

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

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.04 – «Управление в технических системах»
 Отделение школы (НОЦ) автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| |
|---|
| Тема работы |
| Псевдолинейный регулятор для управления объектом второго порядка |

УДК 681.515:681.516.4

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------|
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич | | |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Скороспешкин Максим Владимирович | К. Т. Н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|---------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Конотопский Владимир Юрьевич | К. Э. Н. | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|---------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ООД ШБИП | Горбенко Михаил Владимирович | К. Т. Н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|-----------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Пушкарев Максим Иванович | К. Т. Н. | | |

Томск – 2020 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) |
|-------------------|--|
| | <i>Профессиональные компетенции</i> |
| P1 | Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами. |
| P2 | Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких систем. |
| P3 | Применять полученные знания для решения инновационных инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных средств автоматизации и систем управления техническими объектами с использованием передовых научно-технических знаний и достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств, обеспечивающих конкурентные преимущества этих систем в условиях жестких эксплуатационных, экономических, социальных и других ограничений. |
| P4 | Планировать и проводить аналитические, имитационные, экспериментальные исследования и математическое моделирование для целей проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы. |
| P5 | Демонстрировать работодателям свои конкурентные компетенции, связанные с современными методологиями и видами инновационной инженерной деятельности в области средств автоматизации и систем управления техническими объектами, а также готовность следовать их корпоративной культуре. |
| P6 | Использовать международный опыт проектного, технологического менеджмента и управления бизнес-процессами для ведения инновационной инженерной деятельности в области средств автоматизации и систем управления техническими объектами, в том числе систем, построенных на базе микропроцессорной вычислительной техники. |
| | <i>Универсальные компетенции</i> |

| | |
|-----|--|
| P7 | Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров. |
| P8 | Эффективно работать индивидуально, а также в качестве члена или руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области средств автоматизации и систем управления техническими объектами; демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам |
| P9 | Демонстрировать 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 | Поддерживать физическое состояние организма, вести здоровый образ жизни, принимать ответственные решения в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности. |
| P11 | Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности. |

| | |
|---|---|
| | <p>устройством в ППП MathCad и MatLab; Программная реализация корректирующего устройства на контроллере SIMATIC S7-300; Программно-методическое обеспечение для выполнения лабораторной работы «Изучение псевдолинейного корректирующего устройства на основе нечеткой логики»</p> |
| Перечень графического материала | <p>Слайд 1. Название темы. Слайд 2. Цель и задачи. Слайд 3. Типы корректирующих устройств. Слайд 4. Псевдолинейное КУ с фазовым опережением. Слайд 5. Амплитудная частотная характеристика КУ. Слайд 6. Фазовая частотная характеристика КУ. Слайд 7. Структура нечеткого регулятора. Слайд 8. Структурная схема САР с КУ на основе нечеткой логики. Слайд 9. Функции принадлежности САР. Слайд 10. Результаты исследований в ПП Matlab. Слайд 11. Программная реализация КУ. Слайд 12. Результаты. Слайд 13. Conclusion. Слайд 14. Название темы.</p> |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы | |
| Раздел | Консультант |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Доцент ОСГН, к.э.н. Конотопский В.Ю. |
| Социальная ответственность | Доцент ООД, к.т.н. Горбенко М. В. |
| Раздел ВКР, выполненный на английском языке | Доцент ОИЯ, к.п.н. Сидоренко Т. В. |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| Построение регуляторов на базе нечеткой логики | |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 21.01.2020 |
|---|------------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|----------------------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Скороспешкин Максим Владимирович | к.т.н. | | 21.01.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------------|
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич | | 21.01.2020 |

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

Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность) 27.04.04 Управление в технических системах
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) автоматизации и робототехники
 Период выполнения (осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

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

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

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 01.06.2020 |
|--|------------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---|------------------------------------|
| 05.06.20 | Основная часть | 60 |
| 19.05.20 | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 15 |
| 29.05.20 | Социальная ответственность | 10 |
| 05.06.20 | Обязательное приложение на иностранном языке | 15 |

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|-------------------------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Скороспешкин Максим Владимирович | К.Т.Н. | | 21.01.2020 |

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|--------------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Пушкарев Максим Иванович | К.Т.Н. | | 21.01.2020 |

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

Студенту:

| | |
|---------------|------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич |

| | | | |
|---------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Школа | ИШИТР | Отделение школы (НОЦ) | ОАР |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | Управление в технических системах |

| | |
|---|--|
| Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»: | |
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Исследование выполняется в ИШИТР ТПУ в количестве 1 участника. Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах. |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| 1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i> | Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования |
| 2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i> | Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации |
| 3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР. |
| 4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i> | Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта |
| 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 - <u>выполнить</u> | |
| 7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ - <u>выполнить</u> Потенциальные риски | |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 25.02.2020 |
|---|------------|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------------|---------------------------|---------|------------|
| Доцент ОСГН ШБИП | Конотопский В. Ю. | к.э.н. | | 25.02.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------------|
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич | | 25.02.2020 |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|---------------|------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич |

| | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Школа | ИШИТР | Отделение (НОЦ) | ОАР |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | Управление в технических системах |

Тема ВКР:

| | |
|--|--|
| Псевдолинейный регулятор для управления объектом второго порядка | |
| Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: | |
| <p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p> | <p>Объектом исследования является псевдолинейный регулятор. Область применения: внедрение метода настройки регулятора в промышленных масштабах.</p> |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| <p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. | <ul style="list-style-type: none"> – Нормативные правила к организации оборудования рабочих мест с ПЭВМ регулируется СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, типовой инструкцией ТОИ Р-45-084-01, а также Приказом Минздравсоцразвития РФ №302Н. – Нормативные правила поведения в рабочих помещениях НИ ТПУ регламентированы «Правилами внутреннего распорядка обучающихся Национального исследовательского Томского политехнического университета» |
| <p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения</p> | <p>Анализ выявленных вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенный или пониженный уровень влажности воздуха, температуры регламентирован ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация; – недостаточная освещенность рабочей зоны регулируется СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, |

| | |
|--|--|
| | <p>искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий; -повышенный уровень электромагнитных излучений по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронновычислительным машинам и организации работы»;</p> <p>– повышенная напряжённость электрического поля регулируется ГОСТ 12.1.019-85.</p> <p>Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты; - повышенный уровень шума регламентирован ГОСТ 12.1.003-83 9 Шум. Общие требования безопасности;</p> <p>Анализ выявленных опасных факторов:</p> <p>– электрический ток (источником является ЭВМ)</p> |
| 3. Экологическая безопасность: | – При выполнении работы влияние на атмосферу, литосферу и гидросферу не происходит, т.к. все работы производятся в лабораторном помещении на ЭВМ |
| 4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: | – В рабочем помещении возможно ЧС техногенного характера – пожар (возгорание) регламентировано ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 25.02.2020 |
|---|------------|

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|------------------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ООД ШБИП | Горбенко Михаил Владимирович | к.т.н. | | 25.02.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------------|
| 8АМ81 | Вебер Максим Яковлевич | | 25.02.2020 |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 175 страниц, 74 рисунков, 17 таблиц, 25 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: псевдолинейные корректирующие устройства, нечеткая логика, интегральная квадратичная ошибка, ПИД-регулятор, амплитудная частотная характеристика, фазовая частотная характеристика, переходный процесс, программный пакет Matlab, контроллер SIMATIC S7-300, программный пакет STEP 7.

Объектом исследования является псевдолинейный регулятор и система автоматического регулирования (САР) с применением данного регулятора.

Цель работы - провести исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и системы автоматического управления второго порядка с псевдолинейным регулятором на базе нечеткой логики, программно реализовать псевдолинейный регулятор на нечеткой логике на контроллере SIMATIC S7-300.

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

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

Обозначения и сокращения

В данной работе используются следующие обозначения и сокращения:

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ПО – программное обеспечение;

ППП – пакет прикладных программ;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессам;

ПО – программное обеспечение;

КУ – корректирующее устройство;

ЛКУ – линейные корректирующие устройства;

НКУ – нелинейные корректирующие устройства;

ОУ – объект управления;

ПИД-регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;

ПКУ – псевдолинейные корректирующие устройства;

САР – система автоматического регулирования;

САУ – система автоматического управления;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 17 |
| 1 Классификация нелинейных корректирующих устройств | 19 |
| 1.1 Линейные корректирующие устройства | 19 |
| 1.1.1 Дифференцирующие корректирующие устройства | 20 |
| 1.1.2 Интегрирующее корректирующее устройство | 22 |
| 1.1.3 Интегро-дифференцирующие корректирующие устройства | 24 |
| 1.2 Нелинейные корректирующие устройства | 25 |
| 1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства | 27 |
| 1.3.1 Нелинейный фильтр с амплитудным подавлением (ослаблением) | 28 |
| 1.3.2 Нелинейный фильтр с фазовыми опережением | 30 |
| 1.3.3 Нелинейный фильтр с отдельными каналами для амплитуды и фазы | 33 |
| 1.4 Выбор корректирующих устройств | 35 |
| 2 Построение регуляторов на базе нечеткой логики | 36 |
| 2.1 Основы теории нечеткой логики | 37 |
| 2.2 Базовые логические операции | 40 |
| 2.3 Понятие функции принадлежности | 41 |
| 2.4 Лингвистические переменные | 44 |
| 2.5 Структура и принцип работы нечеткого регулятора | 45 |
| 3 Исследование и разработка псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и систем управления использующие данное корректирующее устройство в средах MATLAB и MATHCAD | 49 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1 | Исследование свойств корректирующего устройства с фазовым опережением..... | 49 |
| 3.2 | Критерии качества процесса регулирования | 54 |
| 3.3 | Исследование свойств системы автоматического регулирования | 56 |
| 3.4 | Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением с управлением на нечеткой логике | 61 |
| 4 | Программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства на контроллере Simatic S7-300 | 69 |
| 4.1 | Общие сведения контроллера Simatic S7-300 его назначение и технические характеристики..... | 69 |
| 4.2 | Реализация программы САР с псевдолинейным корректирующим устройством на Step7 | 72 |
| 5 | Программно-методическое обеспечение для выполнения | 78 |
| 6 | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 79 |
| 6.1 | Организация и планирование работ | 79 |
| 6.1.1 | Определение продолжительности этапов работ | 80 |
| 6.2 | Расчет сметы затрат на создание макета КУ | 84 |
| 6.2.1 | Расчет затрат на материалы | 84 |
| 6.2.2 | Расчет заработной платы..... | 85 |
| 6.2.3 | Расчет затрат на социальный налог | 86 |
| 6.2.4 | Расчет затрат на электроэнергию | 86 |
| 6.2.5 | Расчет амортизационных расходов | 87 |
| 6.2.6 | Расчет прочих расходов | 88 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.2.7 | Расчет общей себестоимости разработки..... | 89 |
| 6.2.8 | Прибыль | 89 |
| 6.2.9 | НДС | 89 |
| 6.2.10 | Цена разработки НИР..... | 89 |
| 6.3 | Оценка экономической эффективности проекта | 90 |
| 7 | Социальная ответственность | 91 |
| 7.1 | Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 92 |
| 7.1.1 | Организационные мероприятия обеспечения безопасности рабочей зоны | 92 |
| 7.2 | Производственная безопасность..... | 94 |
| 7.2.1 | Отклонение параметров микроклимата | 96 |
| 7.2.2 | Недостаточная освещенность рабочей зоны..... | 96 |
| 7.1.4 | Повышенные уровни электромагнитного поля | 99 |
| 7.1.5 | Электрический ток..... | 101 |
| 7.2 | Экологическая безопасность | 102 |
| 7.3 | Безопасность в чрезвычайных ситуациях | 102 |
| | Заключение | 105 |
| | Conclusion | 106 |
| | Список использованных источников | 107 |
| | Приложение А (обязательное) Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением | 110 |

| | |
|--|-----|
| Приложение Б (обязательное) Текст программы работы системы автоматического управления (САУ) с корректирующим устройством (КУ) на языке FBD в STEP 7..... | 111 |
| Приложение В (обязательное) Текст программы работы нечеткой логики корректирующего устройством на языке FBD в STEP 7 | 115 |
| Приложение Г (справочное) Building regulators based on fuzzy logic | 118 |
| Приложение Д (обязательное) Методические указания для выполнения лабораторной работы «изучение псевдолинейного корректирующего устройства на основе нечеткой логики» | 131 |

Введение

При проектировании систем автоматического управления одной из главных задач, является выбор структурной схемы, которая будет удовлетворять таким показателям качества как быстродействие, перерегулирование, а также точность регулирования и управления.

В настоящее время ПИД-регуляторы успешно применяются в промышленности благодаря их простоте, относительной дешевизне и эффективности в управлении линейными системами. ПИД-регулятор хорошо справляется со своими обязанностями в объекте управления со статическими параметрами. Однако, они обычно не эффективны для систем, у которых неизвестна точная математическая модель либо присутствуют неопределенности. Для решения этих проблем требуется использование методов, которые занимают значительно время, что усложняет реализацию данных систем.

Использование корректирующих устройств позволяет повышать качество таких систем, они способствуют изменению соответствующие характеристики в зависимости от требований, предъявляемых системе. Включение корректирующих устройств в состав систем автоматического регулирования позволяет добиться повышения точности, обеспечить необходимый запас устойчивости и улучшить качество переходного процесса в целом. Различают три группы корректирующих устройств: линейные, нелинейный, псевдолинейные. В свою очередь использование псевдолинейных позволяет избежать зависимость между амплитудными и фазовыми частотными характеристиками, что значительно повышает запас устойчивости системы.

В то же время в последние годы появилась тенденция к замене традиционных регуляторов нечеткими регуляторами. И в условиях, когда знания об управляющем объекте в недостаточном количестве, показатели качества

системы можно улучшить с помощью методов нечеткой логики. Основной недостаток нечетких регуляторов является сложность их настройки.

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

1 Классификация нелинейных корректирующих устройств

Повышение качества систем автоматического регулирования (САР) достигается обеспечением необходимого запаса устойчивости и быстродействия систем. При этом обеспечение запаса устойчивости является приоритетным направлением, однако наилучшее состояние системы может быть достигнуто, когда все показатели, а именно точность в типовых режимах, запас устойчивости и быстродействие, обеспечиваются в комплексе, что является достаточно сложной задачей.

Увеличения запаса устойчивости системы можно добиться двумя способами: прежде всего изменению подвергаются ее параметры (среди которых коэффициенты передачи отдельных звеньев, постоянные времени и т.п.); вторым способом является коррекция структуры системы [1].

Под изменением структуры системы подразумевается введение в нее корректирующих устройств, которые представляют собой динамические звенья с определенными передаточными функциями. Их вносят с целью улучшения точности системы и повышения качества переходных процессов. Введение корректирующих устройств может решать и более общую задачу – часто система становится устойчивой (если она была без них неустойчивой), а варьированием коэффициентов передаточной функции внесенного корректирующего звена можно добиться и желаемого качества процесса регулирования. Любые корректирующие устройства, которые могут быть применены при синтезе САУ, делятся на линейные и нелинейные.

1.1 Линейные корректирующие устройства

Среди линейных КУ наибольшее применение получили дифференцирующее, интегрирующее и интегро-дифференцирующее [1]. Речь о них пойдет ниже.

Сразу стоит упомянуть о том, что применение линейных корректирующих устройств не обеспечивает получения наилучших показателей качества САР по той причине, что и АЧХ и ФЧХ подобных устройств одновременно зависят от их параметров. При реализации КУ с требуемой ФЧХ системы часто получают нежелательную АЧХ и наоборот.

1.1.1 Дифференцирующие корректирующие устройства

Для дальнейшего описания необходимо вспомнить, что передаточная функция процесса имеет следующий вид:

$$W(s) = \frac{k(T_1s + 1)}{T_2s + 1}, \quad (1.1)$$

где $T_1 > T_2$.

Известно, что изменение коэффициента усиления k влияет на характеристики системы. Так, его увеличение приводит к снижению запаса устойчивости, увеличению перерегулирования, колебательности и времени переходного процесса. Такого рода ухудшение переходного процесса связано с появлением запаздывания в системе колебаний по фазе. Компенсация данного ухудшения может быть достигнута путем демпфирования логарифмической фазочастотной характеристики (ЛФЧХ) системы. Для этого ее поднимают вверх, тем самым компенсируя запаздывание в полосе частот, которая расположена около частоты среза $\omega_{\text{ср}}$, соответствующей повышенному коэффициенту усиления системы. Подобное изменение достигается путем включения в структуру последовательного элемента, вносящего опережение по фазе синусоидальных колебаний в указанной выше полосе частот. В результате происходит компенсация рассогласования и показатели системы улучшаются. Таким элементом является дифференцирующее звено [1, 6].

ЛЧХ корректирующего устройства представлено на рисунке 1.1. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) построена в соответствии с выражением:

$$L(\omega) = 20 \log k + 20 \log \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} - 20 \log \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1}. \quad (1.2)$$

ЛФЧХ контура на основании формулы:

$$\psi(\omega) = \arctg \omega T_1 - \arctg \omega T_2. \quad (1.3)$$

Согласно логарифмической частотной характеристике (ЛЧХ) T_1 , T_2 и k .

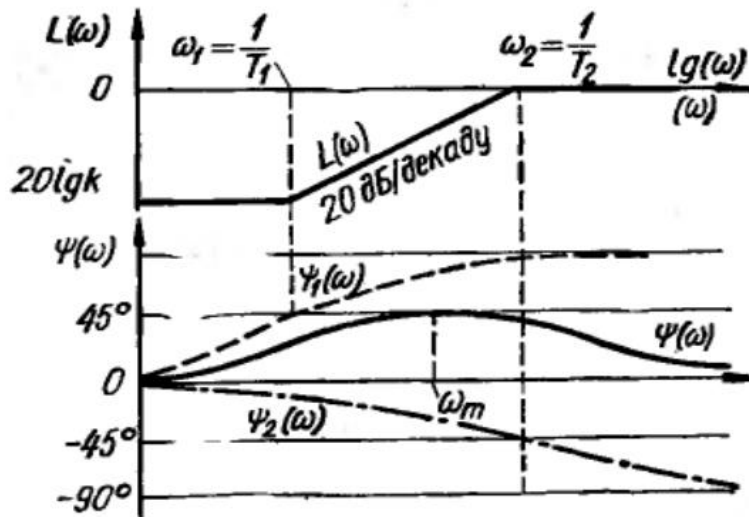


Рисунок 1.1 – ЛЧХ дифференцирующего КУ

Таким образом, можно сделать вывод, что, уменьшая величину ошибки и сокращая длительность переходного процесса, а именно регулируя качество переходного процесса – все это достигается путем варьирования коэффициента усиления системы k и частоты среза ω_{cp} [6].

Однако сигнал, содержащий высокочастотные шумы или помехи, будет пропущен дифференцирующим устройством без коррекции. Такое КУ не только пропускает высокочастотные помехи, но и ослабляет полезный сигнал,

расположенный в области низких частот. Так в системе появляются динамические ошибки, что является явным недостатком применения подобных звеньев.

1.1.2 Интегрирующее корректирующее устройство

Выше было упомянуто, что при поступлении в систему зашумленного полезного сигнала, применение дифференцирующего звена провоцирует появление ошибок и не гарантирует достижения ожидаемого результата. Так, проблема наличия помех в системе решается путем увеличения коэффициента усиления и достижения меньшей частоты среза (узкой полосы пропускания в области низких частот). Все это обеспечивается при применении интегрирующего звена, которое, в отличие от дифференцирующего, позволяет увеличивать коэффициент усиления системы, при этом не увеличивая ее частоты среза. Таким образом, если от системы требуется высокая динамическая точность, т.е. наличие большого коэффициента усиления, то применение интегрирующего звена наиболее целесообразно [5].

Передаточная функция звена интегрирующего звена выглядит следующим образом:

$$W(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}, \quad (1.4)$$

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

ЛАЧХ звена представлена на рисунке 1.2 и построена в соответствии с выражением:

$$L(\omega) = -20 \log \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} + 20 \log \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1}. \quad (1.5)$$

Для области высоких и низких частот выражение (1.5) принимает соответствующий вид:

$$L_{в.ч.}(\omega) = -20 \log \omega T_1 + 20 \log \omega T_2; L_{н.ч.}(\omega) = 0. \quad (1.6)$$

ЛФЧХ корректирующего звена построена в соответствии с выражением
(1.7)

$$\psi(\omega) = -\arctg \omega T_1 + \arctg \omega T_2. \quad (1.7)$$

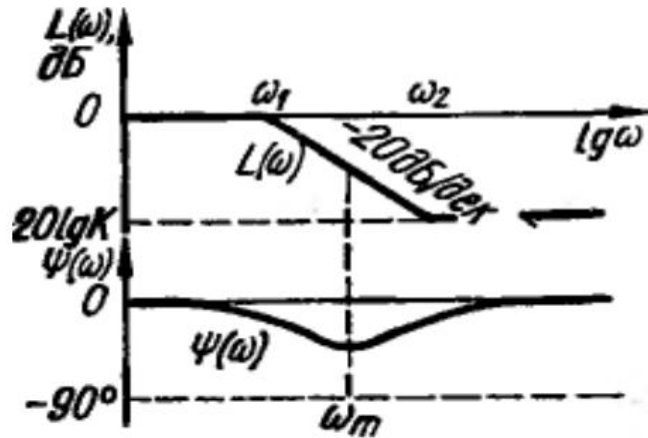


Рисунок 1.2 – ЛЧХ интегрирующего КУ

Таким образом, интегрирующее корректирующее устройство ослабляет высокие частоты и при этом не ослабляет низкие частоты. Это является его явным преимуществом по сравнению с дифференцирующими КУ.

Однако, из рисунка 1.2 так же видно, что использование интегрирующего звена провоцирует отставание колебаний по фазе в определенной области частот. Частота, соответствующая максимальному углу отставания, определяется, как:

$$\omega_m = \frac{1}{T_1 \sqrt{k}}. \quad (1.8)$$

Максимальный угол отставания определяется по формуле:

$$\psi_{\max} = -\arctg \frac{1}{\sqrt{k}} + \arctg \sqrt{k}. \quad (1.9)$$

Это обстоятельство является недостатком использования интегрирующих КУ. Однако, смещение можно произвести путем подбора параметров звена. При

включении интегрирующих корректирующих устройств устойчивость системы практически не снижается, но может произойти незначительное ухудшение качества переходного процесса.

1.1.3 Интегро-дифференцирующие корректирующие устройства

Выше были оговорены достоинства и недостатки дифференцирующих и интегрирующих корректирующих устройств. Замечено, что недостатки применения одних в некоторой степени могут быть компенсированы включением других. Таким образом, в систему вводятся интегро-дифференцирующие корректирующие устройства. Такие звенья дают возможность одновременно значительно увеличить и коэффициент усиления системы, и ее частоту среза, тем самым улучшив качество переходного процесса. Передаточная функция интегро-дифференцирующего КУ определяется выражением:

$$W(s) = \frac{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}{(T_3s + 1)(T_4s + 1)}, \quad (1.10)$$

при $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$.

ЛЧХ контура отображены на рисунке 1.3. Частоты сопряжения ЛАХ контура соответственно равны: $\omega_1 = \frac{1}{T_3}$, $\omega_2 = \frac{1}{T_1}$, $\omega_3 = \frac{1}{T_2}$, $\omega_4 = \frac{1}{T_4}$.

ЛФЧХ контура построена в соответствии со следующим выражением:

$$\psi(\omega) = \arctg \omega T_1 + \arctg \omega T_2 - \arctg \omega T_3 - \arctg \omega T_4. \quad (1.11)$$

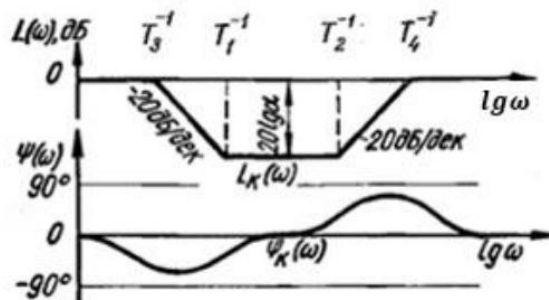


Рисунок 1.3 – ЛЧХ интегро-дифференцирующего звена

Так, из рисунка 1.3, можно сделать вывод, что в области низких частот срабатывает интегрирующая часть звена, в области же высоких частот устройство обрабатывает как дифференцирующее звено. Применение последовательного интегро-дифференцирующего звена позволяет одновременно увеличить и коэффициент усиления системы, и частоту среза, и, как следствие, повысить точность системы как в установившемся, так и в переходном режимах [1, 6].

1.2 Нелинейные корректирующие устройства

Выше речь шла о применении в качестве корректирующего звена линейных устройств, чьим недостатком является взаимозависимость амплитудной и фазовой характеристик. Введение в систему дифференцирующего звена влечет за собой ослабление полезного сигнала, находящегося в области низких частот, и положительному его сдвигу по фазе; введение же интегрирующего звена приводит к отставанию колебаний по фазе. В отличие от линейных КУ, нелинейные корректирующие устройства могут изменять свое поведение в зависимости от установившегося режима.

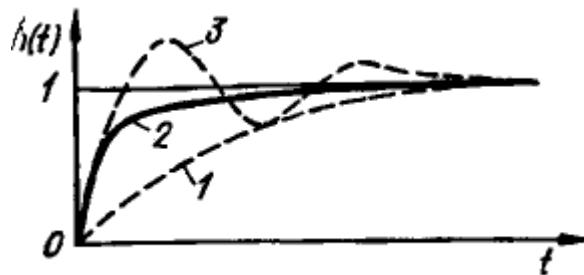


Рисунок 1.4 - Переходные процессы САУ при нелинейной коррекции (2) и линейной (1, 3)

При использовании нелинейных корректирующих устройств для систем, кривые переходного процесса которых выглядят как на рисунке 1.4 (кривые 1, 3), можно получить значительное улучшение характеристик переходного процесса

(кривая 2). Как видно рисунка, улучшаются быстродействие системы (или не меняется, как в случае с кривой 1), уменьшается колебательность процесса, завершение же процесса остается монотонным. Так на кривую переходного процесса влияют изменения коэффициента усиления разомкнутой системы k в зависимости от величины ошибки d . Требуемое поведение коэффициента k может быть реализовано при помощи простейшего нелинейного корректирующего устройства (рисунок 1.5, а).

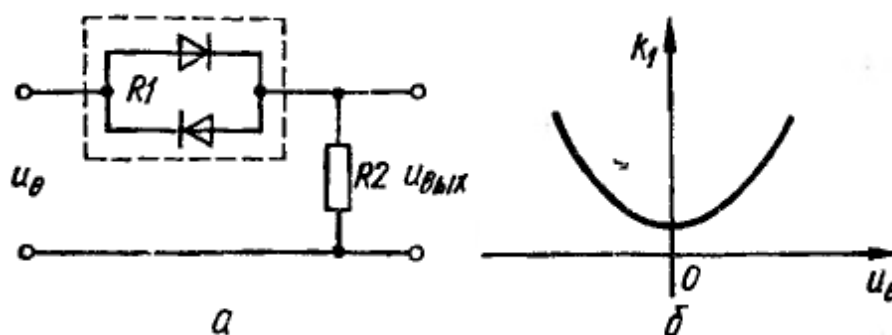


Рисунок 1.5 – Последовательное нелинейное корректирующее устройство (а) и его характеристика $k_1 = f(u_0)$ (б).

Известно, что коэффициент усиления цепи вычисляется по формуле $k_1 = R_2 / (R_1 + R_2)$. Примерный график зависимости k_1 от u_0 изображен на рисунке 1.5, б. Таким же образом меняется коэффициент усиления системы k_p . Варьируя параметры примененного нелинейного КУ, можно добиться изменения k_p системы, однако при этом не учитывается и не компенсируется вредное влияние инерционности элементов системы, из-за чего в ней появляются большие динамические ошибки [2].

По сравнению с линейной коррекцией, применение нелинейных КУ является более общим методом. Только применяя нелинейные корректирующие устройства можно добиться оптимального быстродействия системы и решить проблему компенсации вредных естественных нелинейностей. Кроме того, единой

методики синтеза нелинейных КУ не существует, поэтому используются частные приемы и схемы нелинейных корректирующих устройств.

Нелинейные корректирующие устройства делятся на статические и динамические (по характеру действия); последовательные, параллельные устройства с обратной связью (по способу включения)

К наиболее широко распространенным нелинейным корректирующим устройствам относятся нелинейные фильтры, нелинейные динамические переключающиеся устройства и нелинейные компенсационные устройства [3].

Нелинейные фильтры, разделенные безынерционными элементами, представляются как совокупность линейных звеньев. Применяя такие фильтры в качестве нелинейных КУ, можно добиться улучшения быстродействия, повышения точности и качества переходного процесса системы.

Нелинейные динамические переключающиеся устройства применяются для улучшения динамических характеристик систем. Принцип их работы заключается во включении в управляющий сигнал фрагментов специально сформированного сигнала на небольших отрезках времени. Это позволяет добиться нужной реакции от системы на тех самых интервалах времени, где управляющий сигнал переключается на корректирующий.

Компенсация вредного влияния сопутствующей нелинейности достигается посредством применения компенсационных нелинейных корректирующих устройств (или, как минимум, существенного его ослабления).

1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства

Часто для анализа и синтеза нелинейных систем применяют частотные методы. Используя данный подход, можно обнаружить, что из всех нелинейных корректирующих устройств выделяются такие, чьи амплитудно-фазовые характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала, но являются

функциями частоты; в отличие от линейных КУ, у подобных устройств нет взаимозависимости амплитудной и фазовой характеристик. Отсюда происходит название псевдолинейных корректирующих устройств (ПКУ). Независимость формируемых амплитудной и фазовой характеристики таких устройств позволяет гибко изменять частотные характеристики САУ [9].

В состав псевдолинейного корректирующего устройства включаются линейные фильтры для создания фазовых сдвигов, и математические блоки, выполняющие простейшие операции. Такие КУ состоят из двух- или трехканальных нелинейных фильтров, в которых каналы для амплитуды и фазы являются независимыми. Произведение выходных сигналов каждого из каналов является выходным сигналом псевдолинейного КУ. Амплитудное соотношение формируется в канале с блоком абсолютной величины, а фазовое – в канале с релейным блоком. Подбор нужных значений амплитудных и фазовых соотношений осуществляется посредством применения линейных фильтров.

К псевдолинейным корректирующим устройствам относятся ПКУ с амплитудным подавлением (ослаблением), ПКУ с фазовым опережением и ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы.

Принцип работы каждого из указанных ПКУ описан ниже.

1.3.1 Нелинейный фильтр с амплитудным подавлением (ослаблением)

Псевдолинейные корректирующие устройства, у которых ослабление амплитуды не влечет за собой изменение фазы и достигается увеличением частоты, выполняется по схеме, изображенной на рисунке 1.6.

