

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Ондасынова Сымбат Даниярқызы

Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6B07103 – Автоматизация и роботизация

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

На тему: «Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов»

6B07103 – Автоматизация и роботизация

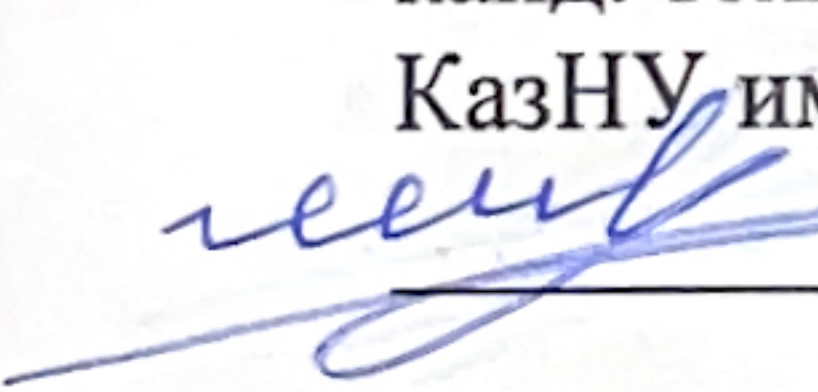
Выполнила

Ондасынова С.Д.

Рецензент

канд. техн. наук, доц.

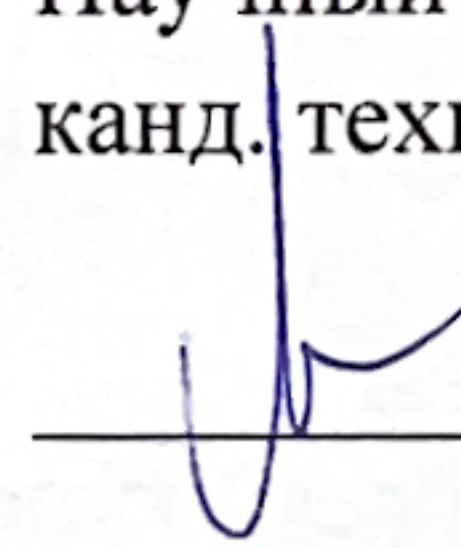
КазНУ им.Аль-Фараби

 Туманов И.Е.

«9» июня 2023г.

Научный руководитель

канд. техн. наук, ассоц. проф.

 Орынбет М.М.

«9» июня 2023г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление

6B07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающейся Ондасынова С.Д.

Тема: «Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов»

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 408-П/Ө от «23» ноября 2022 г.

Срок сдачи законченной работы «15» мая 2023г.

Исходные данные к дипломному проекту: Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением на основе нечеткой логики, программные пакеты Matlab

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) Классификация нелинейных корректирующих устройств
- б) Построение регуляторов на базе нечеткой логики
- в) Исследование и разработка псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и систем управления использующие данное корректирующее устройство в средах MATLAB

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
структурная схема КУ.

Рекомендуемая основная литература:

1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

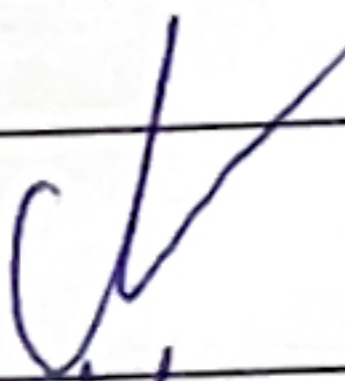
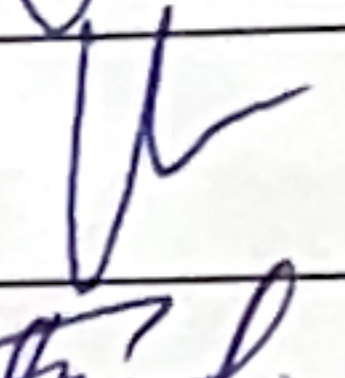
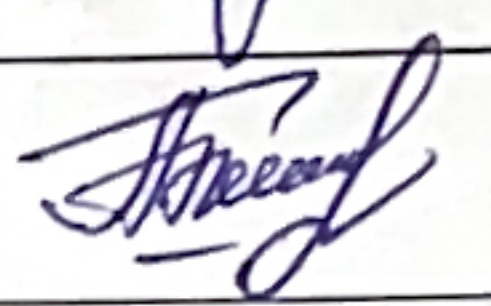
2 Юревич Е.И. Теория автоматического управления. М.: Энергия, 1969. – 375 с.

ГРАФИК

подготовки дипломного проекта

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологический раздел Выбор корректирующего устройства	28 марта 2023 г.	
Технологический раздел Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением суправлением на нечеткой логике	26 апреля 2023 г.	
Специальный раздел	8 мая 2023 г.	

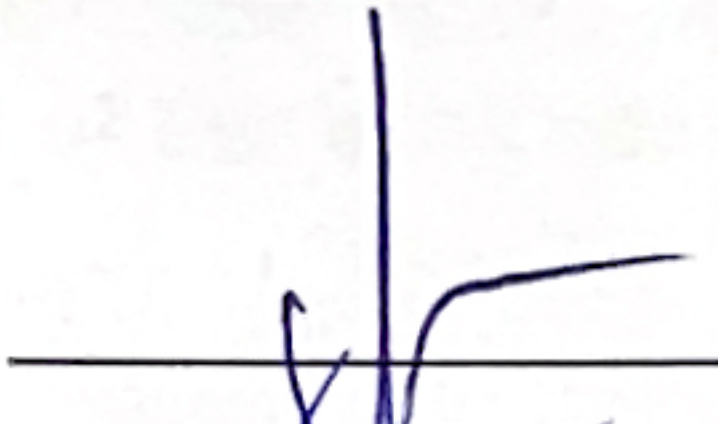
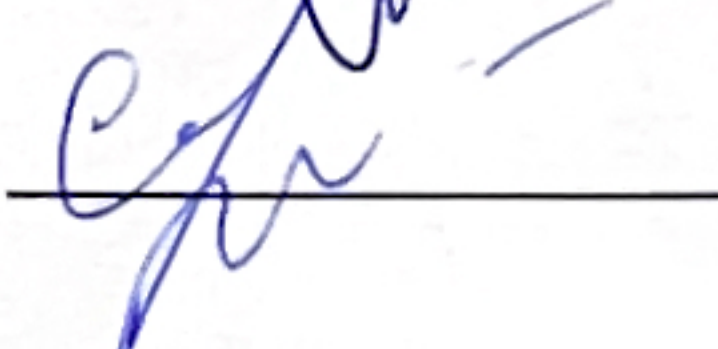
Подписи
консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект суказанием
относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата	Подпись
Технологический раздел	М. М. Орынбет канд. техн. наук	12.06.2023	
Специальный раздел	М. М. Орынбет канд. техн. наук	12.06.2023	
Нормоконтролер	А.Б. Жеңіс маг. техн. наук, ассистент	30.05.2023	

Научный руководитель

Задание принял к исполнению обучающийся

Дата

Орынбет М. М.
Ондасынова С. Д.

«5» января 2023 г.

АҢДАТПА

Бұл дипломдық жоба объектілердің белгілі бір класы үшін түзету құрылғысын жасауға арналған. Зерттеудің мақсаты оңтайлы өнімділікке қол жеткізу үшін объектінің параметрлерін автоматты түрде реттей алатын тиімді құрылғыны жасау болып табылады. Жұмыста осы класс объектісінің проблемалары мен шектеулері талданады және заманауи әдістер мен технологияларға негізделген көзқарас ұсынылады. Тәжірибелер мен сынақтар қондырғының параметрлерді түзетудегі және объектінің жұмысын жақсартудағы тиімділігін көрсетеді. Жұмыстың нәтижелері осы класс объектілерінің жұмысын оңтайландыру үшін әртүрлі салаларда қолданылуы мүмкін.

АННОТАЦИЯ

Данный дипломный проект посвящен разработке корректирующего устройства для определенного класса объектов. Цель исследования заключается в создании эффективного устройства, способного автоматически корректировать параметры объекта для достижения оптимальной работы. В работе проводится анализ проблем и ограничений данного класса объекта и предлагается подход на основе современных методов и технологий. Эксперименты и тестирование показывают эффективность устройства в коррекции параметров и улучшении работы объекта. Результаты работы могут быть применены в различных областях для оптимизации работы объектов данного класса.

ANNOTATION

This graduation project is devoted to the development of a corrective device for a certain class of objects. The purpose of the study is to create an effective device that can automatically adjust the parameters of an object to achieve optimal performance. The paper analyzes the problems and limitations of this class of object and proposes an approach based on modern methods and technologies. Experiments and testing show the effectiveness of the device in correcting parameters and improving the operation of the object. The results of the work can be applied in various areas to optimize the operation of objects of this class.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Классификация нелинейных корректирующих устройств	8
1.1 Линейные корректирующие устройства	8
1.2 Дифференцирующие корректирующие устройства	8
1.3 Интегрирующее корректирующее устройство	10
1.4 Интегро-дифференцирующие корректирующие устройства	12
1.5 Нелинейные корректирующие устройства	13
1.6 Псевдолинейные корректирующие устройства	14
1.7 Нелинейный фильтр с амплитудным подавлением (ослаблением)	15
1.8 Нелинейный фильтр с фазовыми опережением	17
1.9 Нелинейный фильтр с отдельными каналами для амплитуды и фазы	19
1.10 Выбор корректирующих устройств	21
2 Построение регуляторов на базе нечеткой логики	22
2.1 Базовые логические операции	25
2.2 Понятие функции принадлежности	26
2.3 Лингвистические переменные	27
2.4 Структура и принцип работы нечеткого регулятора	28
3 Исследование и разработка псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и систем управления, использующие данное корректирующее устройство в средах MATLAB	30
3.1 Исследование свойств корректирующего устройства с фазовым опережением	30
3.2 Критерии качества процесса регулирования	35
3.3 Исследование свойств системы автоматического регулирования	37
3.4 Анализ свойств корректирующего устройства с фазовым опережением с управлением на нечеткой логике	41
Заключение	46
Список использованной литературы	47

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

1 Классификация нелинейных корректирующих устройств

Для повышения качества систем автоматического регулирования (САР) необходимо обеспечить достаточный запас устойчивости и быстродействия. Хотя обеспечение запаса устойчивости является приоритетным, наилучший результат достигается, когда все показатели, такие как точность в типовых режимах, запас устойчивости и быстродействие, обеспечиваются комплексно, что является сложной задачей.

Увеличение запаса устойчивости системы может быть достигнуто двумя способами. Во-первых, изменяются параметры системы, такие как коэффициенты передачи отдельных звеньев, постоянные времени и другие. Во-вторых, осуществляется коррекция структуры системы.

Коррекция структуры системы предлагает введения корректирующих устройств, которые являются динамическими звеньями с определенными передаточными функциями. Они применяются для улучшения точности системы и повышения качества переходных процессов. Введение корректирующих устройств может также решать более общую задачу-часто они делают систему устойчивой (если она была неустойчивой без них), а изменением коэффициентов передаточной функции корректирующего звена можно достичь желаемого качества процесса регулирования. Корректирующие устройства, которые могут быть использованы при синтезе САР, могут быть классифицированы на линейные и нелинейные.

1.1 Линейные корректирующие устройства

Среди линейных корректирующих устройств наибольшее распространение получили дифференцирующее, интегрирующее и интегро-дифференцирующее устройства. В дальнейшем будет рассмотрено их применение.

Однако стоит отметить, что применение линейных корректирующих устройств не гарантирует достижения наилучших показателей в качества САР. Это связано с тем, что АЧХ и ФЧХ таких устройств одновременно зависят от их параметров. При реализации корректирующего устройства с требуемой ФЧХ системы часто возникают нежелательные изменения в АЧХ, и наоборот.

1.2 Дифференцирующие корректирующие устройства

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

$$W(s) = \frac{k(T_1 s + 1)}{T_2 s + 1} \quad (1.1)$$

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 ω_{cp} , 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

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

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 .

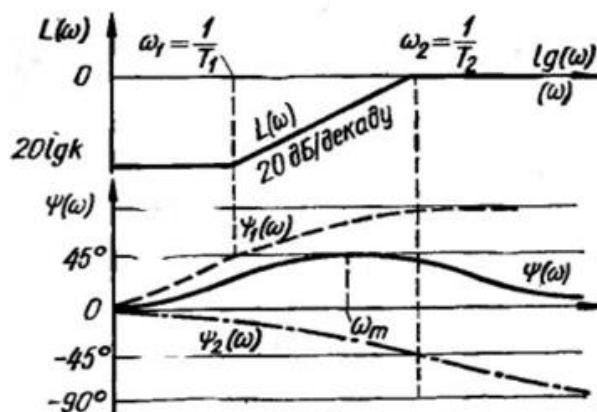


Рисунок 1.1 – ЛЧХ дифференцирующего КУ

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 $\omega_{\text{ср}}$ [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.

1.3 Интегрирующее корректирующее устройство

Упоминалось ранее, что использование дифференцирующего звена при поступлении зашумленного полезного сигнала может привести к появлению ошибок и не гарантирует достижения ожидаемых результатов. Проблема наличие помех в системе решается путем увеличения коэффициента усиления и использования более низкой частоты среза (узкой полосы пропускания в области низких частот). В этом случае применение интегрирующего звена является предпочтительным, поскольку оно позволяет увеличивать коэффициент усиления системы, не увеличивая ее частоту среза. Если требуется высокая динамическая точность системы, то есть необходимость в большом коэффициенте усиления, то применение интегрирующего звена наиболее подходящее решение [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

$$L(\omega) = -20 \log k + 20 \log \sqrt{T^2 \omega^2 + 1} - 20 \log \sqrt{T^2 \omega^2 + 1} \quad (1.5)$$

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

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

корректирующего звена построена в соответствии с выражением

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

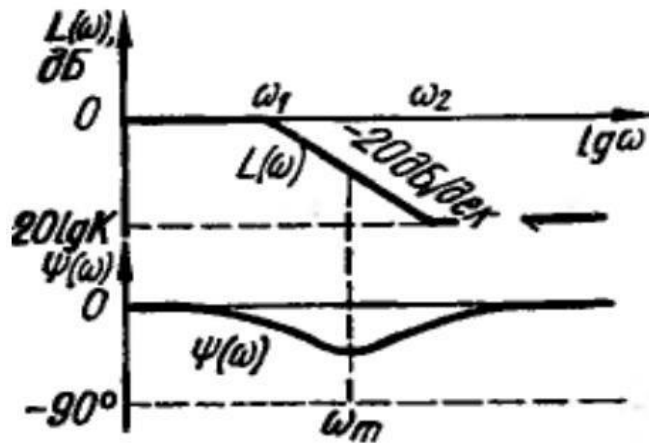


Рисунок 1.2 – ЛЧХ интегрирующего КУ

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

1.4 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

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

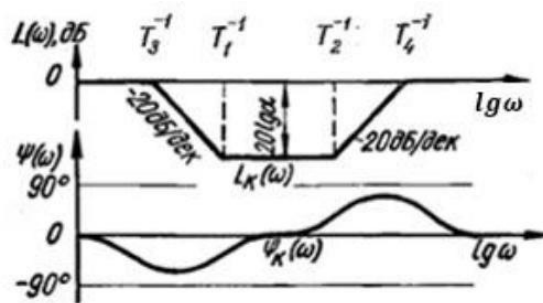


Рисунок 1.3 – ЛЧХ интегро-дифференцирующего звена

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.

1.5 Нелинейные корректирующие устройства

Ранее было упомянуто использование линейных корректирующих устройств, которые имеют недостаток – взаимозависимость амплитудной и фазовой характеристик. Введение дифференцирующего звена в систему приводит к ослаблению полезного сигнала в низкочастотной области и положительному сдвигу его фазы. В свою очередь, интегрирующее звено

вызывает отставание колебаний по фазе. В отличие от линейных КУ, нелинейные корректирующие устройства могут изменять свое поведение в зависимости от установившегося режима.

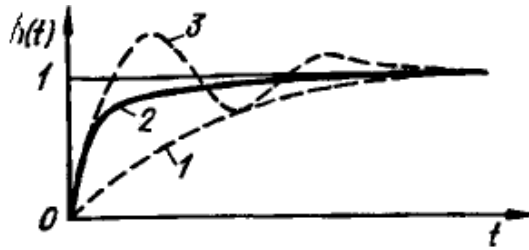


Рисунок 1.4 – Переходные процессы САУ при нелинейной коррекции (2) и линейной (1, 3)

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).

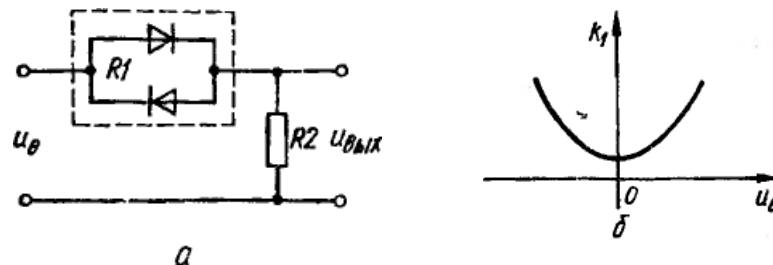


Рисунок 1.5 – Последовательное нелинейное корректирующее устройство (а) и его характеристика $k_1 = f(u_0)$ (б)

Коэффициент усиления цепи рассчитывается по следующей формуле: сумма сопротивлений $(R_1 + R_2)$. На рисунке 1.5,б показан примерный график зависимости коэффициента усиления k_1 от u_0 . Аналогичным образом меняется коэффициент усиления системы k_p . Если изменить параметры нелинейного усилителя, можно изменить k_p системы. Однако такой подход не учитывает и не компенсирует негативное воздействие инерционности элементов системы, что приводит к возникновению больших динамических ошибок.

Использование нелинейных КУ является более общим методом по сравнению с линейной коррекцией. Только с помощью нелинейных коррекций

можно достичь оптимальной динамики системы и решить проблему компенсации вредных естественных нелинейностей. Существует множество различных методик синтеза нелинейных корректирующих устройств, поэтому применяются частые приемы и схемы.

Нелинейные корректирующие устройства могут быть статическими или динамическими по характеру действия, а также последовательными, параллельными или с обратной связью по способу включения.

Среди наиболее распространенных нелинейных КУ можно выделить нелинейные фильтры, нелинейные динамические переключающие устройства и нелинейные компенсационные устройства. Нелинейные фильтры, состоящие из линейных звеньев, позволяют улучшить динамику, точность и качество переходных процессов системы.

Нелинейные динамические переключающиеся устройства используются для улучшения динамических характеристик системы. Они включают специально сформированные сигналы в управляющий сигнал на коротких промежутках времени, что позволяет системе реагировать на эти интервалы времени с нужной реакцией.

Для компенсации вредного влияния сопутствующей нелинейности применяются компенсационные нелинейные корректирующие устройства или, по крайней мере, значительно ослабляются такие влияния.

1.6 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.

1.7 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.

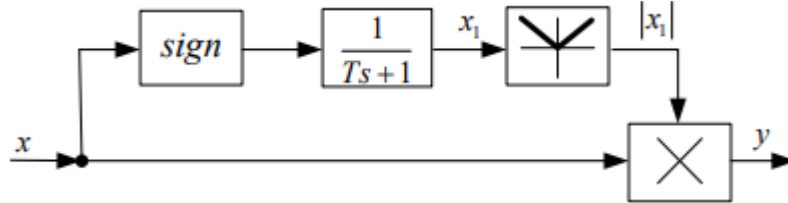


Рисунок 1.6 – Схема псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

Сигнал X подается на два параллельных канала. Верхний канал включает блок сигнатуры, фильтр низких частот и блок взятия модуля. В нижнем входной сигнал X остается неизменным. Выходной сигнал фильтра представляет себя как произведение обеих выходных частей

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

где x_1 определяется уравнением

$$Tx_1 + x_2 = \text{sign}x \quad (1.13)$$

Коэффициенты гармонической линейризации 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

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

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

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.