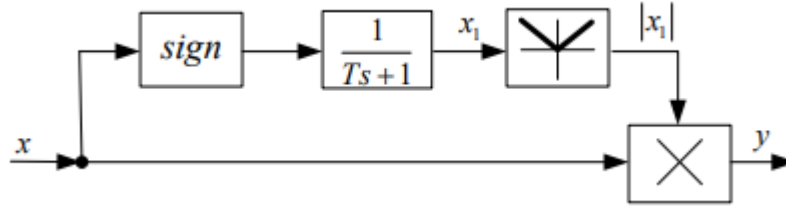


Рисунок 1.6 – Схема псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

Входной сигнал X разделяется на два канала. В верхней части располагаются блок сигнатуры, фильтр низких частот, блок взятия модуля; в нижней части входной сигнал X не изменяется. Выходной сигнал фильтра представляет себя как произведение обеих выходных частей

$$y = |x_1| x, \quad (1.12)$$

где x_1 определяется уравнением

$$T x_1 + x_1 = \text{sign} x. \quad (1.13)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации фильтра с амплитудным подавлением определяются по следующим формулам:

$$\alpha = \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(1 + \frac{1}{3} \cos 2\theta \right); \quad (1.14)$$

$$b = \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(\frac{1}{3} \cos 2\theta \right), \quad (1.15)$$

где $\theta = -\arctan \omega T$.

Амплитудная и фазовая характеристики рассматриваемого нелинейного фильтра задаются формулами:

$$q(A, \omega) = \sqrt{|\alpha(A, \omega)|^2 + |b(A, \omega)|^2}; \quad (1.16)$$

$$\varphi(A, \omega) = \arctg \frac{b(A, \omega)}{\alpha(A, \omega)}, \quad (1.17)$$

Логарифмические частотные характеристики фильтра с амплитудным подавлением $[q(\omega)$ и $\mu(\omega)]$ при вычислении a и b по формулам (1.14) и (1.15) на рисунке 1.7 показаны штриховыми линиями.

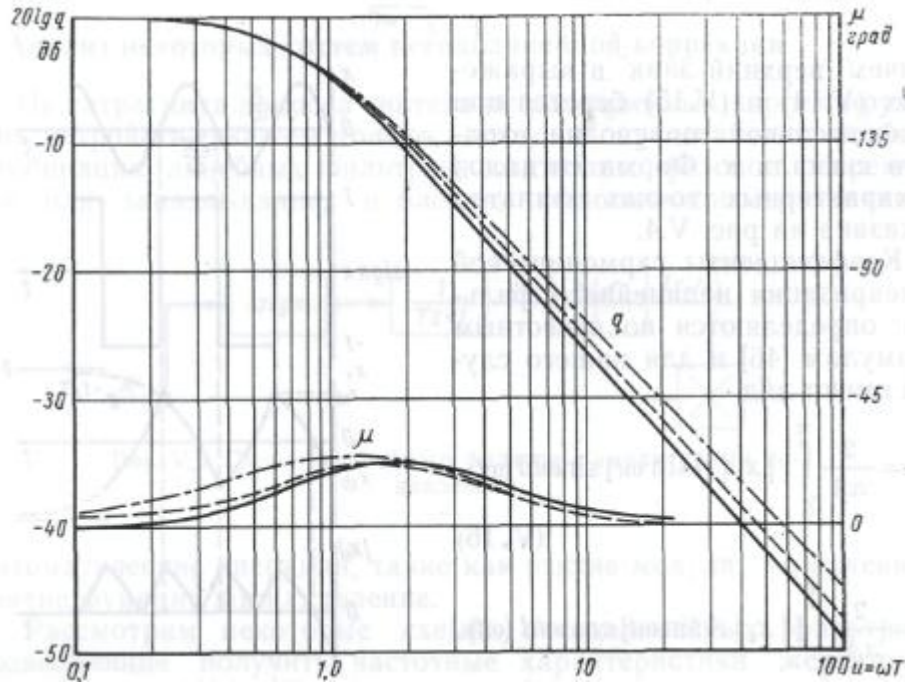


Рисунок 1.7 - ЛАЧХ и ЛФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

Такая схема псевдолинейной коррекции применяется для увеличения запасов устойчивости в системах автоматического управления, в которых возможно применение способа демпфирования.

1.3.2 Нелинейный фильтр с фазовым опережением

Структурная схема псевдолинейной коррекции, применени которой позволяет получать фазовое опережение без изменения амплитуды, приведена на рисунке 1.8.

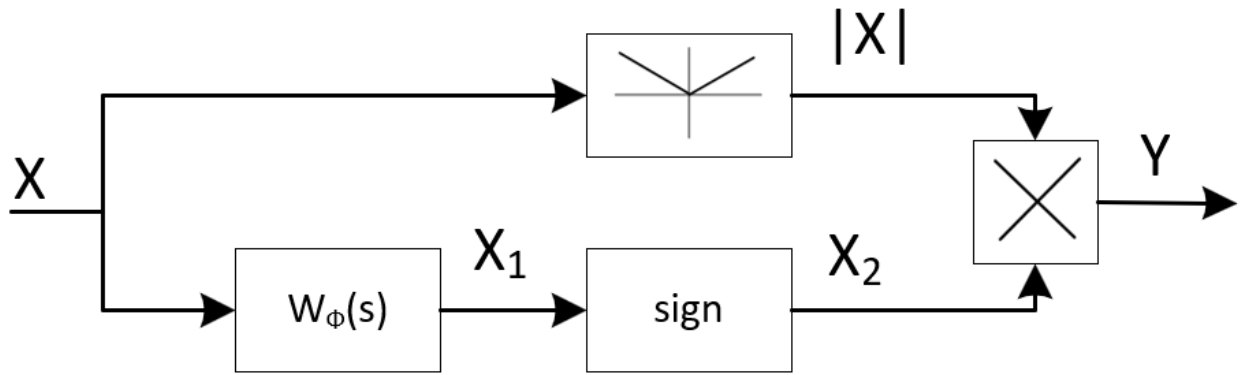
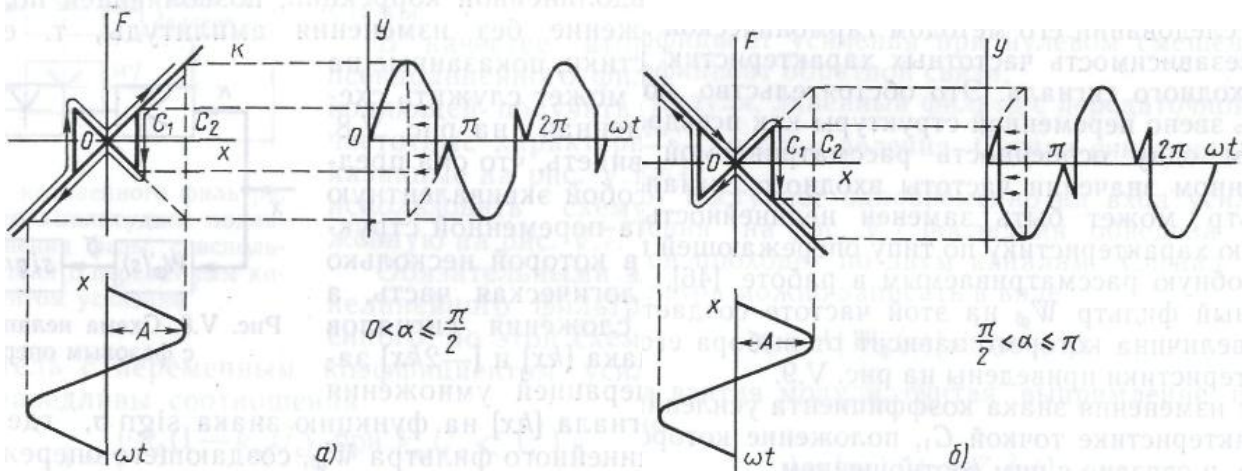


Рисунок 1.8 – Схема КУ с фазовым опережением

Если исследовать данное звено методом гармонической линеаризации, можно обнаружить его характерное свойство: частотные характеристики звена не зависят от амплитуды входного сигнала. По этой причине рассматриваемое звено является псевдолинейным.

Если возникает необходимость подавать на вход сигнал с фиксированным значением частоты ω , то входной сигнал может быть заменен нелинейностью, имеющей статическую характеристику по типу опережающей гистерезисной петли. Это работает при условии, если фильтром создается опережение, величина которого зависит от выбора его параметров.

Изменение частоты ω при неизменных параметрах линейного фильтра W_ϕ влияет на вид характеристики нелинейности.



а – при фазовом опережении до 90° ; б – при фазовом опережении от 90° до 180°

Рисунок 1.9 – Нелинейные характеристики

Из характеристики, приведенной на рисунке 1.10, можно сделать вывод о том, что коэффициенты гармонической реализации a и b не зависят от амплитуды входного сигнала. Зависимость от частоты выражается в разбиении интервала интегрирования $(0, \pi)$ при их вычислении на подынтервала $(0, \alpha)$ и (α, π) , граница между которыми, определяемая значением α , меняется при изменении частоты.

Если в схеме используется линейный фильтр с передаточной функцией

$$W_\phi(s) = \frac{T_1 \cdot Ts + 1}{T \cdot T_1s + 1}, \quad (1.18)$$

то создаваемое им опережение

$$\alpha = \text{arctg} \frac{\omega T (1 - \nu)}{1 + \omega^2 T^2 \nu}, \quad (1.19)$$

где через ν обозначено отношение T_1/T . Тогда коэффициенты a и b будут равны:

$$a = \frac{k}{\pi} (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha); \quad (1.20)$$

$$b = \frac{k}{\pi} (1 - \cos 2\alpha). \quad (1.21)$$

Следовательно, у псевдолинейного фильтра при $k = 1$ логарифмические частотные характеристики примут вид, изображенный на рисунке 1.10.

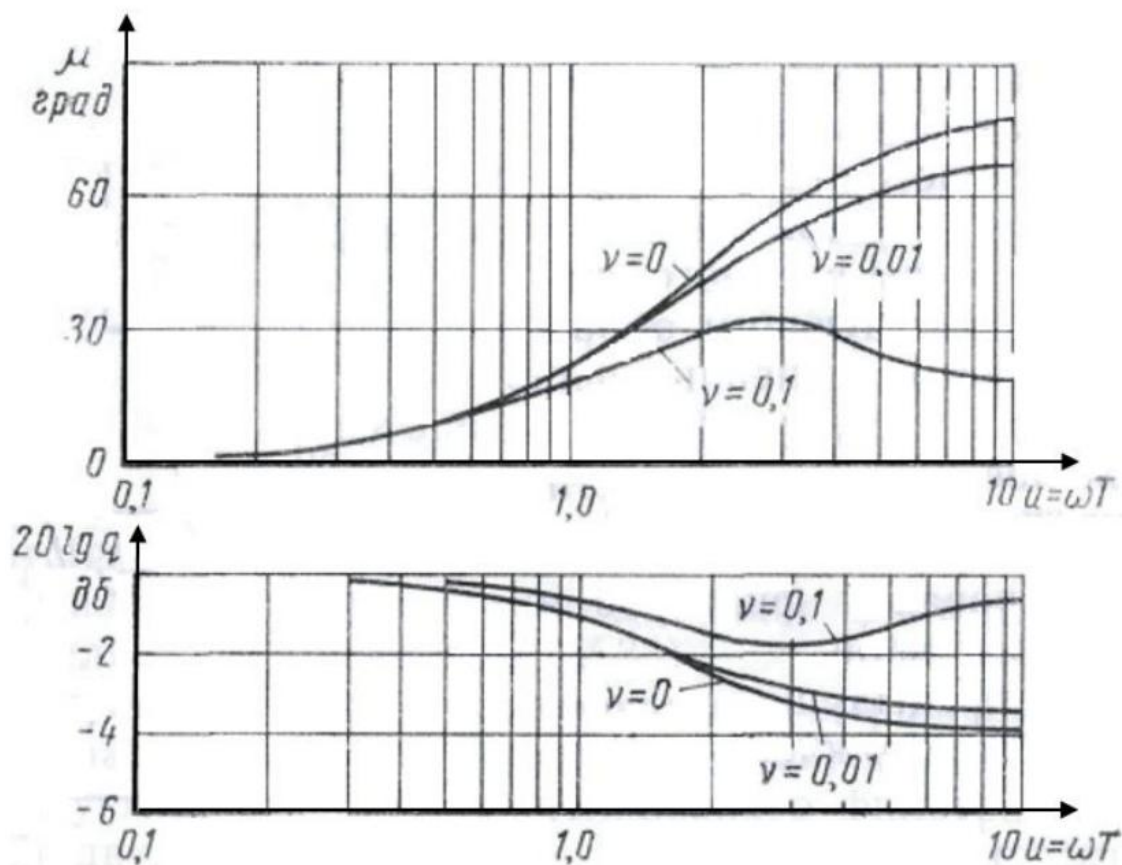


Рисунок 1.10 – ЛЧХ нелинейного фильтра с фазовым опережением

Если для улучшения качества переходного процесса в систему требуется ввести фазовое опережение и при этом подавить амплитуду входного сигнала, применению подлежит фильтр с фазовым опережением.

1.3.3 Нелинейный фильтр с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Также возможностью получения независимых фазовой и амплитудной характеристики обладает схема псевдолинейной коррекции, изображенная на рисунке 1.11. Данные характеристики не меняются при изменении амплитуды входного сигнала, а значит, меняя параметры линейных фильтров в схеме, можно

получить желаемые характеристики любого вида. Поэтому предложенная схема создания корректирующих устройств является универсальной. В общем случае линейный фильтр в фазовой ветви является форсирующим звеном, а фильтр в амплитудной ветви – элементом, создающим ослабление амплитуды и отставание по фазе.

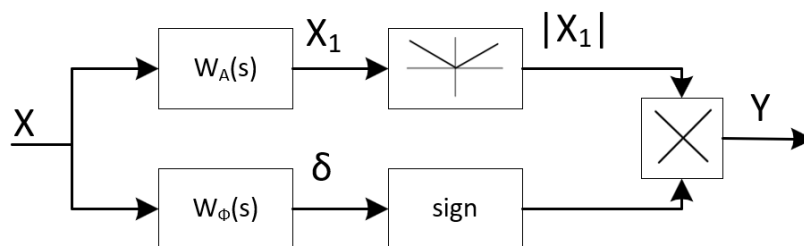


Рисунок 1.11 – Схема двухканального КУ

На входе в систему управляющий сигнал раздваивается и идет по независимым каналам. Верхний канал формирует амплитудную характеристику системы. Нижний канал, соответственно, синтезирует фазовую характеристику.

Передаточная функция линейного элемента амплитудного канала выглядит следующим образом (1.22):

$$W_A(s) = \frac{k}{T_2 s + 1}. \quad (1.22)$$

Передаточная функция линейного элемента фазового канала определяется как:

$$W_\phi(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T s + 1}{T_1 s + 1}. \quad (1.23)$$

Тогда коэффициенты a и b для нахождения АФЧХ равны:

$$a = \frac{k}{\pi \sqrt{1 + \omega^2 \gamma^2 T^2}} [(\pi - 2\alpha - 2\theta) \cos \theta + \sin \theta + \cos \alpha \sin(\alpha + \theta) + \sin \alpha \cos(\alpha + \theta)]; \quad (1.24)$$

$$b = \frac{k}{\pi^* \sqrt{1 + \omega^2 \gamma^2 T^2}} \left[(2\theta + 2\alpha - \pi) \sin \theta + \cos \theta + \sin \theta \sin 2\alpha + \cos \theta \cos 2\alpha \right], \quad (1.25)$$

где θ – фазовое запаздывание, вносимое фильтром W_A , представляется формулой:

$$\theta = \operatorname{arctg} \omega \gamma T, \quad (1.26)$$

α – фазовое опережение, создаваемое фильтром W_ϕ , определяется формулой выявленной ранее (1.19); через ν обозначено отношение T_1/T , а через γ отношение T_2/T .

Подобные корректирующие устройства целесообразно применять в системах управления, в которых улучшение качества переходного процесса может быть достигнуто путем установления фазового опережения с одновременным подавлением амплитуды входного сигнала.

1.4 Выбор корректирующих устройств

На основе вышеизложенного делается вывод об универсальности и простоте применения псевдолинейных корректирующих устройств. Применяя псевдолинейные КУ можно добиться независимого изменения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики. Более того, эти характеристики у выбранных КУ не зависят от амплитуды задающего воздействия, из-за чего адаптация происходит гораздо проще.

Особое внимание стоит уделить тому факту, что в промышленных объектах управления, находящихся в процессе работы, возможно регулирование только АЧХ или только ФЧХ по отдельности. Это еще раз подчеркивает универсальность и широкую применимость псевдолинейных корректирующих устройств.

По указанным выше причинам в данной работе для исследования в качестве корректирующего устройства было выбрано псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением.

2 Построение регуляторов на базе нечеткой логики

В конце XX века широкое распространение получили регуляторы на базе нечеткой логики. Тогда эта технология переживала настоящий бум: она внедрялась повсеместно, начиная от бытовых стиральных машин и заканчивая промышленным применением, например, в системах управления в метро. В настоящее время эта технология вновь активно исследуется благодаря развитию вычислительных способностей технических устройств. Среди современных производств, использующих технологии на базе нечеткой логики, Tokyo Electric Pow., применяющие автоматическое управление воротами плотины на гидроэлектростанциях, Omron, чья технология автоматически наводит телекамеры при трансляции спортивных событий, разработки Nissan, которые способствуют эффективному и стабильному управлению автомобильными двигателями, и многие другие.

Управление на основе нечеткой логики базируется на комплексе так называемых правил, которые представляют собой предложения, описывающие действия регулятора в зависимости от поступающего воздействия. Воздействий на регулятор, разработанный согласно правилам нечеткой логики, может быть неограниченное число, а его выходные сигналы, то есть действия, выбираются из базы знаний, подготовленной «экспертом». В любом случае, в отличие от традиционных систем управления (таких как ПИД-регуляторы), регулятор на основе нечеткой логики более гибок, он может быть разработан, даже если у разработчика нет каких-либо специфических знаний об объекте. Поэтому такие регуляторы наиболее часто применяются для решения задач управления сложными нелинейными системами, и даже систем с нелинейными внешними возмущениями.

2.1 Основы теории нечеткой логики

В теории четких множеств если некоторый элемент x принадлежит некоторому множеству A , то его принадлежность в формализованном виде:

$$x \in A; \quad (2.1)$$

Уравнение (2.1), записанное с помощью характеристической функции, эквивалентно системе (2.2) и изображено на рисунок 2.1а:

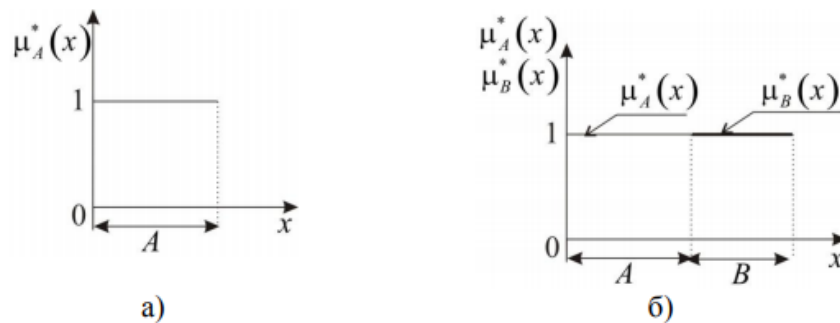
$$\mu_A^*(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

Пусть вышеуказанное множество A является подмножеством арифметического пространства R_1 , тогда характеристическая функция:

$$\mu_A^*(x): A \rightarrow R_1 = \{0,1\}; \quad (2.3)$$

Наряду с этим пусть существует подмножество B (также дискретное или непрерывное), при этом непересекающееся с подмножеством A : $A \subset R_1, B \subset R_1, A \cap B = \emptyset$ (рисунок 2.1 б).

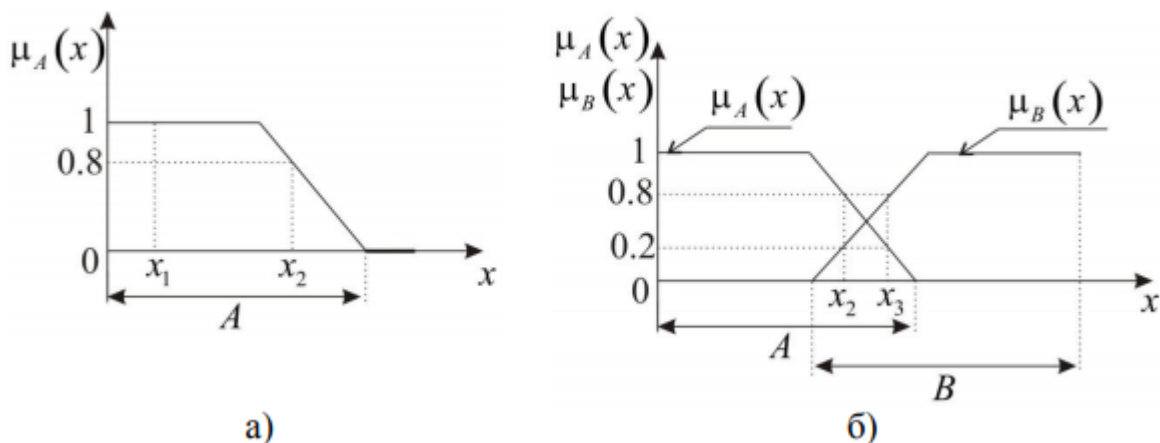
Тогда графическое выражение функций принадлежности приведено на рисунке 2.1б и представляет собой два прямоугольника, граница между которыми четкая и переход из одного в другое происходит скачком.



а) принадлежность в подмножеству A ; б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B

Рисунок 2.1 – Понятие принадлежности в четкой теории множеств

В теории нечетких множеств $\mu_A(x)$ называется одномерной функцией принадлежности, если область значений одномерного отображения $\mu_A(x) \in [0, 1] \subset R_1$ [11].



а) принадлежность в подмножеству A ; б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B

Рисунок 2.2 – Понятие принадлежности в нечеткой теории множеств

На рисунке 2.2 графически изображена принадлежность части обоим множествам одновременно. Подмножество $A \subset R_1$ имеет функцию принадлежности $\mu_A(x)$ и представлено на рисунке 2.2а. Рассмотрим элемент $x_1 \in A$ и $x_2 \in A$ с функциями принадлежности $\mu_A(x_1) = 1$ и $\mu_A(x_2) = 0.8$ соответственно. В теории нечетких множеств говорят, что элемент x_1 полностью принадлежит множеству A , а x_2 – частично и имеет вес, равный 0.8. На рисунке 2.2б приведено пересечение двух функций принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$ ($B \subset R_1$). Элемент x_2 принадлежит множеству A с весом 0.8, а множеству B с весом 0.2 ($\mu_B(x_2) = 0.2$). Аналогично для элемента x_3 – $\mu_A(x_3) = 0.2$, $\mu_B(x_3) = 0.8$. Так как граница между двумя множествами нечеткая, то имеет место условие нормировки

$\mu_A(x) + \mu_B(x) = 1$, т.е. переход элементов между множествами осуществляется плавно.

Чтобы решить простейшую задачу теории управления применяют нечеткое отображение φ - такое отображение, где каждому элементу $x \in A_1$ ставится в соответствие элемент $y \in A_2$. Функция принадлежности нечеткого отображения выглядит следующим образом $\mu_\varphi(x, y)$.

На рисунке 2.3 изображена функция принадлежности нечеткого отображения φ . Как строятся проекции на ось, соответствующую множеству x , и на ось, соответствующей множеству y , видно из рисунка 2.3.

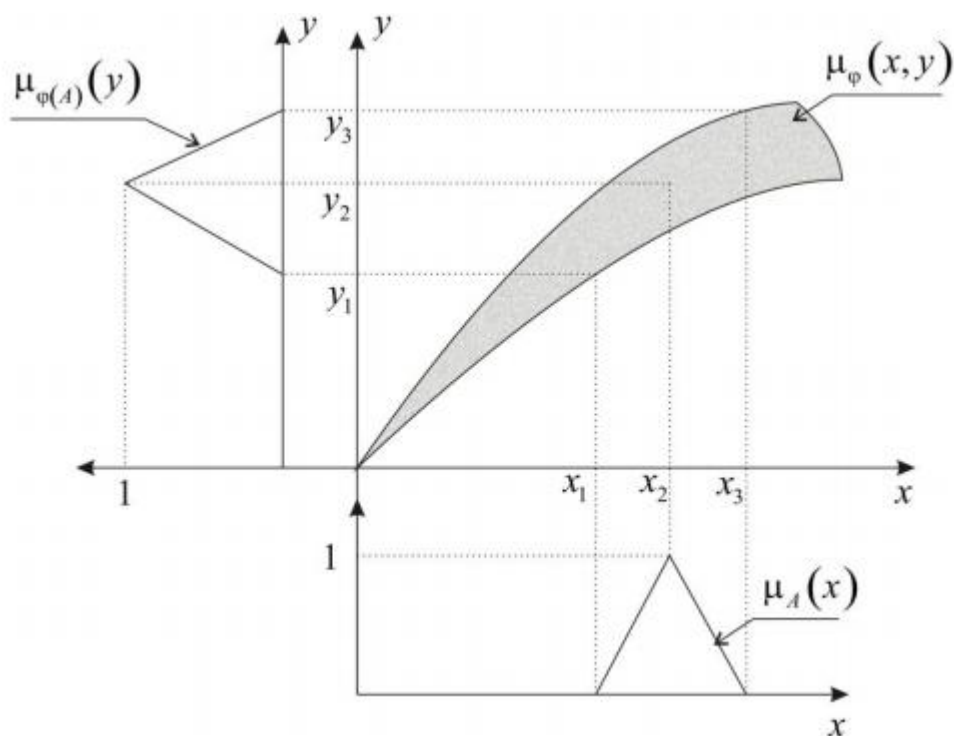


Рисунок 2.3 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

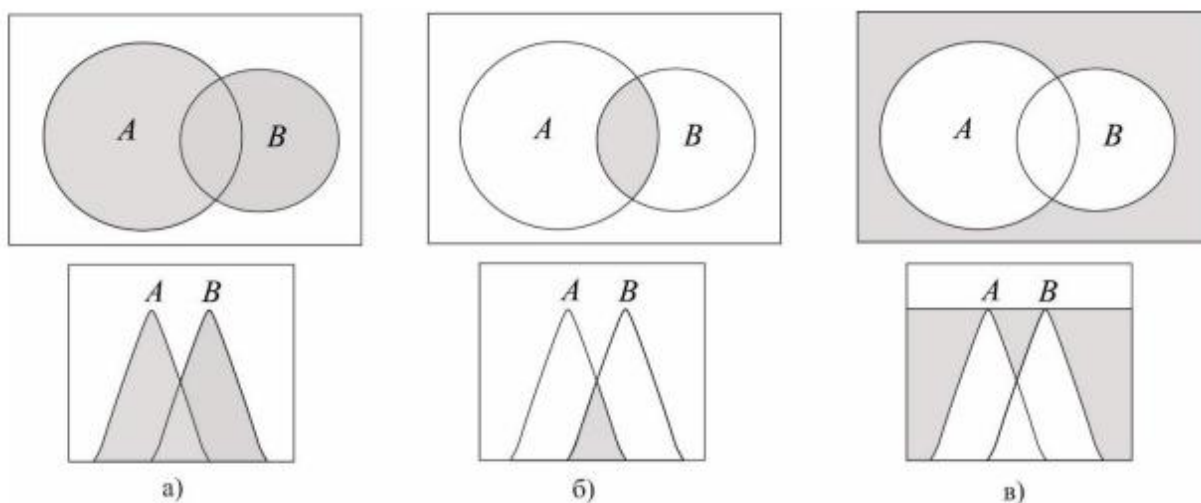
Описание нечеткого множества использует лингвистические переменные, речь о них пойдет ниже. Введение новых переменных, близких по смыслу с существующими и отличающихся – лишь степень состояния, порождает новые модифицированные нечёткие множества.

2.2 Базовые логические операции

Пусть, элементы $a, b, c \dots x, y, z$ содержатся во множествах $A, B, C \dots X, Y, Z$. В таблицу 2.1 сведены основные логические операции, применяемые в нечеткой логике, на рисунке 2.4 – их графическое изображение.

Таблица 2.1 – Основные логические операции

| Обозначение | Описание |
|----------------------|--|
| $a \in A$ | Элемент a принадлежит к множеству A . Здесь символ « \in » – символ принадлежности. |
| $a \notin A$ | Элемент a не принадлежит к множеству A . |
| $\emptyset \notin A$ | В составе множества нет элементов – множество пустое. |
| $A \subseteq B$ | Если каждый элемент множества A принадлежит к множеству B , то A является подмножеством B (но не наоборот) |
| $A = B$ | Если $A \subseteq B$ и $B \subseteq A$, то A и B являются равными множествами |
| $A \neq B$ | A и B не являются равными множествами |



а) объединения; б) пересечения; в) дополнения

Рисунок 2.4 - Графическое изображение логических операций

2.3 Понятие функции принадлежности

На практике и для дальнейшего описания наиболее важной является функция принадлежности.

Через U обозначают универсальное множество, такое, которое характеризуется функцией принадлежности $\mu_{NCT}(x)$, изменяющейся в интервале $[0,1]$. Любое множество, например, множество A , принадлежащее U , может быть представлено парой элементов, куда входит значение x и значения функции принадлежности при подстановке в нее значения x $A = \{(x, \mu_{NCT}(x)) | x \in U\}$. На рисунке 2.5 обозначен пример функции принадлежности «чисел около 3».

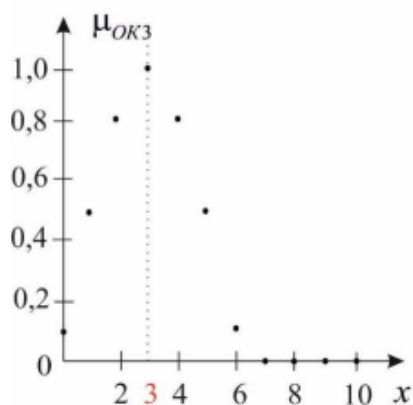


Рисунок 2.5 – Функция принадлежности «число около 3»

При синтезировании систем управления в реальности наиболее применимы треугольные, трапециевидальные и колоколообразные функции принадлежности, приведенные на рисунке 2.6. Здесь X – значение функции принадлежности μ , при подстановке в нее значений x -диапазона, x_0 – его начальное значение, x_n – его конечное значение, x_m – его значение, при котором значение функции принадлежности принимает максимальное значение.