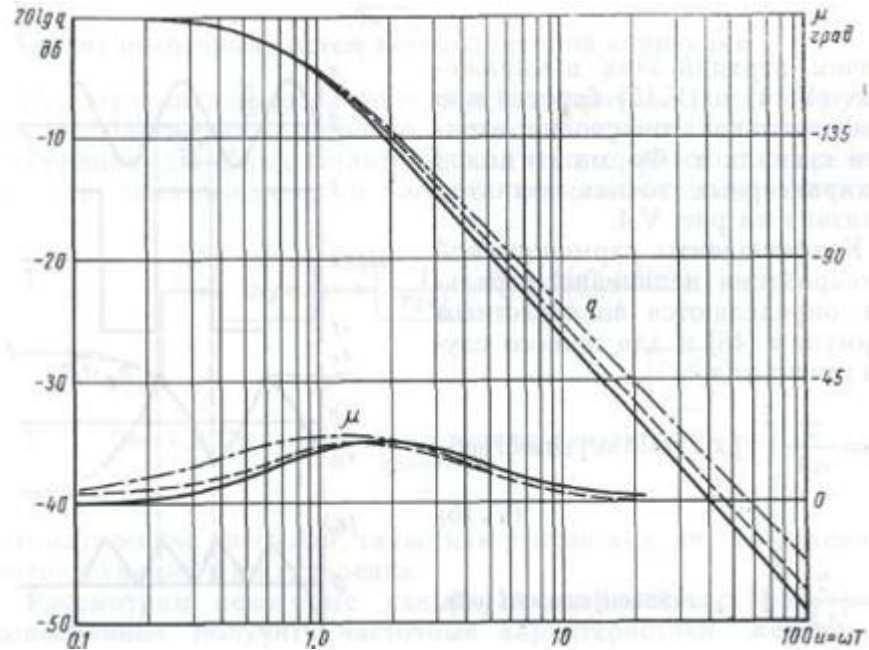


Рисунок 1.7 – ЛАЧХ и ЛФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

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

1.8 Нелинейный фильтр с фазовым опережением

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

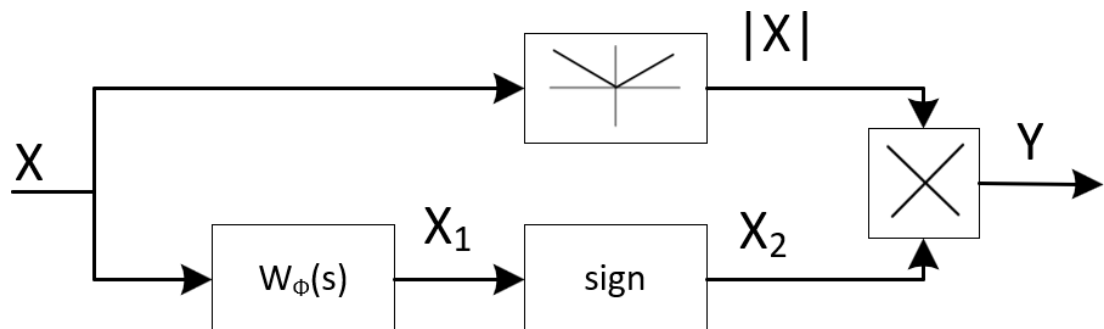


Рисунок 1.8 – Схема КУ с фазовым опережением

Если мы применим метод гармонической линеаризации для анализа данного компонента, мы обнаружим его уникальное свойство: его частотные характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала. Именно по этой причине этот компонент считается псевдолинейным.

Если у нас возникает необходимость подавать на вход сигнал с фиксированной частотой ω , мы можем использовать нелинейность в качестве замены входного сигнала. Эта нелинейность имеет статическую характеристику, которая напоминает опережающую гистерезисную петлю. Однако такой подход работает только в том случае, если фильтр создает опережение, и величина этого опережения зависит от выбранных параметров фильтра.

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

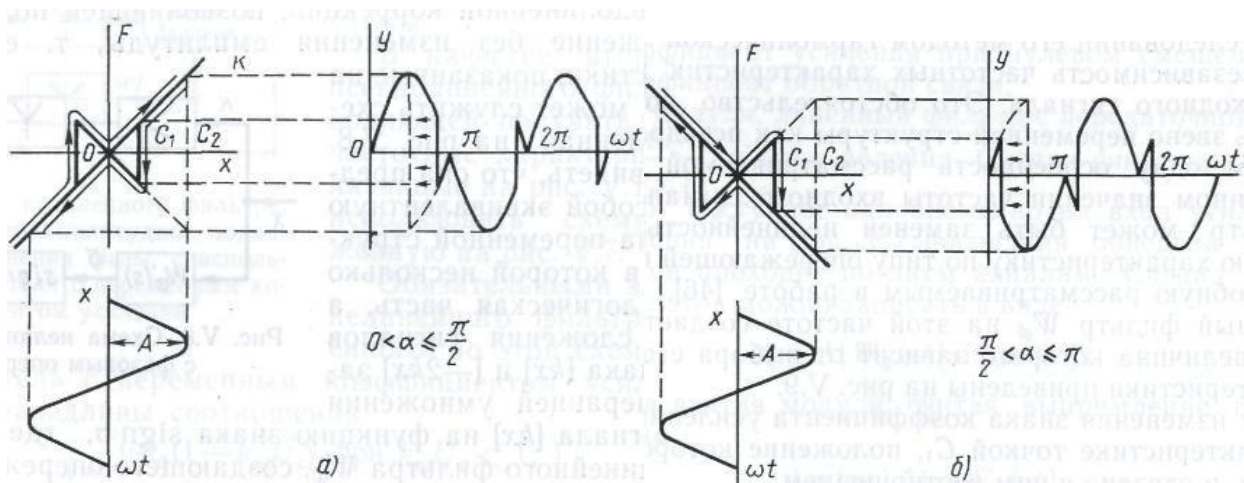


Рисунок 1.9 – Нелинейные характеристики: а – при фазовом опережении до 90° ; б – при фазовом опережении от 90° до 180°

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

$$W_\Phi(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T_s + 1}{T_1 s + 1} \quad (1.18)$$

то создаваемое им опережение

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

где через u 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.

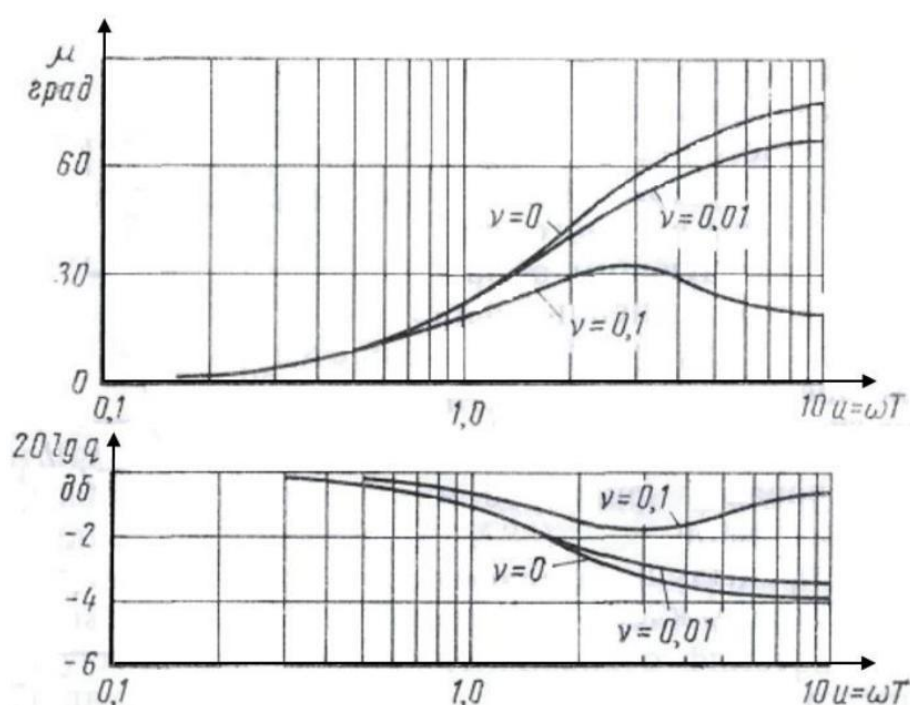


Рисунок 1.10 – ЛЧХ нелинейного фильтра с фазовым опережением

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.

Однако при введении фазового опережения возникает риск увеличения амплитуды выходного сигнала, особенно на определенных частотах. Это может привести к неустойчивости или искажению сигнала.

1.9 Нелинейный фильтр с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Также в схеме псевдолинейной коррекции, представленной на рисунке 1.11, есть возможность получения независимых фазовой и амплитудной характеристики. Эти характеристики не изменяются при изменении амплитуды входного сигнала, что означает, что путем изменения параметров линейных фильтров в схеме можно получить желаемые характеристики любого типа. Таким образом, предложенная схема создания КУ является универсальной. В общем случае линейный фильтр в фазовой ветви выполняет функцию форсирующего звена, а фильтр в амплитудной ветви является элементом, обеспечивающим ослабление амплитуды и отставание по фазе.

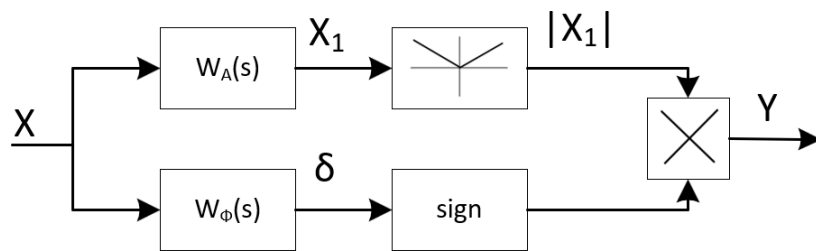


Рисунок 1.11 – Схема двухканального КУ

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

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

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

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

$$\theta = \arctg\omega\gamma T \quad (1.26)$$

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

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.

1.10 Выбор корректирующих устройств

Из вышеизложенного можно сделать вывод об универсальности и простоте использования псевдолинейных корректирующих устройств. Применение таких устройств позволяет независимо изменять амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики. Более того, эти характеристики выбранных устройств не зависят от амплитуды входного сигнала, что упрощает процесс адаптации.

Особое внимание следует уделить тому факту, что в промышленных объектах управления, работающих в режиме, возможно регулирование только амплитудно-частотной характеристики или только фазо-частотной характеристики отдельно. Это еще раз подчеркивает универсальность и широкое применение псевдолинейных корректирующих устройств.

Исходя из указанных причин, в данной работе было выбрано псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением для дальнейшего исследования.

Псевдолинейные корректирующие устройства представляют собой эффективные инструменты, применимые в различных областях, таких как автоматизированное управление производством, системы связи, робототехника, медицинская техника и другие. Их универсальность заключается в том, что они могут быть использованы для регулирования и корректировки как амплитуды, так и фазы сигналов.

Одной из ключевых особенностей псевдолинейных КУ является независимость их характеристик от амплитуды входного сигнала. Это означает, что изменение амплитуды сигнала не влияет на выбранные параметры устройства, что в свою очередь облегчает процесс адаптации и использования.

2 Построение регуляторов на базе нечеткой логики

В конце XX века нечеткая логика получила широкое распространение в качестве основы для регуляторов. Эта технология стала очень популярной и нашла применение как в бытовых устройствах, например, стиральных машинах, так и в промышленных системах, включая системы управления в метро. В настоящее время интерес к нечеткой логике снова возрос благодаря развитию вычислительных возможностей технических устройств. Современные производственные компании, такие как Tokyo Electric Pow, используют нечеткую логику для автоматического управления шлюзами на гидроэлектростанциях, Omron применяет ее технологию для автоматической настройки камер при трансляции спортивных событий, а Nissan разрабатывает системы, обеспечивающие эффективность и стабильность управления автомобильными двигателями, и многие другие компании также активно используют нечеткую логику в своих проектах.

Управление на основе нечеткой логики основано на системе правил, которые определяют действия регулятора в зависимости от входных сигналов. Регулятор, основанный на нечеткой логике, может принимать неограниченное количество входных сигналов, а его выходные сигналы, то есть действия, выбираются из базы знаний, созданной экспертом. В отличие от традиционных систем управления, такие как ПИД-регуляторы, регулятор на основе нечеткой логики более гибок и может быть разработан даже без специфических знаний об объекте управления. Именно поэтому такие регуляторы часто применяются для управления сложными нелинейными системами, включая с нелинейными внешними возмущениями.

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 : $A \subset R_1$,

$$B \subset R_1,$$

$$A \cap B \neq \emptyset \text{ (рисунок 2.1 б).}$$

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.

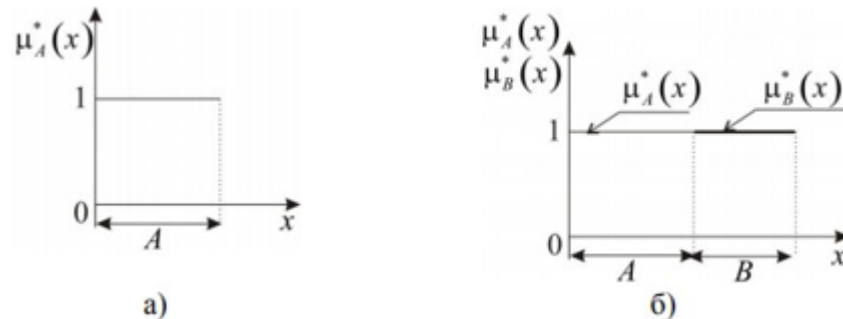


Рисунок 2.1 – Понятие принадлежности в четкой теории множеств:

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

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].

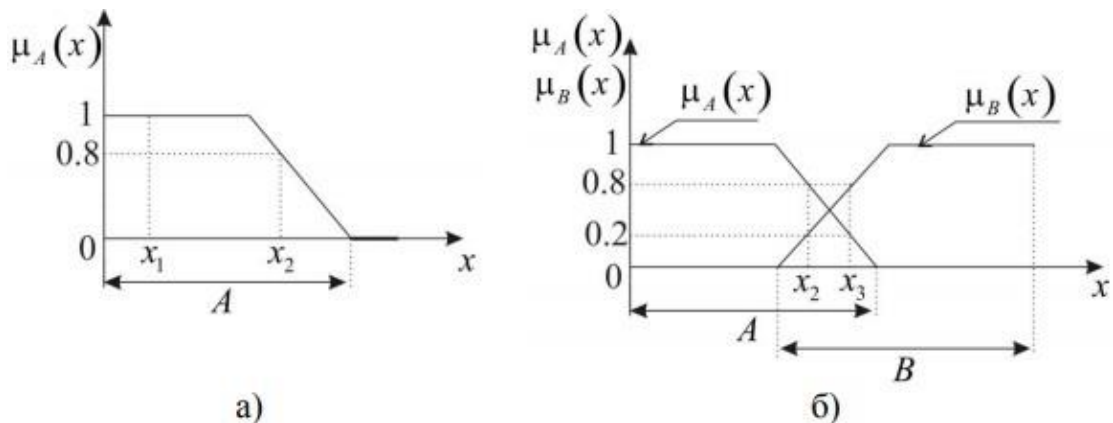


Рисунок 2.2 – Понятие принадлежности в нечеткой теории множеств: а) принадлежность подмножеству A ; б) совокупность принадлежностей к подмножеству A и B

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 $x_1 \in A$ $x_2 \in A$. С функциями принадлежности $\mu_A(x_1) = 1$ $\mu_A(x_2) = 0.8$ 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 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.

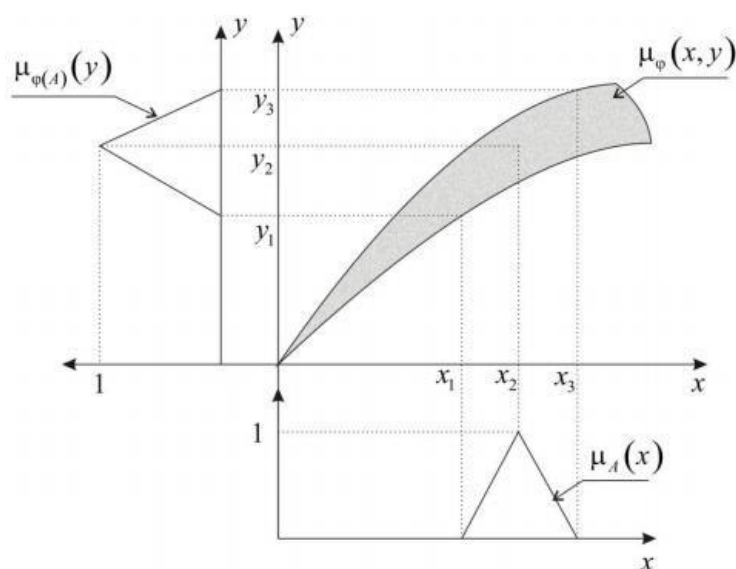


Рисунок 2.3 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

При описании нечетких множеств часто используются лингвистические переменные, о которых мы поговорим ниже. Введение новых переменных, которые имеют близкий смысл с уже существующими переменными, но отличаются только степенью состояния, приводят к появлению новых модифицированных нечетких множеств.

2.1 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

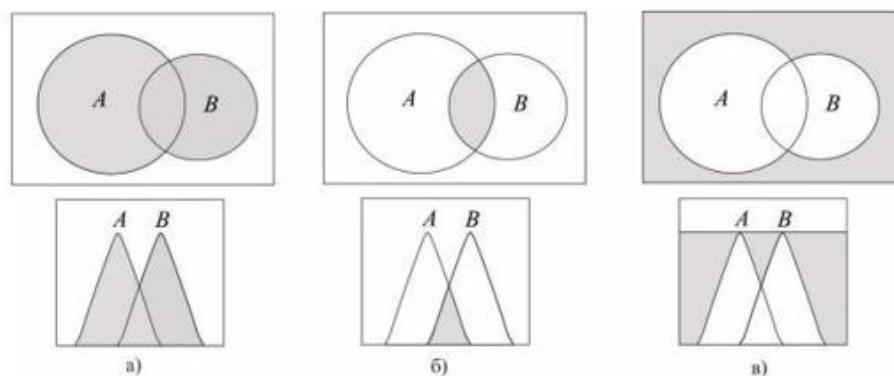


Рисунок 2.4 – Графическое изображение логических операций:
а) объединения; б) пересечения; в) дополнения

2.2 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 $x \in A$ $= \{(x, \mu_{NCT}(x)) | x \in U\}$. На рисунке 2.5 обозначен пример функции принадлежности «чисел около 3».

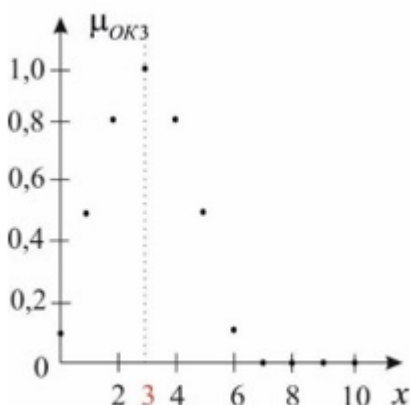


Рисунок 2.5 – Функция принадлежности «число около 3»

При синтезировании систем управления в реальности наиболее применимы треугольные, трапецеидальные 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.

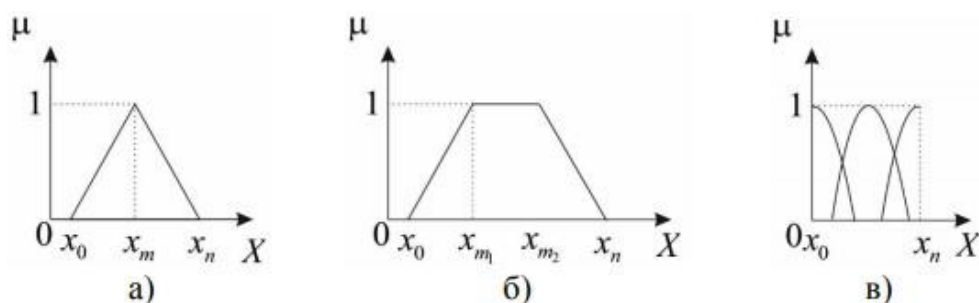
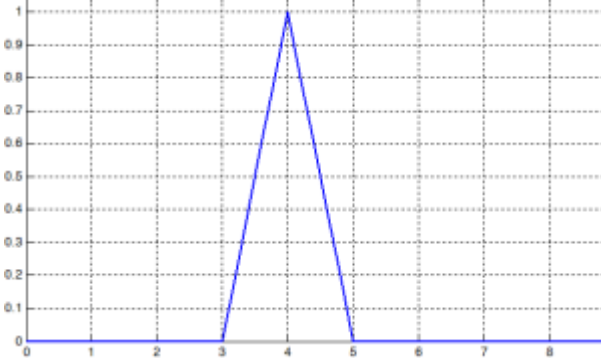


Рисунок 2.6 – Образ нечеткого множества при нечетком отображении

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
	Треугольная функция принадлежности <pre>>> x = (0:0.2:10); >> y = trimf(x, [3 4 5]); >> plot(x, y);</pre>	
	Трапецеидальная функция принадлежности <pre>>> y = trapmf(x, [3 4 6 8]); >> plot(x, y);</pre>	

2.3 Лингвистические переменные

Как было упомянуто ранее, регулятор на основе нечеткой логики оперирует базой знаний, которая описывается нечеткими правилами, используя лингвистические переменные. Эти переменные могут быть связаны с различными физическими величинами, такими как «скорость», «температура» и так далее, и их значения определяются с помощью термов, таких как «быстро», «далеко», «тепло». Например, лингвистическая переменная, описывающая скорость автомобиля, может быть выражена как «скорость автомобиля - БЫСТРАЯ». Таким образом, лингвистическая переменная представляет собой значение функции принадлежности, которое выражено естественным, «человеческим» языком. Для примера рассмотрим описание скорости автомобиля ($v, \text{км/ч}$) с использованием лингвистических переменных в виде треугольных функций принадлежности, как показано на рисунке 2.7. Для простейшей базы знаний применены такие переменные как

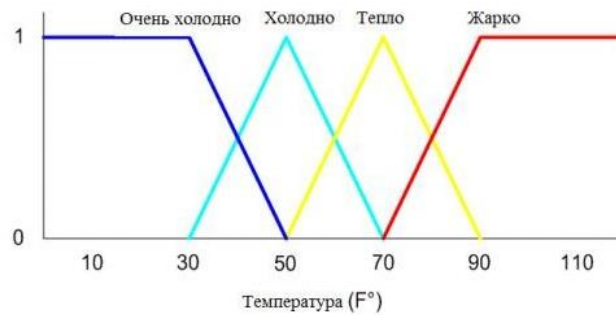


Рисунок 2.7 – Функции принадлежности лингвистических переменных описания температуры внешней среды

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).