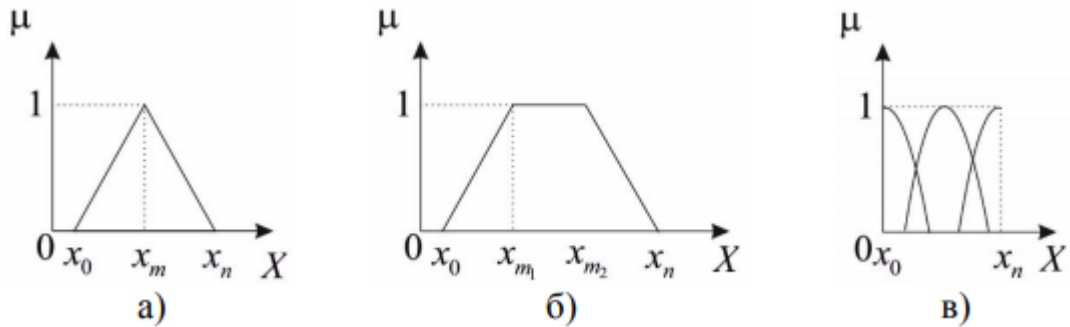
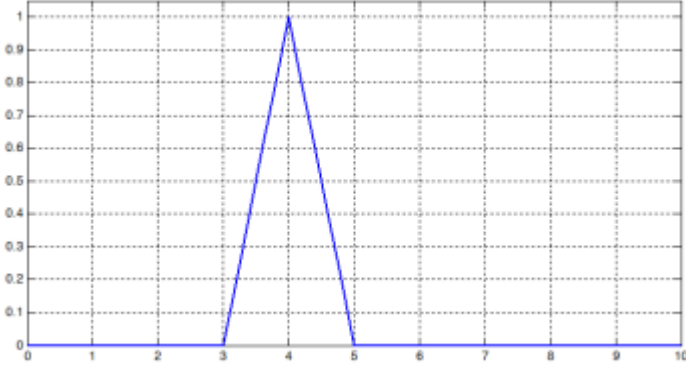


Рисунок 2.6 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

Синтез данных функций может быть осуществлен в пакете прикладных программ MatLab. Данный пакет программ позволяет осуществить имитационное моделирование поведения САР и подобрать необходимые параметры, прежде чем строить систему в реальности. Основные функции принадлежности уже реализованы в MatLab в виде следующих подпрограмм, приведенных в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Подпрограммы MatLab для синтеза функции принадлежности

| № п/п | Подпрограмма для синтеза функции принадлежности | Графическое изображение функции принадлежности |
|-------|--|--|
| 1 | <p>Треугольная функция принадлежности</p> <pre data-bbox="305 1325 678 1514">>> x = (0:0.2:10); >> y = trimf(x, [3 4 5]); >> plot(x, y);</pre> |  |

Продолжение таблицы 2.2

| № п/п | Подпрограмма для синтеза функции принадлежности | Графическое изображение функции принадлежности |
|-------|--|--|
| 2 | <p>Трапецеидальная функция принадлежности</p> <pre data-bbox="305 499 732 604">>> y = trapmf(x, [3 4 6 8]); >> plot(x, y);</pre> | |
| 3 | <p>Гауссовская функция принадлежности 1 типа</p> <pre data-bbox="305 894 699 999">>> y = gaussmf(x, [1 5]); >> plot(x, y);</pre> | |
| 4 | <p>Гауссовская функция принадлежности 2 типа</p> <pre data-bbox="305 1268 776 1440">>> y = gauss2mf(x, [1 5 1.5 6]); >> plot(x, y);</pre> | |
| 5 | <p>Колокоидальная функция принадлежности</p> <pre data-bbox="305 1642 732 1839">>> y1 = gbellmf(x, [1 1 5]); >> y2 = gbellmf(x, [1 2 5]); >> y3 = gbellmf(x, [1 3 5]);</pre> | |

2.4 Лингвистические переменные

Как было упомянуто выше, основой регулятора на базе нечеткой логики является база знаний, которая описывается нечеткими правилами в виде лингвистических переменных. Такие переменные могут быть связаны с любыми физическими величинами, такими как «скорость», «дистанция», «температура» и так далее, их значения определяются с помощью термов: «быстро», «далеко», «тепло». Так, в совокупности лингвистическая переменная выглядят как оценка скорости автомобиля - «скорость автомобиля «БЫСТРАЯ». Отсюда можно сделать вывод, что лингвистическая переменная представляет собой значение функции принадлежности, выраженное естественным, “человеческим” языком.

Для примера будет рассмотрено описание скорости автомобиля (v , км/ч) с использованием лингвистических переменных. На рисунке 2.7 каждая из них имеет вид треугольной функции принадлежности. Для простейшей базы знаний применены такие переменные как:

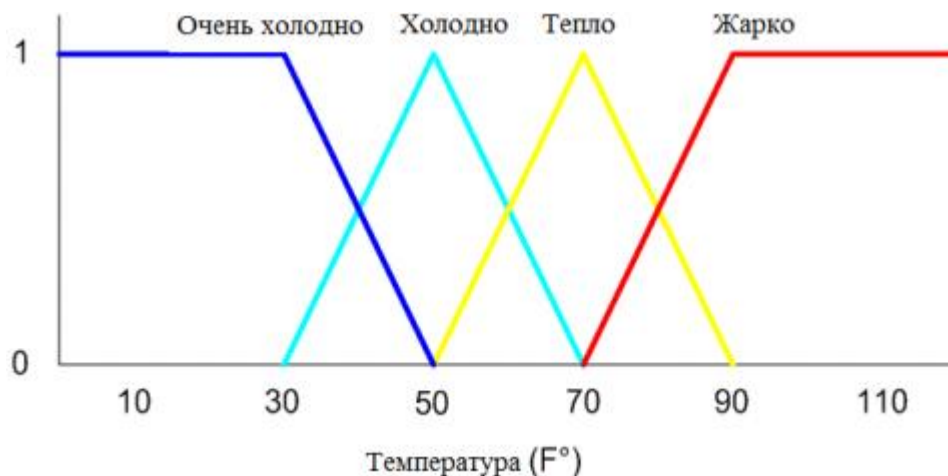


Рисунок 2.7 – Функции принадлежности лингвистических переменных описания температуры внешней среды

Для того, чтобы определить, какой лингвистической переменной принадлежит значение скорости, например, 35 км/ч, необходимо оценить, к какой из функций принадлежности относится заданная точка (рисунок 2.8).

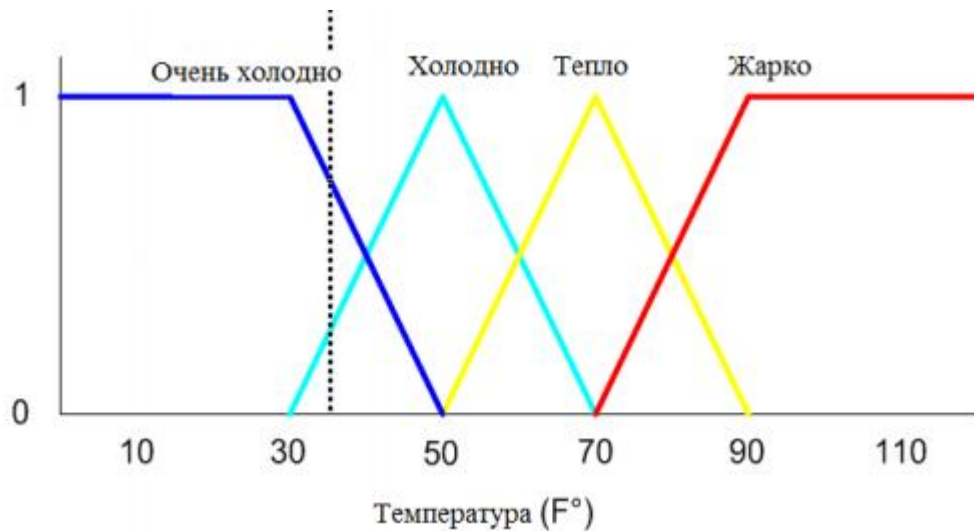


Рисунок 2.8 – Функции принадлежности лингвистических переменных
- поиск 36F°

Из рисунка 2.8 видно, что скорость, равная 35 км/ч, принадлежит примерно на 70% к лингвистической переменной «Медленно» и примерно на 30% - к «Обычно». Исходя из этого же, стоит говорить о субъективности созданной базы знаний о системе и о внесении экспертности по этим данным.

2.5 Структура и принцип работы нечеткого регулятора

Структура нечеткого регулятора представлена на рисунке 2.9.

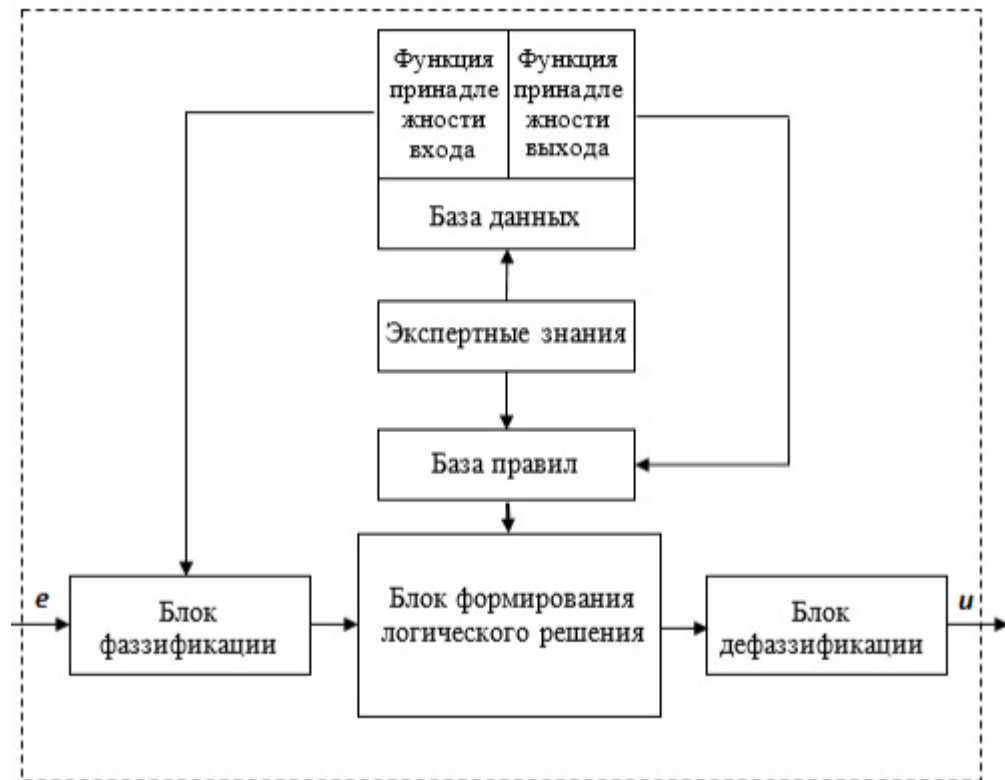


Рисунок 2.9 – Структура нечеткого регулятора

Проектирование нечеткого регулятора подразумевает формирование базы правил, в которой каждое предложение строится согласно следующей структуре:

ЕСЛИ < предпосылка > ТО < вывод >.

База знаний формируется так называемыми «экспертами» на основе эмпирических знаний, которые определяют перечень вышеописанных функций принадлежности для предпосылок $\mu(e)$ и выводов $\mu(u)$. В результате создаются все требующиеся лингвистические правила с лингвистическими переменными и термами.

Следующим этапом синтеза регулятора является фаззификация, представляющая собой переход от конкретных входных значений к термам. Здесь устанавливаются соответствия между каждым значением входной переменной и

соответствующим значением функции принадлежности лингвистической переменной. Это действие выполняется для каждого из входных сигналов.

После того, как термы определены, можно из существующей базы знаний выбирать то, которое соответствует входному воздействию. Формирование логического решения состоит из таких этапов, как агрегирование, активирование и аккумулярование.

Под агрегированием понимается установление степени истинности по каждому правилу системы нечеткого ввода. Значения истинности по всем из подусловий системы нечеткого вывода $B = \{b_i\}$ полагаются известными. Затем анализируется каждое правило нечеткой системы. Если нечеткое высказывание вида (2.4) и (2.5) соответствует правилу:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЕСЛИ } \langle\langle \beta_1 \text{ есть } a \rangle\rangle, \quad (2.4)$$

или

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЕСЛИ } \langle\langle \beta_1 \text{ есть } \nabla a \rangle\rangle, \quad (2.5)$$

где ∇ соответствует высказыванию «ОЧЕНЬ», «МЕНЕЕ» и т.д., то степень его истинности равна соответствующему значению b_i .

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

Следующий этап - активизация заключений - подразумевает определение степени истинности для всех подзаключений правил. По сути, это та же агрегация, но для подзаключений.

Последний этап - аккумуляция - подразумевает процесс нахождения итоговых значений функций принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных множества. Этот этап необходим для разграничения

подзаклучений одинаковых переменных, принадлежащих разным правилам системы. Для каждого из правил вычисляется значение функции принадлежности, после чего следует этап дефаззификации, на котором происходит переход от полученных значений лингвистических переменных к конкретным значениям для каждой из выходных лингвистических переменных.

Работа нечеткого регулятора завершена, если для каждой выходной лингвистической переменной определено конкретное значение, подразумевающее выработку управляющего действия регулятора.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что нечеткие регуляторы применяются в случаях, когда:

- есть лингвистическое описание процесса, исходя из которого возможно его описание множеством нечетких правил;
- при описании процесса уравнениями выясняется, что их параметры не могут быть определены, либо сами уравнения слишком сложны;
- по входным данным системы можно оценить нечеткие правила реакций системы.

3 Исследование и разработка псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и систем управления использующие данное корректирующее устройство в средах MATLAB и MATHCAD

3.1 Исследование свойств корректирующего устройства с фазовым опережением

В данной работе в качестве корректирующего устройства, на основе которого была разработана система автоматического управления, выбрано ПКУ с фазовым опережением. Пример структурной схемы, реализующей фазовое опережение без изменения амплитуды, представлена на рисунке 3.1.

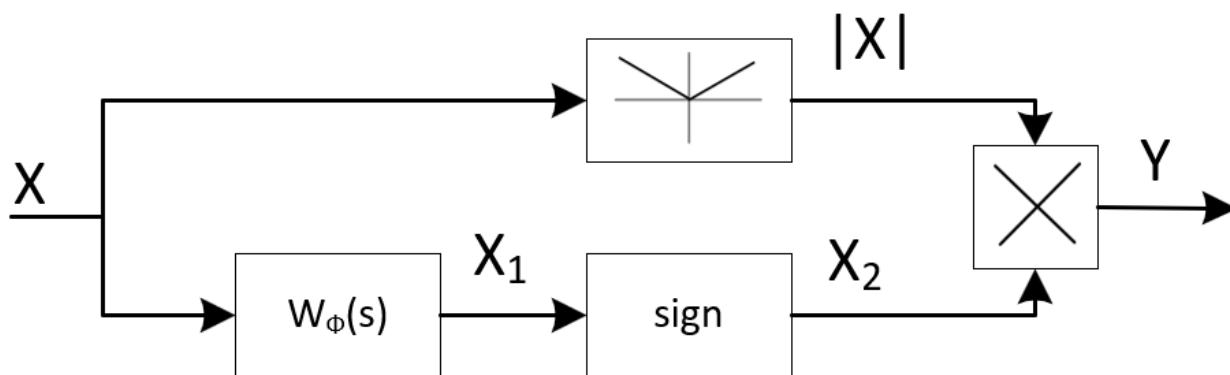


Рисунок 3.1 – Схема КУ с фазовым опережением

Из рисунка видно, что схема представляет собой эквивалентную схему звена переменной структуры [11], в которой несколько изменена логическая часть, а операция сложения сигналов разного знака заменена на произведение модуля сигнала $|X|$ и на функцию знака $sign(X_1)$, где X_1 – выход линейного фильтра $W_\phi(s)$, создающего фазовое опережение.

Характерным свойством такого звена при исследовании его методом гармонической линеаризации проявляется в независимости частоты от амплитуды входного сигнала. Это обстоятельство позволяет рассматривать звено переменной структуры как псевдолинейное.

Момент изменения знака коэффициента усиления определяется на характеристике точкой C_1 , положение которой зависит от значения α , и связано с ним соотношением:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \sin \alpha. \quad (3.1)$$

Положение точки C_2 , в свою очередь, определяется амплитудой входного сигнала $x = A \sin \omega t$, т.е. $OC_2 = A$. При возрастании α точка C_1 сближается с точкой C_2 и сливается с ней при значении $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При дальнейшем увеличении α (от $\frac{\pi}{2}$ до π) движение точки C_1 происходит в обратную сторону, и ее положение определяется соотношением

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \cos \alpha. \quad (3.2)$$

Изменение частоты ω при неизменных параметрах линейного фильтра W_Φ влияет на вид характеристики нелинейности.

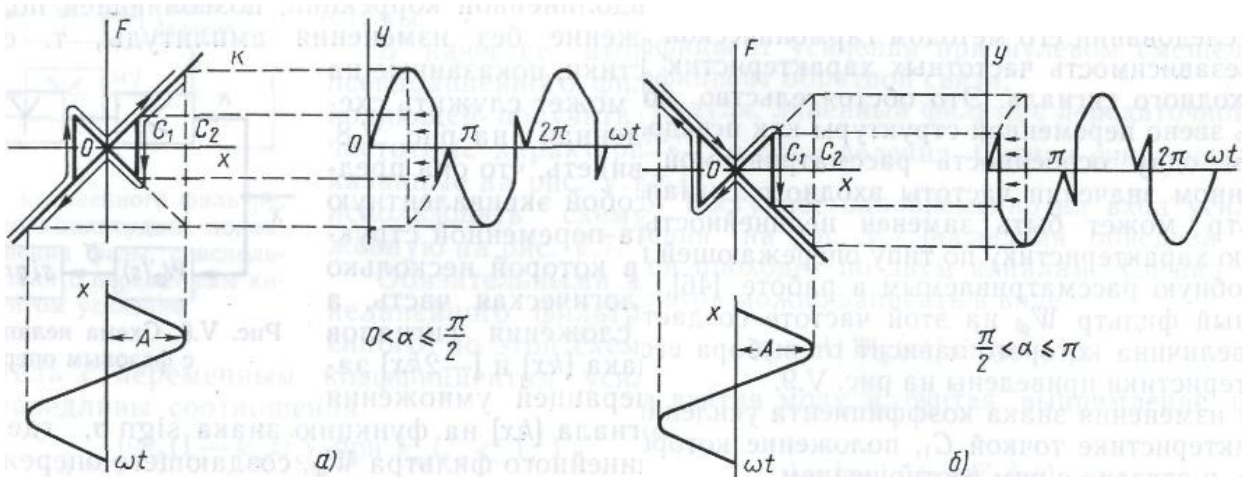


Рисунок 3.2 – Нелинейные характеристики: а – при фазовом опережении до 90° ;

б – при фазовом опережении от 90° до 180°

Независимость коэффициентов линейаризации a и b от амплитуды входного сигнала подтверждается на рисунке 3.2. Зависимость от частоты выражается в разбиении интервала интегрирования $(0, \pi)$ при их вычислении на подынтервала $(0, \alpha)$ и (α, π) , граница между которыми, определяемая значением α , меняется при изменении частоты.

Введем в рассмотрение эквивалентную амплитудно-фазовую характеристику корректирующего устройства, полученную в результате гармонической линейаризации

$$J(A, \omega) = a(A, \omega) + jb(A, \omega), \quad (3.3)$$

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

Выражение (3.3) можно представить в виде

$$J(A, \omega) = q(A, \omega)e^{j\mu(A, \omega)}, \quad (3.4)$$

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

$$q(A, \omega) = \sqrt{[a(A, \omega)]^2 + [b(A, \omega)]^2}; \quad (3.5)$$

$\mu(A, \omega)$ – эквивалентная фазовая характеристика нелинейного звена

$$\mu(A, \omega) = \arctg \frac{b(A, \omega)}{a(A, \omega)}. \quad (3.6)$$

Коэффициенты гармонической линейаризации корректирующего устройства определяются по формулам

$$a = \frac{2}{\pi \cdot A} \int_0^{\pi} F(A \sin(\omega t)) \cdot \sin(\omega t) d(\omega t); \quad (3.7)$$

$$b = \frac{2}{\pi \cdot A} \int_0^{\pi} F(A \sin(\omega t)) \cdot \cos(\omega t) d(\omega t). \quad (3.8)$$

Если в схеме используется линейный фильтр с передаточной функцией

$$W_{\phi}(s) = \frac{T_1 \cdot Ts + 1}{T \cdot T_1 s + 1}, \quad (3.9)$$

то создаваемое им опережение

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\omega T (1 - \nu)}{1 + \omega^2 T^2 \nu}, \quad (3.10)$$

где через ν обозначено отношение T_1/T . Тогда коэффициенты a и b будут равны:

$$a = \frac{k}{\pi} (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha); \quad (3.11)$$

$$b = \frac{k}{\pi} (1 - \cos 2\alpha), \quad (3.12)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы находится через выражение:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}, \quad (3.13)$$

а фазово-частотная характеристика (ФЧХ) системы находится через выражение:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (3.14)$$

В программном пакете MathCad были построенные семейства ЛАЧХ и ФЧХ при значениях параметра T фазового канала $T = 0,9 \div 0,005$ корректирующего устройства. Следовательно, у псевдолинейного фильтра при $k = 1$ логарифмические частотные характеристики примут вид, изображенные на рисунке 3.3 и рисунке 3.4.

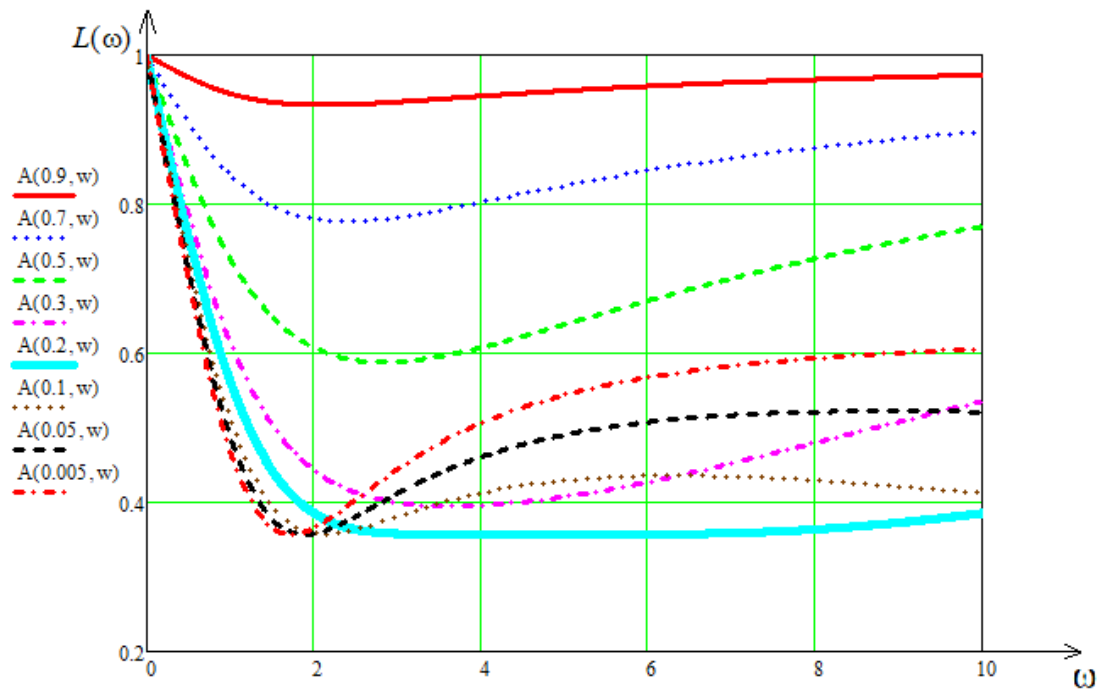


Рисунок 3.3 – Семейство АЧХ фильтра с фазовым опережением при различных значениях параметра T

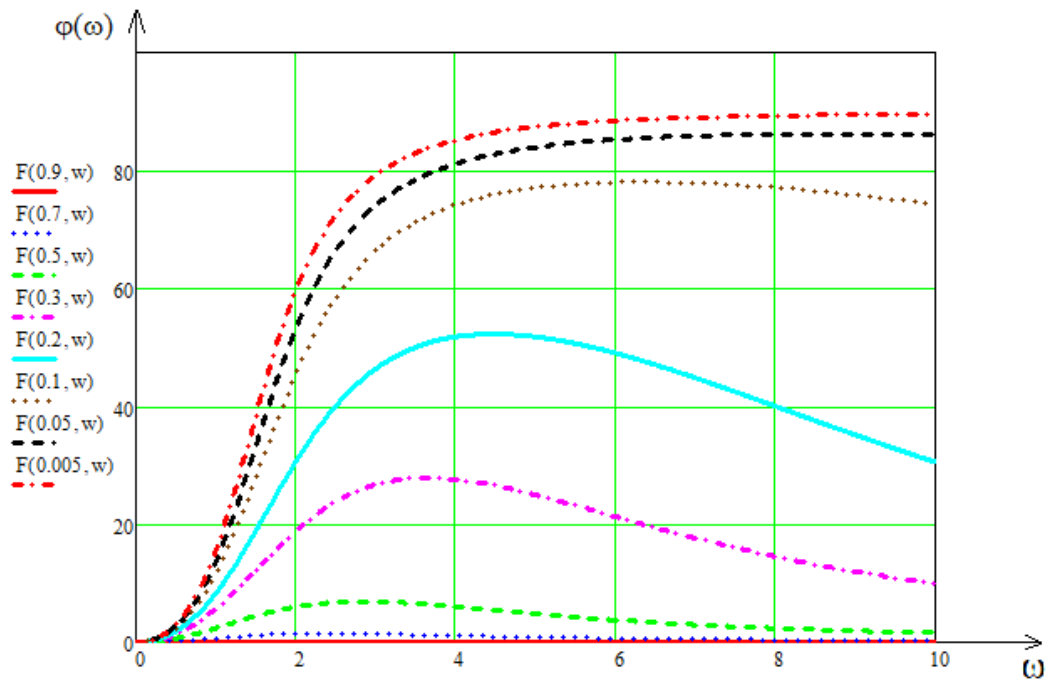


Рисунок 3.4 – Семейство ФЧХ фильтра с фазовым опережением при различных значениях параметра T

Данный вид корректирующих регулятор зачастую применяют в системах управления, где для улучшения качества переходных процессов требуется вводить фазовое опережение с одновременным подавлением амплитуды входного сигнала.

3.2 Критерии качества процесса регулирования

Устойчивость является необходимым, но недостаточным условием работоспособности линейной системы автоматического регулирования.

Качество работы любой системы регулирования приходится оценивать по некоторым свойствам системы, проявляющимся при различных типовых воздействиях. Зачастую качество регулирования определяется в установившемся режиме в совокупности с точностью и качеством переходных процессов.

Для оценки качества регулирования обычно используют ступенчатое входное воздействие и ряд критериев для описания формы переходного процесса.

Различают косвенные и прямые оценки качества системы. Среди прямых и косвенных также различают статические и динамические, где статические оценки характеризуют установившийся режим, а динамические – переходный процесс.

Прямые оценки качества находятся по переходной характеристике непосредственно по каналу управления или возмущения (рисунок 2.10).

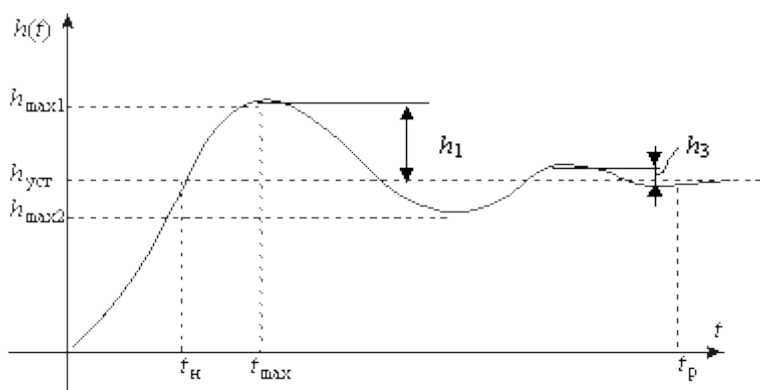


Рисунок 3.5 – Переходная характеристика

К основным прямым оценкам качества относят:

- время регулирования (t_p) – время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее, чем на заранее заданное значение q , где q - точность регулирования. Значение q выбирают обычно равным 5 %;
- перерегулирование (σ) – разность максимального значения h_{max1} переходной характеристики и установившимся значением $h_{уст}$, выраженная в процентах:

$$\sigma = \frac{|h_{уст} - h_{max1}|}{h_{уст}} 100\% ; \quad (3.15)$$

- время достижения первого максимума (t_{max});
- время нарастания (t_n) – промежуток времени, за который на нарастающем фронте импульса уровень изменяется от низкого опорного значения (10%) до высокого опорного значения (90%);
- число колебаний (n), которые возникают в системе за время регулирования;
- декремент затухания – количественная оценка интенсивности затухания колебательности переходного процесса системы:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_3}{h_1} . \quad (3.16)$$

Среди косвенных оценок наибольшее распространение получили интегральные оценки. Существует две вида интегральной оценки:

- линейная интегральная оценка определяется следующим выражением:

$$I_0 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y) dt , \quad (3.17)$$

где y - текущее значение рабочего параметра. Эта оценка может быть применена только при монотонных переходных процессах при отсутствии колебаний.

- квадратичная интегральная оценка применяется как при монотонных, так и при колебательных переходных процессах и определяется следующим соотношением:

$$I^2 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y)^2 dt. \quad (3.18)$$

Недостаток интегральной квадратичной оценки заключается в том, что различные по характеру переходные процессы могут иметь одну и ту же величину оценки.[13,14]

Для данной работы система второго порядка будет принимать желаемые показатели качества управления при времени регулирования системы равное 15 с. и перерегулировании до 10 %.

3.3 Исследование свойств системы автоматического регулирования

Согласно заданию научного руководителя был выбран объект управления (ОУ) второго порядка, схема системы представлена на рисунке 3.6:

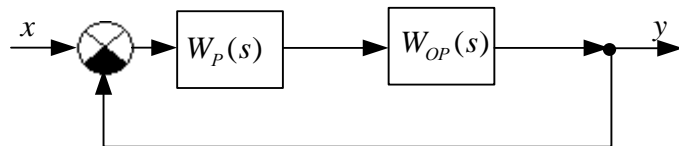


Рисунок 3.6 – Схема системы с ОУ второго порядка

Передаточная функция объекта управления:

$$W_{OP}(s) = \frac{k_O}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}. \quad (3.19)$$

Данная функция описывает большое количество всевозможных технологических объектов. При $T_1 \geq 2T_2$ функция (3.19) описывает аperiodическое звено. При $T_1 < 2T_2$ функция (3.19) описывает колебательное звено. [4].