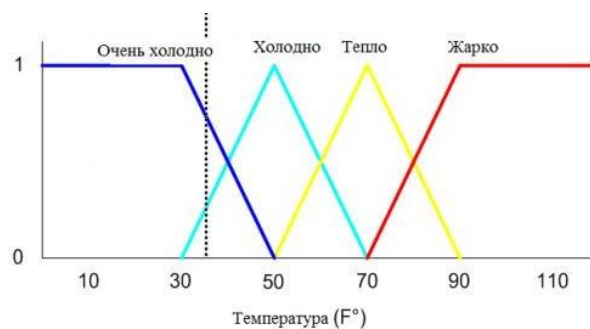


Рисунок 2.8 – Функции принадлежности лингвистических переменных - поиск 36F°

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.

Результаты, полученные из базы знаний, должны интерпретироваться с учетом экспертной оценки и субъективности. Внесение экспертного мнения и знаний в базу данных является важным аспектом при построении и анализе систем на основе логики нечеткого вывода. Это позволяет учесть различные аспекты и нюансы, которые могут быть недоступны для формализованного подхода.

Важно принимать во внимание, что создание базы знаний и определение принадлежности переменных являются искусственными и в основе лежит субъективное понимание и опыт экспертов. Это подчеркивает необходимость осторожности при использовании и интерпретации результатов, полученных с помощью лингвистических переменных и базы знаний

2.4 Структура и принцип работы нечеткого регулятора

Структура нечеткого регулятора представлена на рисунке 2.9.

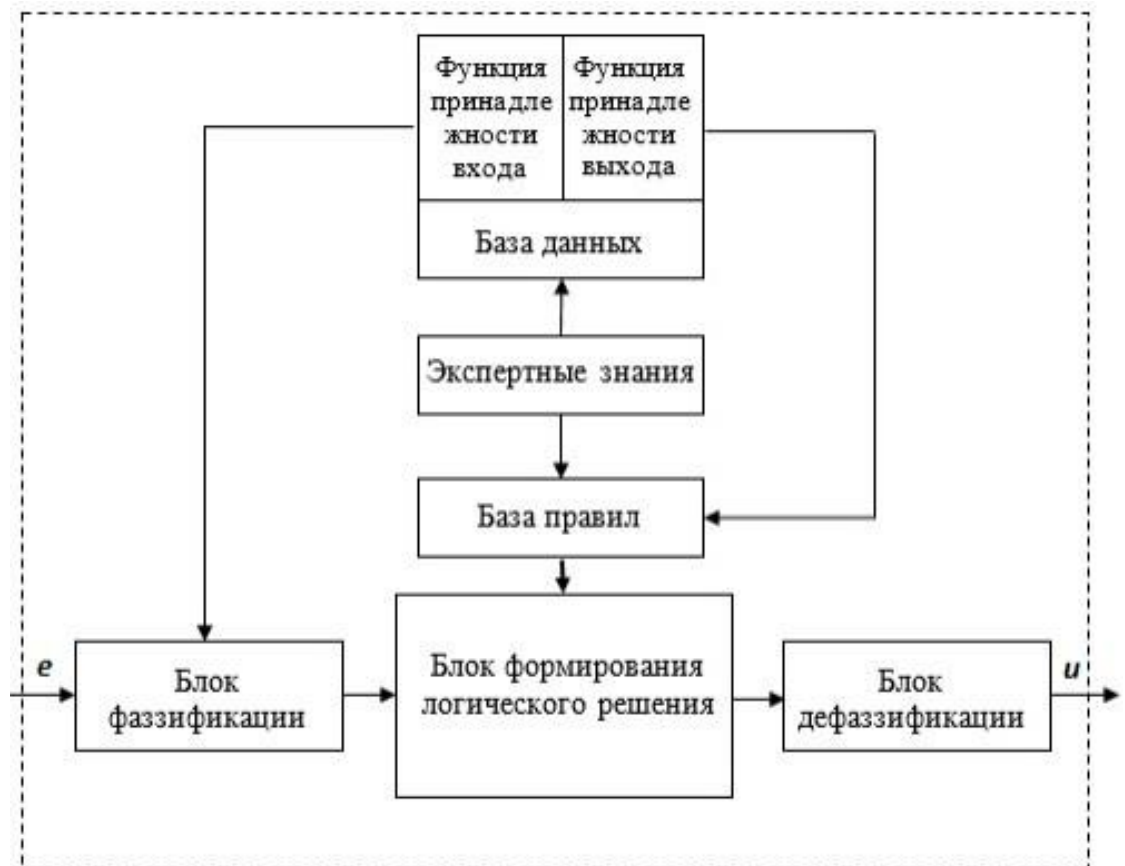


Рисунок 2.9 – Структура нечеткого регулятора

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 всеобъемлющие 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^* полагаются известными. Затем анализируется каждое правило нечеткой системы. Если нечеткое высказывание вида (2.4) и (2.5) соответствует правилу

<#>:ЕСЛИ

$\ll \beta_1 \text{ есть } a \gg$

или

<#>:ЕСЛИ $\ll \beta_1 \text{ если } \forall a$ (2.5)

где соответствует высказыванию «ОЧЕНЬ», «МЕНЕЕ» и т.д., то степень 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 под заключений правил. По сути, это та же агрегация, но для под заключений.

Последний этап - аккумуляция - подразумевает процесс нахождения итоговых значений функций принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных множества. Этот этап необходим для разграничения под заключений одинаковых переменных, принадлежащих разным правилам системы. Для каждого из правил вычисляется значение функции принадлежности, после чего следует этап дефазификации, на котором происходит переход от полученных значений лингвистических переменных к конкретным значениям для каждой из выходных лингвистических переменных.

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

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.

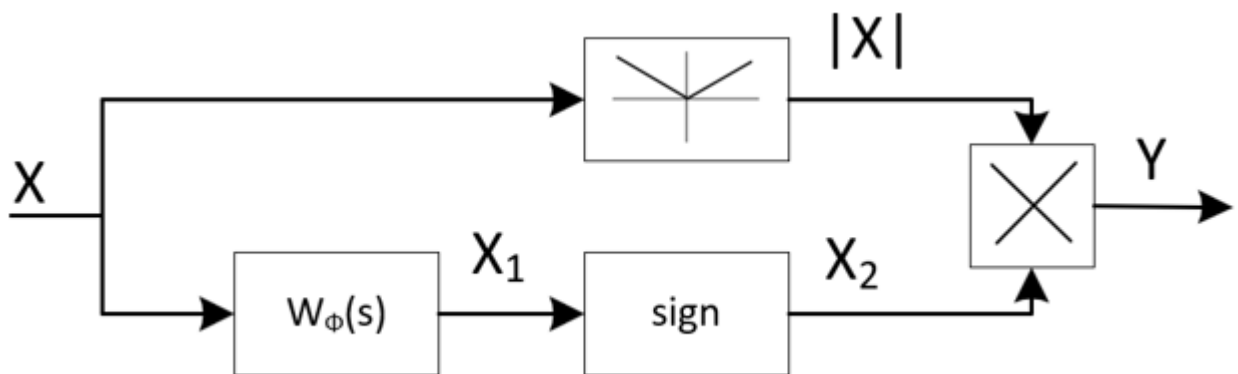


Рисунок 3.1 – Схема КУ с фазовым опережением

Из рисунка видно, что схема представляет собой эквивалентную схему звена переменной структуры, 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

$$OC_1 = \sin \alpha \cdot OC_2 \quad (3.1)$$

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 сточкой 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 влияет на вид характеристики нелинейности.

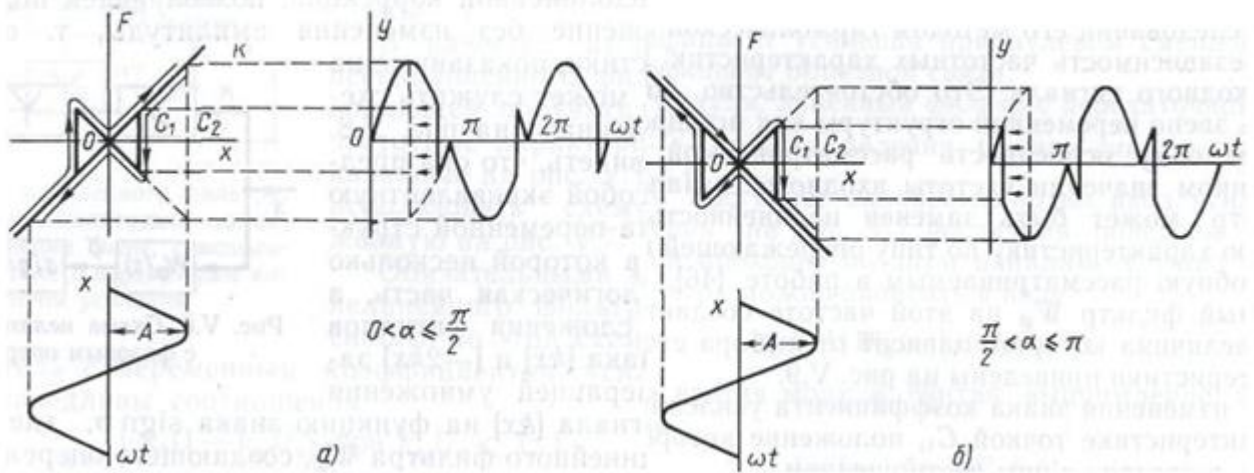


Рисунок 3.2 – Нелинейные характеристики: а – при фазовом опережении до 90° ; б – при фазовом опережении от 90° до 180°

Независимость коэффициентов линеаризации 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 линеаризации

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

где $a(A, \omega)$ и $b(A, \omega)$ – коэффициенты гармонической линеаризации, 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 линеаризации 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

$$W_{\Phi}(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{Ts + 1}{T_1s + 1} \quad (3.9)$$

то создаваемое им опережение

$$a = \arctg \frac{\omega T(1 - \vartheta)}{1 + \omega^2 T^2 \vartheta} \quad (3.10)$$

где через ϑ 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

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

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

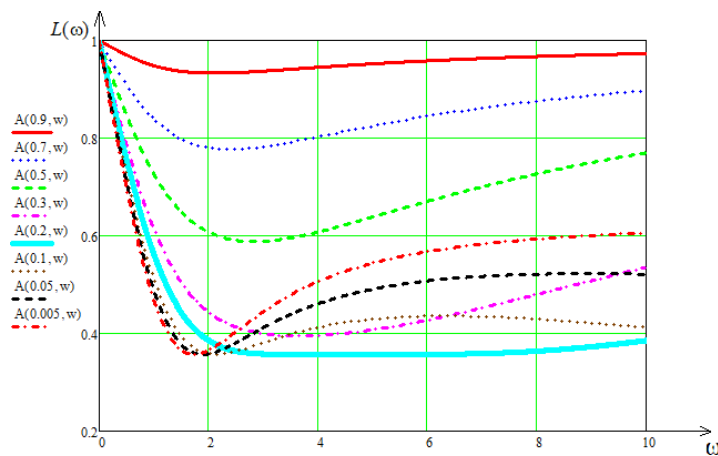


Рисунок 3.3 – Семейство АЧХ фильтра с фазовым опережением при различных значениях параметра T

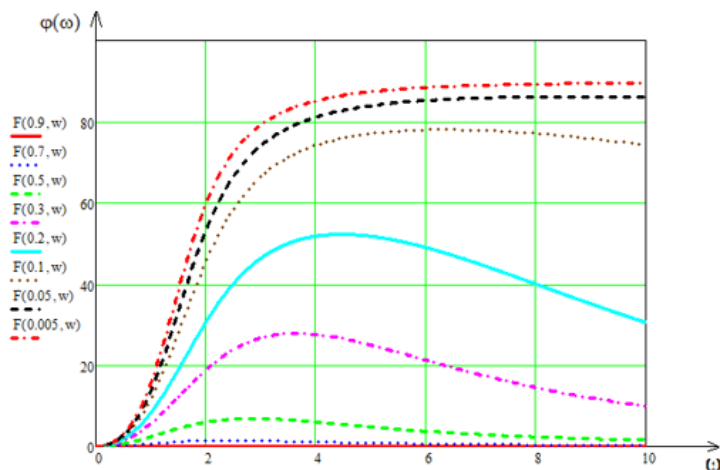


Рисунок 3.4 – Семейство ФЧХ фильтра с фазовым опережением при различных значениях параметра T

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 системы автоматического регулирования является необходимым, но недостаточным условием для обеспечения ее работоспособности.

Качество работы регулирующей системы оценивается на основе определённых свойств, которые проявляются при различных типовых воздействиях. Часто оценка качества регулирования осуществляется на основе установившегося режима, а также точности и качества переходных процессов.

Для оценки качества регулирования обычно используют ступенчатое входное воздействие и ряд критериев, которые описывают форму переходного процесса.

Оценки качества системы могут быть прямыми или косвенными, а также статическими или динамическими. Статические оценки характеризуют установившийся режим работы системы, а динамические – переходной процесс.

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

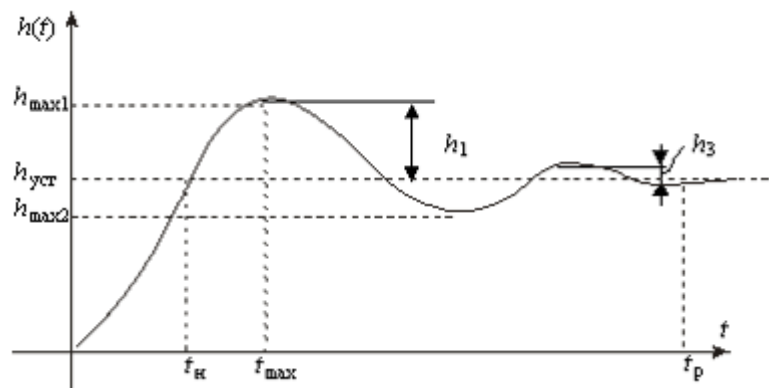


Рисунок 3.5 – Переходная характеристика

К основным прямым оценкам качества относятся 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

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad (3.16)$$

Среди косвенных оценок наибольшее распространение получили интегральные оценки. Существует два 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

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

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

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

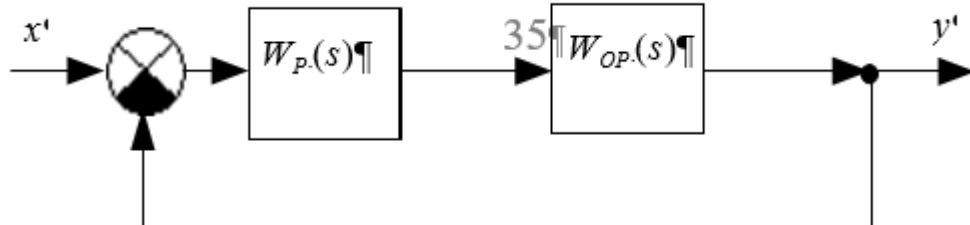


Рисунок 3.6 – Схема системы с ОУ второго порядка
Передаточная функция

Объекта управления

$$W_{OP}(s) = \frac{k_0}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} \quad (3.19)$$

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

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

$$W_p(s) = k_{PEГ} \cdot \left(k_p + \frac{1}{T_{И} s} + \frac{k_d T_d s}{T_d s + 1} \right) \quad (3.20)$$

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

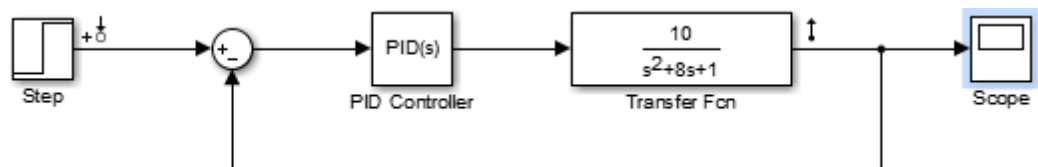


Рисунок 3.7 – Структурная схема САР в MatLab

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

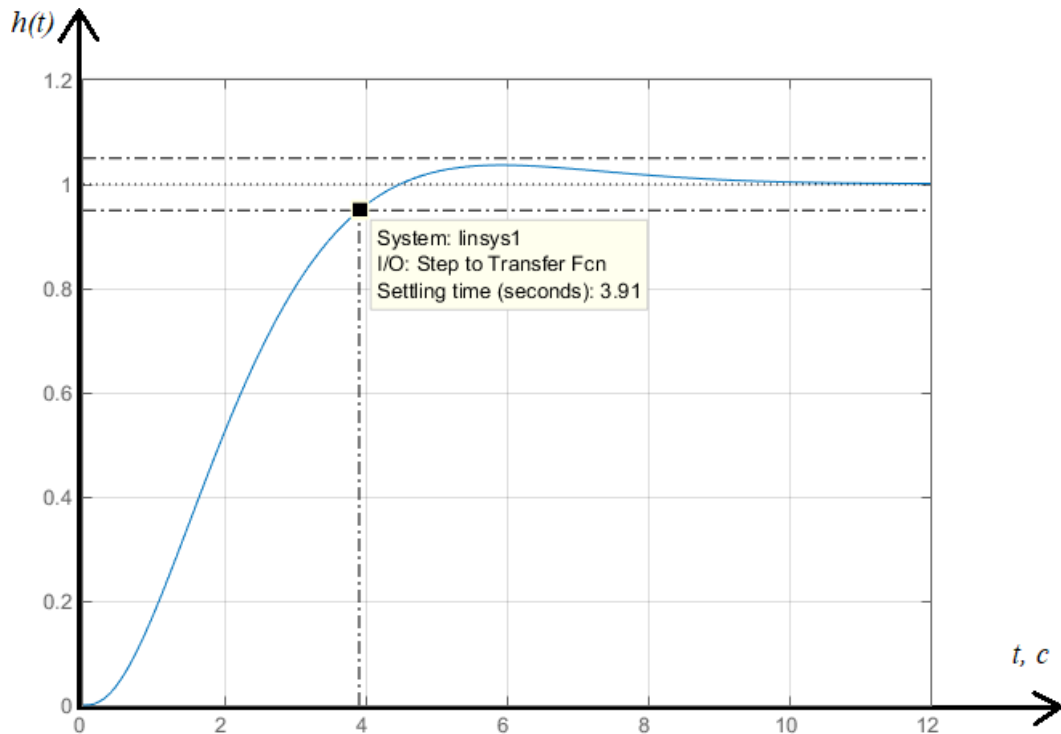


Рисунок 3.8 – Кривая переходного процесса САР

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

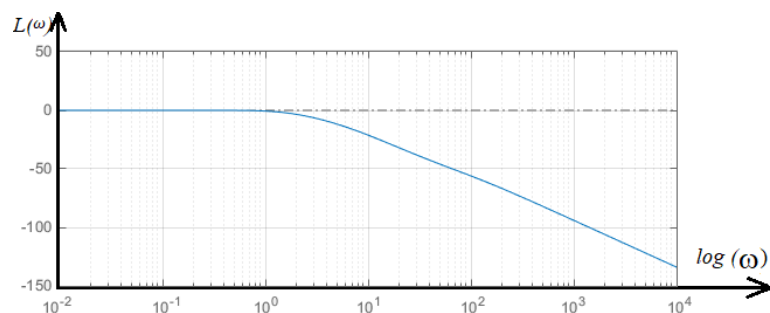


Рисунок 3.9 – Амплитудная частотная характеристика системы

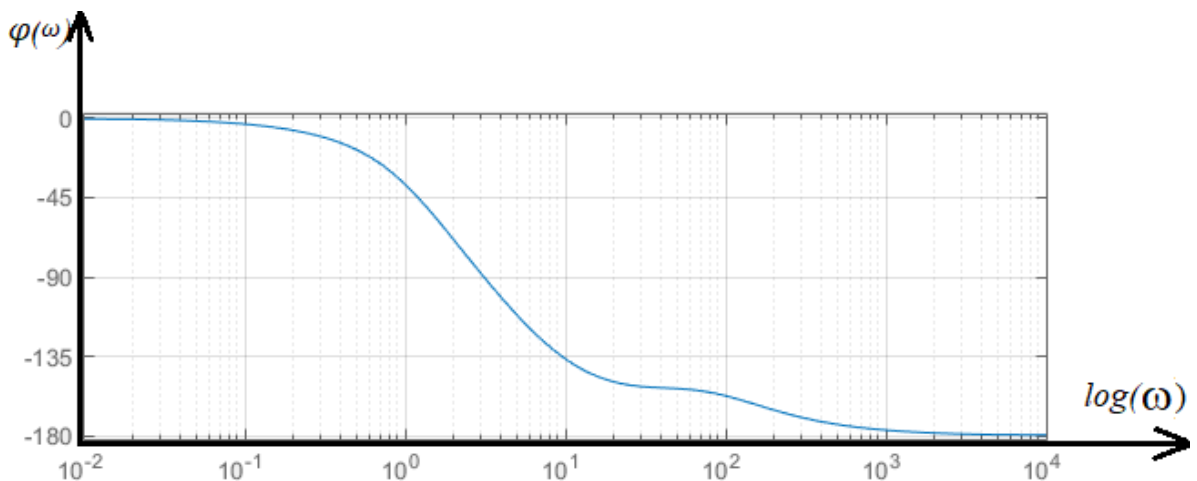


Рисунок 3.10 – Фазовая частотная характеристика системы

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.