В качестве регулятора используется ПИД-регулятор, передаточная функция которого определяется выражением:

$$W_P(s) = k_{PEГ} \cdot \left(k_P + \frac{1}{T_I s} + \frac{k_D T_D s}{T_D s + 1} \right). \quad (3.20)$$

Структурная схема системы автоматического регулирования, состоящая из ПИД-регулятора и объекта управления второго порядка, смоделирована в программной среде Matlab и выглядит следующим образом:

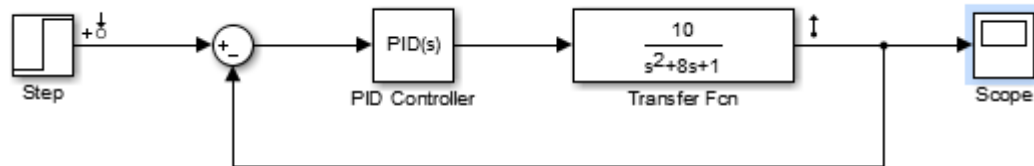


Рисунок 3.7 – Структурная схема САР в MatLab

Зададим коэффициенты ПИД регулятору таким образом, чтобы система была устойчивой: $T_p=1$; $T_i=1$; $T_d=0.01$. Тогда график переходного процесса будет выглядеть следующим образом:

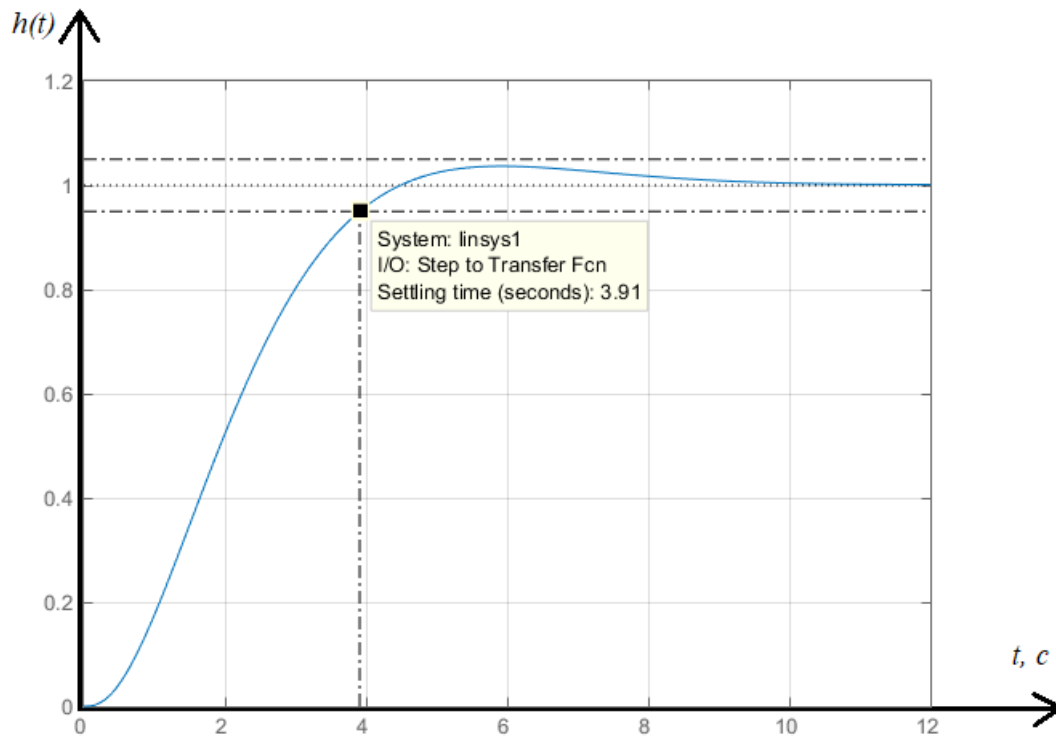


Рисунок 3.8 – Кривая переходного процесса САР

Проанализировав рисунок 3.8 можно вычислить показатели качества системы:

- характер переходного процесса – сходящийся, монотонный;
- время регулирования – минимальное время, по истечению которого разность между текущим значением регулируемого параметра и его заданием становится меньше допустимого отклонения ε : $t_{рег} = 3,91$ с.
- установившееся значение сигнала – $h_{уст} = 1$.

С помощью программной среды Matlab и функции Linear Analysis построена амплитудно-фазовая характеристика:

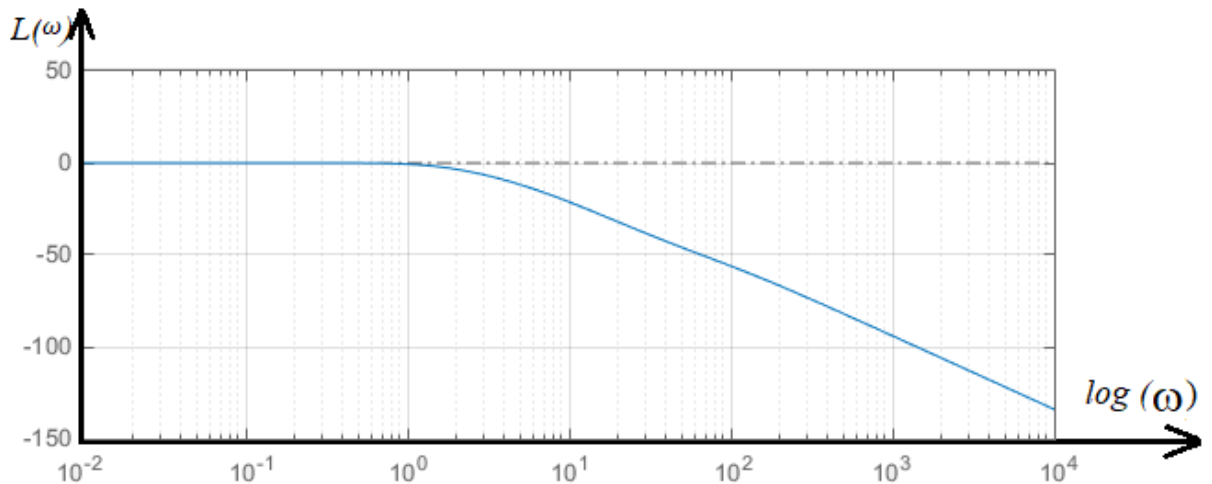


Рисунок 3.9 – Амплитудная частотная характеристика системы

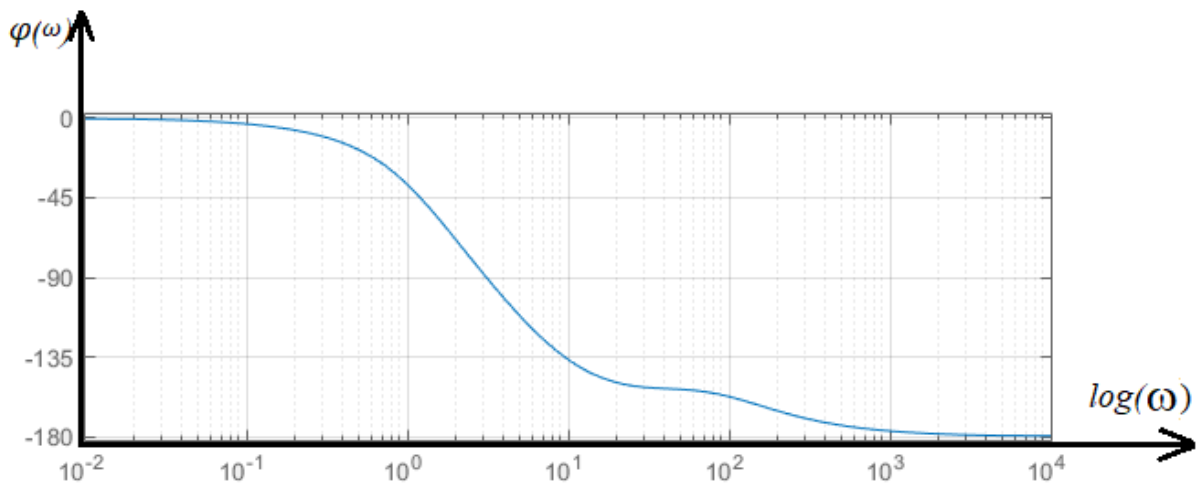


Рисунок 3.10 – Фазовая частотная характеристика системы

Ниже рассмотрим несколько случаев переходных процессов системы второго порядка вида $W_{OP}(s) = \frac{k}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}$ различными значениями параметра T_1 и T_2 при фиксированном значении параметра k без КУ.

Примем параметр $k = 1$, $T_2 = 8$ а параметр T_1 будет принимать различные значения $T_1 = 0.1, 5, 10, 15$.

На рисунке 3.11 представлено семейство переходных процессов на задающее ступенчатое воздействие при изменении постоянной времени объекта управления.

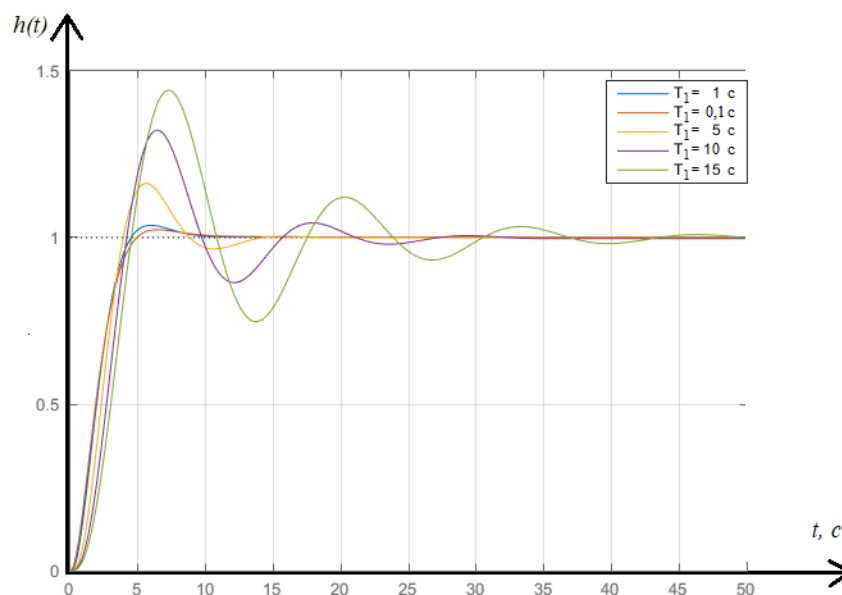


Рисунок 3.11 – Семейство переходных процессов при изменении постоянной времени T_1

Следующим этапом примем параметр $k = 1$, $T_1 = 1$ а параметр T_2 будет принимать различные значения $T_2 = 2, 5, 8, 12$.

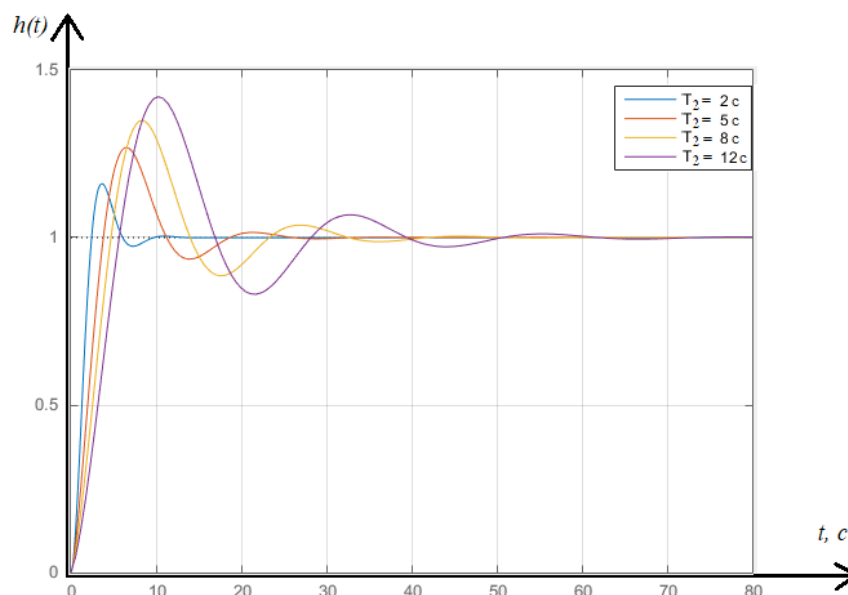


Рисунок 3.12 – Семейство переходных процессов при изменении постоянной времени T_2

Проанализировав представленные семейства можно сделать вывод, что характер переходного процесса объекта управления существенно зависит от постоянных времени объекта управления. При увеличении параметра T_1 и уменьшении T_2 переходный процесс становится более колебательным, растет перерегулирование а также и снижается быстродействие системы.

3.4 Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением с управлением на нечеткой логике

Для анализа свойств корректирующего устройства с фазовым опережением и объектом управления второго порядка следует рассмотреть схему следующей САУ:

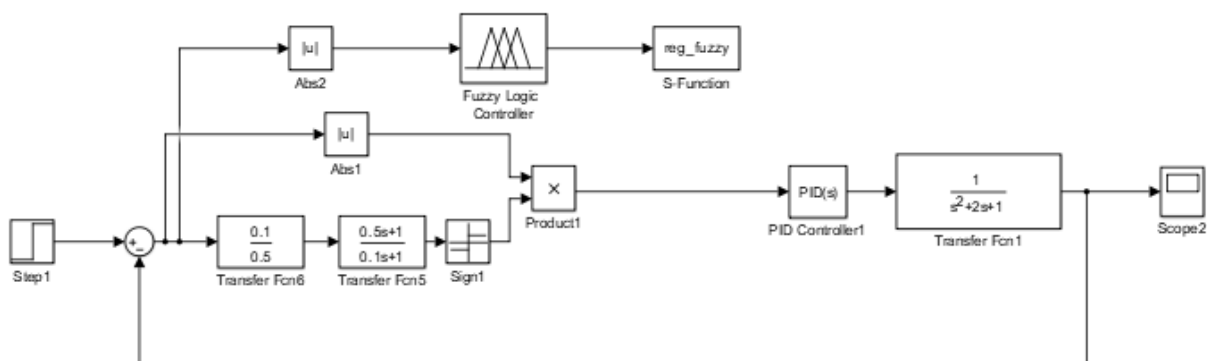


Рисунок 3.13 – Структурная схема САУ с КУ в среде Matlab

В виде устройства, которое будет управлять разработанным КУ, было решено использовать некий регулятор, который позволит реализовать блок нечеткого регулирования. ППП Matlab обладает таким пакетом расширения функциональности, он носит название Fuzzy Logic Toolbox.

Данная fuzzy-библиотека позволяет использовать графический интерфейс для проектирования нечетких систем. В частности, в данной работе с помощью этого инструмента формируются различные функции принадлежности. В работе используются *trimf* – треугольная и *trapezmf* – трапецеидальная [16].

Значение интегрального квадратичного критерия в момент времени, когда динамическая ошибка системы становится равной нулю, будет формировать функцию принадлежности входных переменных I , а для формирования значения постоянной времени КУ необходима выходная переменная T . Произведя все эти действия для всего интервала изменений постоянной времени объекта управления T_2 , можно сформировать функции принадлежности входной и выходной лингвистических переменных (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Данные для формирования функций принадлежности

| | | | | |
|--------------|-------|------|------|------|
| $T_2 OY (c)$ | 2 | 5 | 8 | 12 |
| I | 0.005 | 0.06 | 0.13 | 0.21 |
| $T_{KY} (c)$ | 1.38 | 3.12 | 5.23 | 7.35 |

Используемые в данной работе функции принадлежности входной переменной и выходной переменной, составленные по таблице 3.1, представлены на рисунках 3.14 и 3.15 соответственно.

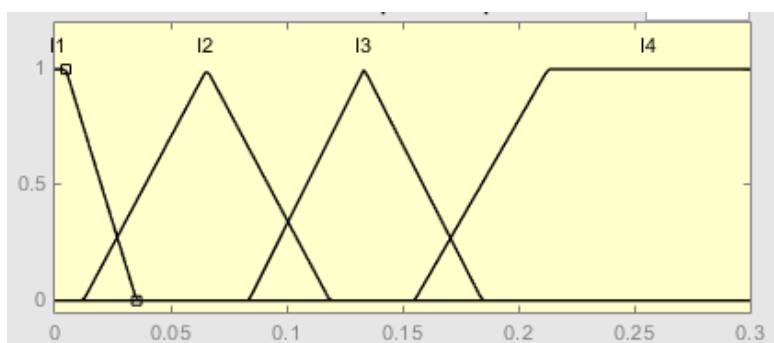


Рисунок 3.14 - Функции принадлежности входной переменной I

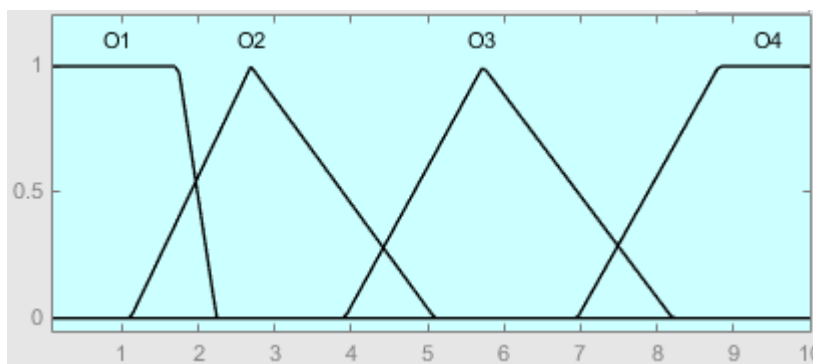


Рисунок 3.15 - Функции принадлежности входной переменной T

Подстройка корректирующего устройств осуществляется по следующей базе правил:

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

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

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

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

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

В блоке вывода нечетких преобразований является алгоритм «Mamdani». В этом алгоритме значение выходной переменной определяется методом центра массы фигуры.

Исследование будет заключаться в реакции системы на единичное задающее воздействие при неизменяемом параметре корректирующего устройства $T_I = 0.1$ с., но при изменяющихся параметрах T_I и T_2 объекта управления. Подстройка в системе будет производиться изменением постоянной времени корректирующего устройства T .

Первым этапом будет изменяться постоянная времени объекта управления T_I и будет принимать различные значения: 0.1, 1, 5, 10, 15.

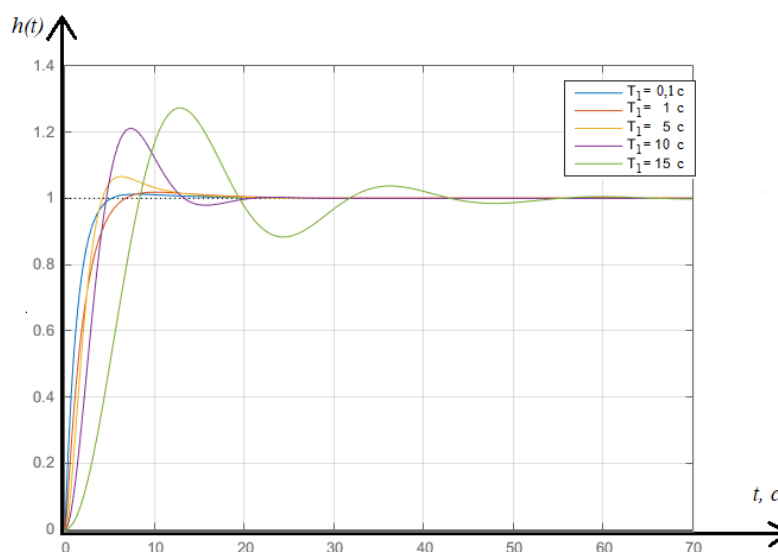


Рисунок 3.16 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_I

Далее рассмотрим изменения постоянной времени объекта управления T_2 и будет принимать различные значения: 2, 5, 8, 12.

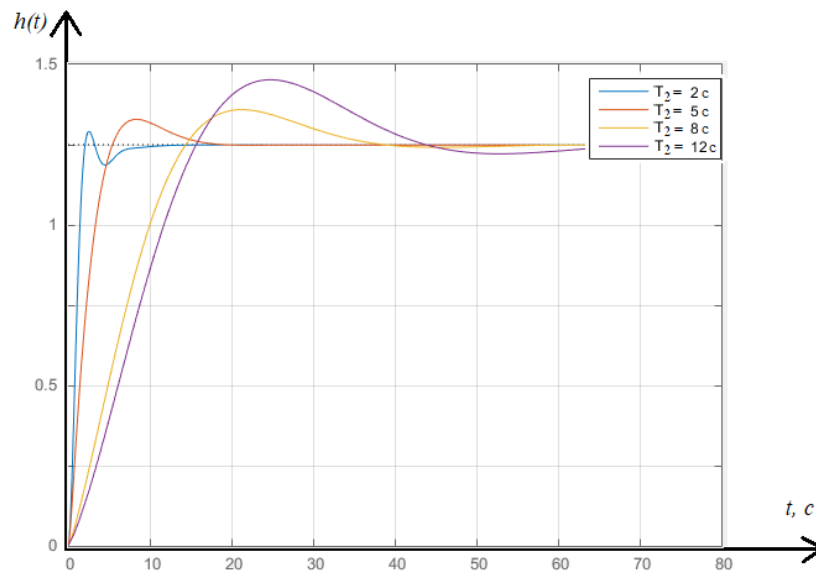


Рисунок 3.17 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

Вторым этапом будет анализ свойств нечеткого корректирующего устройства с фазовым опережением подключенный по параллельной схеме подключения, изображенной на рисунке 3.18.

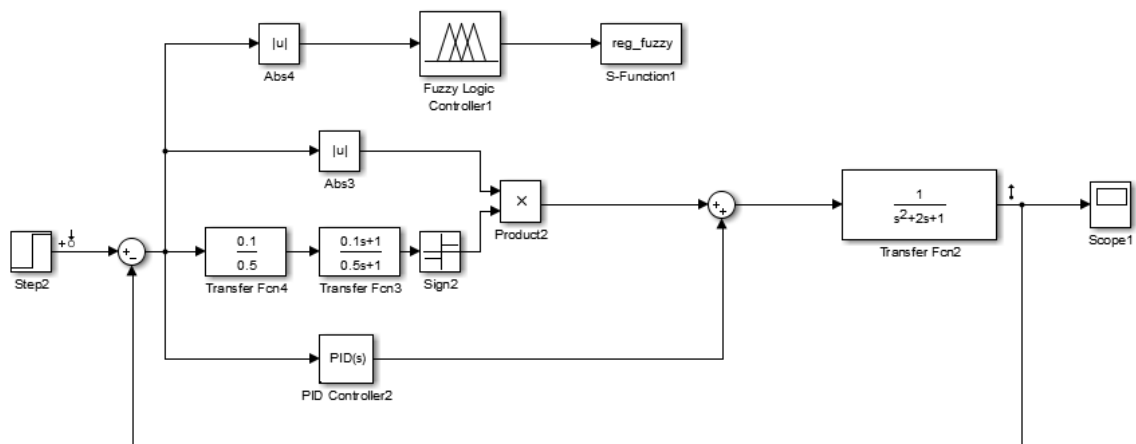


Рисунок 3.18 – Структурная схема САУ с параллельным подключенным КУ в среде Matlab

Для данной схемы также были проведены опыты с изменением постоянных времени T_1 и T_2 , а семейства переходных процессов приведены на рисунке 3.19 и 3.20.

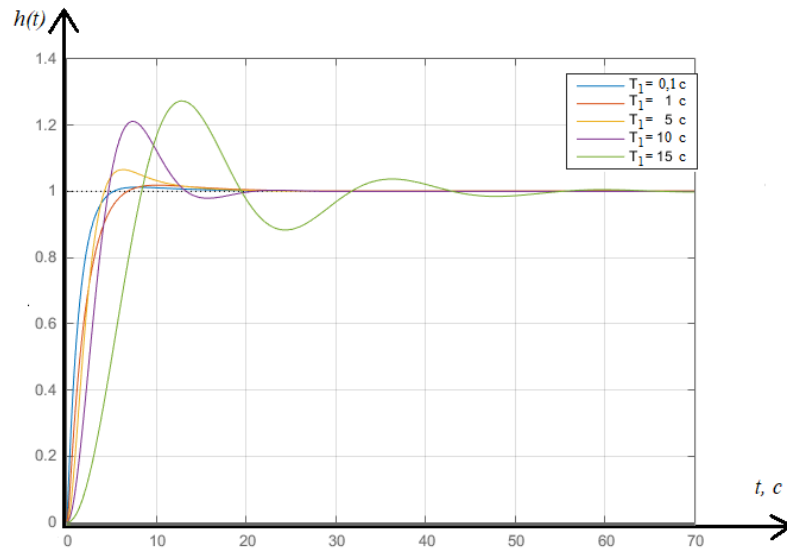


Рисунок 3.19 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

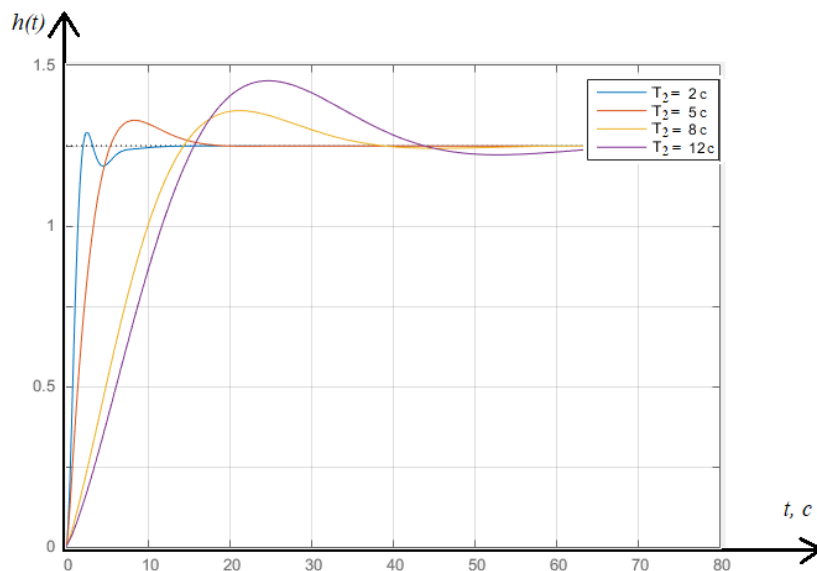


Рисунок 3.20 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

Полученная информация со всех опытов изменения постоянной времени T_1 представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные о характеристиках системы второго порядка при разных схемах управления

| Тип системы | Изменяемый параметр ОУ T_1 (с) | Параметр КУ T (с) | Запас по фазе, φ_3 (град) | Запас по амплитуде, α_3 (Дб) | Время регулирования (с) | Перерегулирование (%) |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Без КУ | 0.1 | – | 167.0 | 44.1 | 4.6 | 2.4 |
| | 1 | – | 160.0 | 24.6 | 5.8 | 3.7 |
| | 5 | – | 73.1 | 12.2 | 12.3 | 16.2 |
| | 10 | – | 31.5 | 7.2 | 20.0 | 32.2 |
| | 15 | – | 13.7 | 4.0 | 35.3 | 44.2 |
| С последовательным КУ | 0.1 | 0.07 | 167.0 | 44.1 | 4.6 | 1.4 |
| | 1 | 0.13 | 160.0 | 24.6 | 5.9 | 1.8 |
| | 5 | 0.23 | 73.1 | 12.2 | 12.0 | 3.3 |
| | 10 | 0.34 | 31.5 | 7.2 | 18.6 | 21.2 |
| | 15 | 0.26 | 13.7 | 4.0 | 36.3 | 28.2 |
| С параллельным КУ | 0.1 | 0.08 | - | - | 4.4 | 1.2 |
| | 1 | 0.12 | - | - | 5.7 | 1.9 |
| | 5 | 0.18 | 79.7 | 16.4 | 11.6 | 3.8 |
| | 10 | 0.22 | 37.3 | 9.9 | 19.7 | 22.5 |
| | 15 | 0.25 | 20.0 | 6.5 | 37.0 | 30.8 |

В приложении А рассмотрены случаи переходных процессов системы при изменении параметров ОУ T_2 без КУ и с использованием КУ параллельного и

последовательного типа. Значения параметров объекта приняты равными $T_2 = 2, 5, 8, 12$.

Проанализировав все кривые переходных процессов и данных представленных в таблицах, показывает, что использование в системе корректирующего устройства на базе нечеткой логики положительно влияет на время регулирования а также и на перерегулирование. В системе управления с КУ показатели качества переходного процесса лучше, чем в системе управления без КУ.

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

4.1 Общие сведения контроллера Simatic S7-300 его назначение и технические характеристики

Для работы в настоящей ВКР используется контроллер серии Simatic, модель S-300. Именно он был выбран по следующим причинам:

- модульная структура; конечный вид устройства определяется набором требований к нему. В состав системы могут входить несколько центральных процессоров, которые обеспечивают непосредственно выполнение зашитых в контроллер программ, модули ввода-вывода различного типа сигналов и пр.

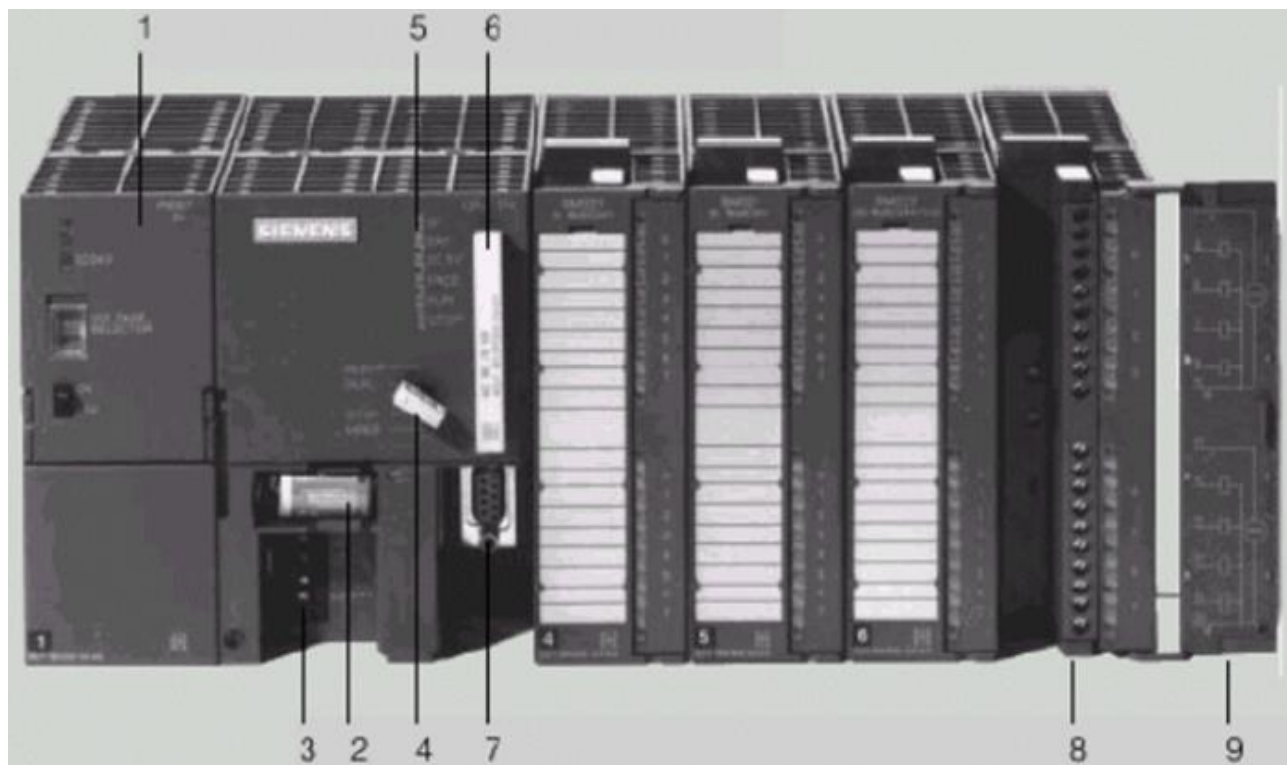
- данный контроллер применяется для решения задач средней и высокой сложности, а самое главное – его используют в реальных проектах;

- простота программирования с помощью адаптированного под нужды разработчиков пакета программ SIMATIC STEP-7, поддерживающий языки программирования стандарта МЭК 6-1131/3.

В конечном виде в зависимости от требований, предъявляемых к системе, устройство может включать в себя:

- модуль блока питания;
- модуль центрального процессора, обеспечивающий выполнение программ и управление узлами контроллера;
- сигнальный модуль (тот самый ввод-вывод аналоговых и дискретных сигналов);
- модуль коммуникации, обеспечивающий подключение контроллера к различным сетям.

Внешний вид контроллера SIMATIC S7-300 представлен на рисунке 4.1.



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

Рисунок 4.1 – Внешний вид контроллера SIMATIC S7-300

В таблице 4.1 сведены сравнительные характеристики центральных процессоров контроллера.

Таблица 4.1 – Сравнительная характеристика процессоров

| CPU | 312FM | 313 | 314FM | 314 | 315/315D P | 316DP | 318DP |
|-----|----------|------------|-----------|-----------|----------------|-----------|---------|
| 1 | 6 Кб | 12 Кб | 32 Кб | 24 Кб | 48/64 Кб | 128 Кб | 512 Кб |
| 2.1 | 20 Кб | 20 Кб | 48 Кб | 40 Кб | 80 Кб/96 | 192 Кб | 64 Кб |
| 2.2 | 20 Кб | - | 48 Кб | - | Кб | - | - |
| 2.3 | - | до 4 Мб | до 4 Мб | до 4 Мб | - до 4 Мб | до 4 Мб | до 4 Мб |
| 3 | 0.6 -1.2 | 0.6 | 0.3 - 0.6 | 0.3 - 0.6 | 0.3 - 0.6 | 0.3 - 0.6 | 0.1 |
| 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.1 |
| 5 | 256 | 256 | 992 | 1024 | 1024 / 8192 | 16384 | 65536 |
| 6 | 64/32 | 64/32 | 248/124 | 256/128 | 256/512 | 1024 | 4096 |
| 7 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 |
| 8 | 1 | 1 | 1+3 | 1+3 | 1+3 | 1+3 | 1+3 |
| 9 | 8 | 8 | до 32 | до 32 | до 32 | до 32 | до 32 |
| 10 | 0/1 | 0/1 | 0/1 | 0/1 | 0/1 1/1 | 1/1 | 2/2 |
| 11 | 0/8 | 0/8 | 0/16 | 0/16 | 0/32 64/64 | 124/64 | 125/64 |

В таблице 4.1 используются следующие обозначения:

- 1 – объем встроенного ОЗУ;
- 2 – объем загружаемой встроенной RAM;
- 3 – объем загружаемой расширенной EEPROM;
- 4 – карта Flash-EEPROM;
- 5 – время выполнения логической операции – мкс;
- 6 – время выполнения операции с плавающей запятой – мкс;
- 8 – количество дискретных в/в;
- 8 – количество аналоговых в/в;
- 9 – количество станций MPI интерфейса;
- 10 – количество стоек в централизованной системе;

11 – количество модулей в системе.

4.2 Реализация программы САР с псевдолинейным корректирующим устройством на Step7

STEP 7 – это пакет программного обеспечения, который позволяет программировать и конфигурировать контроллеры семейства SIMATIC. Промышленное программное обеспечение SIMATIC позволяет вести разработку программ на языках, включенных в международный стандарт МЭК 6-1131/3, а именно:

FBD (Function Block Control Diagram), описывающий программу в виде стандартных логических схем, содержащих интегральные логические элементы, счетчики, таймеры, и пр.

STL (Statement List), описывающий программу в виде инструкции. Занимает меньше памяти и обладает высоким быстродействием, но менее удобен для разработчика;

LAD (Ladder Diagram), описывающий программу в виде, похожем на электрическую схему, так как основными ее элементами являются контакты, которые могут находиться в разомкнутом или замкнутом состоянии.

В программе STEP 7 на языке FBD была реализована передаточная функция САУ второго порядка, а также корректирующего устройства в виде математических операций. Листинг программы приведен в приложении Б. В данной системе управления функция принадлежности определяется на основе значения отклонения интегральной квадратичной ошибки. Текст программы, реализующий определение интегральной квадратичной ошибки в программе Step 7 представлен на рисунке 4.2.

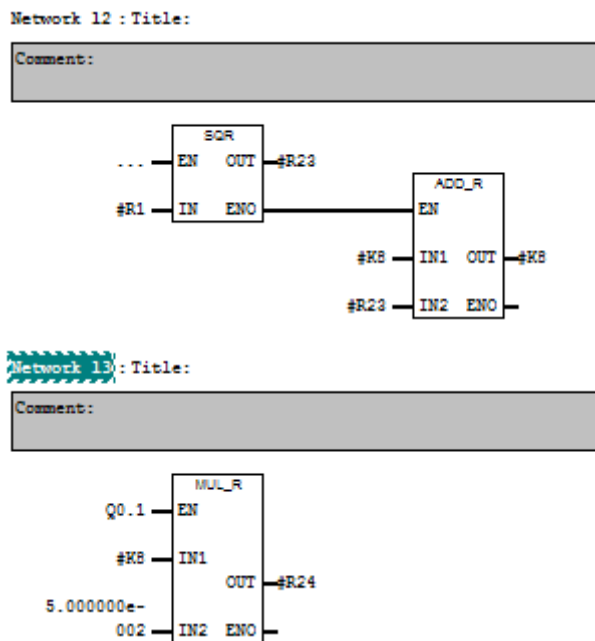


Рисунок 4.2 – Текст программы, вычисляющий интегральную квадратичную ошибку

Далее отклонение значения интегрального квадратичного критерия подается на блок нечеткой логики, откуда выходной сигнал будет определять постоянную времени T корректирующего устройства. Текст программы работы нечеткой логики от величины интегрального квадратичного критерия выполнен в отдельном блоке и приведен в приложении В.

Аппарат нечеткой логики будет состоять из блоков кусочно-линейных функций, где для треугольной функции принадлежности задаются координаты трех вершин треугольника, для прямоугольной функции принадлежности – координаты основания и вершин.

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

В данном решении используется база правил, которая уже использовалась при проектировании нечеткой логики в среде Matlab.

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

Для того чтобы реализовать выходные функции принадлежности, нужно поменять оси X и Y и перевернуть функцию принадлежности, поделив ее пополам. Это позволит подавать значение истинности каждого термина на вход кусочно-линейной функции и получить на выходе четкую переменную.

После дефаззификации из всех четких значений T выбирается наибольшее, так реализуется метод правого модального значения.

Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением, структурная схема которого представлена на рисунке 1.8, выполнено также в отдельном блоке, и текст программы представлен ниже.

Для реализации передаточной функции фазового канала на языке FBD, следует представить ее в виде набора простейших математических операций. Опираясь на формулу (1.11) получим выражение:

$$W_{\phi}(s) = \frac{1}{T_1} \cdot \left(T + \frac{1}{s} \right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s}}, \quad (4.1)$$

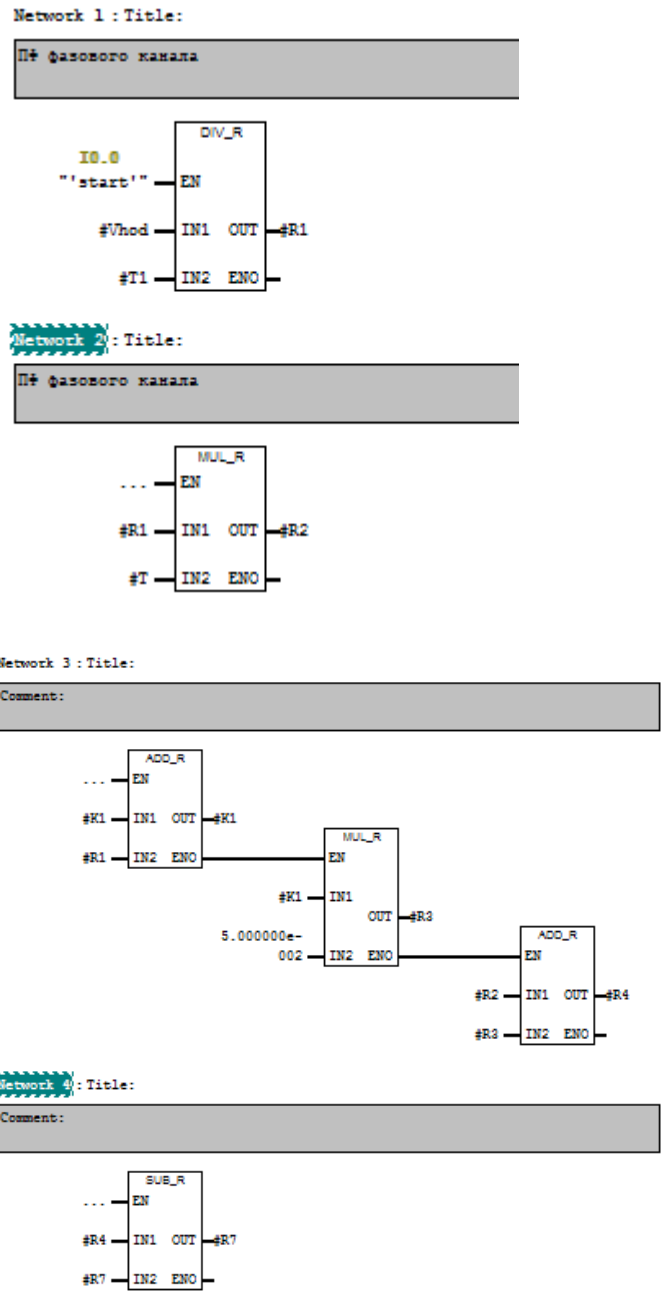


Рисунок 4.3 – Начало программы реализации КУ с фазовым опережением, описывающие передаточную функцию

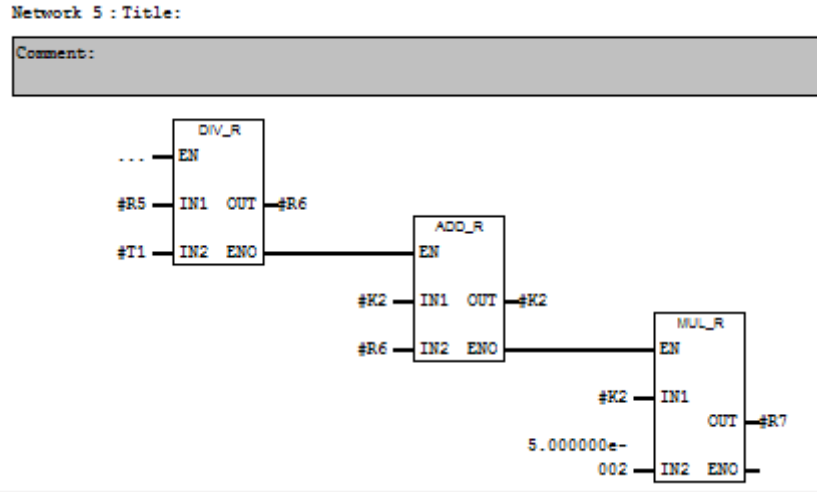


Рисунок 4.4 – Продолжение программы реализации КУ с фазовым опережением, описывающие передаточную функцию

Также как и для передаточной функции фазового канала, для функции знака программа описывается простейшими математическими операциями:

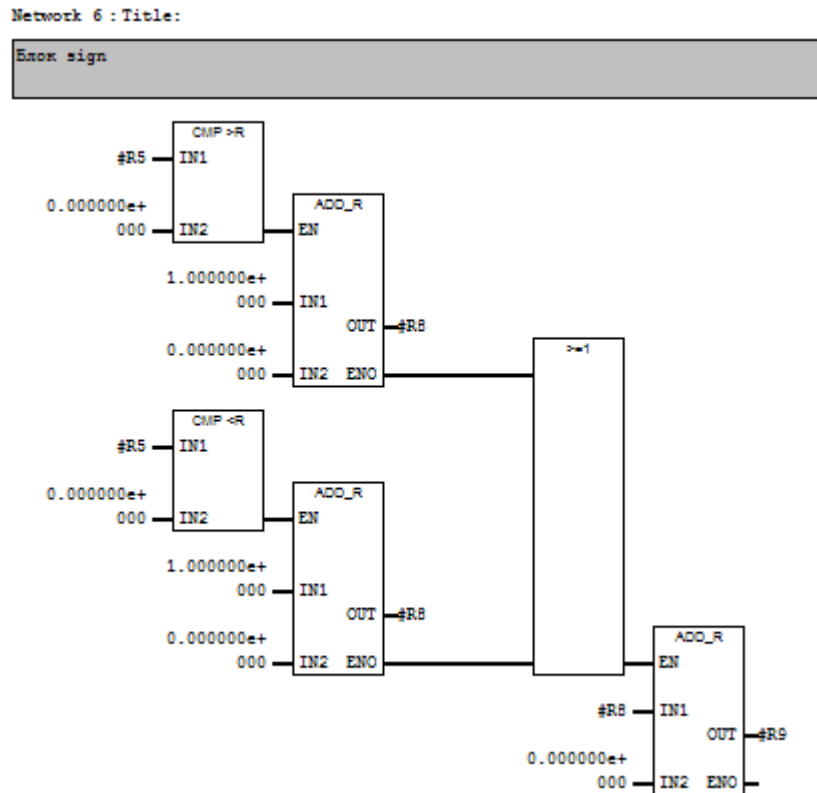


Рисунок 4.5 – Программная реализация функции знака фазового сигнала

Текст программы функции модуля и умножение выходных сигналов амплитудного и фазового сигнала представлен на рисунке 4.6.

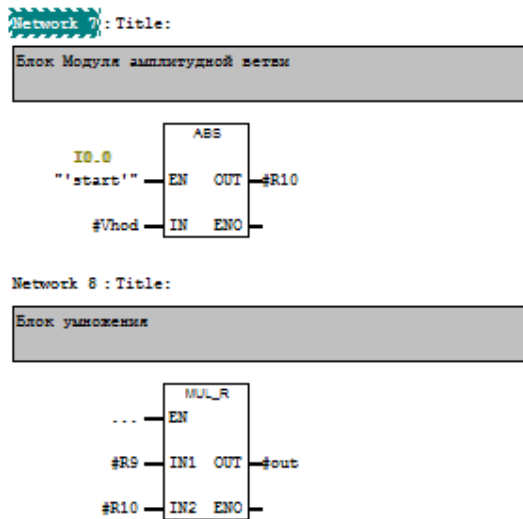


Рисунок 4.6 – Программная реализация функции модуля и умножение выходных сигналов амплитудного и фазового сигнала

5 Программно-методическое обеспечение для выполнения

В ходе выполнения работы было разработано программно-методическое обеспечение для выполнения лабораторной работы «Изучение псевдолинейного корректирующего устройства на основе нечеткой логики». Оно поможет изучить студенту принцип работы псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением, а также поможет осуществить написание программы системы управления второго порядка с данным корректирующим устройством на базе нечеткой логики.

Программная реализация в методическом обеспечении осуществляется на базе контроллера «Siemens Simatic S7-300» на языке FBD.

В методических указаниях приводятся: цель работы, описание пользовательского интерфейса, обзор используемых в данной лабораторной работе блоков, задание на лабораторную работу, методические указания по составлению программы псевдолинейного регулятора, содержание отчёта и контрольные вопросы.

Полный текст методических указаний представлен в приложении Д данной работы.

6 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.

6.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта (ОКР) или научного исследования (НИ) 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. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

| Этапы работы | Исполнители | Загрузка (занятость) исполнителей |
|--|--------------------|--|
| Постановка целей и задач, получение исходных данных | НР | НР – 100% |
| Составление и утверждение ТЗ | НР, И | НР – 50% И – 100% |
| Разработка календарного плана | НР, И | НР – 100% И – 100% |
| Изучение литературных источников, написание теоретической части работы и математических выкладок | И | И – 100% |

Продолжение таблицы 6.1

| Этапы работы | Исполнители | Загрузка (занятость) исполнителей |
|--|-------------|-----------------------------------|
| Создание адаптивной САР с ПКУ | И | И – 100% |
| Создание программного обеспечения для ПКУ | И | И – 100% |
| Проведение испытаний и их результаты, доработка программного обеспечения | НР, И | НР – 30% И – 100% |
| Оформление расчетно-пояснительной записки | И | И – 100% |
| Оформление графического материала | И | И – 100% |
| Подведение итогов | НР, И | НР – 100% И – 100% |

6.1.1 Определение продолжительности этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

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

- аналоговый;
- экспертный.

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

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (6.1)$$

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

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

Для выполнения перечисленных в таблице 6.1 работ требуются специалисты:

- инженер;
- научный руководитель.

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

$$T_{РД} = t_{о\text{ж}} \cdot K_{ВН} \cdot K_{Д}, \quad (6.2)$$

где $t_{о\text{ж}}$ – трудоемкость работы, чел/дн.;

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

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

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (6.3)$$

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

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

$T_{К}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (6.4)$$

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

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

$T_{\text{пд}}$ – праздничные дни ($T_{\text{пд}} = 10$).

$$T_{\text{к}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

В таблице 6.2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 6.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

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

6.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ

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

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

6.2.1 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 6.3.

Таблица 6.3 – Расходные материалы

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

Пусть ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны $C_{\text{мат}} = 220 * 1,05 = 231$ руб.

6.2.2 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, включая премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада.

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

$$ЗП_{\text{дн-т-б}} = MO/25,083 \quad (6.5)$$

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 6.4. При расчете учитывалось, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце 25,083 рабочих дня.

Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 6.2. Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент дополнительной заработной платы $K_{\text{ДЗП}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$.

Таблица 6.4 – Затраты на основную заработную плату

| Исполнитель | Оклад, руб./мес. | Среднедневная ставка, руб./раб. день | Затраты времени, раб. дни | Коэффициент | Фонд з/платы, руб. |
|---------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------|--------------------|
| НР | 33 664 | 1342,10 | 9 | 1,699 | 20 522,05 |
| И | 15 470 | 616,75 | 73 | 1,699 | 76 493,65 |
| Итого: | | | | | 97 015,70 |

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили $C_{\text{осн}} = 97\,015,70$ руб.

6.2.3 Расчет затрат на социальный налог

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

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} * 0,3 \quad (6.6)$$

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

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

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 * 97\,015,70 = 29\,104,71 \text{ руб.}$$

6.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

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

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{Э}} \quad (6.7)$$

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

$Ц_{\text{Э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

Для ТПУ ЦЭ = 6,59 руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 6.2 для инженера ($T_{рД}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = T_{рД} * K_t, \quad (6.8)$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} * K_C \quad (6.9)$$

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

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

Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

| Наименование оборудования | Время работы оборудования $t_{об}$, час | Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт | Затраты $\mathcal{E}_{об}$, руб. |
|---------------------------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Персональный компьютер | 384*0,7 | 0,3 | 531,42 |
| Струйный принтер | 1 | 0,1 | 0,66 |
| Итого: | | | 532,08 |

6.2.5 Расчет амортизационных расходов

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

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot C_{OB} \cdot t_{pф} \cdot n}{F_D}, \quad (6.10)$$

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

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

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

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

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

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 45000 \cdot 384 \cdot 1}{2384} = 1812,08 \text{ руб.}$$

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

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

Итого $C_{AM} = 1812,08 \text{ руб.} + 36 \text{ руб.} = 1848,08 \text{ руб.}$

6.2.6 Расчет прочих расходов

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

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам} + C_{нп}) \cdot 0,1 \quad (6.11)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{\text{проч}} = (231 + 97\,015,70 + 29\,104,71 + 532,08 + 1848,08) \cdot 0,1 = 12\,873,16 \text{ руб.}$$

6.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

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

Таблица 6.7 – Смета затрат на разработку проекта

| Статья затрат | Условное обозначение | Сумма, руб. |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Материалы и покупные изделия | $C_{\text{мат}}$ | 231 |
| Основная заработная плата | $C_{\text{зп}}$ | 97 015,70 |
| Отчисления в социальные фонды | $C_{\text{соц}}$ | 29 104,71 |
| Расходы на электроэнергию | $C_{\text{эл.}}$ | 532,08 |
| Амортизационные отчисления | $C_{\text{ам}}$ | 1848,08 |
| Непосредственно учитываемые расходы | $C_{\text{нр}}$ | - |
| Прочие расходы | $C_{\text{проч}}$ | 12 873,16 |
| Итого: | | 141 604,73 |

Таким образом, расходы на разработку составили $C = 141\,604,73$ руб.

6.2.8 Прибыль

Примем прибыль в размере 5 - 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 28 320,95 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

6.2.9 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли:
 $(141\,604,73 + 28\,320,95) \cdot 0,18 = 30\,586,62$ руб.

6.2.10 Цена разработки НИР

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

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 150\,689,22 + 29\,104,71 + 30\,586,62 = 201\,296,06 \text{ руб.}$$

6.3 Оценка экономической эффективности проекта

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

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

7 Социальная ответственность

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

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

Работа проводится в 113А аудитории 10 корпуса ТПУ. Для проведения работы выделено рабочее место, включающее рабочий стол размером 150*80 см, высотой 87 см, а также персональный компьютер с установленным на нем программным обеспечением (рисунок 7.1).



Рисунок 7.1 – Фото учебного помещения, в котором производится работа

7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Все виды работ, проводимые в лабораторном комплексе (вычислительном центре), относятся к классу 2 – допустимые условия труда, при которых уровень вредных факторов трудового процесса не превышает показателей, 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, контролирующие соблюдение законодательства и нормативных правовых актов в исследуемой в работе области: 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)).

Экологический контроль является одним из наиболее важных звеньев организационно-правового механизма охраны окружающей среды. Экологический контроль – система мероприятий, направленная на предотвращение, выявление и пресечение нарушения законодательства в области охраны окружающей среды. Общественный экологический контроль проводится профсоюзными и общественными организациями и объединениями [16].

7.1.1 Организационные мероприятия обеспечения безопасности рабочей зоны

При выполнении выпускной квалификационной работы основная нагрузка приходится на центральную нервную систему, так как происходит умственная

работа. При проектировании необходимо организовать комфортные условия для полноценной работы.

Рабочее место должно отвечать требованиям техники безопасности. Рабочее место - это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

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

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;
- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Главными элементами рабочего места являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также

необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

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

Согласно информации на сайте «Интерактивная карта НИ ТПУ» [17], общая площадь аудитории 113А составляет 39.8 м² на 12 рабочих мест. Средняя площадь на одно рабочее место составляет:

$$S_{APM} = \frac{S_{ауд}}{N_{APM}} = \frac{39.8}{12} = 3.3 \text{ м}^2, \quad (7.1)$$

где: $S_{арм}$ – средняя площадь на одно автоматизированное рабочее место, $S_{ауд}$ – общая площадь аудитории, $N_{АРМ}$ – количество рабочих мест, предусмотренных на аудиторию. Средняя площадь пространства на одного учащегося в аудитории занижена на 27% от необходимой нормы.

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

7.2 Производственная безопасность

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

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

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

Таблица 7.1 – Опасные и вредные факторы при разработке нечеткого регулятора

| Источник фактора, наименование видов работ | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74) | | Нормативные документы |
|--|---|--|--|
| | Вредные | Опасные | |
| Работа за персональным компьютером | <ol style="list-style-type: none"> 1. Повышенный уровень шума; 2. Несоответствующий микроклимат рабочего помещения; 3. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 4. Недостаточная освещенность рабочего помещения; | <ol style="list-style-type: none"> 1. Электрический ток | <ol style="list-style-type: none"> 1. Предельно допустимые значения уровня шума установлены ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности; 2. Параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96; 3. Превышение показателей электромагнитного излучения регламентируются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. 4. Освещенность регламентируется СанПиН 2.2.4.548 – 96 5. Требование правил безопасности при работе с электрическим током контролируются ГОСТ 12.1.019-85 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. |

Далее более подробно рассмотрим данные опасные и вредные факторы.

7.2.1 Отклонение параметров микроклимата

Требования к параметрам микроклимата определяются согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [18].

Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (значительные или незначительные тепловыделения). Допустимые параметры микроклимата, приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Микроклимат производственных помещений

| Период года | Температура воздуха, °С | Скорость движения воздуха, м/с | Относительная влажность воздуха, % |
|-------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Холодный | 22-24 | до 0.1 | 40-60 |
| Теплый | 23-25 | 0.1-0.2 | 40-60 |

В помещении, где производится работа средняя температура в период проведения работ составила 23.1°С, что является нормальным показателем. Влажность воздуха также поддерживается в заданных в таблице пределах. Таким образом, нет необходимости в принятии дополнительных мер для создания благоприятных условий.

7.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

По СанПиН 2.2.4.548 – 96 рабочее место должно иметь естественное и искусственное освещение [18]. Согласно СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых

и общественных зданий» требования к освещению рабочих мест, оборудованных персональным компьютером, показаны в таблице 7.3

Таблица 7.3 – Требования к освещению рабочих мест с ЭВМ

| | |
|--|-----------------------|
| Освещенность на рабочем месте | 300-500 лк |
| Освещенность на экране ПК | ≤ 300 лк |
| Блики на экране | ≤40 кд/м ² |
| Прямая блескость источника света | 200 кд/м ² |
| Показатель ослепленности | ≤20 |
| Показатель дискомфорта | ≤15 |
| Отношение яркости: Между рабочими поверхностями | 3:1 – 5:1 |
| Между поверхностями стен и оборудования | 10:1 |
| Коэффициент пульсации | ≤5% |

Определим необходимое количество светильников для данного помещения согласно «руководство по эксплуатации» светильников TechnoLUX TLC418 (люминесцентные лампы 18 Вт, в одном светильнике 4 лампы $\Phi_{л} = 1150$ лм), установленных в аудитории [19]:

$$N = \frac{100 \cdot E \cdot S \cdot K_3}{U \cdot \eta \cdot \Phi_{л}} = \frac{100 \cdot 500 \cdot 39.8 \cdot 1.25}{71 \cdot 4 \cdot 1150} = 7.61 \quad (7.2)$$

где: N – минимально необходимое количество светильников,

E – освещенность помещения согласно СП 52.13330.2011 (характеристика зрительной работы – средней точности; IV разряд зрительной работы, подразряд Б; освещенность – 500 Лк) [20],

S – площадь помещения,

K_3 – коэффициент запаса (константа, принимаемая в расчетах 1.25),

U – коэффициент использования помещения (для офисных помещений с подвесными потолками белого цвета равен 71),

n – количество ламп в светильнике,

$\Phi_{\text{л}}$ – световой поток одной лампы.

Так как в аудитории 113А установлено 12 светильников, то из формулы (7.2) видно что, количество светильников в помещении достаточно не только для учебных и исследовательских, но и более точных работ, требующих хорошего освещения.

7.1.3 Повышенный уровень шума

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

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

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

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

Стандарт ГОСТ 12.1.003-83 [21] распространяется на технологическое оборудование, машины и другие источники шума, которые создают в воздушной среде все виды шумов. Предельно допустимые нормы уровня шума для рабочих

мест в конструкторских бюро и лабораториях для теоретических работ приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах

| Вид трудовой деятельности, рабочее место | Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | | | Уровни звука и эквивалентного звука (в дБА) |
|--|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|---|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 63 | |
| Проектирование и программирование | 71 | 61 | 54 | 49 | 45 | 42 | 40 | 28 | 71 | 50 |

Уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены ПЭВМ, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами, а также возможно использование средств индивидуальной защиты (наушники, беруши).

7.1.4 Повышенные уровни электромагнитного поля

При работе компьютера вокруг него образуется электромагнитное поле, деионизирующее окружающую среду, что делает воздух сухим, слабо ионизированным. Согласно СанПиН 2.22.542-96 [18] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг монитора по электрической составляющей должна быть не более: в диапазоне частот 5 Гц ÷ 2 кГц – 25 В/м; в диапазоне частот 2 кГц ÷ 400кГц – 2,5 В/м.

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 приведены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Параметры неионизирующих электромагнитных излучений

| Наименование параметров | Допустимое значение |
|---|------------------------------|
| <p>Напряжённость электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть не более:</p> <p>в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;</p> <p>в диапазоне частот 2 – 400 кГц.</p> | <p>25 В/м</p> <p>2.5 В/м</p> |
| <p>Плотность магнитного потока должна быть не более:</p> <p>в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;</p> <p>в диапазоне частот 2 – 400 кГц.</p> | <p>250 нТл</p> <p>25 нТл</p> |
| <p>Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать:</p> | <p>500 В</p> |

Возможные способы защиты от ЭМП [22]:

- использование жидкокристаллических мониторов, 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 и увеличение количества перерывов в работе.
- применение ионизаторов воздуха для увеличения количества легких отрицательных ионов в воздухе.

7.1.5 Электрический ток

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

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с компьютером и контроллером «SIMATIC S7-300» в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного соприкосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

В помещении используются приборы, потребляющие напряжение 220В переменного тока с частотой 50Гц. Разработка связана с использованием следующих электроприборов: компьютером (дисплей, системный блок, манипулятор «мышь» и клавиатура), контроллером «SIMATIC S7-300» и принтером.

Согласно с СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03 [23] 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 ГОСТ 12.1.019–85 [24].

7.2 Экологическая безопасность

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

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

При завершении срока службы ПК, их можно отнести к отходам электронной промышленности. Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

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

7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов.
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Причинами возникновения пожара могут быть:

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

В лаборатории причинами возникновения пожара могут стать неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

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

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, т.к. в помещении находятся бумажные документы и

справочная литература. Следовательно, использование открытого нагревательного прибора неприемлемо.

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

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

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

При возникновении пожара здание необходимо покидать в соответствии с планом эвакуации, которые размещены на каждом этаже [25].

Заключение

В ходе выполнения работы были проанализированы основные виды корректирующих устройств. В качестве корректирующего устройства было выбрано псевдолинейное устройство с фазовым опережением, так как у него отсутствует жесткая связь между амплитудными и фазовыми характеристиками, а эквивалентные амплитудно-фазовые характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала и являются только функциями частоты. Свойства выбранного КУ были проанализированы в системах автоматического управления с объектами второго порядка. Моделирование показало, что улучшение качества САУ зависит от параметров корректирующего устройства.

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

Программная реализация псевдолинейного регулятора произведена в программном пакете STEP 7 на языке программирования FBD.

Conclusion

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

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

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

The software implementation of the pseudo-linear controller is made in the STEP 7 software package in the FBD programming language.

Список использованных источников

- 1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
- 2 Юревич Е.И. Теория автоматического управления. М.: Энергия, 1969 – 375 с.
- 3 Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
- 4 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 287 с.
- 5 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.
- 6 Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 421 с.
- 7 Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1988. - 256 с.
- 8 Топчиев Ю.И. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления – М.: Машиностроение, 1971. – 464с.
- 9 Хлыпало Е.И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. - Л.: Энергоиздат, 1982. – 271 с.
- 10 Михайлов В.С., Харченко Р.Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 04(80). – С. 199 – 204.
- 11 Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети: Монография. – М., ФИЗМАТЛИТ, 2001 – 221 с.

- 12 Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВПетербург, 2005 - 736 с.
- 13 Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радіоматор, 2008. -972с.
- 14 Контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 – Симекс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://simecs.ru/catalog/siemens/tekhnika-avtomatizatsii/kontrollery-simatic-s7-300/>
- 15 Программируемые логические контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://progressavtomatika.ru/siemens-simatic-s7-300.php>
- 16 В. И. Жуков, Л. Н. Горбунова. Защита и безопасность в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие / Сибирский федеральный университет (СФУ). — Москва; Красноярск: Инфра-М Изд-во СФУ, 2014. — 392 с.: ил. — Высшее образование. Бакалавриат. — Библиогр.: с. 384- 387.
- 17 Интерактивная карта учебных корпусов ТПУ [Электронный ресурс]. URL: www.map.tpu.ru.
- 18 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 19 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
- 20 СП 52.13330.2011. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95.
- 21 ГОСТ 12.0.003-74. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

22 Авраамов, Ю. С. Защита человека от электромагнитных воздействий / Ю. С. Авраамов, Н. Н. Грачев, А. Д. Шляпин. — Москва: Изд-во МГИУ, 2002. — 232 с.: ил. — Это важно знать!. — Библиогр.: с. 227-231.

23 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

24 ГОСТ 12.1.019-85. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

25 ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий.