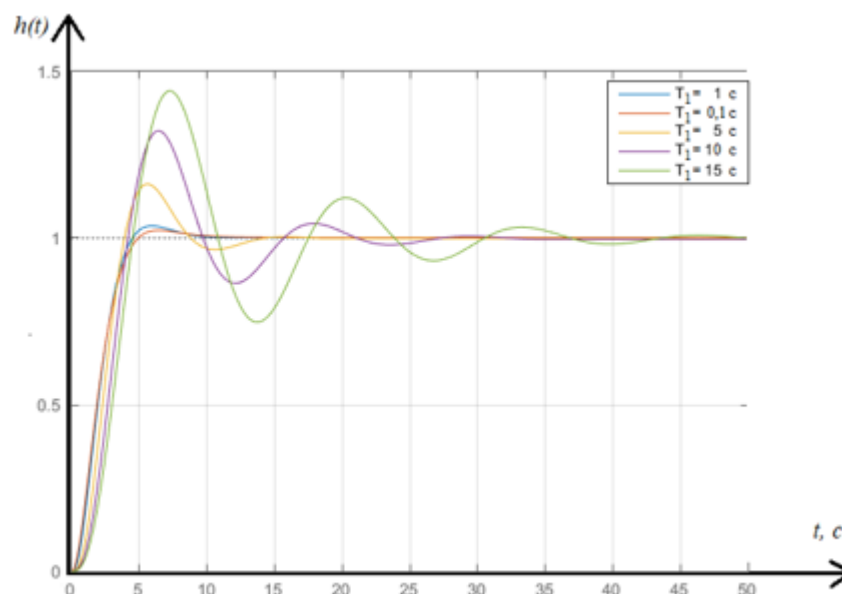


Рисунок 3.11 – Семейство переходных процессов при изменении постоянной времени T_1

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

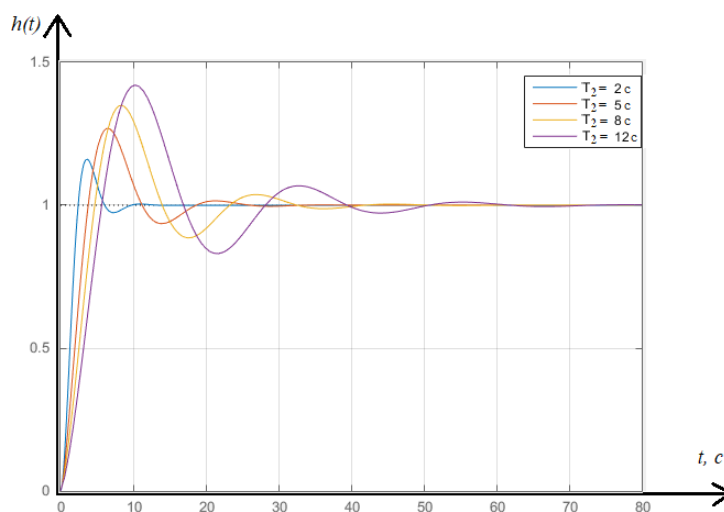


Рисунок 3.12 – Семейство переходных процессов при изменении постоянной времени T_2

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

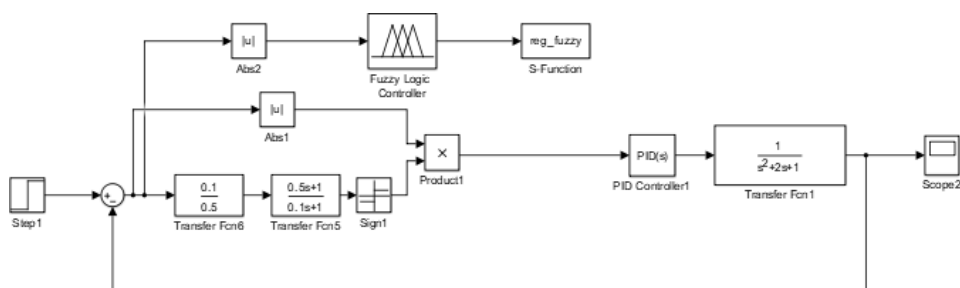


Рисунок 3.13 – Структурная схема САУ с КУ в среде Matlab

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.

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 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 3.14 и 3.15 соответственно.

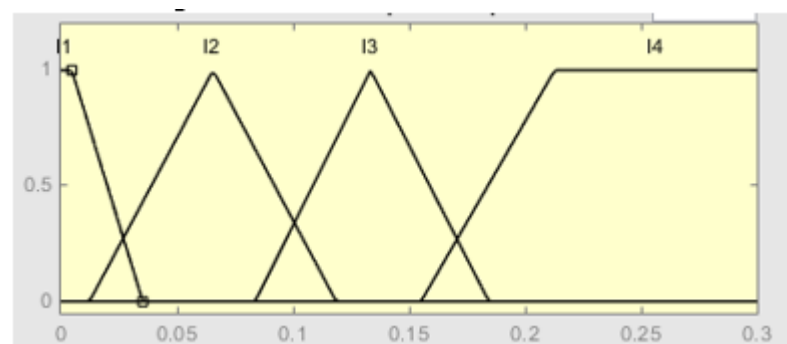


Рисунок 3.14 – Функции принадлежности входной переменной I

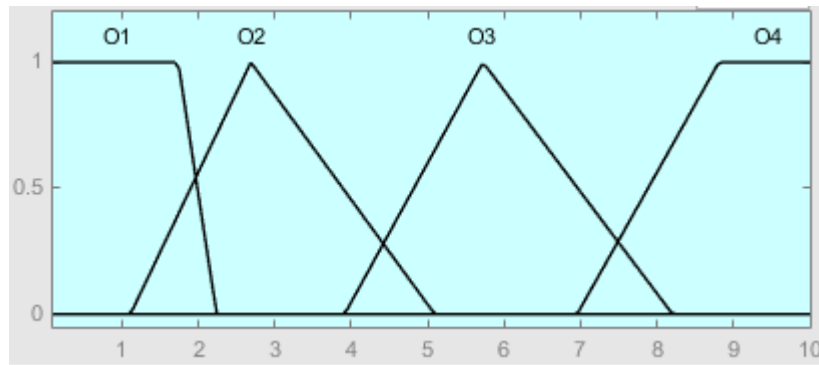


Рисунок 3.15 – Функции принадлежности входной переменной T

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 $T_1 = 0.1$ с., но при изменяющихся параметрах T_1 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_1 и будет принимать различные значения: 0.1, 1, 5, 10, 15.

При проведении исследования осуществляется подстройка системы путем изменения постоянной времени корректирующего устройства T. Это означает, что в процессе эксперимента будут производиться изменения данного параметра с целью достижения оптимальных условий и лучшей регулировки системы.

Изменение параметров T_1 и T_2 объекта управления может оказывать значительное влияние на динамику системы. Исследование позволит оценить, какие значения этих параметров обеспечивают наилучшую производительность и стабильность системы при заданном постоянном времени корректирующего устройства T_1 .

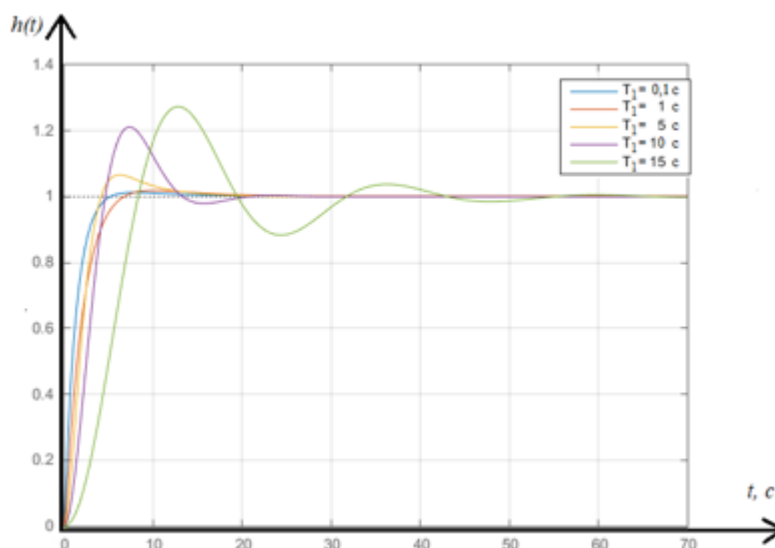


Рисунок 3.16 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_1

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

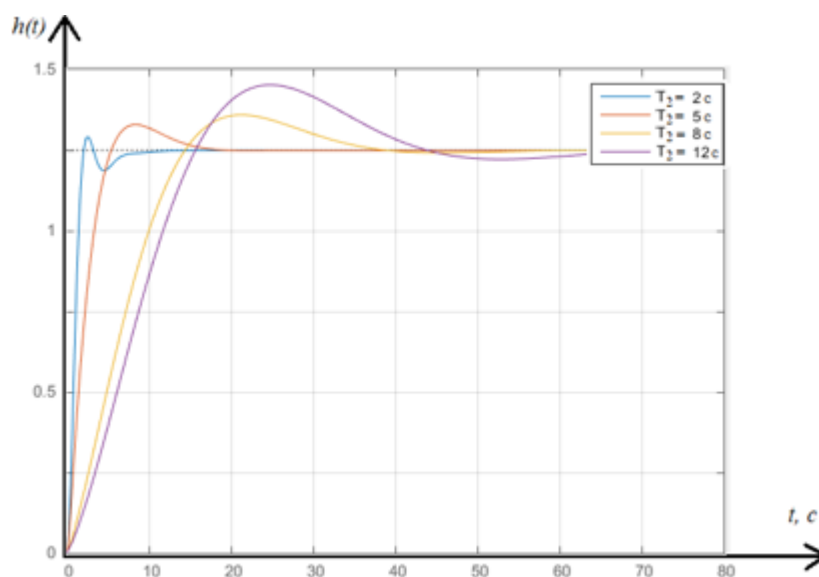


Рисунок 3.17 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

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

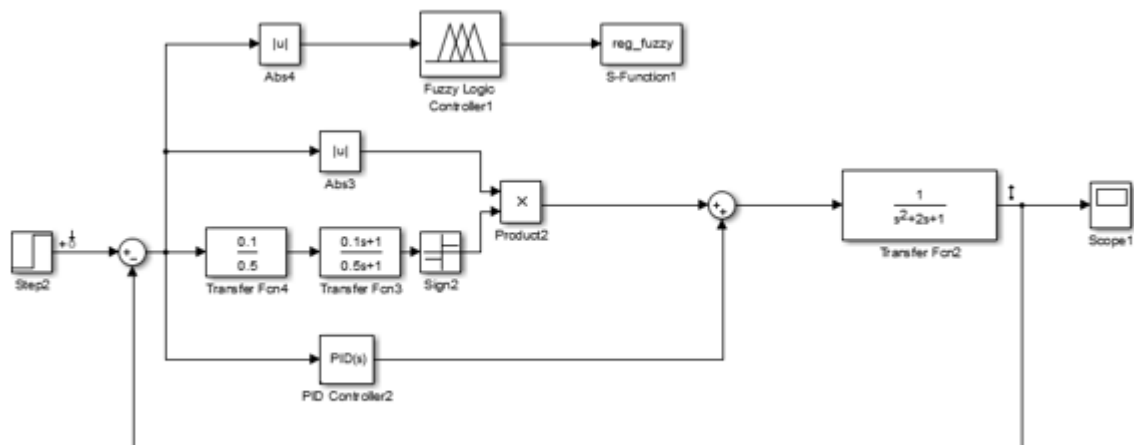


Рисунок 3.18 – Структурная схема САР с параллельным подключенным КУ в среде Matlab

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.