Приложение А
(Обязательное)

Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением

Таблица А.1 – Данные о характеристиках системы второго порядка при разных значениях параметров ОУ

| Тип системы | Изменяемый параметр T_2 (с) | Параметр КУ T (с) | Запас по фазе, φ_3 (град) | Запас по амплитуде, α_3 (Дб) | Время регулирования (с) | Перерегулирование (%) |
|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Без КУ | 2 | – | 1.6 | 91.2 | 7.1 | 16.1 |
| | 5 | – | 2.6 | 86.2 | 15.3 | 26.9 |
| | 8 | – | 2.7 | 73.8 | 28.1 | 35.0 |
| | 12 | – | 2.9 | 63.1 | 43.0 | 42.1 |
| С последовательным КУ | 2 | 0.05 | 1.6 | 91.2 | 7.2 | 3.4 |
| | 5 | 0.09 | 2.6 | 86.2 | 14.9 | 5.2 |
| | 8 | 0.24 | 2.7 | 73.8 | 31.2 | 9.3 |
| | 12 | 0.32 | 2.9 | 63.1 | 44.8 | 16.1 |
| С параллельным КУ | 2 | 0.05 | 1.6 | 91.2 | 7.2 | 3.5 |
| | 5 | 0.08 | - | 80.1 | 16.3 | 5.6 |
| | 8 | 0.11 | - | - | 29.2 | 9.0 |
| | 12 | 0.18 | 3.0 | - | 42.7 | 16.6 |

Приложение Б (Обязательное)

**Текст программы работы системы автоматического управления (САУ) с
корректирующим устройством (КУ) на языке FBD в STEP 7**

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"

Comment:

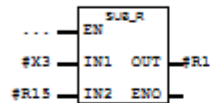
Network 1 : Title:

Comment:



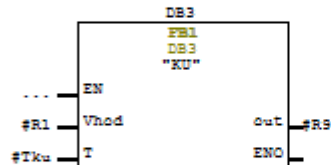
Network 2 : Title:

Comment:



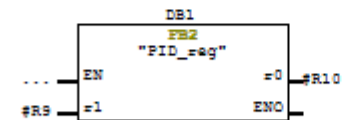
Network 3 : Title:

Comment:



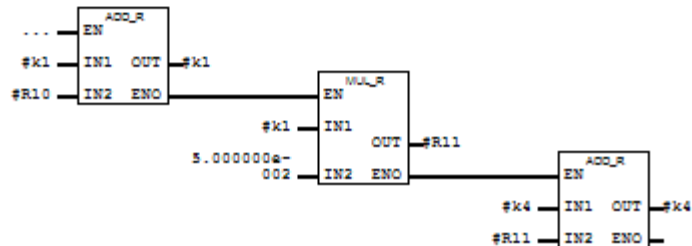
Network 4 : Title:

Comment:



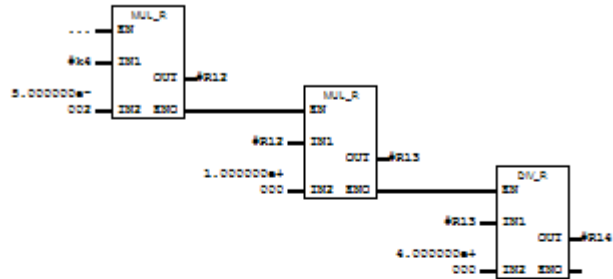
Network 5 : Title:

Comment:



Network 6 : Title:

Comment:



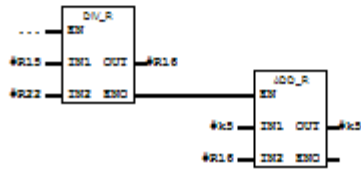
Network 7 : Title:

Comment:



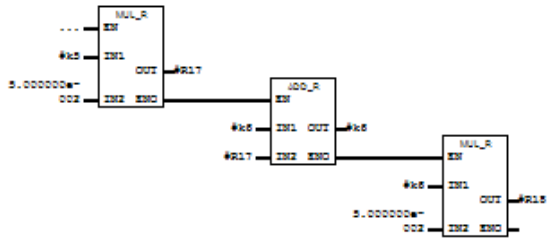
Network 8 : Title:

Comment:



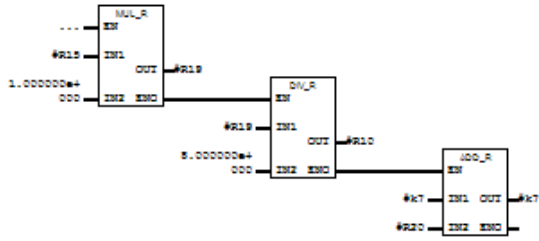
Network 9 : Title:

Comment:



Network 10 : Title:

Comment:



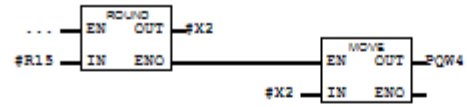
Network 11 : Title:

Comment:



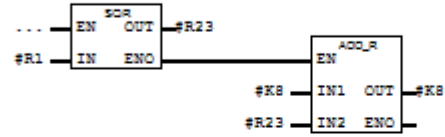
Network 12 : Title:

Comment:



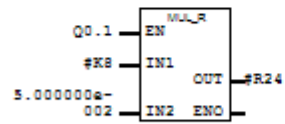
Network 13 : Title:

Comment:



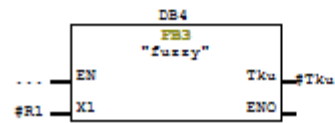
Network 14 : Title:

Comment:



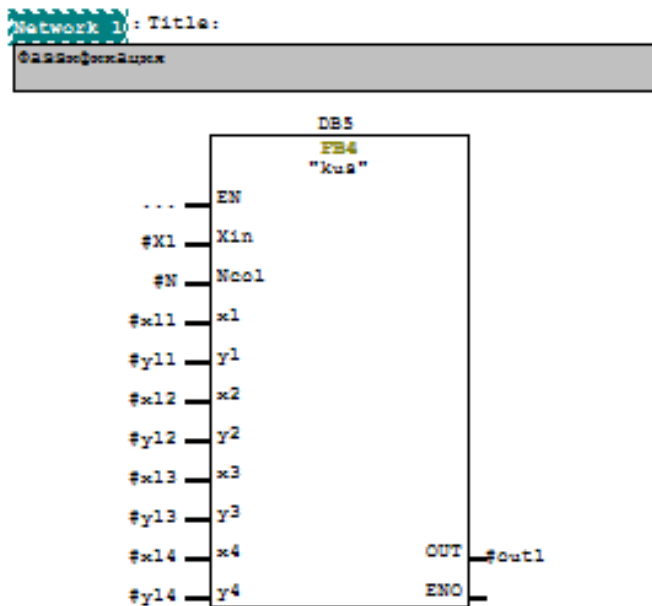
Network 15 : Title:

Comment:



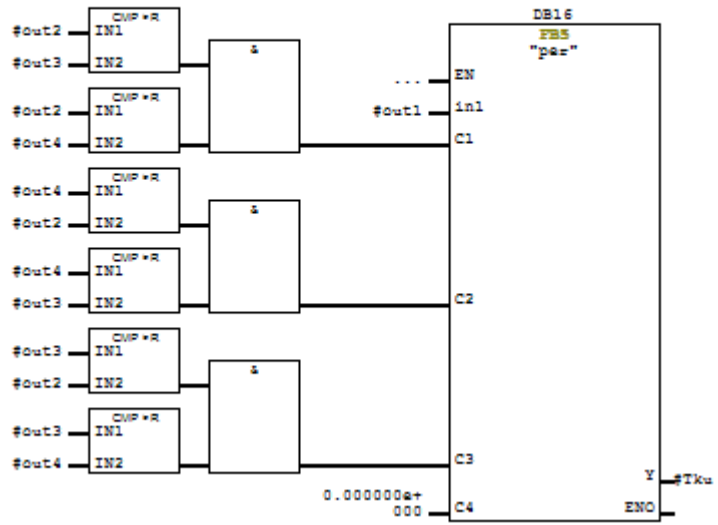
Приложение В (обязательное)

Текст программы работы нечеткой логики корректирующего устройством на языке FBD в STEP 7



Network 3: Title:

Comment:



Приложение Г
(Справочное)
Building regulators based on fuzzy logic

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|---------------|------------------------|----------------|-------------|
| 8AM81 | Вебер Максим Яковлевич | | |

Руководитель ВКР

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

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

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

G.1 Building regulators based on fuzzy logic

In current times, in connection with the development of the computational capabilities of technical devices, research in the field of fuzzy logic with respect to the management of technical objects has resumed. Technologies that use fuzzy logic are basically widely applied in the management of technical systems: automatic control of dam gates at hydroelectric power station (Tokio Electric Pow.), pointing TV cameras at sports events (Omron), efficient and stable control of automobile engines (Nissan), control of economical speed of cars, etc.; and to simplify everyday life: optimization of gasoline consumption in cars (NOK, Nippon Denki Tools), increasing the sensitivity and efficiency of Elevator management (Fujitec, Hitachi, Toshiba), optimized planning of bus schedules (Toshiba, Nippon-System, Keihan-Express).

Control based on fuzzy logic uses suggestions in the form of rules in order to control one or another process. A regulators based on fuzzy logic can have an unlimited number of input signals and is based on the knowledge of an «expert», in contrast to traditional control systems (for example, PID-controllers), it can be synthesized without using specific knowledge about the control object. This type of controller is well established in the management of complex nonlinear systems, as well as systems with nonlinear external perturbations.

G.1.1 Concept of fuzzy set of its characteristic and its basic properties

Concept set understand set of elements having some common property. Thus any element beforehand axiomatic or belongs to the given set, or does not belong. However, as the practice applied shows researches similar “Boolean” a principle in overwhelming majority of cases does not answer processes proceeding in real complex a system that is results in unjustified idealization of the mathematical description of such systems. Differently, language of usual sets appears insufficiently flexible for formalization of elements of uncertainty inherent in real systems.

The concept of fuzzy set is based on the assumption that any element only somewhat belongs to the given set, therefore one of the basic ways of the mathematical description of fuzzy set is the definition of a degree of such accessory by some number, for example from an interval $[0,1]$. Thus the borders of an interval that is 1 and 0, mean, accordingly, “belongs” and “does not belong” [1], [20].

Definition 1. Let E – universal set, x – element E , and R – some property. The usual (precise) subset A of universal set E , which elements satisfy to property R , is determined as set of the ordered pairs:

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

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

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

Definition 2. The fuzzy set A is a normal set if its height $\sup_{x \in E} \mu_A(x)$ is equal to 1, i.e. the upper limit at least of one of its membership function is equal to 1. Fuzzy set called subnormal if $\sup_{x \in E} \mu_A(x) < 1$.

Definition 3. The fuzzy set is called an empty set if $\forall x \in E, \mu_A(x) = 0$. A nonempty set can be normalized according to the formula:

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

Definition 4. The fuzzy set is called a unimodal set if at least for one of the “ x ” following equality holds: $\mu_A(x) = 1$.

Definition 5. Subset with membership functions with values $\mu_A(x) > 0$ is called a carrier of the fuzzy subset “A”, i.e. $A = \{x / x \in E, \mu_A(x) > 0\}$.

Definition 6. Elements $x \in E$ that are corresponded to membership functions $\mu_A(x) = 0,5$ is called transition points of the set A.

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

Definition 7. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E”. It is claimed that A contains “B” if $\forall x \in E \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$. This operation is called an inclusion operation and indicated like $A \subset B$. The term domination is sometimes used that is in a case, when $A \subset B$, speak that B dominates above A.

Definition 8. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E”. It is claimed that “A” is equal “B” if $\forall x \in E \mu_A(x) = \mu_B(x)$. Is designated as $A = B$.

Definition 9. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E” and $M = [0,1]$. “A” and “B” complement each other if $\forall x \in E \mu_A(x) = 1 \Leftrightarrow \mu_B(x)$. This operation is called a complement and indicated like $B = \bar{A}$ or $\bar{A} = B$. Hence it’s clear that $\bar{\bar{A}} = A$ (a complement is defined for $M = [0, 1]$, but it’s possible to define it for any orderly M).

Definition 10. The association of “A” and “B” fuzzy sets is the smallest fuzzy subset including both “A” and “B” sets with the membership function $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. It’s indicated like $A \cap B$.

Definition 11. The association of “A” and “B” fuzzy sets is the smallest fuzzy subset including both “A” and “B” sets with the membership function $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$. It’s indicated like $A \cup B$.

Definition 12. The difference of “A” and “B” fuzzy sets is a $A \ominus B = A \cap \bar{B}$ fuzzy set with the membership function $\mu_{A \ominus B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}} = \min(\mu_A(x), 1 \ominus \mu_B(x))$.

Definition 13. The disjunctive sum of “A” and “B” fuzzy sets is $A \oplus B = (A \ominus B) \cup (B \ominus A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$ fuzzy set with function: $\mu_{A \oplus B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 \ominus \mu_B(x)); \min(1 \ominus \mu_A(x), \mu_B(x)))$.

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

- commutative: $A \cap B = B \cap A$ and $A \cup B = B \cup A$;
- associativity: $(A \cap B) \cap C = (B \cap A) \cap C$ and $(A \cup B) \cup C = (B \cup A) \cup C$;
- idempotency: $A \cap A = A$ and $A \cup A = A$;
- distributivity: $(A \cap (B \cup C)) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ и

$$(A \cup (B \cap C)) = (A \cup B) \cap (A \cup C);$$

- $A \cup \otimes = A$, where \otimes – empty set that is $\mu_{\otimes}(x) = 0 \quad \forall x \in E$;
- $A \cap \otimes = \otimes$;
- $A \cap E = A$, where E – universal set;
- $A \cup E = E$;
- De Morgan theorems: $\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$ and $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$.

In contrast to the crisp sets for fuzzy sets in general: $A \cap A \neq \otimes$, $A \cup A \neq E$.
 .Comment: The above-mentioned operations with fuzzy sets are based on max and min operations using. The theory of fuzzy sets deals with generic guidance and parameterized intersection operators («and»), union («or») and additions («no»). One of the approaches to the intersection, complement and association operators is a class of triangular norms and conorms, which are determined by these operators.

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

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

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

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

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

Definition 14. Algebraic product of “A” and “B” fuzzy sets is a fuzzy set defined: $\forall x \in E, \mu_{A \times B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. It's indicated like $A * B$.

Definition 15. Algebraic sum of “A” and “B” fuzzy sets is a fuzzy set defined: $\forall x \in E, \mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \Leftrightarrow \mu_A(x) \times \mu_B(x)$.

There are following properties for product and sum operations:

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

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

- idempotency: $A \times A = A$ and $A + A = A$;

- distributivity: $A \times (B + C) = (A \times B) + (A \times C)$ and

$$A + (B \times C) = (A + B) \times (A + C);$$

- $A \times \bar{A} = \otimes, A + \bar{A} = E.$

The remark: At sharing operations of association, crossing, product and the sums are carried out the following properties:

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

Based on algebraic product operation there is “A” fuzzy set exponentiation operation defined. It’s indicated like A^α , where α - number positive. Fuzzy set A^α is defined by membership function $\mu_A^\alpha = \mu_A^\alpha(x)$. A special cases of exponentiation are concentrating ($CON(A) = A^2$) and stretching ($DIL(A) = A^{0.5}$) operations, which are used in work with linguistic uncertainties (figure G.1).

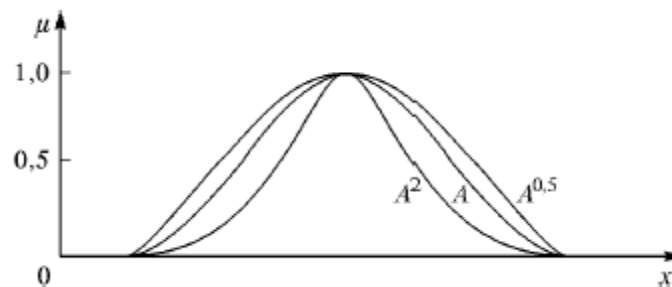


Figure G.1 – Illustrations to the concept of concentration (sealing) and stretching operations

G.1.2 Fuzzy logic and its basic properties (fuzzy conclusions)

The concept of logic can be defined as the analysis of different methods of reasoning. In the study of these methods the logic takes shape in the first place, rather than the content of the arguments in those or other considerations. The logic doesn’t care

whether the individual inclusions true or false. The important thing is, it follows from the truth of the condition the truth of the conclusion or not [14, 15].

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

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

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

.....

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

where x – input parameter; y-output parameter (calculated using base of rules on input parameter value); “A” and “B” – membership functions defined on x and y. Let’s consider more detailed explanation below.

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

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

where « \rightarrow » stands for fuzzy implication.

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

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

where “ \circ ” – convolution operation.

Implication and composition operations of the fuzzy sets algebra can be represented in different ways. You should note that the final result will be different too. However, the general logical output is consistently implemented for the following four steps [13]:

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

Mamdani algorithm

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

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

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

where x and y – input parameters; z – output parameter; $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – specified membership functions and explicit value z_0 need to be determined based on the above information and explicit values x_0 и y_0 .

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

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

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

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \quad (\text{G.5})$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),$$

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

$$C_1'(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)), \quad (\text{G.6})$$

$$C_2'(z) = (\alpha_2 \wedge C_2(z)).$$

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

$$\varphi_{\Sigma}(z) = C(z) = C_1'(z) \vee C_2'(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z)). \quad (\text{G.7})$$

4. Defuzzification stage (to determine z_0): it is a reduction to definition (for example, using centroid method) [12].

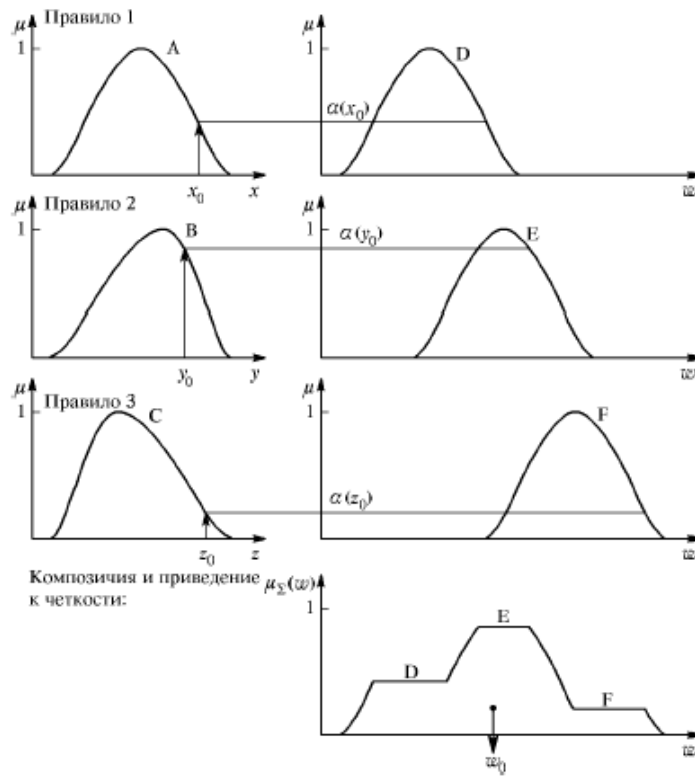


Figure G.2 – Mamdani algorithm illustration

Tsukamoto algorithm

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

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm
2. Logical output stage: firstly “clipping” levels for α_1 and α_2 are determined (like on Mamdani algorithm), then α_1 and α_2 are found for each of the initial rules by solving the following evaluations:

$$a_1 = C_1(z), a_2 = C_2(z), \tag{G.8}$$

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

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

$$z_0 = \frac{a_1 \cdot z_1 + a_2 \cdot z_2}{a_1 + a_2}. \quad (\text{G.9})$$

Larsen algorithm

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

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm
2. Logical output stage: firstly “clipping” levels for α_1 and α_2 are determined (like on Mamdani algorithm), then special fuzzy subsets are determined.

$$a_1 C_1(z), a_2 C_2(z). \quad (\text{G.10})$$

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

$$\varphi_{\Sigma}(z) = C(z) = (a_1 C_1(z)) \vee (a_2 C_2(z)). \quad (\text{G.11})$$

4. Defuzzification stage: it is a reduction to definition (like in algorithms considered above) [12].

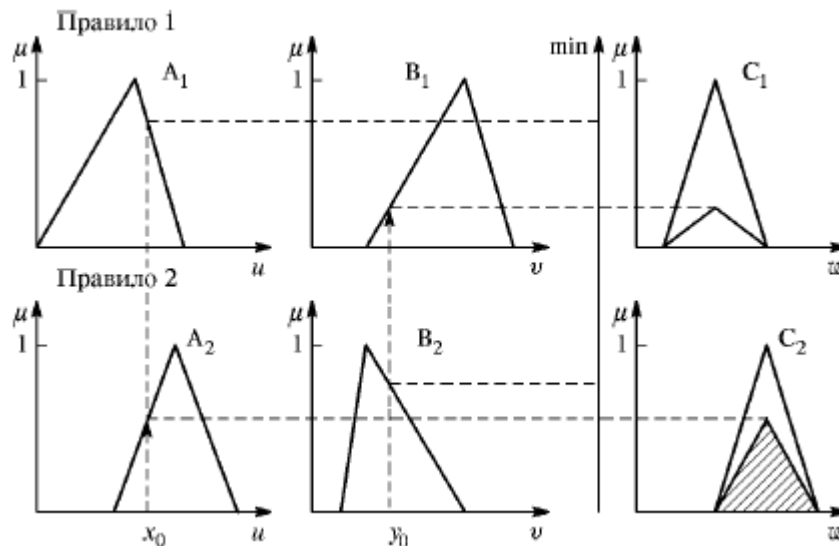


Figure G.3 – Larsen algorithm illustration

Simplified algorithm of the fuzzy output

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

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

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

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

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

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

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

$$z_0 = \frac{a_1 \cdot z_1 + a_2 \cdot z_2}{a_1 + a_2}. \quad (\text{G.12})$$

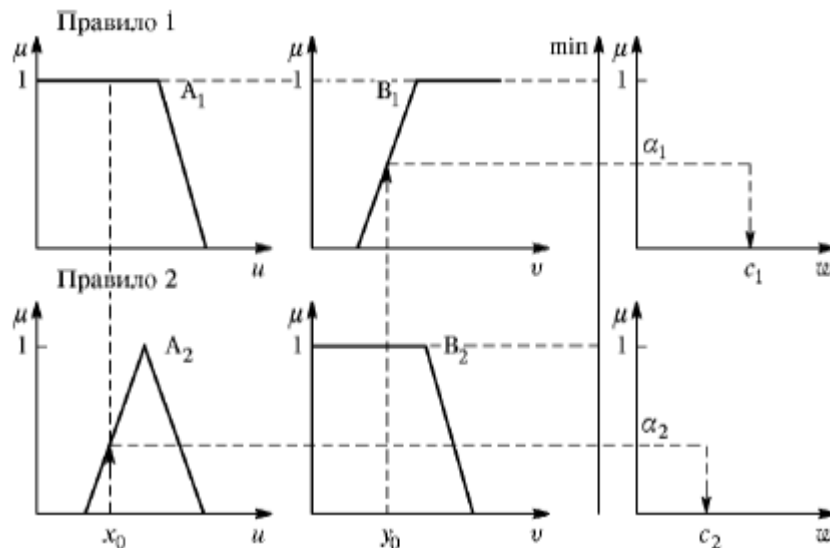


Figure G.4 – Simplified algorithm of the fuzzy output illustration

Приложение Д
(Обязательное)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ
РАБОТЫ «ИЗУЧЕНИЕ ПСЕВДОЛИНЕЙНОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ»**



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

Утверждаю

«__»_____ 2020 г.

М. Я. Вебер

Изучение псевдолинейного корректирующего устройства на основе нечеткой логики

Методические указания к выполнению лабораторной работы №__ по курсу
«_____» для студентов специальностей 27.04.04 «Управление в
технических системах»

Издательство
Томского политехнического университета
2020

УДК _____

ББК _____

A446

Вебер М. Я.

A446 Методические указания к выполнению лабораторной работы №__ по курсу «_____» для студентов специальностей 27.04.04 «Управление в технических системах»

М. Я. Вебер. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 43 с.

УДК _____

ББК _____

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделением автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники «___»
2020 г.

Руководитель ОАР

кандидат технических наук

_____ А.А. Филипас

Председатель учебно-методической

комиссии

Рецензент

Доцент, кандидат технических наук

Скороспешкин М.В.

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2020

© Вебер М.Я., 2020

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| <u>Содержание</u> | 134 |
| <u>1 Цель работы</u> | 135 |
| <u>2 Корректирующие устройства</u> | 136 |
| <u>2.1 Линейные корректирующие устройства</u> | 136 |
| <u>2.2 Нелинейные корректирующие устройства</u> | 138 |
| <u>2.3 Псевдолинейные корректирующие устройства</u> | 140 |
| <u>2.4 Критерий качества регулирования</u> | 142 |
| <u>3 Обзор блоков FBD пакета STEP 7, используемых в данной лабораторной работе</u> | 148 |
| <u>3.1 Обзор битовых логических команд, счетчиков, триггеров</u> | 148 |
| <u>3.2 Математические инструкции над числами с плавающей точкой</u> | 151 |
| <u>3.3 Функции преобразования</u> | 155 |
| <u>4 Структурная схема лабораторного стенда</u> | 157 |
| <u>5 Программа реализации системы автоматического управления с адаптивным двухканальным корректирующим устройством на языке программирования FBD в пакете STEP 7</u> | 157 |
| <u>6 Задание</u> | 173 |
| <u>7 Требования к содержанию отчета</u> | 174 |

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение псевдолинейного регулятора на основе нечеткой логики и создания программы работы системы автоматического управления данного регулятора на языке FBD в программном пакете STEP 7.

2 КОРРЕКТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

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

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

Все корректирующие устройства, применяемые в системах автоматического управления, можно разделить на линейные и нелинейные.

2.1 Линейные корректирующие устройства

Линейные корректирующие устройства имеют ряд достоинств и широко применяются для улучшения динамических свойств как линейных, так и нелинейных автоматических систем. Вместе с тем линейным корректирующим устройствам присущи и недостатки. К ним, в частности, следует отнести жесткую зависимость между амплитудными и фазовыми частотными характеристиками. Так, например, дифференцирующие фазоперебегающие цепи создают положительный сдвиг, но одновременно вносят ослабление в области низких частот, т. е. в области спектра полезного сигнала. Этим объясняется низкая помехоустойчивость дифференцирующих цепей. Интегрирующие корректирующие контуры подавляют высокие частоты, но при этом создают запаздывание колебаний по фазе, что приводит к ухудшению переходных

процессов и т. д. В то же время было бы желательно, чтобы корректирующие устройства создавали опережение по фазе без изменения амплитудной характеристики, подавляли высокие частоты без изменения фазовой характеристики, обеспечивали опережение по фазе и одновременно ослабляли высокие частоты. Эти задачи могут быть решены с помощью нелинейных корректирующих устройств.

Кроме указанных недостатков, линейные корректирующие устройства имеют ограниченные возможности в получении высоких показателей качества в автоматических системах. Например, если в линейной системе для повышения быстродействия (уменьшения времени установления t_v) увеличивать коэффициент усиления разомкнутой системы k_p , то это приводит к уменьшению запаса устойчивости, увеличению колебательности переходного процесса. Для иллюстрации сказанного на рисунке 1 приведены кривые 1 и 2 переходных процессов линейной САУ при коэффициентах усиления k_{p1} и k_{p2} соответственно ($k_{p2} > k_{p1}$).

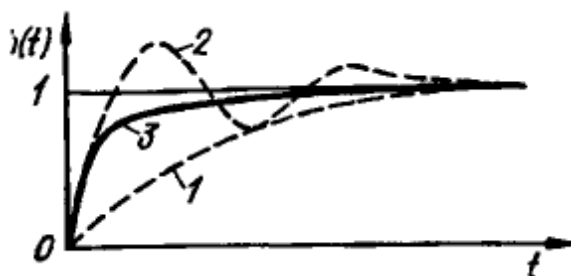


Рисунок 1 – Переходные процессы САУ при линейной (1 и 2) и нелинейной (3) коррекции.

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

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

2.2 Нелинейные корректирующие устройства

В результате применения нелинейной коррекции, может быть получен желаемый процесс, изображенный, например, на рисунке 1 кривой 3. Как видно из рисунка, он сочетает полезные свойства процессов 2 и 1: начальная часть процесса 3 совпадает с процессом 2 линейной системы, благодаря чему обеспечивается большое быстродействие системы, а окончание процесса 3 подобно окончанию процесса 1, т. е. является монотонным. Такой процесс может быть достигнут, например, изменением коэффициента усиления разомкнутой системы, k_p в зависимости от величины ошибки θ . При больших θ значение k_p должно быть большим, чтобы обеспечить быстрое уменьшение ошибки (начальный участок кривой 3), а по мере уменьшения θ значение k_p должно уменьшаться для завершения переходного процесса без перерегулирования. Такое изменение k_p может быть реализовано, например, с помощью простейшего последовательного нелинейного корректирующего устройства (рисунок 2, а). При больших значениях напряжения ошибки u_θ нелинейное сопротивление R_1 мало и поэтому коэффициент усиления цепи $k_1 = R_2 / (R_1 + R_2)$ велико. По мере уменьшения u_θ нелинейное сопротивление R_1 увеличивается, а коэффициент усиления k_1 уменьшается. Примерный график зависимости k_1 от u_θ изображен на рисунке 2, б. По такому же графику будет изменяться и коэффициент усиления системы k_p . Недостаток коррекции с помощью рассматриваемого корректирующего устройства состоит в том, что оно изменяет лишь k_p системы, не компенсируя при этом вредное влияние инерционностей ее элементов. Из-за этого получаются

малые значения k_p в установившихся динамических режимах, следовательно, большие динамические ошибки системы.

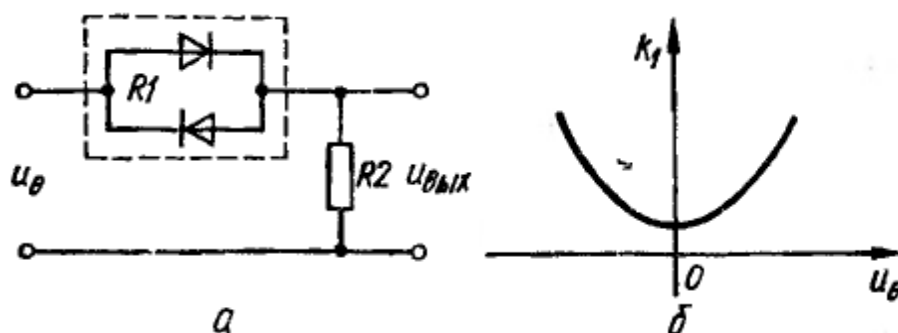


Рисунок 2 – Последовательное нелинейное корректирующее устройство (а) и его характеристика $k_1 = f(u_\theta)$ (б).