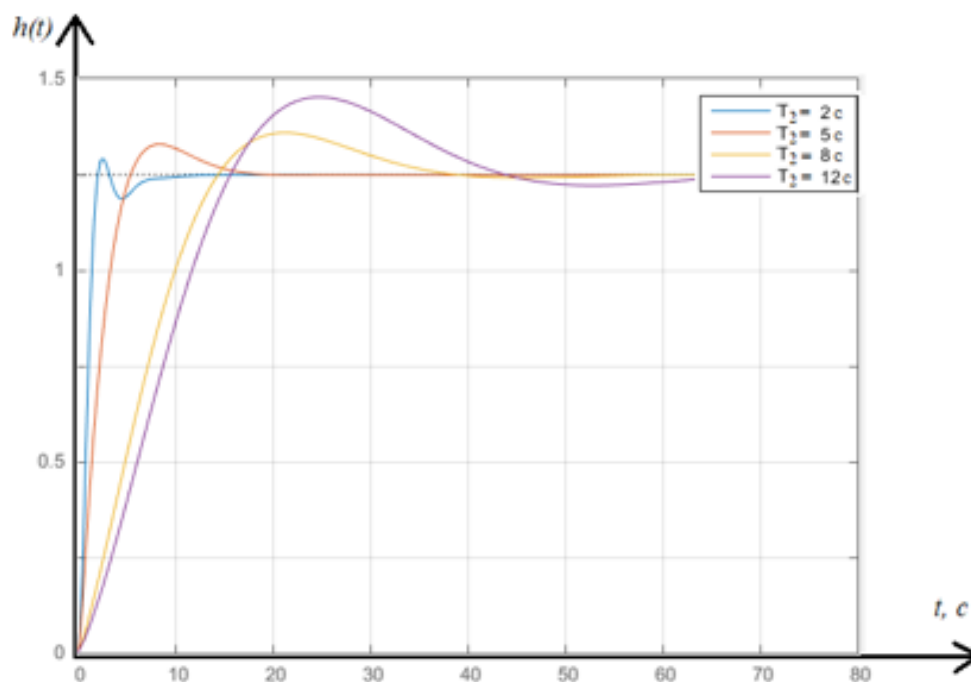


Рисунок 3.19 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

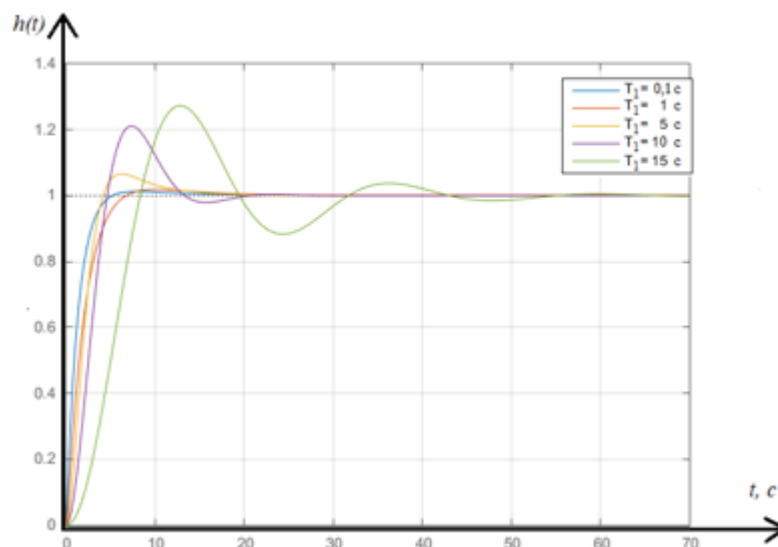


Рисунок 3.20 – Семейство переходных процессов при КУ с изменением постоянной времени T_2

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. 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 ПЦ лучше, чем в системе управления без КУ.

В таблицах и на графиках переходных процессов можно увидеть, что время регулирования (время, требуемое для достижения установившегося значения) с КУ на базе нечеткой логики уменьшается по сравнению с системой без КУ. Это означает, что система с КУ быстрее достигает желаемого значения и стабилизируется.

Кроме того, перерегулирование (максимальное отклонение от установившегося значения) также уменьшается в системе с КУ на базе нечеткой логики. Это означает, что система с КУ более точно регулируется к желаемому значению без значительного превышения или колебания.

Таким образом, в системе управления с КУ на базе нечеткой логики показатели качества, такие как время регулирования и перерегулирование, улучшаются по сравнению с системой без КУ. Это подтверждает положительное влияние использования КУ на базе нечеткой логики на качество переходных процессов в системе.

Также следует отметить, что в приложении А рассмотрены два типа КУ - параллельный и последовательный. Оба типа КУ показывают улучшение показателей качества, но конкретные результаты могут различаться в зависимости от конкретной системы и настроек КУ.

В целом, результаты анализа позволяют сделать вывод о преимуществах и положительном влиянии использования КУ на базе нечеткой логики на показатели качества переходных процессов в системе управления. Это может быть полезной информацией при проектировании и оптимизации систем управления для достижения желаемых показателей качества.

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.

Таким образом, в работе была проведена не только аналитическая и экспериментальная оценка свойств псевдолинейного корректирующего устройства, но и исследование его работы в контексте нечеткой системы управления. Это позволило получить более глубокое понимание применимости и эффективности выбранного корректирующего устройства в различных сферах автоматизации и управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
- 2 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 287 с.
- 3 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.
- 4 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.
- 5 Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети: Монография. – М., ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 221 с.
- 6 Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВПетербург, 2005. – 736 с.
- 7 Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радіоматор, 2018. – 972с.
- 8 Контроллеры Siemens SIMATIC S7-300 – Симекс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://simecs.ru/catalog/siemens/tekhnika-avtomatizatsii/kontrollery-simatic-s7-300/>
- 9 Программируемые логические контроллеры Siemens SIMATIC S7- 300 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://progressavtomatika.ru/siemens-simatic-s7-300.php>
- 10 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.

**Протокол анализа Отчета подобия
заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения**

Заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения заявляет, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Ондасынова Сымбат Даниярқызы

Название: Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов

Координатор: Орынбет Марат Маханбетович

Коэффициент подобия 1: 0.56

Коэффициент подобия 2: 0

Замена букв: 13

Интервалы: 0

Микропробелы: 40

Белые знаки: 11

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальника структурного подразделения констатирует следующее:

- ☒ обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.56 и Коэффициент подобия 2: 0. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

« 12 » июня 202 3 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Окончательное решение в отношении допуска к защите, включая обоснование:
Дипломный проект допускается к защите.

« 12 » июня 202 3 г.
Дата


Подпись заведующего кафедрой /
начальника структурного подразделения

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Ондасынова Сымбат Даниярқызы

Название: Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов

Координатор: Орынбет Марат Маханбетович

Коэффициент подобия 1: 0.56

Коэффициент подобия 2: 0

Замена букв: 13

Интервалы: 0

Микропробелы: 40

Белые знаки: 11

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- ☒ обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- ☐ обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование: В результате проверки на антиплагиат были получены коэффициенты: Коэффициент подобия 1: 0.56 и Коэффициент подобия 2: 0. Работа выполнена самостоятельно и не несет элементов плагиата. В связи с этим, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите перед государственной комиссией.

«12» июня 2022 г.

Дата



Подпись Научного руководителя

ОТЗЫВ

НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

Дипломная работа

Онласынова Сымбат Данияркызы

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема дипломной работы: «Разработка корректирующего устройства для
одного класса объектов»

В дипломной работе рассматривается разработка корректирующего устройства для одного класса объектов.

Цель работы - провести исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и системы автоматического управления второго порядка с псевдолинейным регулятором на базе нечеткой логики.

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 САУ, в которой изменение постоянной времени псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением осуществляется на основе нечеткой логики.

Данная дипломная работа отличается проработанностью, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведенные исследования доказывают отличную теоретическую подготовку дипломанта.

Считаю, что дипломная работа студентки Онласынова С.Д. присуждения академической степени бакалавра по специальности 6B07103 – Автоматизация и роботизация. На основании вышеописанной характеристики выполненной работы, уровня и качества результатов студентка Онласынова С.Д. допускается к защите.

Научный руководитель

Асоц. Проф. К.Т.Н

(должность, уч. степень, звание)

(подпись)

« 12 » июня 2023... г.

Орынбет М.М.

Ф. И.О.

РЕЦЕНЗИЯ

Дипломный проект

Ондасынова Сымбат Даниярқызы

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Тема дипломного проекта: «Разработка корректирующего устройства для одного класса объектов»

Выполнено:

а) презентация на 14 слайдах

б) пояснительная записка на 47 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В дипломной работе показана разработка корректирующего устройства для одного класса объектов.

Цель работы - провести исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и системы автоматического управления второго порядка с псевдолинейным регулятором на базе нечеткой логики.

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.

Данный дипломный проект отличает проработанность, научно-исследовательский подход и полноту изложенного теоретического материала. Приведенные исследования доказывают отличную теоретическую подготовку дипломанта.

Оценка работы

Считаю, что дипломная работа заслуживает оценки 95%, а студентка Ондасынова С.Д. присуждения академической степени бакалавра по специальности 6В07103 – Автоматизация и роботизация. На основании вышеописанной характеристики выполненной работы, уровня и качества результатов студентка Ондасынова С.Д. допускается к защите.

Рецензент

К.т.н. доцент КазНУ им. Альфараби

Туманов И.Е.

« 9 »

2023 г.