С помощью нелинейных корректирующих устройств возможно удовлетворение повышенным требованиям к показателям качества САУ. Нелинейную коррекцию можно рассматривать как более общее средство коррекции, чем линейную коррекцию, которую можно отнести к частному случаю нелинейной коррекции. Построение оптимальных по быстродействию возможно только благодаря применению нелинейных устройств управления. С помощью нелинейных корректирующих устройств решается задача компенсации вредных естественных нелинейностей. Вместе с тем следует отметить, что нелинейная коррекция является более специализированной (менее универсальной) по отношению к внешним воздействиям. Нелинейная коррекция, выбранная для определенного класса внешних воздействий, может оказаться малоэффективной или даже вредной при других воздействиях (режимах работы системы). Поэтому при широком диапазоне внешних воздействий может оказаться лучшей линейная коррекция. Следует отметить, что общей методики синтеза нелинейных корректирующих устройств в настоящее время нет. Приходится прибегать к применению частных приемов и схем нелинейных корректирующих устройств.

2.3 Псевдолинейные корректирующие устройства

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

В данной работе в качестве корректирующего устройства, на основе которого была разработана система автоматического управления, выбрано ПКУ с фазовым опережением. Пример структурной схемы, реализующей фазовое опережение без изменения амплитуды, представлена на рисунке 3.

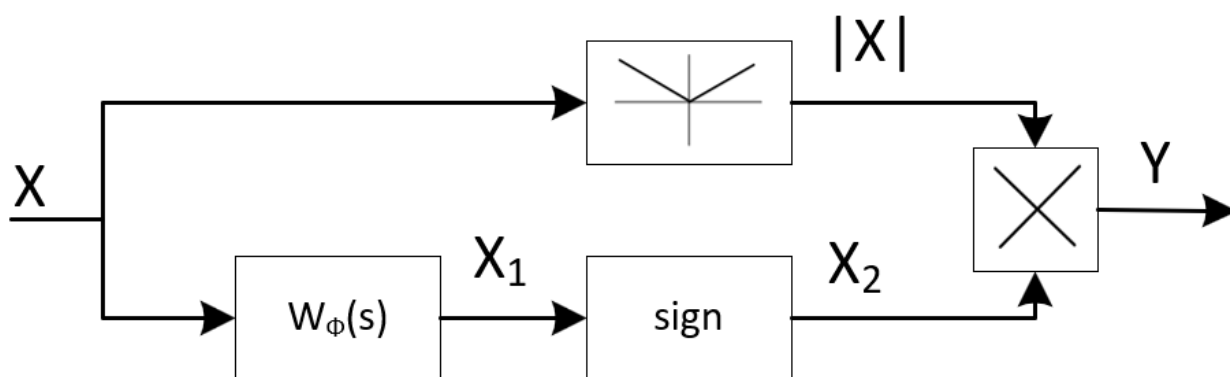


Рисунок 3 – Схема КУ с фазовым опережением

Из рисунка видно, что схема представляет собой эквивалентную схему звена переменной структуры [11], в которой несколько изменена логическая часть, а операция сложения сигналов разного знака заменена на произведение модуля

сигнала $|X|$ и на функцию знака $sign(X_1)$, где X_1 – выход линейного фильтра $W_\phi(s)$, создающего фазовое опережение.

Характерным свойством такого звена при исследовании его методом гармонической линеаризации проявляется в независимости частоты от амплитуды входного сигнала. Это обстоятельство позволяет рассматривать звено переменной структуры как псевдолинейное.

Момент изменения знака коэффициента усиления определяется на характеристике точкой C_1 , положение которой зависит от значения α , и связано с ним соотношением:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \sin \alpha. \quad (1)$$

Положение точки C_2 , в свою очередь, определяется амплитудой входного сигнала $x = A \sin \omega t$, т.е. $OC_2 = A$. При возрастании α точка C_1 сближается с точкой C_2 и сливается с ней при значении $\alpha = \frac{\pi}{2}$. При дальнейшем увеличении α (от $\frac{\pi}{2}$ до π) движение точки C_1 происходит в обратную сторону, и ее положение определяется соотношением

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \cos \alpha. \quad (2)$$

Изменение частоты ω при неизменных параметрах линейного фильтра W_ϕ влияет на вид характеристики нелинейности.

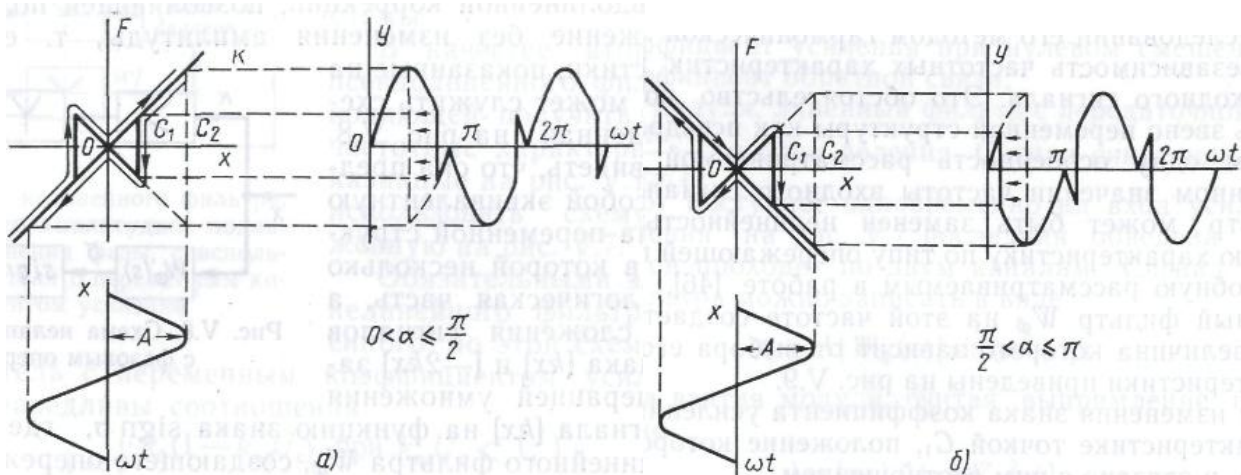


Рисунок 4 – Нелинейные характеристики: а – при фазовом опережении до 90° ;

б – при фазовом опережении от 90° до 180°

Независимость коэффициентов линеаризации a и b от амплитуды входного сигнала подтверждается на рисунке 4. Зависимость от частоты выражается в разбиении интервала интегрирования $(0, \pi)$ при их вычислении на подынтервала $(0, \alpha)$ и (α, π) , граница между которыми, определяемая значением α , меняется при изменении частоты.

Данный вид корректирующих регуляторов зачастую применяют в системах управления, где для улучшения качества переходных процессов требуется вводить фазовое опережение с одновременным подавлением амплитуды входного сигнала.

2.4 Критерий качества регулирования

Устойчивость является необходимым, но недостаточным условием работоспособности линейной системы автоматического регулирования.

Качество работы любой системы регулирования приходится оценивать по некоторым свойствам системы, проявляющимся при различных типовых воздействиях. Зачастую качество регулирования определяется в установившемся режиме в совокупности с точностью и качеством переходных процессов.

Для оценки качества регулирования обычно используют ступенчатое входное воздействие и ряд критериев для описания формы переходного процесса.

Различают косвенные и прямые оценки качества системы. Среди прямых и косвенных также различают статические и динамические, где статические оценки характеризуют установившийся режим, а динамические – переходный процесс.

Прямые оценки качества находятся по переходной характеристике непосредственно по каналу управления или возмущения (рисунок 5).

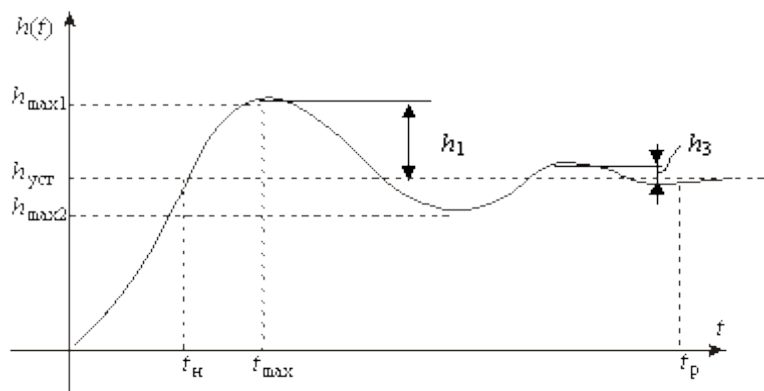


Рисунок 5 – Переходная характеристика

К основным прямым оценкам качества относят:

- время регулирования (t_p) – время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее, чем на заранее заданное значение q , где q - точность регулирования. Значение q выбирают обычно равным 5 %;
- перерегулирование (σ) – разность максимального значения h_{max1} переходной характеристики и установившимся значением $h_{уст}$, выраженная в процентах:

$$\sigma = \frac{|h_{уст} - h_{max1}|}{h_{уст}} 100\%; \quad (3)$$

- время достижения первого максимума (t_{max});

- время нарастания (t_n) – промежуток времени, за который на нарастающем фронте импульса уровень изменяется от низкого опорного значения (10%) до высокого опорного значения (90%);
- число колебаний (n), которые возникают в системе за время регулирования;
- декремент затухания – количественная оценка интенсивности затухания колебательности переходного процесса системы:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_3}{h_1}. \quad (4)$$

Среди косвенных оценок наибольшее распространение получили интегральные оценки. Существует две вида интегральной оценки:

- линейная интегральная оценка определяется следующим выражением:

$$I_0 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y) dt, \quad (5)$$

где y - текущее значение рабочего параметра. Эта оценка может быть применена только при монотонных переходных процессах при отсутствии колебаний.

- квадратичная интегральная оценка применяется как при монотонных, так и при колебательных переходных процессах и определяется следующим соотношением:

$$I^2 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y)^2 dt. \quad (6)$$

Недостаток интегральной квадратичной оценки заключается в том, что различные по характеру переходные процессы могут иметь одну и ту же величину оценки.[13,14]

Для данной работы система второго порядка будет принимать желаемые показатели качества управления при времени регулирования системы равное 15 с. и перерегулировании до 10 %.

Для анализа свойств корректирующего устройства с фазовым опережением и объектом управления второго порядка следует рассмотреть схему следующей САУ:

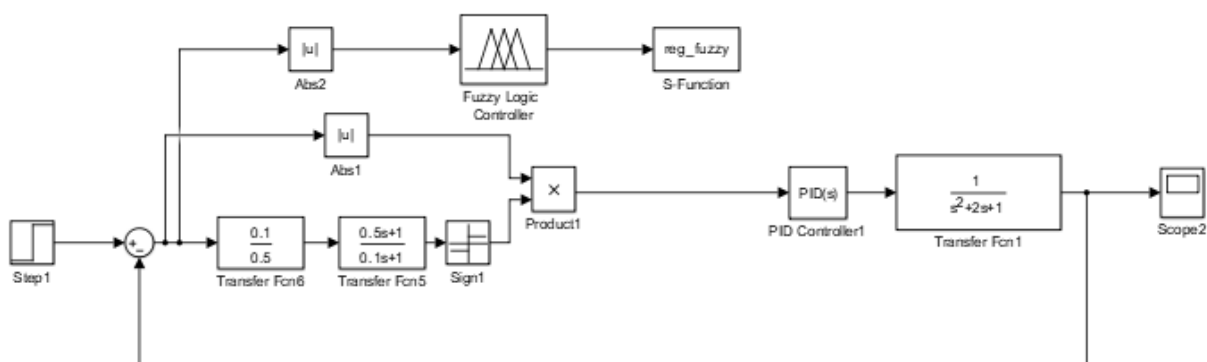


Рисунок 6 – Структурная схема САУ с КУ в среде Matlab

В виде устройства, которое будет управлять разработанным КУ, было решено использовать некий регулятор, который позволит реализовать блок нечеткого регулирования. ППП Matlab обладает таким пакетом расширения функциональности, он носит название Fuzzy Logic Toolbox.

Данная fuzzy-библиотека позволяет использовать графический интерфейс для проектирования нечетких систем. В частности, в данной работе с помощью этого инструмента формируются различные функции принадлежности. В работе используются trimf – треугольная и trapmf – трапецеидальная [16].

Значение интегрального квадратичного критерия в момент времени, когда динамическая ошибка системы становится равной нулю, будет формировать функцию принадлежности входных переменных I, а для формирования значения постоянной времени КУ необходима выходная переменная T. Произведя все эти действия для всего интервала изменений постоянной времени объекта управления

T2, можно сформировать функции принадлежности входной и выходной лингвистических переменных (таблица 1).

Таблица 1 – Данные для формирования функций принадлежности

| T_2 ОУ (с) | 2 | 5 | 8 | 12 |
|--------------|-------|------|------|------|
| I | 0.005 | 0.06 | 0.13 | 0.21 |
| $T_{КУ}$ (с) | 1.38 | 3.12 | 5.23 | 7.35 |

Используемые в данной работе функции принадлежности входной переменной и выходной переменной, составленные по таблице 3.1, представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

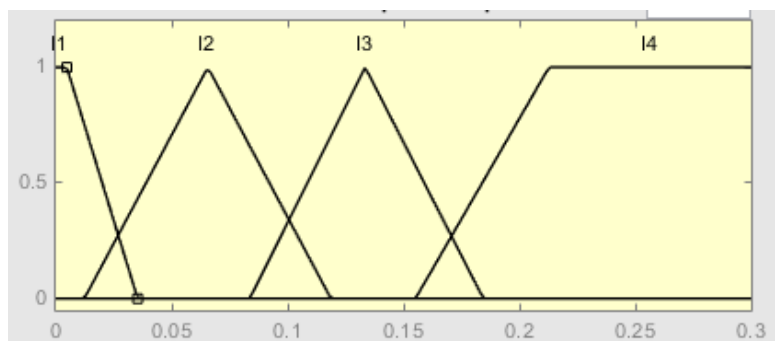


Рисунок 7 – Функции принадлежности входной переменной I

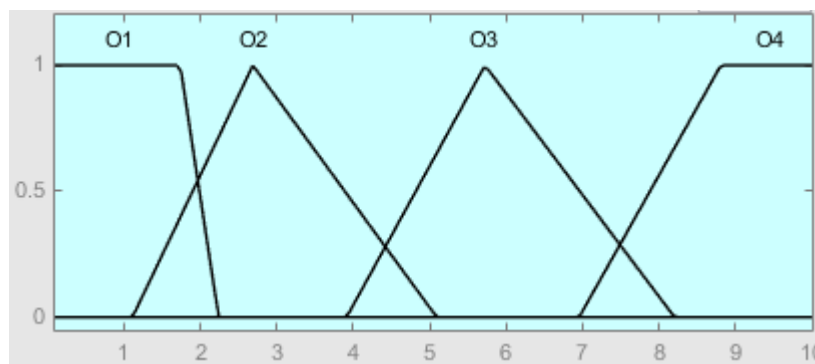


Рисунок 8 – Функции принадлежности входной переменной T

Подстройка корректирующего устройств осуществляется по следующей базе правил:

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

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

Правило 3: Если «I» – «среднее», тогда «T» – «среднее».

Правило 4: Если «I» – «большое», тогда «T» – «большое».

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

В блоке вывода нечетких преобразований является алгоритм «Mamdani». В этом алгоритме значение выходной переменной определяется методом центра массы фигуры.

3 ОБЗОР БЛОКОВ FVD ПАКЕТА STEP 7, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ДАННОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

3.1 Обзор битовых логических команд, счетчиков, триггеров

Битовые логические инструкции работают с двумя числами, 1 и 0. Эти две цифры образуют базис системы счисления, называемой двоичной системой. Цифры 1 и 0 называются двоичными цифрами (binary digits) или просто битами. При работе со схемами, использующими контакты и катушки, значение 1 означает активное состояние или протекание тока, а 0 – неактивное состояние или отсутствие протекания тока.

Битовые логические инструкции интерпретируют состояния сигналов 1 и 0 и комбинируют их по правилам булевой логики. Эти комбинации дают результат 1 или 0, называемый «результатом логической операции» (RLO).

Битовые логические операции предоставляют в распоряжение следующие функции:

- И, ИЛИ и исключаящее ИЛИ: эти операции опрашивают состояние сигнала и выдают результат, который или копируется в бит RLO, или комбинируются с ним.
- Присваивание и коннектор: эти операции присваивают значение RLO или сохраняют его временно.
- Следующие команды реагируют на RLO = 1:
 - Установить выход и Сбросить выход.
 - Триггер S/R и триггер R/S.
- Некоторые команды реагируют на нарастающий или падающий фронт, так что они могут исполнять следующие функции:
 - Увеличивать или уменьшать значение счетчика.
 - Запускать таймер.
 - Выдавать единичный выход.
- Остальные команды непосредственно влияют на RLO следующим образом:

- Отрицают RLO.
- Сохраняют RLO в бите двоичного результата слова состояния.

В данной лабораторной работе используются следующие битовые логические операции:

Логическая операция «И»

В случае команды «И» можно опросить состояния сигналов по двум или более адресам, указанным на входах блока «И». Логическая операция «И» выдает на выходе 1 только тогда, когда все входные контакты имеют состояние равным 1. Если команда «И» является первой в цепи логических операций, то она сохраняет результат опроса состояния сигнала в бите RLO. Каждая команда «И», не являющаяся первой в цепи логических операций, комбинирует результат опроса состояния сигнала со значением, хранящимся в бите RLO. Эти значения комбинируются в соответствии с таблицей истинности для «И».

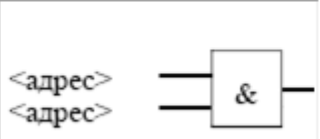
| Блок FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|---------------------------|------------------------|--|
|  | адрес | BOOL, TIMER COUNTER | I, Q, M, T, C, D, L | Адрес указывает бит, сигнал умножается |

Рисунок 9 – Описание логического блока «И»

Логическая операция «ИЛИ»

Операция «ИЛИ» позволяет опросить сигналы на двух и более входах. Если хотя бы на одном из входов сигнал равен 1 то на выходе мы получим 1. Если команда «ИЛИ» является первой в цепи логических операций, то она сохраняет результат опроса состояния сигнала в бите RLO. Каждая команда «ИЛИ», не являющаяся первой в цепи логических операций,

комбинирует результат опроса состояния сигнала со значением, хранящимся в бите RLO. Эти значения комбинируются в соответствии с таблицей истинности для «ИЛИ».

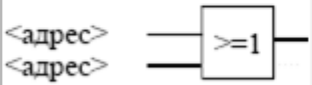
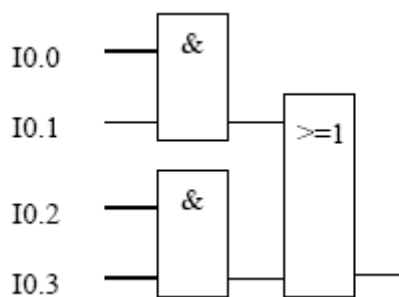
| Блок FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|--------------------------|---------------------------|--|
|  | адрес | BOOL TIMER COUNTER | I, Q, M, T, C, D, L | Адрес определяет сигнальное состояние опрашиваемого бита |

Рисунок 10 – Описание логического блока «И»

Логические операции «И перед ИЛИ» и «ИЛИ перед И»

Если операции «И перед ИЛИ» результат операции определяется в соответствии с таблицей истинности для «ИЛИ». Результат будет равен 1 если хотя бы одна операция «И» даст результат 1.

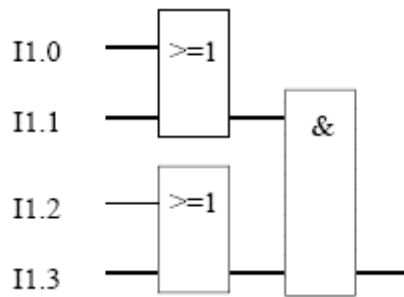


Результат будет равен 1 если хотя бы одна операция «И» даст результат 1. Из примера: на выходе Q3.1 будет записана 1 если:

- на входе I0.0 и I0.1 будет 1;
- на входе I0.2 и I0.3 будет 1;
- на входах I0.0 и I0.1 I0.2 и I0.3 будет сигнал 1.

Если операции «ИЛИ перед И» результат операции определяется в соответствии с таблицей истинности для «И». Результат будет равен 1 если все операции «ИЛИ» дадут результат равным 1

Результат будет равен 1 если все операции «ИЛИ» дадут результат 1. Из примера: на выходе Q3.1 будет записан 0 если: Результат хотя бы на одном блоке «ИЛИ» будет равен 0, если



на входе I0.0 и I0.1 будет 0 --> 0;
 на входе I0.2 и I0.3 будет 0 --> 0;
 на входах I0.0 и I0.1 I0.2 и I0.3 будет сигнал 0 --> 0.

Биты слова состояния те же, что и в операции «И перед ИЛИ».

3.2 Математические инструкции над числами с плавающей точкой

Можно использовать арифметические операции с плавающей точкой для выполнения следующих математических операций, использующих два 32–битных числа с плавающей точкой в формате IEEE:

- сложение;
- вычитание;
- умножение;
- деление.

32-битные числа с плавающей точкой в формате IEEE принадлежат к типу данных, известному как REAL (вещественные). Используя арифметику с плавающей точкой, Вы можете выполнять следующие операции с одним 32-битным числом с плавающей точкой в формате IEEE:

- образование абсолютного значения (ABS) числа с плавающей точкой;
- образование натурального логарифма (LN) числа с плавающей точкой;
- образование квадрата (SQR) или квадратного корня (SQRT) числа с плавающей точкой;
- образование экспоненциального значения числа с плавающей точкой (EXP) по основанию e (= 2.7182...);

- образование следующих тригонометрических функций угла, представленных в виде 32–битного числа с плавающей точкой:
 - образование синуса числа с плавающей точкой (SIN) и формирование арксинуса числа с плавающей точкой (ASIN);
 - образование косинуса числа с плавающей точкой (COS) и образование арккосинуса числа с плавающей точкой (ACOS);
 - образование тангенса числа с плавающей точкой (TAN) и образование котангенса числа с плавающей точкой (ATAN).

В данной лабораторной работе используются следующие математические инструкции:

Сложение чисел с плавающей точкой

Состояние сигнала 1 на входе EN (деблокировка входа) активизирует команду «Сложить числа с плавающей точкой» в функциональном плане (FBD). Эта команда складывает входы IN1 и IN2. Результат можно считать на OUT. Если один из входов или выход не являются числом с плавающей точкой, то биты OV и OS слова состояния равны 1, а ENO равно 0.

| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|---------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Первое слагаемое |
| | IN2 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Второе слагаемое |
| | OUT | INT | I, Q, M, D, L | Результат сложения |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 11 – Описание блока «ADD_R»

Вычитание чисел с плавающей точкой

Состояние сигнала 1 на входе EN активизирует команду «Вычесть числа с плавающей точкой». Команда вычитает вход IN2 из IN1. Результат считывается на OUT. Если один из входов или выход не являются числом с плавающей точкой, то биты OV и OS слова состояния равны 1, а ENO равно 0.

| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|---------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Уменьшаемое |
| | IN2 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Вычитаемое |
| | OUT | INT | I, Q, M, D, L | Результат вычитания |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 12 – Описание блока «SUB_R»

Умножение чисел с плавающей точкой

Данная команда перемножает входы IN1 и IN2 если на входе EN сигнал равен 1. Результат считывается на OUT. Если один из входов или выход не являются числом с плавающей точкой, то биты OV и OS слова состояния равны 1, а ENO равно 0.

| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|---------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Первый множитель |
| | IN2 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Второй множитель |
| | OUT | DINT | I, Q, M, D, L | Результат умножения |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 13 – Описание блока «MUL_R»

Деление чисел с плавающей точкой

Эта команда делит вход IN1 на IN2, команда выполняется только если сигнал на входе EN равен 1. Результат считывается на OUT. Если один из входов или выход не являются числом с плавающей точкой, то биты OV и OS слова состояния равны 1, а ENO равно 0.

| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|---------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Делимое |
| | IN2 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Делитель |
| | OUT | INT | I, Q, M, D, L | Результат деления |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 14 – Описание блока «DIV_R»

3.3 Функции преобразования

Функции преобразования конвертируют типы данных переменных.

Преобразование из INT в DINT

Функция I_DI интерпретирует значение на входе IN как число типа данных INT и преобразует его в число типа данных DINT. Результат считывается на OUT. ENO всегда имеет то же состояние сигнала, что и EN.

Преобразование из INT в DINT об ошибках не сообщает.

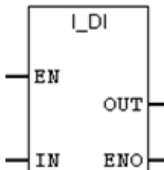
| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|--|-----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Значение для преобразования |
| | OUT | DINT | I, Q, M, D, L | Результат |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 15 – Описание блока «I_DI»

Преобразование из DINT в REAL

Функция DI_R интерпретирует значение на входе IN как число типа данных DINT и преобразует его в число типа REAL. Результат считывается на OUT. ENO всегда имеет то же состояние сигнала, что и EN.

Функция DI_R об ошибке не сообщает.

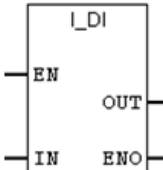
| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | INT | I, Q, M, D, L или константа | Значение для преобразования |
| | OUT | DINT | I, Q, M, D, L | Результат |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 16 – Описание блока «DI_R»

Преобразование из DINT в REAL

Функция ROUND интерпретирует значение на входе IN как число типа данных REAL и преобразует его в число типа DINT. ROUND возвращает следующее целое число. Если результат находится точно между нечетным и четным числом, предпочтение отдается четному числу.

Если значение на входе IN находится вне диапазона, допустимого для чисел в формате DINT, или оно не соответствует числу в формате REAL, то ROUND устанавливает биты состояния OV и OS. Преобразование не выполняется.

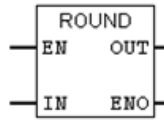
| Элемент FBD | Параметры | Тип данных | Область памяти | Описание |
|---|-----------|------------|-----------------------------|-----------------------------|
|  | EN | BOOL | I, Q, M, D, L, T, C | Деблокировка входа |
| | IN1 | REAL | I, Q, M, D, L или константа | Значение для преобразования |
| | OUT | DINT | I, Q, M, D, L | Результат |
| | ENO | BOOL | I, Q, M, D, L | Деблокировка выхода |

Рисунок 17 – Описание блока «ROUND»

4 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

На рисунке 16 представлена структурная схема лабораторного стенда, позволяющая исследовать контроллер SIMATIC S7-300.

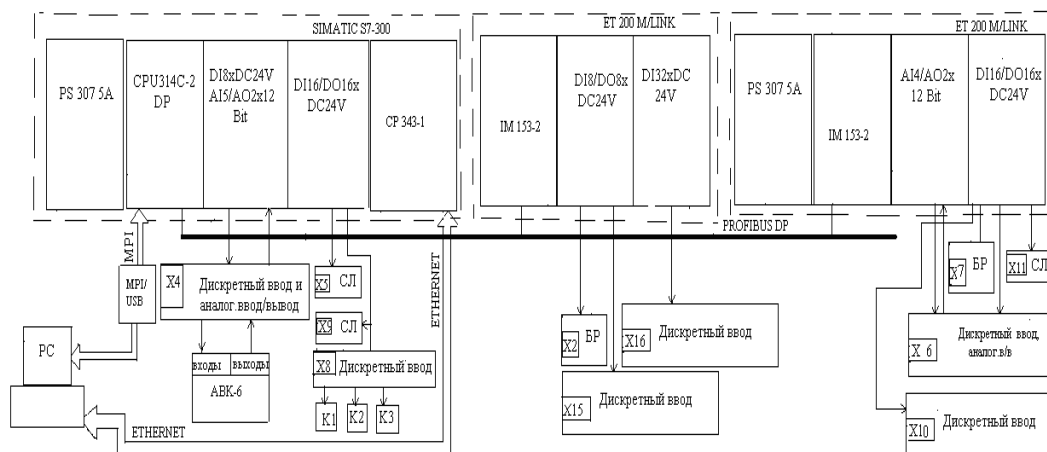


Рисунок 18 – Структурная схема лабораторного стенда

В данный лабораторный комплекс входят модули контроллера: блок питания PS 307 5A (307-1EA00-0AA0), центральный процессор CPU 314C – 2 DP (314-6CG03-0AB0) с встроенные модули: дискретного ввода DI8xDC24V и аналогового ввода/вывода AI5/AO2x12Bit, коммуникационный модуль CP 343–1 для организации последовательной передачи данных по Ethernet интерфейсу, станции распределенного ввода ET200M/LINK (IM 153-2) с заказным номером 153-2BA02-0XB0, модули ввода/вывода дискретного сигнала DI 32xDC24V (321-1BL00-0AA0) и DI8/DO8xDC24V (323-1BH01-0AA0), модуль аналогового ввода/вывода AI4/AO2x12Bit (334-0KE00-0AB0), модуль дискретного ввода/вывода DI16/DO16xDC24V (323-1BL00-0AA0), а также 2 блока реле (X2, X7), АВК (аналогового – вычислительный комплекс) для создания математической модели САУ. Также на стенде присутствуют клеммные колодки для ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов. X4, X6, X8, X10, X15, X16 - обозначение клеммных колодок. Каналы модуля ввода аналогового сигнала поступают на клеммную колодку X4, где осуществляется ввод сигнала с АВК.

Каналы модуля ввода дискретного сигнала поступают на колодки X15, X16, X8 и X10. На X8 осуществляется ввод дискретного сигнала при помощи кнопок. Каналы модуля вывода дискретного сигнала поступают на блоки реле X2 и X7, где осуществляется вывод дискретного сигнала при помощи сигнального табло. Тип клеммных соединений – «сухой контакт».

Назначение данного лабораторного стенда – ввод аналогового сигнала, ввод/вывод дискретного сигнала, то есть реализация программно-логического управления САУ с дискретными сигналами и контроль за САУ с аналоговыми сигналами.

5 ПРОГРАММА РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПСЕВДОЛИНЕЙНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ FBD В ПАКЕТЕ STEP 7

Для реализации представленной САУ передаточные функции элементов были преобразованы в последовательность элементарных математических операций, легко реализуемых на языке FBD в STEP 7.

- Передаточная функция ОУ

$$W_{OP}(s) = \frac{K_o}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} \quad (7)$$

преобразуется в последовательность элементарных математических операций следующим образом:

$$\frac{K_o}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} = \frac{1}{s^2} \cdot \frac{K_o}{T_1 + \frac{T_2}{s} + \frac{1}{s^2}} = \frac{1}{s^2} \cdot K_o \cdot \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{1 + T_2 \cdot \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s} + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s^2}} \quad (8)$$

Структурная схема ОУ в виде совокупности элементарных звеньев будет выглядеть согласно рисунку 17:

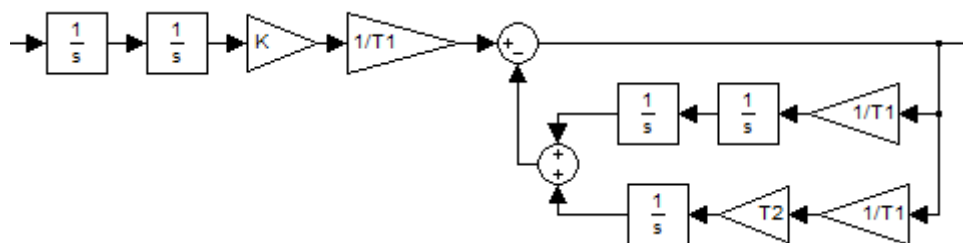


Рисунок 19 – Структурная схема ОУ в виде совокупности элементарных
звеньев

- Передаточная функция регулятора:

$$W_P(s) = k_{PEГ} \cdot \left(k_{П} + \frac{1}{T_{И} s} + \frac{k_{Д} T_{Д} s}{T_{Д} s + 1} \right), \quad (9)$$

где $k_{PEГ} = k_{II}$, $T_{II} = \frac{k_{PEГ}}{k_{II}}$, $T_D = \frac{k_D}{k_{PEГ}}$.

Дифференциальное звено регулятора в виде совокупности элементарных

звеньев: $\frac{Kd \cdot s}{Td \cdot s + 1} = \frac{Kd}{Td} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Td} \cdot \frac{1}{s}}$.

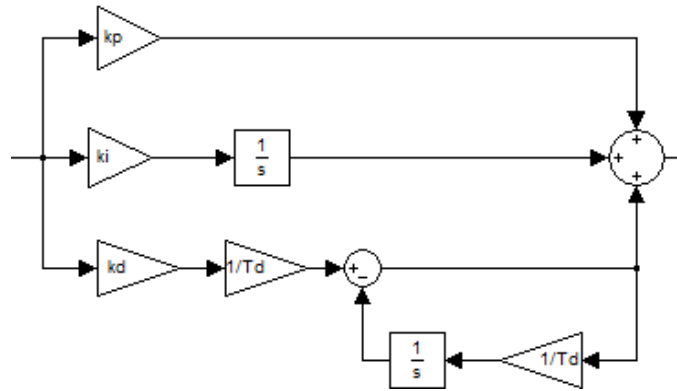


Рисунок 20 – Структура ПИД-регулятора в виде совокупности элементарных звеньев

Интегрирующий канал регулятора реализуется следующим образом:

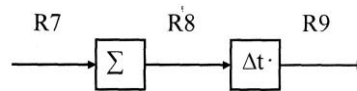


Рисунок 21 – Представление интегрирующего канала регулятора

Интегратор заменяется суммой с определенным шагом дискретизации. Шаг дискретизации примем равным 0.05.

Передаточную функции фазового $W_{\phi}(s)$ каналов КУ преобразуем следующим образом:

$$W_{\phi}(s) = \frac{Ts + 1}{T_1s + 1} = \frac{Ts}{T_1s + 1} + \frac{1}{T_1s + 1} = \frac{T}{T_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1s}} + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1s}} = \frac{1}{T_1} \cdot \left(T + \frac{1}{s}\right) \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1} \cdot \frac{1}{s}} \quad (10)$$

Таким образом, структурная схема КУ в виде совокупности элементарных функций представлена на рисунке 22. Верхний канал – фазовый, нижний – амплитудный:

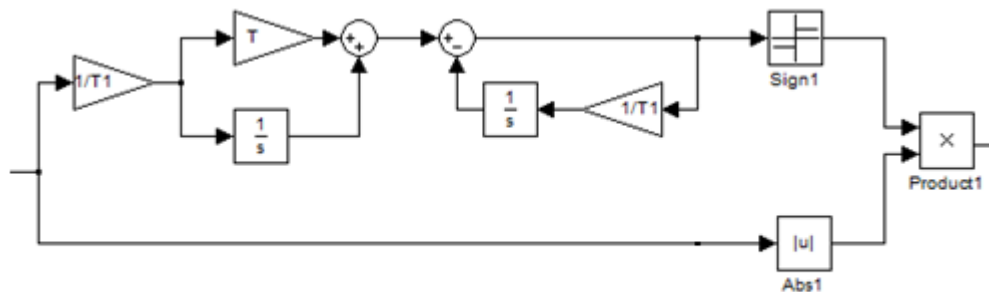


Рисунок 22 – Структурная схема КУ в виде совокупности элементарных звеньев

Сначала необходимо создать программу работы системы без КУ с параметрами ОУ $K_o = 1$, $T_1 = 0.5$, $T_2 = 2$. Данные параметры характеризуют устойчивый монотонный переходный процесс.

Уставка вводится в целочисленном виде. Поэтому необходимо конвертировать ее в число с плавающей точкой.

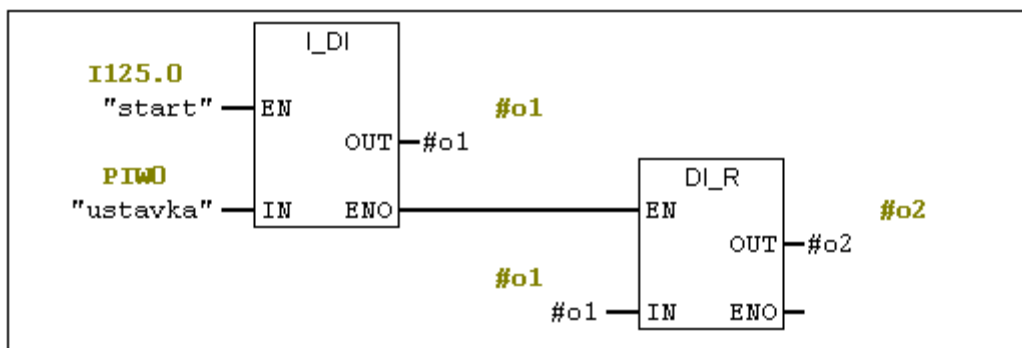


Рисунок 23 – Первый сегмент программы

Данный сегмент программы отвечает за преобразование входного сигнала типа INT в сигнал типа DINT, затем преобразование сигнала типа DINT в сигнал типа REAL

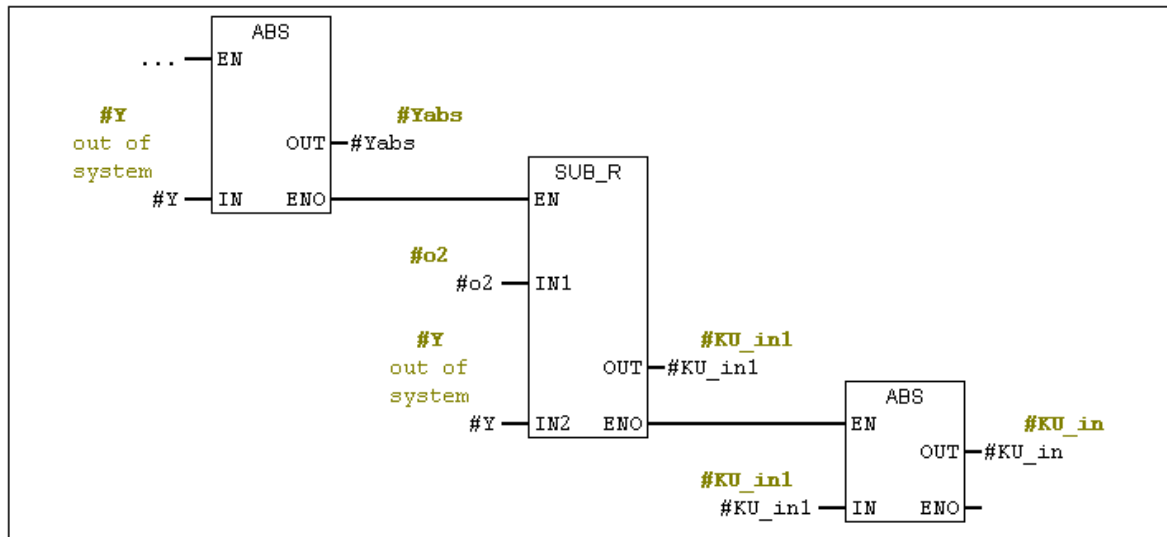


Рисунок 24 – Второй сегмент программы

Второй сегмент программы отвечает за вычитание сигнала обратной связи из основного сигнала.

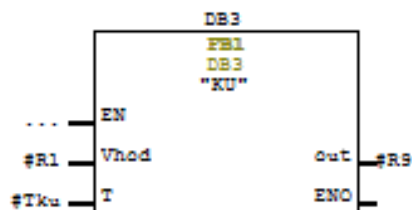


Рисунок 25 – Третий сегмент программы

Третий сегмент отвечает за работу КУ, который организован в отдельном функциональном блоке. Реализация КУ осуществляется согласно схеме на рисунке 17. Рассмотрим более подробно из чего состоит функциональный блок корректирующего устройства.

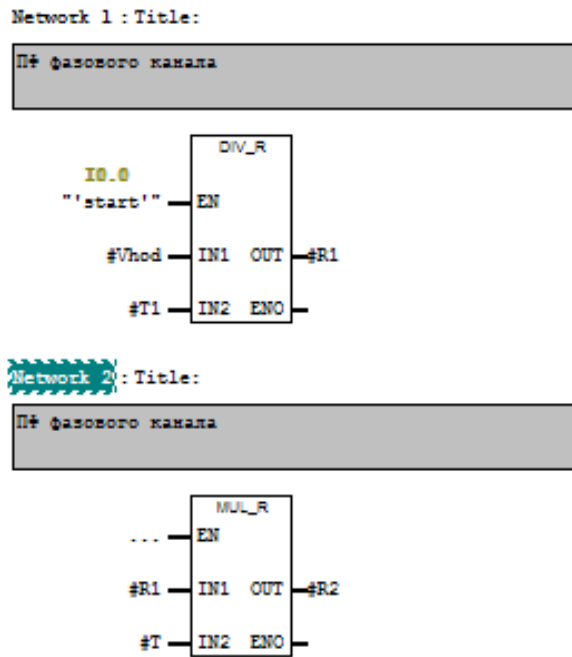
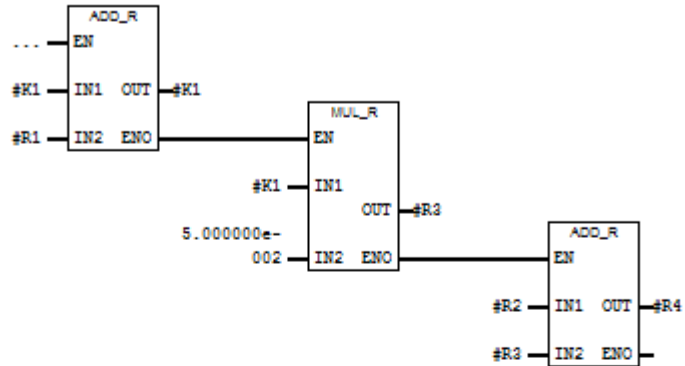


Рисунок 26 – Сегменты программы с 1 по 2

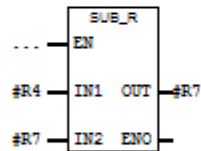
Network 3 : Title:

Comment:



Network 4 : Title:

Comment:



Network 5 : Title:

Comment:

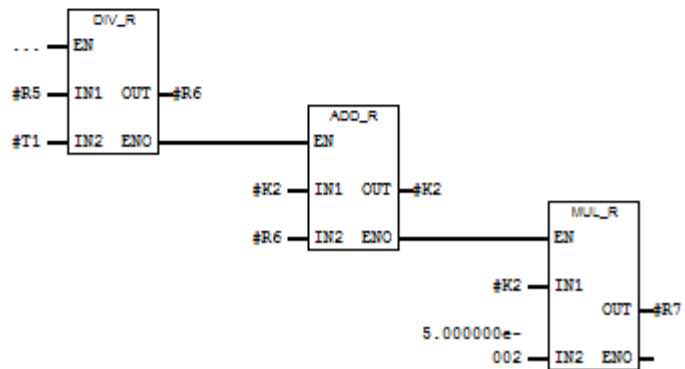


Рисунок 27 – Сегменты программы с 3 по 5

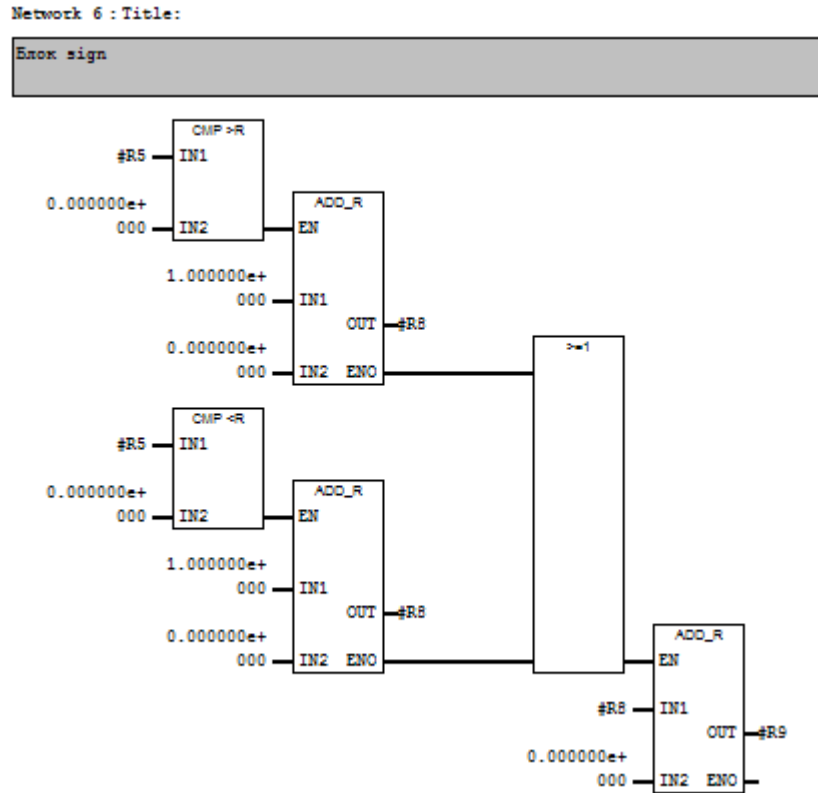


Рисунок 28 – Сегменты программы 6 (функция знака фазового сигнала)

Текст программы функции модуля и умножение выходных сигналов амплитудного и фазового сигнала представлен на рисунке 26.

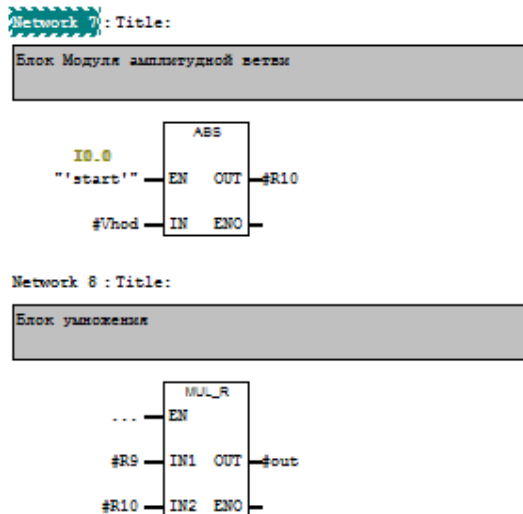


Рисунок 29 – Программная реализация функции модуля и умножение выходных сигналов амплитудного и фазового сигнала

Следующим этапом реализации нашего корректирующего устройства будет разработка блока ПИД-регулятора. Ниже приведен текст программы реализующий работу ПИД-регулятора.

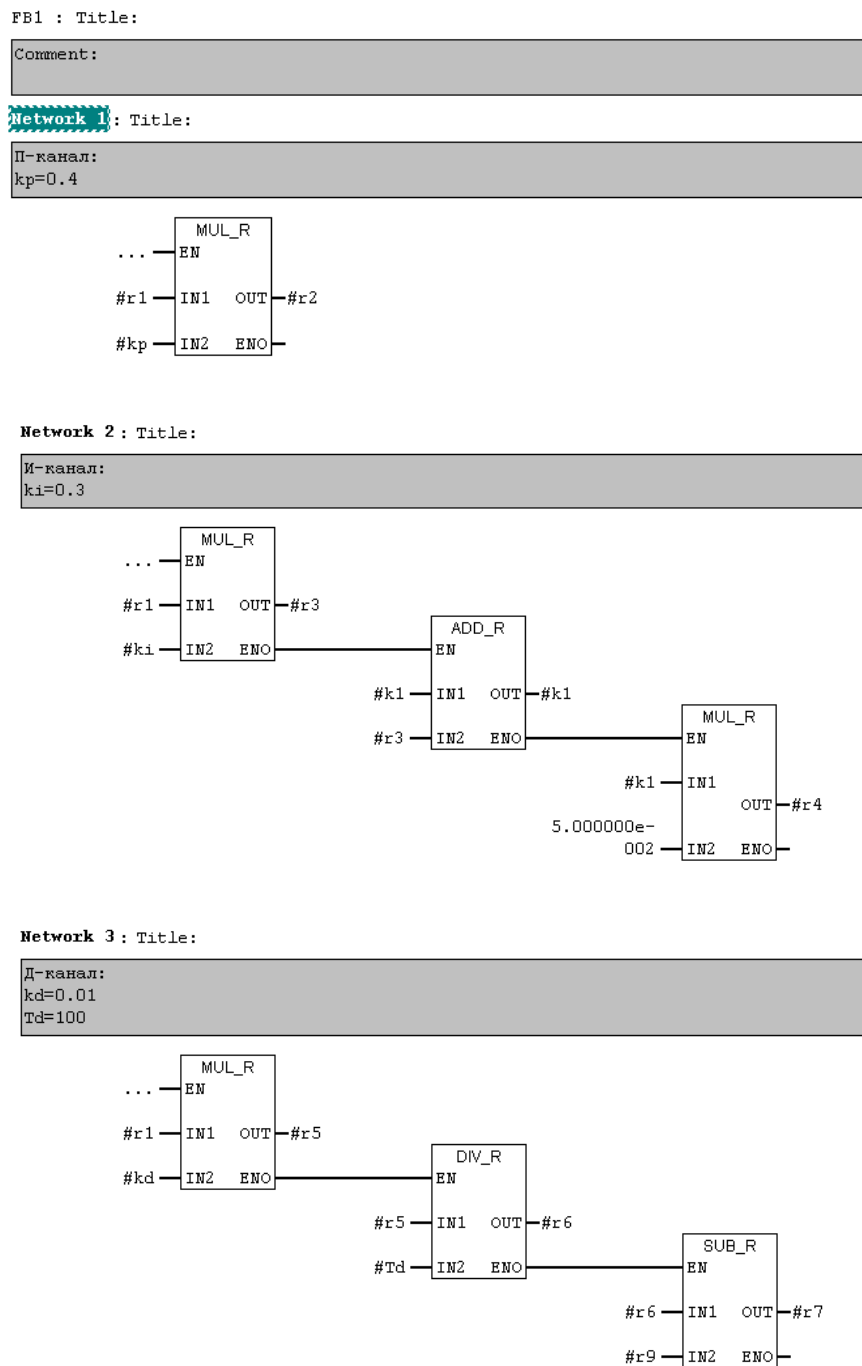
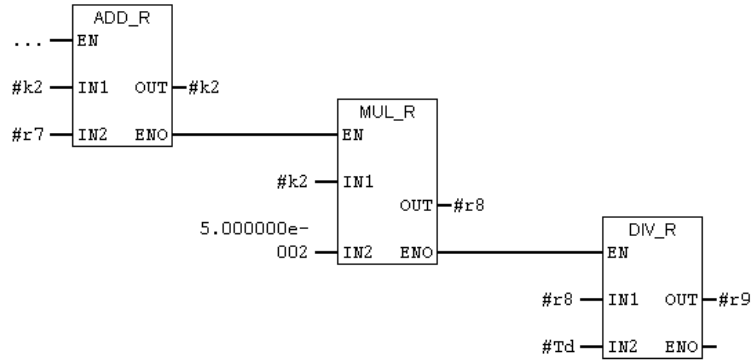


Рисунок 30 – Реализация ПИД-регулятора (начало)

Network 4 : Title:

Д-канал:
Td=100



Network 5 : Title:

Comment:

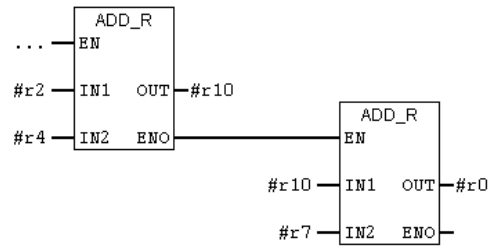


Рисунок 31 – Реализация ПИД-регулятора (окончание)

Следующим этапом будет описание объекта управления второго порядка в основной части программы. По формуле 8 составим следующий текст программы объекта управления:

Network 5 : Title:

Comment:

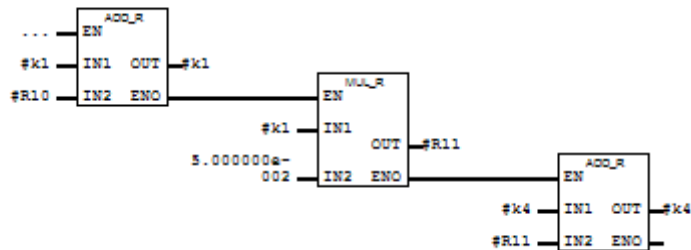
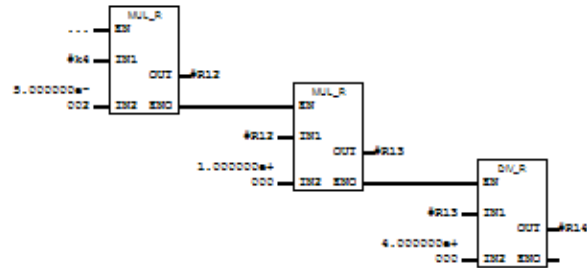


Рисунок 32 – Реализация объекта управления (сегмент 5)

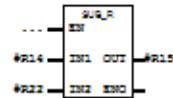
Network 6 :Title:

Comment:



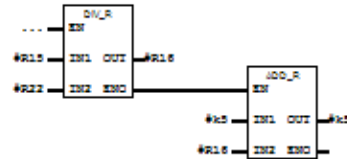
Network 7 :Title:

Comment:



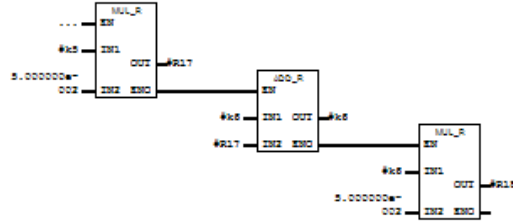
Network 8 :Title:

Comment:



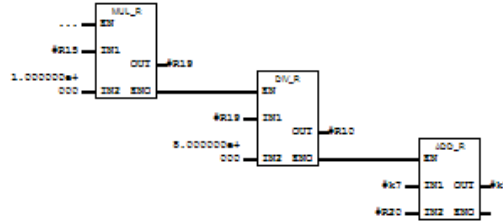
Network 9 :Title:

Comment:



Network 10 :Title:

Comment:



Network 11 :Title:

Comment:



Рисунок 33 – Реализация объекта управления (сегмент 6 – 11)

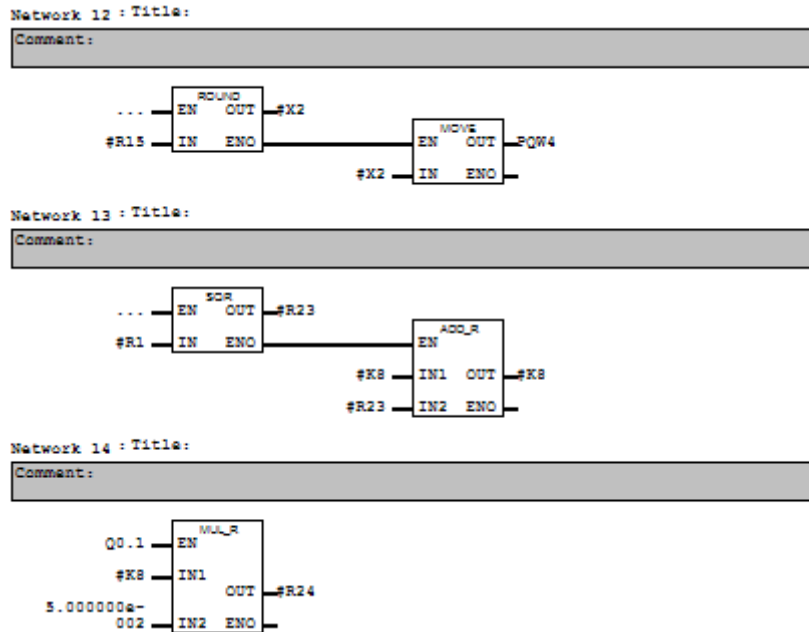


Рисунок 34 – Реализация объекта управления (сегмент 12 – 14)

Далее в основную программу добавим еще один сегмент, который будет отвечать за работу нечеткой логики, который организован в отдельном функциональном блоке.

Аппарат нечеткой логики будет состоять из блоков кусочно-линейных функций, где для треугольной функции принадлежности задаются координаты трех вершин треугольника, для прямоугольной функции принадлежности – координаты основания и вершин.

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

В данном решении используется база правил, которая уже использовалась при проектировании нечеткой логики в среде Matlab.

В соответствии с приведенной базой правил, выходы из блоков фаззификации, реализующие терм-множества входных функций принадлежности

поступают на блоки дефаззификации, реализующие терм-множества выходных функций принадлежности.

Для того чтобы реализовать выходные функции принадлежности, нужно поменять оси X и Y и перевернуть функцию принадлежности, поделив ее пополам. Это позволит подавать значение истинности каждого термина на вход кусочно-линейной функции и получить на выходе четкую переменную.

После дефаззификации из всех четких значений T выбирается наибольшее, так реализуется метод правого модального значения.

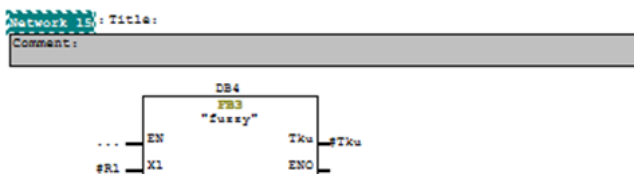


Рисунок 35 – Блок нечеткой логики (сегмент 15)

Блок нечеткой логики устроен следующим образом:

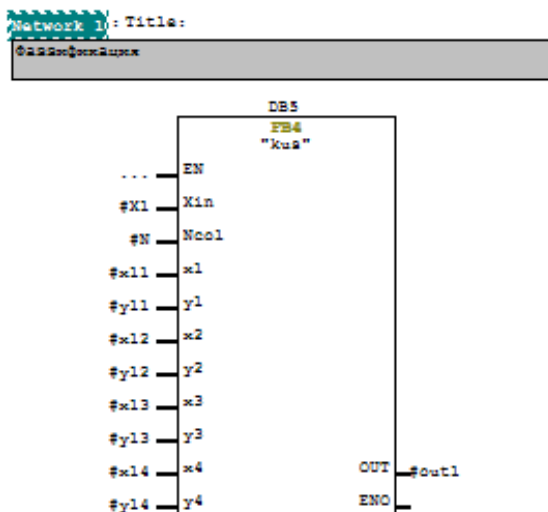


Рисунок 36 – Блок фаззификации

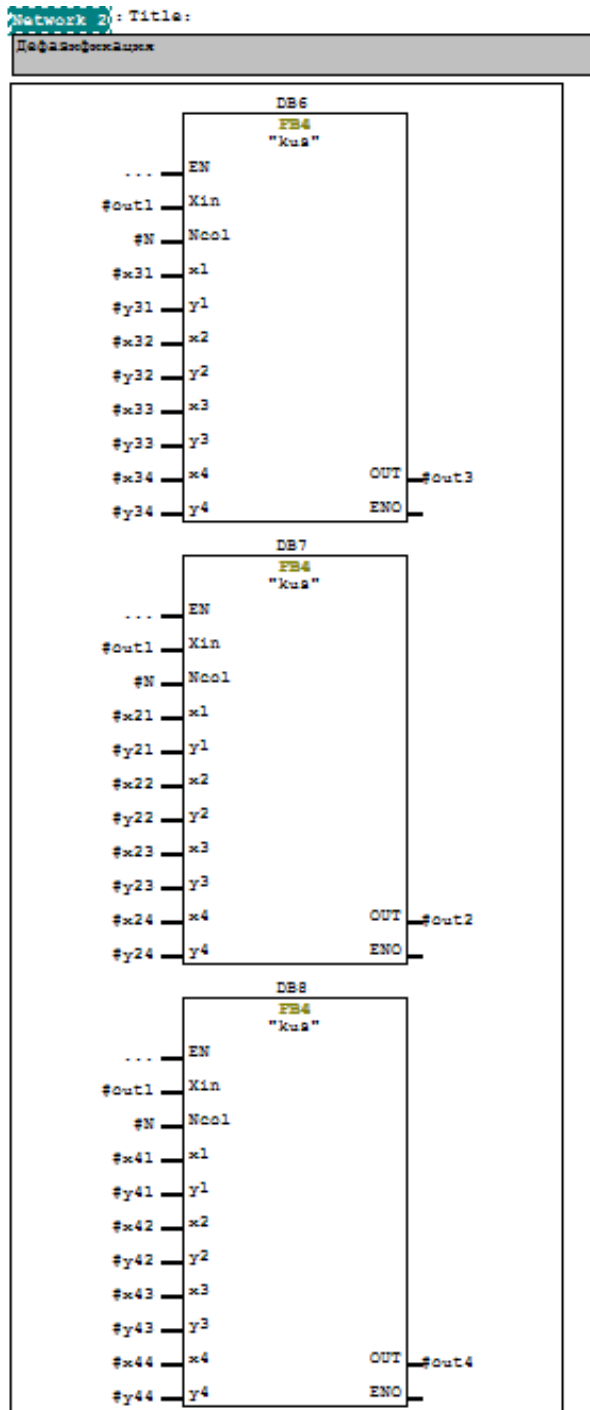


Рисунок 37 – Блок дефазкиции

Network 3: Title:
Comment:

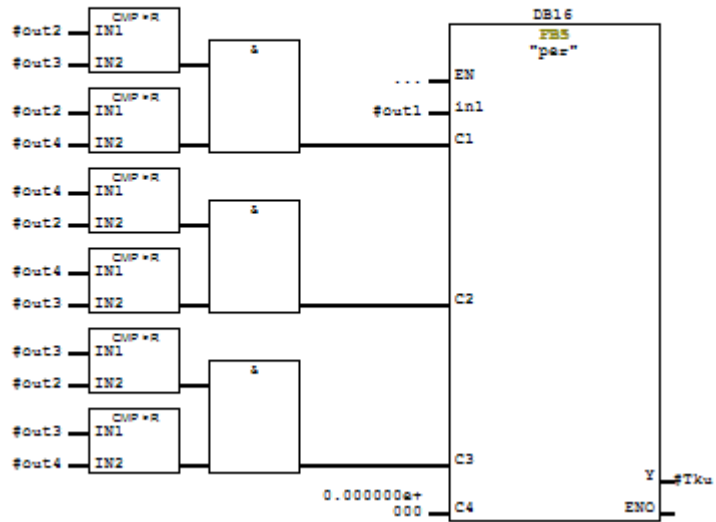


Рисунок 38 – Блок дефаззификации с получением значения постоянной времени
КУ

6 ЗАДАНИЕ

Заданием на выполнение лабораторной работы предусматривается следующая работа:

- Реализация САУ с фазовым опережением КУ. Реализация КУ осуществляется согласно структурной схеме КУ, представленной на рисунке 19.
- Добавление в программу блока нечеткого логики для управления постоянной времени КУ.
- Тестирование работы программы на симуляторе PLCSIM и контроллере SIMATIC S7-300.

7 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) структурную схему лабораторного стенда;
- 3) задание;
- 4) схема программы;
- 5) выводы по работе.

Учебное издание

Вебер Максим Яковлевич

ИЗУЧЕНИЕ ПСЕВДОЛИНЕЙНОГО КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
№___ по курсу «Автоматизированные информационно –
управляющие системы» для студентов специальностей 27.04.04
«Управление в технических системах»

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 09.06.2020. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 9,01. Уч.-изд. л. 8,16.

Заказ 000-14. Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru