

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

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки: Управление в технических системах
Отделение школы (НОЦ): Автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование влияния настроек регулятора Смита на качество регулирования УДК 681.515.8-77

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР	Коновалов Виктор Иванович	к.т.н.		
Руководитель ООП	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Баннова Кристина Алексеевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОКД ИШНКБ	Авдеева Ирина Ивановна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОАР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

Планируемые результаты обучения по направлению
27.04.04 «Управление в технических системах»

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

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

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки: Управление в технических системах
Отделение школы (НОЦ): Автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Пушкарев М.И.

(Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

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

Студентке:

Группа	ФИО
8АМ61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы

Тема работы:

Исследование влияния настроек регулятора Смита на качество регулирования	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	N 2181/с от 28 марта 2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2018
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

В данной выпускной квалификационной работе будут рассмотрены примеры промышленных ОУ с запаздыванием, методы управления объектов с запаздыванием. Будет произведено исследование влияния настроек регулятора Смита на качество регулирования. Реализация данного исследования будет проведена в программном продукте Matlab Simulink. Задача состоит в том, что как правильно настроить предиктор Смита для получения желаемых показателей качества САУ, когда объект управления является апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном. Будут наблюдаться переходные процессы в системе при изменении параметров модели объекта управления, а также проанализируем замкнутую систему с использованием предиктора Смита.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор и анализ методов управления объектами с запаздыванием. Примеры оценки устойчивости САР с запаздыванием. 2. Результаты моделирования управления объектом в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием. 3. Моделирование для объектов управления в виде интегрирующего звена с запаздыванием.
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	Презентация в Microsoft PowerPoint

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Баннова Кристина Алексеевна
Социальная ответственность	Авдеева Ирина Ивановна
Раздел, выполненный на иностранном языке	Шепетовский Денис Владимирович

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

Обзор литературы
Объект и методы исследования
Расчеты, аналитика, исследование методов управление объектов с запаздыванием
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
Социальная ответственность
Examples of industrial object of control with delay

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	15.10.2016 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделение автоматизации и робототехники	Коновалов В.И.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы		

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

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки: Управление в технических системах
Уровень образования – магистратура
Отделение школы (НОЦ): Автоматизации и робототехники
Период выполнения – осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2018
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) /вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.04.2018 г.	Основная часть	70
05.05.2018 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
12.05.2018 г.	Раздел, выполненный на иностранном языке	10
24.05.2018 г.	Социальная ответственность	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР	Коновалов Виктор Иванович	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8AM61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы

Школа	ИШИТР	Отделение	АиР
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):	Затраты на выполнение НИР включают в себя затраты на сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, основную и дополнительную заработную платы
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	НИР выполнялась в соответствии со стандартной системой налогообложения, отчислений,

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Предпроектный анализ	Определение потенциальных потребителей результатов исследования и анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценка готовности проекта к коммерциализации. Проведения FAST анализа и SWOT-анализ. Диаграмма Исикавы.
2. Инициация проекта	Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, трудозатраты и функции исполнителей проекта
3. Планирование управления научно-техническим проектом	Составление перечня этапов и работ по выполнению НИР, составление калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов. Бюджетирование и организация структуры предприятия.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Определение эффективности и перспектив научного исследования.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
2. Функционально-стоимостная диаграмма
3. График проведения и бюджет НИР
4. Календарный план проекта
5. Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе (диаграмма Ганта)
6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2018
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Баннова Кристина Алексеевна	К.Э.Н.		01.03.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы		01.03.2018

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы

Инженерная школа информационных технологий и робототехники		Отделение автоматизации и робототехники	
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	27.04.04 Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p>Целью магистерской диссертации является исследование влияния настроек регулятора Смита на качество регулирования. Реализация данного исследования проводилось в программном продукте Matlab Simulink. Область применения – промышленное производство. Рабочее помещение - офисное место (стол, стул, персональный компьютер)</p>
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p> <p>1.3. Рекомендации по минимизации влияний на работника.</p>	<p>1.1. В качестве вредных факторов согласно ГОСТ 12.0.003-74 выделены: показатели микроклимата и освещения, шум, вибрация, электромагнитное излучение, психофизические факторы (нервно психологические, статические, умственные, монотонность).</p> <p>1.2. В качестве опасных факторов выделены: опасность поражения электрическим током, короткое замыкание, статическое электричество.</p> <p>1.3. Приведены рекомендации по улучшению микроклимата в помещении согласно СанПиН 2.2.4.548–96.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <p>2.1. Анализ воздействия на окружающую среду</p> <p>2.2. Рекомендации по минимизации влияния на окружающую среду.</p>	<p>2.1. Деятельность по разработке ПО не связана с производством, поэтому влияние на окружающую среду минимально.</p> <p>2.2. Рассмотрена утилизация бумажных отходов и неисправных комплектующих ПК. Правила утилизации люминесцентных ламп.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <p>3.1. Перечень возможных ЧС на объекте.</p> <p>3.2. Меры по предотвращению и ликвидации ЧС и их последствий.</p>	<p>3.1. Возможные ЧС в офисном помещении является возникновение пожара. Определена категория помещений по пожароопасности по НПБ 105-03 и класс зон взрывопожароопасности по СП 12.13130.2009. Рассмотрены меры пожарной безопасности.</p> <p>3.2. Приведены способы защиты от пожара.</p>

<p>4. 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; <p>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>4.1 Охрана труда для операторов и пользователей ПК. Требования безопасности во время работы. Соответствие рабочего места по требованиям и правила и нормы поведения на производстве согласно НТД (ГОСТ 12.2.032-78)</p> <p>4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. Соблюдение "Трудового кодекса Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018)</p>
--	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2018
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Авдеева Ирина Ивановна	-		01.03.2018

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ61	Аскарлов Айгерим Сапаргаликызы		01.03.2018

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 110 страниц, 49 рисунков, 34 таблиц, 50 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, объект управления с запаздыванием, система автоматического управления, замкнутая система, предиктор Смита.

Объектом исследования являются САУ с запаздыванием.

Цель работы – исследование САУ объектами с запаздыванием, обзор методов управления объектами с запаздыванием, рассмотрение примеров промышленных объектов управления с запаздыванием, а также применение предиктора Смита, выводы и рекомендации по применению регуляторов.

Реализация данного исследования проводилась в программном продукте Matlab Simulink. Задача была в том, что как правильно настроить предиктор Смита для получения желаемых показателей качества САУ, когда объект управления является апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном. Наблюдались переходные процессы в системе при изменении параметров модели объекта управления, а также проанализировали замкнутую систему с использованием предиктора Смита.

Область применения: промышленное производство.

Экономическая эффективность работы обоснована с точки зрения ресурсосбережения и получения прибыли.

В будущем планируется более подробное рассмотрение САУ с запаздыванием, определение решений для искоренения запаздываний и возможное применение на технологических объектах.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

САУ – система автоматического управления

ОУ – объект управления

САР – система автоматического регулирования

ПП – переходной процесс

ПФ – передаточная функция

ЗС – замкнутая система

АФЧХ - амплитудно-фазовая частотная характеристика

ЛФЧХ – логарифмическая фазовая частотная характеристика

ТОУ – технологический объект управления

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	14
1 Примеры промышленных ОУ, имеющих запаздывание	17
1.1 Общие сведения о запаздываниях	17
1.2 Запаздывание в промышленных объектах управления	18
1.3 Примеры объектов управления с запаздыванием.....	20
1.3.1 Вращающиеся печи	22
1.3.2 Регулирование количеств угля на ленточных транспортерах	23
2 Обзор и анализ методов управления объектами с запаздыванием	25
2.1 Устойчивость систем с запаздыванием (критерий устойчивости Найквиста).....	27
2.2 Примеры оценки устойчивости САР с запаздыванием	31
3 Результаты моделирования управления объектом в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием.....	35
3.1 Апериодическое звено первого порядка с запаздыванием.....	35
3.2 Инженерный метод настройки ПИД-регулятора.....	37
3.3 Применение предиктора Смита для объектов управления в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием	40
4 Моделирование для объектов управления в виде интегрирующего звена с запаздыванием	56
4.1 Интегрирующее звено с запаздыванием	56
4.2 Формульный метод определения настроек ПИД-регулятора	60
4.3 Применение предиктора Смита для объектов управления в виде интегрирующего звена с запаздыванием.....	61
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	71
5.1 Предпроектный анализ	71
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	71
5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	72
5.2 Инициация проекта	77

5.2.1 Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, функции исполнителей проекта.....	77
5.3 Планирование управления научно-техническим проектом	79
5.4 Оценка экономической эффективности проекта	87
5.4.1 Оценка научно-технического уровня НИР	87
6 Социальная ответственность	90
6.1 Производственная безопасность	90
6.1.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	91
6.2 Экологическая безопасность.....	99
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	101
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А	113

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема оптимального по быстродействию управления объектами и процессами приобрела первостепенное значение. Так как длительность переходного процесса при управлении является одним из основных показателей качества работы автоматических систем. Сокращение продолжительности переходных процессов при регулировании многих технологических объектов повышает производительность агрегатов, улучшает качество продукции, позволяет получить значительный экономический эффект. Известно, что система, удовлетворяющая требованиям максимального быстродействия, является наилучшим показателем качества.

Стремительное увеличение требований к темпам развития производства и к качеству продукции способствует улучшению автоматизации производственных процессов. В результате увеличение темпов, управляемые величины начали изменяться с большой скоростью во времени. Время играет ключевую роль, которое имеет значение от начала измерения сигнала регулируемой величины до принятия решения и выдачи управляющего сигнала. Эффект запаздывания появляется в автоматическом управлении большими системами при наличии обратной связи. Например, системы с большими расстояниями, системы управления ракетами и высокоскоростными летающими аппаратами.

Запаздывающая реакция приводит

- к возникновению нарушения процесса в управляющей системе;
- к автоколебаниям в замкнутой системе;
- к полной потере устойчивости системы.

На данный момент ряд объектов химической технологии, биологии, экономики, ряд областей науки и техники описываются дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом. Такие уравнения характеризуют работу объектов, в которых один элемент или группа являются

запаздывающими звеньями. Явление временного запаздывания сигналов связано с тем, что при изменении входного сигнала выходной сигнал объекта управления (ОУ) начинает изменяться не сразу, а с некоторой задержкой по времени.

В последнее время ужесточение требований к работе САУ привело к необходимости учета даже незначительных запаздываний в каналах связи объекта. Учет явления запаздывания, которое может отрицательно влиять на процессы управления, позволит повысить качества СУ.

Запаздывания, встречающиеся в ОУ, негативно влияют на процессы регулирования и могут приводить к потере устойчивости системы управления и ухудшению качества процессов управления. Поэтому их так важно учитывать при проектировании систем автоматики.

Однако практическое применение регуляторов для различного рода технологических процессов часто затруднено вследствие возникающего при данных процессах запаздывания. Будучи в общем случае постоянной, переменной или случайной величиной, запаздывание является одним из основных факторов, существенно снижающих динамические показатели оптимальных по быстродействию СУ. Поэтому возникает необходимость разработки и исследования методов синтеза оптимальных по быстродействию регуляторов, обеспечивающих эффективную работу систем управления в данных условиях.

При синтезе автоматических систем регулирования (САР) с запаздыванием приходится не только учитывать влияние на динамику процессов, протекающих в системе, но и обращаться к законам регулирования, которые позволяют повысить качество регулирования даже при существовании по величине запаздывания. Среди таких законов наиболее известен предиктор Смита.

В данной выпускной квалификационной работе будут рассмотрены примеры промышленных ОУ с запаздыванием и методы управления объектов с запаздыванием. Будет произведено исследование влияния

настроек регулятора Смита на качество регулирования. Реализация данного исследования будет проведена в программном продукте Matlab Simulink. Задача состоит в том, как правильно настроить предиктор Смита для получения желаемых показателей качества САУ, когда объект управления является апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном. Будут наблюдаться переходные процессы в системе при изменении параметров модели объекта управления, а также проанализируем замкнутую систему с использованием предиктора Смита.

В данной работе для настройки ПИ и ПИД-регулятора используется «Инженерный метод» и «Формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов без самовыравнивания», который предполагает расчет регулятора с последующим варьированием параметров для получения «оптимального» процесса.

1 ПРИМЕРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ, ИМЕЮЩИХ ЗАПАЗДЫВАНИЕ

1.1 Общие сведения о запаздываниях

В последнее время большое число объектов химической технологии, биологии, экономики, ряд областей науки и техники описываются дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом. Такие уравнения характеризуют работу объектов, в которых один элемент или группа являются запаздывающими звеньями.

В общем случае время запаздывания может быть постоянной, переменной или случайной функцией.

Явления запаздывания можно встретить во многих современных технологических объектах управления (ОУ). При изменении сигнала на входе объекта управления, сигнал на выходе объекта начинает изменяться только через некоторый интервал времени [3].

Запаздывания делятся на сосредоточенные, известные как «чистые» и распределенные. Сосредоточенные запаздывания могут быть локализованы по управлению, состоянию и выходу ОУ. Примеры объектов с запаздыванием по управлению могут быть ленточные транспортеры, реактивные двигатели в переходных режимах, прокатные станы, процессы сушки и горения. Примеры по состоянию – процессы с рециклом, в частности, процессы в измельчительных машинах или процессы в химических реакторах. По выходу – объекты управления с инерционными датчиками измерения [7].

Запаздывания, сосредоточенные по состоянию в объектах управления, негативно воздействует на синтез системы. Они могут привести к автоколебанию, ухудшению качества процессов управления, а также к потере устойчивости системы. Следовательно, возникает потребность управления

такими объектами с учетом отрицательного влияния запаздываний на систему управления.

1.2 Запаздывание в промышленных объектах управления

Транспортное запаздывание встречается в ряде технологических процессов в металлургии, нефтехимии, химической промышленности. Данное запаздывание появляется тогда, когда в технологическом процессе объект (энергия, вещество и др.) перемещается из одной точки в другую с определенной скоростью. При этом характеристики и свойства не изменяются.

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

Другим примером объектов, содержащих транспортное запаздывание, могут служить производства стекла и бумаги. На многих этапах этих производств, присутствуют запаздывания, их значения в несколько раз превышают постоянные времени объекта, что создает большие трудности при управлении процессами.

Большие транспортные запаздывания наблюдаются также при регулировании процессов горения, например, выходная величина, характеризующая процесс горения в топке мазутной печи, то есть содержание кислорода в дымовых газах, может способствовать появлению транспортного запаздывания около минуты. При этом весомая часть этого запаздывания сосредоточена в датчике и определяется временем прохождения газа через отборное устройство газоанализатора.

Транспортные запаздывания, которые нельзя не учесть, имеют место при регулировании уровня жидкости в баках, при управлении шаровыми мельницами и другими объектами с запаздываниями в трубопроводах и объемах.

Присутствие транспортного или, как еще называют, «чистого» запаздывания в технологическом процессе приводит к тому, что сигнал на выходе объекта в течение некоторого времени после применения входного сигнала остается неизменным. Однако существует другой вид запаздывания в реальных объектах управления. Если объект характеризуется несколькими близкими по значению источниками времени или является объектом с распределенными параметрами, математическая формализация представлена уравнением в частных производных, то в течение некоторого времени после подачи управляющего воздействия выходной сигнал также практически не изменяется. В данном случае объект обладает емкостным или эффективным запаздыванием.

Во многих тепловых процессах, а также в процессах, где происходит передача сигналов на расстояние при помощи длинных электрических, гидравлических или других линий, наблюдается запаздывание, распределенное по всей длине линии. Это запаздывание, в отличие от «чистого» запаздывания, приводит к искажению передаваемых сигналов. Тепловые процессы полностью могут быть описаны дифференциальными уравнениями в частных производных[2].

Прохождение сигналов через объекты с распределенными параметрами при помощи некоторых упрощающих каналов можно свести к задаче прохождения сигнала относительно координаты расстояния. Так бывает, как правило, в случае электрических и гидравлических длинных линий и иногда в теплопередачах. В этих случаях рассматриваемые объекты можно описать при помощи линейных уравнений в частных производных первого и второго порядка.

Скорый рост коммуникационных и информационных технологий привел к широкому использованию цифровых контроллеров, применяемых для современных систем автоматики. Однако, не смотря на высокое быстродействие, в силу сложности алгоритма управления, современные контроллеры могут вызвать более чем неприемлемое запаздывание.

Явления запаздывания встречаются в объектах различной физической природы. Они наблюдаются не только в технике, но также в биологии, экономике и оказывают существенное влияние на устойчивость и качество процессов управления. Наиболее ярко эффект запаздывания сказывается на динамике оптимальных релейных систем, к которым в частности относятся оптимальные по быстродействию системы управления.

1.3 Примеры объектов управления с запаздыванием

Ярким примером технической системы, которая функционирует в условиях нестационарной внешней среды, может быть надводное судно. Судно подвергается возмущениям, которые имеют различные происхождение и природу. Можно выделить три типа возмущений, которые могут существенно повлиять на качество управления судном: волновые воздействия, ветровые воздействия и течение воды. Система управления передвижением судна решает различные задачи[13]:

- движение по заданной траектории;
- стабилизация курса;
- стабилизация поперечной и продольной скоростей;
- динамическое позиционирование судна в точке.

Динамическим показателям качества предъявляют высокие требования в САУ. Например, для решения задачи стабилизации курса установившаяся ошибка, не может превышать величину одного градуса. Применительно к нефтеналивным судам, которые имеют большое водоизмещение и длину

более 100 метров, можно синтезировать систему динамического позиционирования в определенной точке. Это при том, что судно может располагаться более суток под нефтяной вышкой, система управления обязана обеспечивать точность позиционирования с возможным отклонением, при различного рода возмущениях, не более 20 сантиметров.

В настоящее время актуальной для обширного класса технических объектов управления является задача полной компенсации возмущающих воздействий, в этом нет никаких сомнений. На сегодняшний день получено огромное число алгоритмов управления в различных условиях внешних воздействий. При наличии возмущения подходы к управлению, как правило, предполагают применение интегральных регуляторов, встраивание возмущающего воздействия известной модели (комбинированные регуляторы) или повышение в системе порядка астатизма.



Рисунок 1.3.1 – Обобщающая структурная схема системы управления с запаздыванием

1.3.1 Вращающиеся печи

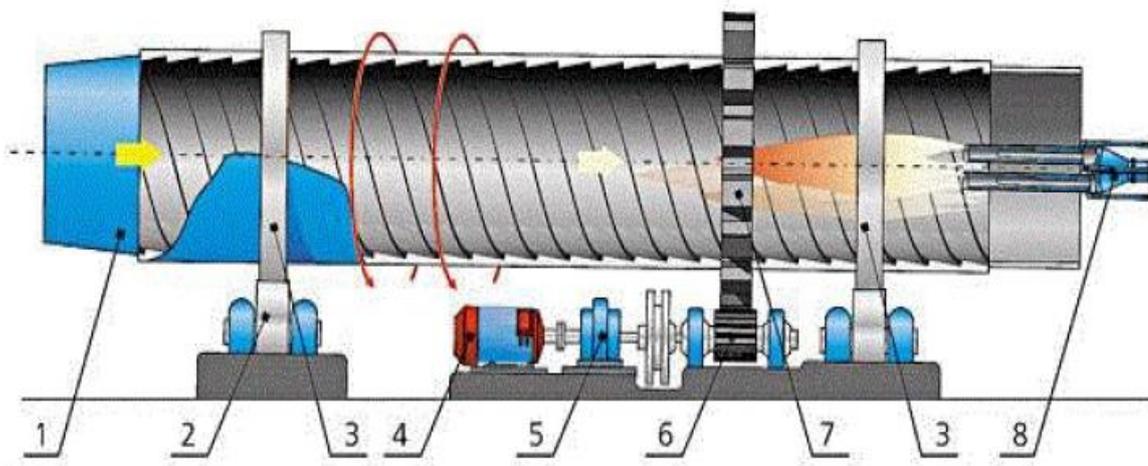
На примере вращающихся печей рассмотрим особенности технологических объектов управления.

Вращающаяся печь – это технологический агрегат в виде цилиндра непрерывного действия. Из-за наклона печи и вращения, происходит процесс перемещения материала, при этом сжигается топливо и выделяется тепло. Печи отличаются между собой габаритами и дизайном.

Печи бывают для обжига цинка, цемента, ртутьсодержащих веществ, для спекания бокситов, кальцинации глиноземов, а так же для сушки металлургических промежуточных материалов[9].

Вращающиеся печи принадлежат к печам теплообменникам. Температура в таких вращающихся печах временами достигает до 1650 °С. При передвижении по длине печи продуктов сгорания топлива, они охлаждаются, и после этого режим работы печи становится конвективным. В зависимости от вида и параметров технологического процесса в печи происходит распределение зон с конвективным и радиационным режимом работы.

Помимо печей, для сушки сульфидного сырья, все остальные печи выполняют работу в противоточном режиме. Попадающие в печь материалы могут иметь влажность, содержащей до 40 % воды. Шихта (материал) поступает в хвостовую (то есть в верхнюю) часть печи и систематический движется навстречу газам, которые возникают в процессе сгорания топлива в головной части печи. Дальнейший процесс, из барабана обработанные материалы попадают в холодильник, а газы и газообразные продукты поступают в специальную систему пыле-газоочистки. Для того чтобы отапливать такие печи, можно использовать материалы в виде твердого топлива и мазута, а также природный газ и т.д.



Наименования конструкции: 1 – корпус, 2 – опорная станция, 3 – опорный бандаж, 4 – двигатель, 5- редуктор, 6- приводная шестерня, 7 – зубчатый венец, 8 – горелочное устройство

Рисунок 1.3.1.1 – Вращающиеся печи

1.3.2 Регулирование количества угля на ленточных транспортерах

Ленточный транспортер угля по причине своей металлической конструкции, состоящих из связанных между собой ленты, став, привода и роликовых опор, которые позволяют передвигать уголь любой фракций на расстояние до 60 метров и под углом до 15 градусов. За счёт высокой производительности, применяется в производстве по добычи угля.

Ленточной конвейер основан на простом принципе работы. Бесконечная гибкая лента, основываясь на верхние и нижние роликовые опоры, огибает расположенные по концам оборудования приводной и натяжной барабаны. Она располагается как перпендикулярно горизонтальной линии, так и под углом 1-30 градусов.

Лента приводится в действие из-за приводного барабана, а требуемое натяжение получает от натяжного барабана. Загрузочная воронка применяется для погрузки сыпучих материалов на рабочую поверхность. Обычно ремонтируют верхнюю часть оборудования, над концевым барабаном. С помощью приводного барабана происходит разгрузка

материалов. Однако разгрузка может быть промежуточной, для этого используют передвижную тележку или стационарный плужковый сбрасыватель. Поток сбрасываемой с барабана продукции направляется разгрузочной коробкой.

Непрерывная подача угля в мельницу является основной задачей. Данный процесс начинается, когда в бункер подается уголь. Далее при помощи ленточного транспортера уголь подается на весы, после взвешивания уголь ссыпается в мельницу. Подвешенным на плече весов грузом регулируется вес угля. При наличии несоответствия между массой заданной и действительной угля, то выдается ошибка. Количество угля, поступившего на ленточный транспортер из бункера, измеряется не сразу, а спустя определенное количество времени, то есть время запаздывания, которое зависит от скорости транспортировки угля.

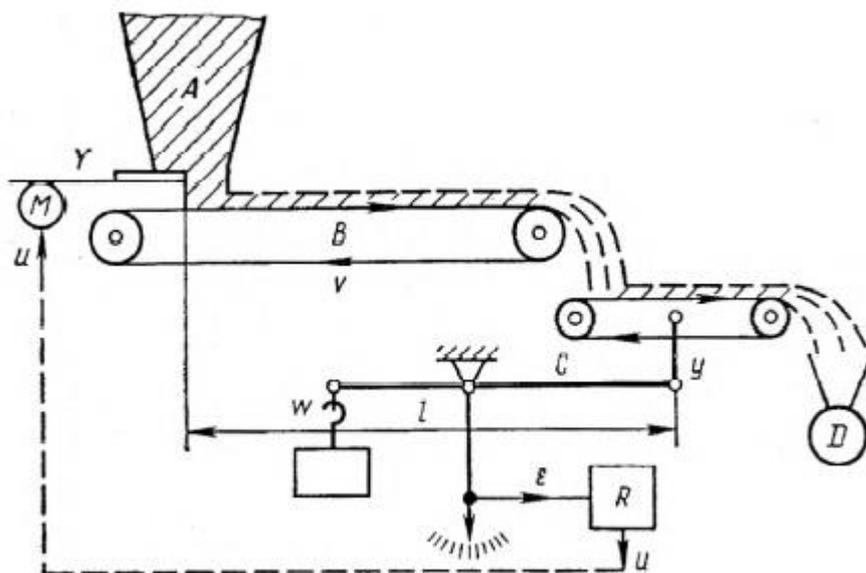


Рисунок 1.3.2.1 – Ленточный транспортер, предназначенный для подачи угля

2 ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Улучшение качества управления объектов с запаздыванием может быть осуществлено следующими способами:

- Реализация сложной структуры для объектов управления, которое позволит снизить отрицательное влияние запаздывания;
- Уменьшение запаздывания в системе управления при помощи внесения определенных изменений в конструкцию;
- Применение различных предикторов–регуляторов с компенсацией запаздывания (предиктор Смита, регуляторы Ресвика, Калмана, Острема и др. [23]);
- Применение цифровых методик синтеза алгоритмов управления объектами с запаздыванием. Это регулятор Цыпкина [23], апериодические регуляторы и регуляторы с конечным временем установления [35].

В целом, большинство систем управления, которые обладают запаздыванием, можно рассмотреть, разделив на три класса:

- объекты со звеном запаздывания по управлению;
- объекты со звеном запаздывания по состоянию, из которых выделяют особый класс – объекты нейтрального типа;
- объекты со звеном запаздывания по состоянию и управлению.

Характеристическое уравнение системы с постоянным запаздыванием отличается, от характеристического уравнения системы без запаздывания тем, что левая часть является не полиномом, а трансцендентной функцией оператора s . Характеристическое уравнение системы независимо от места добавления запаздывающего звена, имеет следующий вид:

$$D_{\tau}(s) = Q(s) + R(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (2.1)$$

где $Q(s)$ – знаменатель ПФ, $R(s)$ - числитель ПФ, $e^{-s\tau}$ - запаздывание.

А также, в отличие от обычного алгебраического уравнения имеет бесконечное множество корней.

$$e^{-s\tau} = 1 - s\tau + \frac{s^2\tau^2}{2!} - \frac{s^3\tau^3}{3!} + \dots \quad (2.2)$$

Для объектов с запаздывающим управлением, при синтезе САУ, требуется учет влияния воздействия параметра запаздывания на качество переходных процессов и устойчивость в замкнутой системе. Идея Отто Смита была уникальным подходом, для ОУ с запаздыванием [20].

Синтез систем для объектов управления с запаздыванием требует учета влияния величины запаздывания на устойчивость и качество переходных процессов в замкнутой системе. Основная идея заключалась в построении систем управления, в котором запаздывания не влияет на качество переходных процессов и на устойчивость системы. Однако недостатками такого подхода является то, что он рассчитан только на объекты управления, которые асимптотически устойчивые. Необходимо точно знать все параметры системы. В последующие годы ученые со всего мира исследовали сложные задачи управления в условиях запаздывания. Были решены задачи для дискретных объектов управления [25], для параметрический не определенных объектов управления [24], для неустойчивых объектов управления [23].

Для того чтобы линейная система с постоянным запаздыванием была устойчива, достаточно и необходимо, обладать левыми корнями уравнения (2.1). Нахождение корней уравнения (2.1) затруднительно, поэтому для исследования устойчивости систем с запаздыванием используют критерии устойчивости.

Нужно принять во внимание, что для исследования систем с запаздыванием алгебраические критерии устойчивости Гурвица и Рауса в их обычной форме непригодны, причем для устойчивости линейных систем первого и второго порядков с запаздыванием только положительности

коэффициентов характеристического уравнения уже становится недостаточно. Существуют различные алгебраические критерии устойчивости для систем с запаздыванием, которые являются аналогами критериев Рауса и Гурвица, однако в инженерной практике они широкого применения не нашли из-за их относительной сложности.

Для исследования устойчивости систем, обладающих запаздыванием, можно использовать частотные критерии, которые основаны на принципе аргумента устойчивости Михайлова и Найквиста, а также можно применить метод D-разбиения.

2.1 Устойчивость систем с запаздыванием (критерий устойчивости Найквиста)

Устойчивость систем для объектов управления без запаздывания, может быть определена обычными способами, и частности, при помощи определителей Гурвица. Если система обладает запаздывающим звеном, то уравнение становится трансцендентным, и определить устойчивость данной системой со звеном запаздывания, при помощи определителей Гурвица практически не возможно.

Уравнение кривой (годографа) Михайлова системы с запаздыванием получают после подстановки в характеристическое уравнение (2.1), т. е.

$$D_{\tau}(jw, e^{-jw\tau}) = Q(jw) + R(jw)e^{-jw\tau} = 0 \quad (2.3)$$

Наличие в (2.3) множителя $e^{-jw\tau}$ делает очертания кривой Михайлова достаточно сложными, и формулировка этого критерия для САУ, обладающей звеном запаздывания становится не такой простой, как для обычных систем.

Более подходящем критерием для исследования устойчивости систем с запаздыванием является применение критерия устойчивости Найквиста.

Формулировка критерия устойчивости Найквиста для систем с запаздыванием в данном случае аналогична формулировке для обычных систем, имеющих дробно-рациональные передаточные функции, а именно:

Для того чтобы системы с постоянным запаздыванием, устойчивая в разомкнутом состоянии, обладала устойчивостью также и в замкнутом состоянии, достаточно и необходимо, чтобы амплитудно-фазовая характеристика $KW(j\omega)$ не охватывала точку $(-1, j0)$ [1].

Фаза вектора системы с запаздыванием по сравнению с системой без запаздывающего звена имеет отрицательное приращение, пропорциональное частоте ω . Коэффициентом пропорциональности является время запаздывания τ [15].

За счет увеличения отрицательного приращения фазы в системе с возрастанием ω возможно нарушение устойчивости системы, устойчивой при $\tau = 0$.

Характеристическое уравнение будет иметь два корня, действительная часть которых равна нулю, при условии, что амплитудно-фазовая характеристика не будет охватывать точку $(-1, j0)$. Остальные корни будут иметь отрицательные действительные части.

Время запаздывания τ_{oi} и соответствующие им частоты ω_{oi} , при которых амплитудно-фазовая характеристика проходит через точку $(-1, j0)$, называется критическими.

Критическое время запаздывания и частота определяется следующим равенством:

$$\begin{cases} |KW(j\omega)| = 1 \\ \theta(\omega) - \tau\omega = +\pi * (2 * n - 1) \end{cases} \quad (2.1.1)$$

Определяя из уравнения (2.1.1) ω_{oi} , можно рассчитать критическое время запаздывания τ_{oi} . Соответственно, если определено ω_{oi} на основании уравнения (2.1.1), тогда критическое время запаздывания равно:

$$\tau_{oi} = \frac{\theta_i}{\omega_{oi}} \quad (2.1.2)$$

Указанное решение $|KW(j\omega)| = 1$ весьма просто выполнить графически (рис. 2.1.1 и 2.1.2), путем определения в точке пересечения годографа $KW(j\omega)$ с единичной окружностью с центром в начале координат. Точка пересечения координат, может определить одновременно как ω_{oi} , так и угол $\theta(\omega_o)$, который, будучи разделен на ω_o , и даст критическое время запаздывания[33].

Рассмотрим ряд случаев, вытекающих из исследования указанного приема:

- Пусть $KW(\omega) < 1$, при $0 \leq \omega \leq \infty$ в этом случае критические частоты отсутствуют; система будет устойчива при любом τ (рис. 2.1.2);
- Пусть $KW(j\omega) > 1$, (рис.2.1.1) в некотором диапазоне частот, тогда имеем несколько критических частот ω_{oi} .

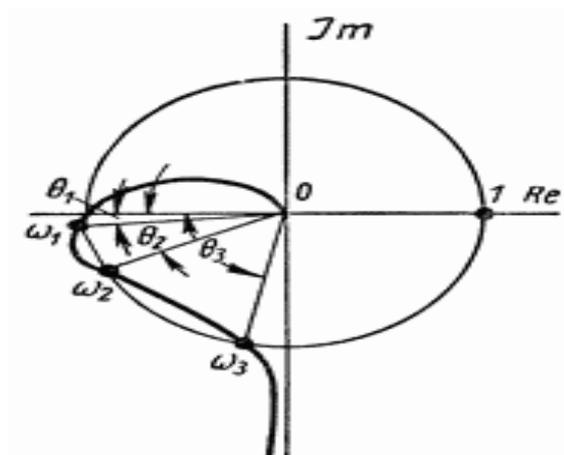


Рисунок 2.1.1 – Определение критического времени запаздывания на плоскости, с использованием графического метода

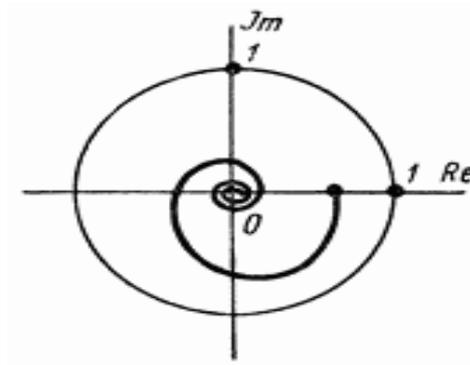


Рисунок 2.1.2 – Амплитудно – фазовая характеристика устойчивой системы

Рассмотрим в порядке убывания последовательно критические частоты ω_{oi} . Очевидно, что для частоты ω_1 угол θ_1 будет наименьшим, исходя из этого, начиная с $\tau_1 = \frac{\theta_1}{\omega_1}$, система с временем запаздывания $\tau > \tau_1$ будет неустойчивой.

Система с постоянным запаздыванием $\tau > \tau_1$ будет неустойчивой до тех пор, пока величина $\frac{\theta}{\omega}$ не будет превышать величину τ_2 .

$$\tau_2 = \frac{\theta_2}{\omega_2} \quad (2.1.3)$$

При значениях τ_1 равных и больших τ_2 система автоматического регулирования с запаздыванием будет устойчивой, так как в диапазоне частот $\omega_2 + \omega_3$ амплитудно-фазовая характеристика по модулю будет меньше единицы. По всей видимости, при любых значениях τ в пределах $\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3$ где система $\tau_3 = \frac{\theta_3}{\omega_3}$ (с запаздыванием τ) будет устойчивой. В дальнейшем при $\tau > \tau_3$ система становится снова неустойчивой. Чередование явлений устойчивости и неустойчивости системы при непрерывном изменении τ , а также других параметров является характерной особенностью многих систем с запаздыванием.

Если система автоматического регулирования с запаздыванием неустойчива, то возникающие в ней колебания могут иметь частоты,

определяющиеся частотами амплитудно-фазовой характеристики, лежащими вне единичной окружности.

В заключение необходимо сделать следующие замечания:

- ✓ в системах автоматического регулирования в целях увеличения быстродействия и точности время запаздывания τ стремятся уменьшить, из-за этого нередко формулируется критерий устойчивости только для минимального время запаздывания;
- ✓ система автоматического регулирования устойчива, если время запаздывания τ меньше минимального граничного времени запаздывания $\tau_{0 \min}$.

2.2 Примеры оценки устойчивости САР с запаздыванием.

Рассмотрим АФЧХ разомкнутой САР с запаздыванием, если передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$W = \frac{2}{0.1s + 1} e^{-j0,02} \quad (2.2.1)$$

Для начала построим АФЧХ линейной части W_0 (рис.2.2.1) в зависимости от частотной передаточной функции:

$$\overline{W}_0 = \frac{2}{0.1j\omega + 1} = \frac{2(1 - j0,1\omega)}{1 + 0,01\omega^2} \quad (2.2.2)$$

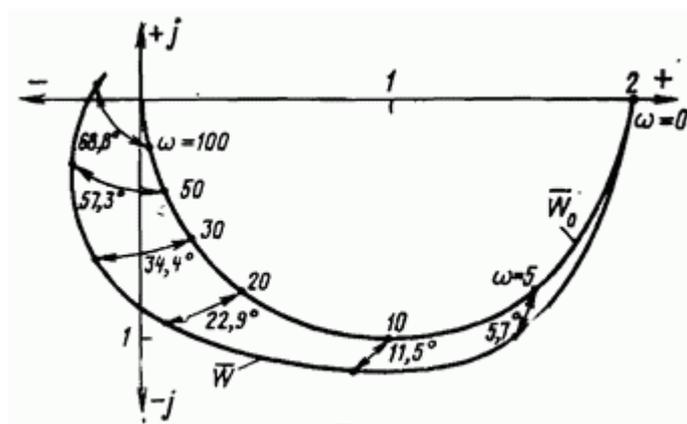


Рисунок 2.2.1 – Построение АФЧХ системы с запаздыванием

Необходимый угол поворота векторов $\overline{W}_0(j\omega_i)$ определяется в данном случае выражением:

$$\Delta\varphi_i = -0,02\omega_i 57,3^\circ \quad (2.2.3)$$

Поэтому при частотах 5; 10; 20; 30; 50; и 60 c^{-1} делаем соответственные повороты на $-5,7$; $-22,5$; $-22,9$; $-34,4$; $57,3$ и $68,8^\circ$. При этом соединив найденные точки плавной кривой, получим АФЧХ \overline{W} рассматриваемой САР.

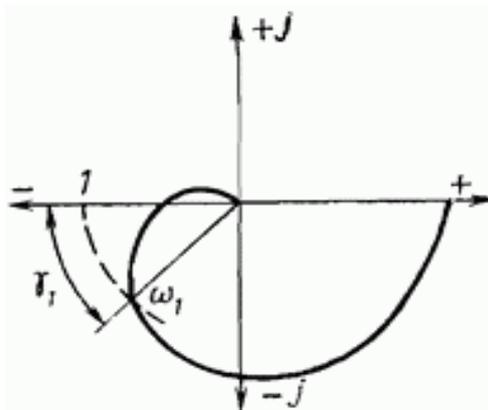


Рисунок 2.2.2 – Определение критического времени запаздывания по АФЧХ разомкнутой системы

Дополнительный фазовый сдвиг $\Delta\varphi = -\omega\theta$ «закручивает» годограф \overline{W}_0 по часовой стрелке и тем сильнее, чем больше частота. Вследствие этого условия устойчивости чаще всего ухудшаются. Однако в некоторых случаях, при сложной форме АФЧХ \overline{W}_0 , запаздывание улучшает условия устойчивости [32].

Для абсолютно устойчивой системы определение критического времени запаздывания $\theta_{кр}$ показано на рис. 2.2.2. На АФЧХ линейной части \overline{W}_0 отыскивается точка, для которой модуль равен единице. Пусть этой точке соответствует частота ω_1 и избыток фазы γ_1 . Тогда критическое значение времени запаздывания будет представлено в виде:

$$\theta_{\text{кр}} = \frac{\gamma_1}{\omega_1} \quad (2.2.4)$$

где γ_1 показано в радианах.

Если передаточная функция W_0 не имеет нулевых и мнимых полюсов и $|\overline{W_0}| < 1$, то САР устойчива при всех значениях времени запаздывания $\theta_{\text{кр}}$.

Исследование устойчивости САР с запаздыванием можно проводить по логарифмическим частотным характеристикам ее разомкнутой цепи. Сначала строят ЛЧХ линейной части. Затем в ЛФЧХ добавляют фазовый сдвиг $\Delta\varphi = -\omega\theta$ создаваемый звеном чистого запаздывания. Критическое значение времени запаздывания определяют по формуле (6.54), где за γ_1 принимают запас по фазе (избыток фазы при частоте среза) разомкнутой системы без запаздывания [35].

Пример. Нужно выяснить критическое значение времени запаздывания и определить устойчивость в САР, которая выражена передаточной функцией разомкнутой цепи:

$$W = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2.2.5)$$

где $k = 2$, $\theta = 20$ с, $T_1 = 40$ с, $T_2 = 10$ с.

Сначала строим ЛЧХ L_0 и φ_0 линейной части САР (рис. 6.32) по следующим данным: $20 \lg k = 6$ дБ; сопрягающие частоты $\omega_1 = \frac{1}{T_1} = 0,025 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = \frac{1}{T_2} = 0,1 \text{ с}^{-1}$

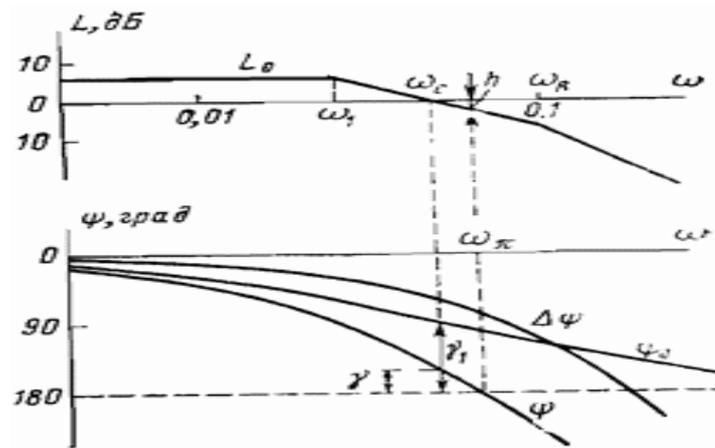


Рисунок 2.2.3 – Логарифмические частотные характеристики линейной части САР

Затем определяем дополнительный сдвиг по фазе $\Delta\varphi = -\omega\theta$ создаваемый звеном чистого запаздывания, и ЛФЧХ φ разомкнутой системы имеющее запаздывание. На участке частот, меньших частоты среза ω_c ординаты ЛФЧХ больше $-\pi$. Логично что, в замкнутом состоянии исследуемая САР является – устойчивой.

Запас по фазе системы без запаздывания $\gamma_1 = 90^\circ$ или 1,57 радиан, частота среза $\omega_c = 0,048c^{-1}$. Критическое значение времени запаздывания

$$\theta_{кр} = \frac{1,57}{0,048} = 32,7 \text{ с} \quad (2.2.6)$$

Используя критерий Найквиста, можно выяснить устойчивость САР с несколькими звеньями запаздывания, а также со звеньями полузапаздывания.

Звено полузапаздывания [105] имеет передаточную функцию

$$W_{п.з.} = e^{-\sqrt{\theta}s} \quad (2.2.7)$$

и характеризует процессы в некоторых диффузионных и тепловых объектах. Его АФЧХ и ЛЧХ определяются следующими равенствами:

$$\overline{W_{п.з.}} = e^{-(1+j)\sqrt{\theta\omega/2}} = e^{-\sqrt{\theta\omega/2}} e^{-j\sqrt{\theta\omega/2}}$$

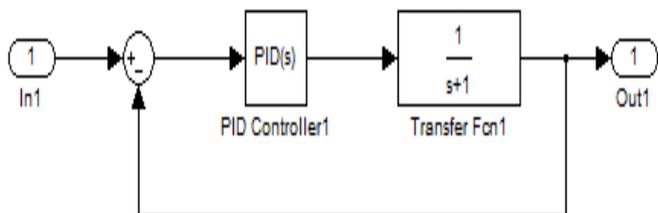
$$L_{п.з.} = -20 \lg e^{\sqrt{\frac{\theta\omega}{2}}} \approx -8,7 \sqrt{\frac{\theta\omega}{2}} \text{ дБ}$$

$$\varphi_{п.з.} = -\sqrt{\theta\omega/2} \quad (2.2.8)$$

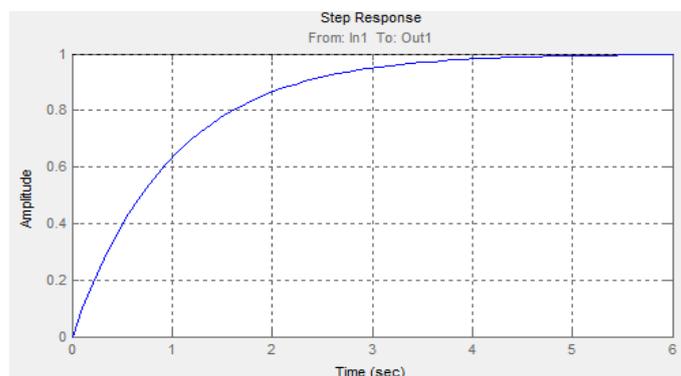
3 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ В ВИДЕ АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

3.1 Аперриодическое звено первого порядка с запаздыванием

Рассмотрим элементарный объект управления, который описывается пропорционально-интегрально-дифференциальным законом управления и аперриодическим звеном первого порядка. Коэффициентами регулятора k_p, k_d, k_i определяются показатели качества.



а) Замкнутая САУ



б) Переходная характеристика выходной переменной

Рисунок 3.1.1 – САУ с ПИД-регулятором

Сложно получить необходимые показатели качества при помощи того же самого регулятора, если канал измерения характеризуется запаздыванием. Система управления потеряет устойчивость при неопределенной критической величине запаздывания. Поэтому факт, что запаздывающее звено вносит в систему отрицательный сдвиг фазы [19].

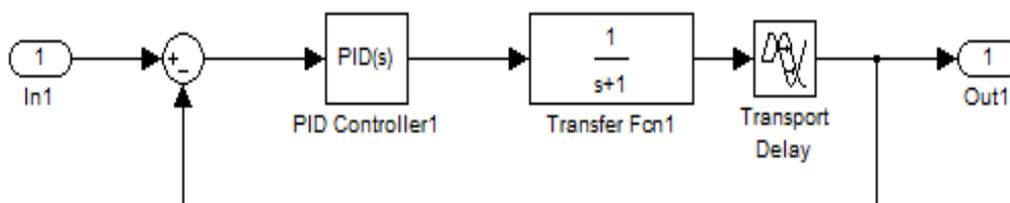


Рисунок 3.1.2 – Структурная схема с запаздыванием в канале измерения

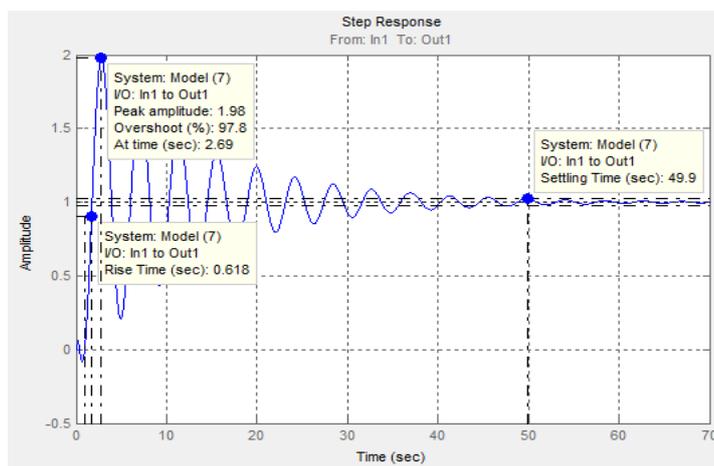


Рисунок 3.1.3 – Переходная характеристика процесса, запаздывание

$$\tau = 1\text{с}$$

ПИД управление является наиболее популярным и в теории, и в практике, так как присутствует простота реализации и анализа. Но, как показано на рисунке 3.1.1, наличие любого запаздывания может сделать систему неустойчивой. В данном случае настройка параметров регулятора является достаточно сложной, возможно, неразрешимой, при условии, что сигнал управления будет ограничен по модулю [4].

3.2 Инженерный метод настройки ПИД-регулятора

В течении многих лет развития систем управления, исследователи искали методы улучшения качества управления объектами с запаздыванием, из-за этого существует много путей и методик структурного и параметрического синтеза систем такими объектами.

В первую очередь это, инженерные методики параметрического синтеза стандартных (ПИД) законов управления, которые до сегодняшнего времени составляют основную часть алгоритмов промышленных систем автоматизированного управления.

Подбор необходимого регулятора обозначает простой выбор закона регулирования, который более дешевый и простой в эксплуатации регулятора, обеспечивающего при различных возмущениях заданное качество регулирования.

Для выбора и расчета показателей настройки регулятора необходимо знать параметры технологического объекта управления. Однако существуют случаи, когда параметры установить не удастся – так как это затруднительно, или объект находится на этапе проектирования.

ПИД – регуляторы включают в себя: усилитель, интегратор и дифференциатор. Обнаружив на входе рассогласование, усилитель регулятора обеспечивает возрастание управляющего воздействия, компенсируя значительную часть рассогласования, затем интегратор медленно, чтобы не проскочить желаемую точку, приближает регулируемый параметр к заданному значению. Дифференциатор ускоряет работу исполнительного механизма.

Использование ПИД-регулятора, обеспечивающего наиболее высокое быстродействие в системе, можно рекомендовать для наиболее ответственных контуров. С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора. Поэтому качество работы

ПИД-регулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ-регулятора [21]. Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД-регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма. Таким образом, ПИД-регулятор следует выбирать для систем регулирования с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления.

В инженерных методах расчеты настроек регулятора чаще всего производятся на основе приближенной модели объекта с передаточной функцией вида:

$$W_0(s) = \frac{k}{Ts + 1} * e^{-\tau s} \quad (3.2.1)$$

Это обозначает что на основе модели объекта, состоящей из последовательно соединенного апериодического звена первого порядка и звена транспортного запаздывания. Настраечные параметры регулятора, в зависимости от его типа и от характера требований к переходному процессу, определяются комбинациями параметров k , T и τ . В таблице 1 приведены соотношения для настроек ПИ- и ПИД- регуляторов при регулировании устойчивого объекта.

Конечно, эти соотношения являются приближенными, поскольку параметры регулятора связаны с отношением τ/T , вообще говоря, нелинейной зависимостью. Более точным является расчет по номограммам, учитывающим такую зависимость. Однако и в этом случае следует относиться осторожно к полученным с их помощью настройкам, поскольку под возмущением нагрузкой в этих методах понимается возмущение, идущее со стороны регулирующего органа, соответственно составлены и номограммы.

Таблица 1 – Настройки параметра регуляторов для получения разных переходных процессов

Апериодический	С 20% перерегулированием	С 40% перерегулированием
$K_p = \frac{0,95 * T_{\text{объект}}}{k_{\text{объект}} * \tau_{\text{объект}}}$ $K_i = 2,4 * T_{\text{объект}}$ $K_d = 0,4 * T_{\text{объект}}$	$K_p = \frac{1,2 * T_{\text{объект}}}{k_{\text{объект}} * \tau_{\text{объект}}}$ $K_i = 2,0 * T_{\text{объект}}$ $K_d = 0,4 * T_{\text{объект}}$	$K_p = \frac{0.95 * T_{\text{объект}}}{k_{\text{объект}} * \tau_{\text{объект}}}$ $K_i = 1,3 * T_{\text{объект}}$ $K_d = 0,5 * T_{\text{объект}}$

Нужно учитывать тот факт, что инженерных методов (как и различного рода методик) для настройки ПИД-регуляторов существует огромное множество. Данные три метода являются наиболее типовыми и самыми распространенными для ПИД-регулятора.

Зачастую на практике для реализации систем управления в промышленности используют ПИ-регуляторы и ПИД-регуляторы, которые имеют свои преимущества:

- ✓ Отличные динамические характеристики системы;
- ✓ Помехозащищенность;
- ✓ Простота ручной подстройки (с учетом запаса устойчивости)

В данном исследовании будет рассмотрена настройка ПИД-регулятора. Инженерные настройки приведены в таблице 1.

Инженерные методы имеют узкую область применения, ограниченную одноконтурными системами, в то время как методы расчета по частотным характеристикам объекта являются основой для построения методов расчета реально применяемых сложных систем регулирования, и, позволяя учитывать статистические характеристики случайных шумов, могут быть положены в основу построения адаптивных систем.

3.3 Применение предиктора Смита для объектов управления в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием

Автоматическое управление ТОУ с запаздыванием имеет определенные сложности, связанные с необходимостью предсказания реакции объекта после действия управляющих и возмущающих воздействий.

Предиктор Смита является одной из ряда структур, которые предназначены для управления объектами с запаздыванием. Рекомендуется применять данный предиктор при определенном соотношении значения запаздывания к постоянной времени объекта, описываемом следующим соотношением [1]:

$$\frac{\tau}{\tau + T} > (0,2 \dots 0,5) \quad (3.3.1)$$

где: τ - время запаздывания, T - постоянная времени объекта.

Целью предиктора Смита является предсказать, какой сигнал появится на выходе объекта до того, как он там появится на самом деле.

Для предсказания можно использовать модель объекта управления, которая состоит из запаздывающего звена $e^{-\tau s}$ и дробно-рациональной части $M_0(s)$. Благодаря тому, что из модели можно исключить задержку, появляется принципиальная возможность предсказания поведения объекта до появления сигнала на его выходе [28]. На рисунке 3.3.1 приведена структурная схема замкнутой системы с встроенным предиктором Смита. Где R представляет собой структуру обычного ПИД-регулятора, $P_0(s) * e^{-\tau s}$ – передаточная функция ОУ.

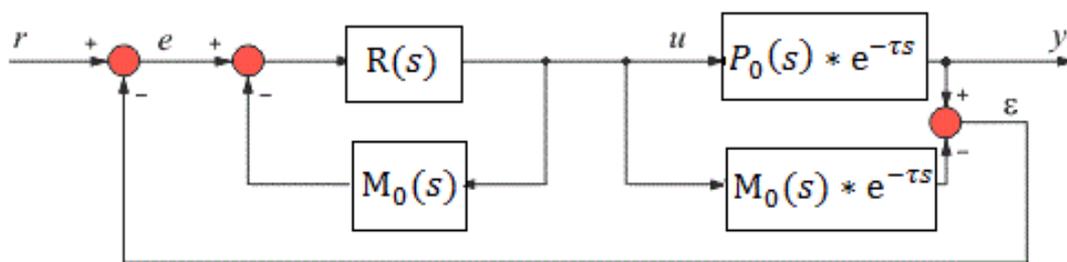


Рисунок 3.3.1 – Система управления с использованием предиктора Смита.

Принцип работы заключается в следующем. Допустим, что модель является абсолютно точной. Тогда разность выходных сигналов y модели и объекта будет равно нулю. Однако в таком случае, исходя из схемы на рисунке 3.3.1, можно составить уравнение:

$$y = P_0 * e^{-\tau s} * \left(\frac{R}{1 + R * M_0} \right) * r = \left(\frac{P_0 R}{1 + R * P_0} * e^{-\tau s} \right) * r \quad (3.3.2)$$

Составляющая $\frac{P_0 R}{1 + R * P_0}$ в этом выражении является передаточной функцией системы без запаздывания. Вышеприведённое высказывание означает, что звено с наличием транспортной задержки не влияет на быстродействие и устойчивость системы, и не входит в контур обратной связи, означает, что регулирование происходит в контуре с моделью без запаздывания, а непосредственно транспортная задержка суммируется к полученному результату [23].

Под понятием устойчивости в ТАУ понимают способность системы сохранять текущее состояние при влиянии внешних воздействий. В самом простом случае определение устойчивости системы может быть связано с ее способностью возвращаться в состояние равновесия (с определенной точностью) после исчезновения воздействующих на нее внешних сил, которые выводили ее из состояния устойчивости. Неустойчивая система возвращается в состояние равновесия, она совершает вокруг него колебания,

причем недопустимо большие, либо вовсе удаляется от состояния равновесия.

Определение устойчивости относится к той ситуации, когда сигналы системы на входе равны нулю, это значит, что внешние воздействия полностью отсутствуют. При этом система, которая построена правильно, должна находиться в состоянии покоя (равновесия) или приближаться к этому состоянию постепенно. В неустойчивых системах возникают собственные колебания даже при нулевых входных сигналах и, как следствие, недопустимо большие ошибки[29].

Проверим устойчивость систем при изменении параметров. Проанализируем замкнутую систему с использованием предиктора Смита. ПФ объекта управления принимает следующий вид:

$$W_0(s) = \frac{k}{Ts + 1} * e^{-\tau s} \quad (3.3.3)$$

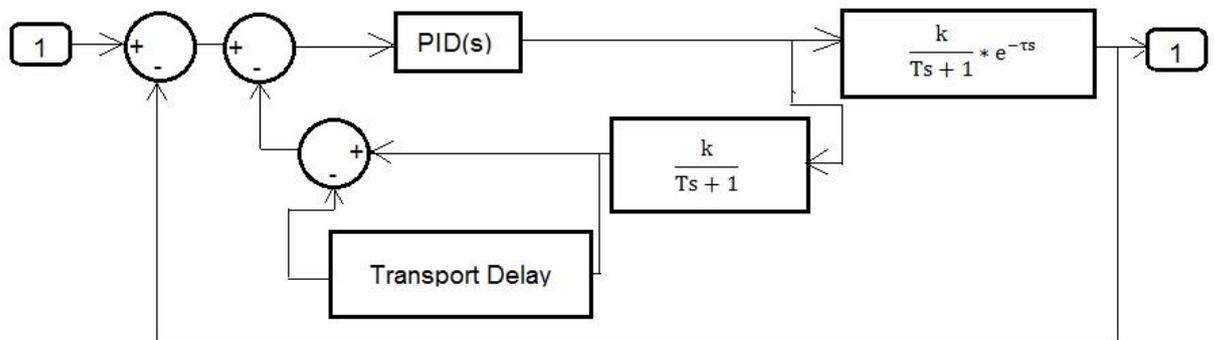


Рисунок 3.3.2 – Общая структурная схема замкнутой системы с предиктором Смита

Методика исследования. Задаем параметры объекта управления k, T и τ . Задача состоит в том, что выяснить, насколько сильно можно ошибиться в задании тех же параметров T и τ в предикторе Смита, для того чтобы качество переходного процесса оставалось удовлетворительным, когда объект управления является апериодическим звеном первого порядка.

Качество переходного процесса будем определять по двум показателям, такими как: перерегулирование ($\sigma, \%$) и время регулирования (t_p, c).

Перерегулирование ($\sigma, \%$) – обозначает максимальное отклонение переходной характеристики процесса от установившегося значения его выходной величины, выраженное в относительных единицах или процентах. Допустимое значение, которое может быть у перерегулирования из опыта эксплуатации обычно (10-25)%, а в определенных случаях это значение допускается до 70%; иногда встречается тот случай, когда перерегулирование не допускается совсем.

Время переходного процесса (время регулирования) – это минимальное время, когда регулируемая величина по истечении времени будет оставаться с заданной точностью, близкой к установившемуся значению. Обычно величина задается в процентах от установившегося значения выходной величины, и составляет (1-5)% от этого значения. Время регулирования помогает определить быстродействие системы управления.

При определении качества ПП возникают два варианта исследования:

1 Коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются, исходя из параметров объекта управления, посредством использования инженерного метода (см. таблица 1) и остаются постоянными.

2 Поскольку считается, что точно модель объекта управления неизвестна, коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются по тем значениям, которые используются в регуляторе Смита.

Исследования будут проводиться в программном продукте Matlab Simulink. Построим структурную схему модели замкнутой системы объекта с предиктором Смита в Matlab Simulink (см. на рисунок 3.3.3).

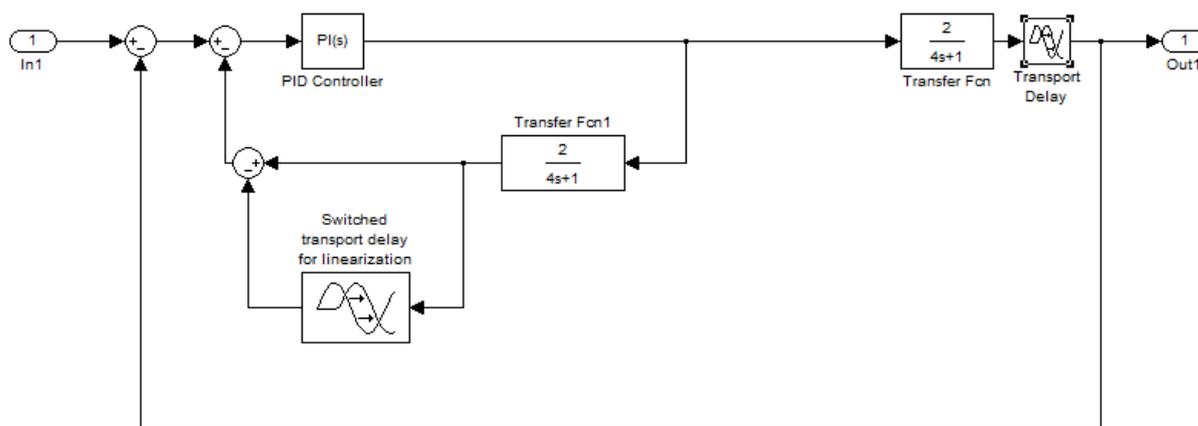


Рисунок 3.3.3 – Структурная схема модели замкнутой системы объекта с предиктором Смита

В прямой цепи поставим $W_{0\text{ пр}}(s)$ с произвольными параметрами. В предикторе, для проведения сравнительного анализа устойчивости параметры τ и T будем поочередно изменять. В ходе исследования по графикам проведем сравнительный анализ качества переходного процесса. Если при изменении параметра система теряет устойчивость, примем возможным изменение параметров ПИД-регулятора для восстановления устойчивости.

Первый вариант исследования, когда коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются, исходя из параметров объекта управления.

Зададим ПФ объекта в прямой цепи:

$$W_{0\text{ пр}}(s) = \frac{k}{Ts + 1} * e^{-\tau s} = \frac{2}{4s + 1} * e^{-1s} \quad (3.3.4)$$

Параметр $k=2=\text{const}$ и в $W_{0\text{ пр}}(s)$ и в предикторе Смита. Рассчитаем параметры ПИД-регулятора с помощью инженерного метода (см. таблица 1). Изначально примем параметры ПИД-регулятора: $K_p = \frac{0.95 * 4}{2 * 1} = 1,9$; $K_i = 2,4 * 4 = 9,6$; $K_d = 0,4 * 4 = 1,6$.

Изменим параметр τ в пределах от 0,25 до 3. Параметр постоянной времени $T = 4$ оставим без изменений.

Таблица 2 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора инженерным методом

$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \downarrow$			
$T=4, \tau = 1,5$	$K_p = 1,9$	$K_i = 9,6$	$K_d = 1,6$	$T=4, \tau = 0,75$	$K_p = 1,9$	$K_i = 9,6$	$K_d = 1,6$
$T=4, \tau = 2$				$T=4, \tau = 0,5$			
$T=4, \tau = 3$				$T=4, \tau = 0,25$			

Изменяя значения запаздывания, мы получаем следующие переходные процессы, которые представлены на рисунке 3.3.4.

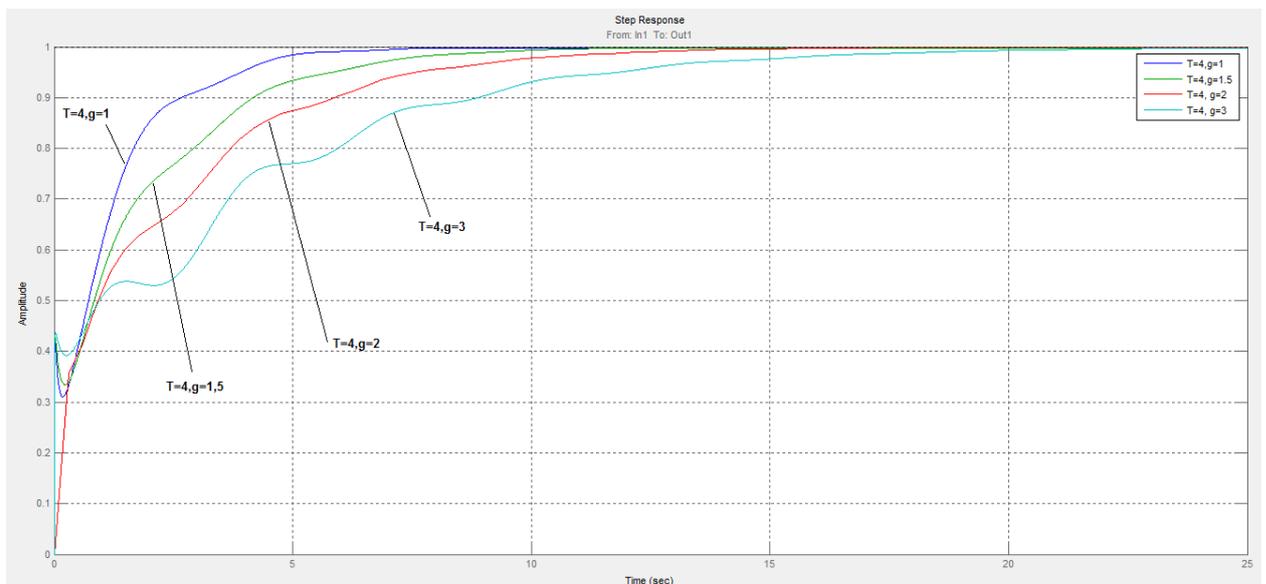


Рисунок 3.3.4 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4, \tau=1;1,5;2;3$ (меняем в большую сторону)

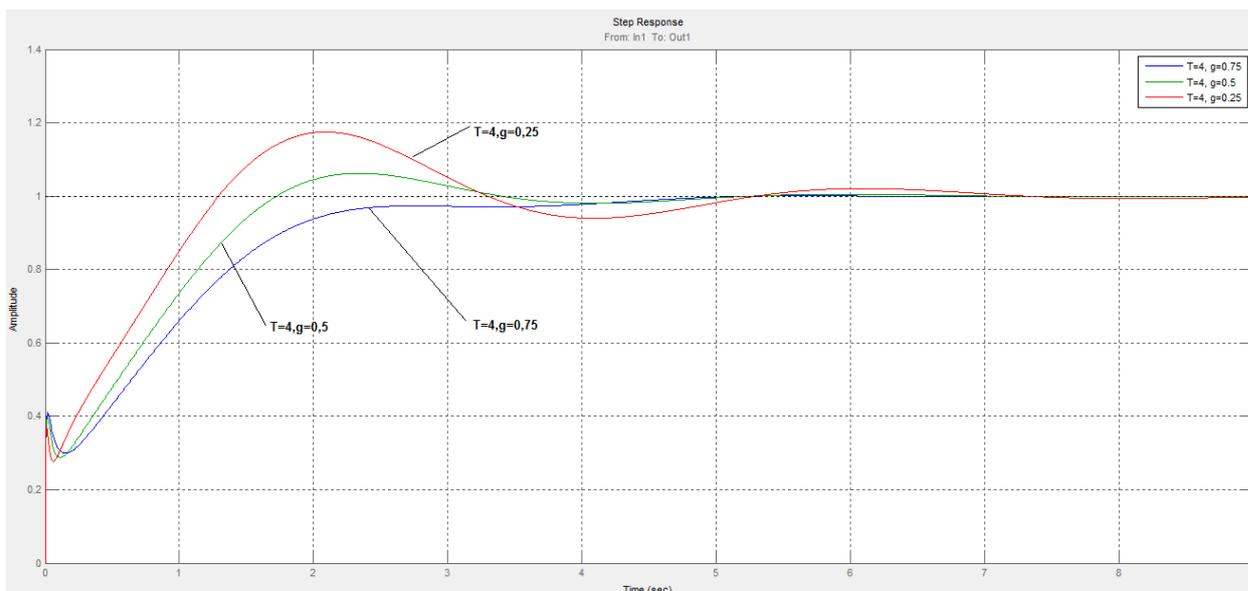


Рисунок 3.3.5 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, $\tau=0,75;0,5;0,25$ (меняем в меньшую сторону)

Из полученных графиков ПП определим изменения, которые произошли в ходе исследования, а также определим показатели качества процесса, и занесем их в таблицу 3.

Таблица 3 – отклонение параметров при изменении параметра τ

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	t_p, c		$\sigma, \%$	t_p, c
$T=4, \tau = 1$	0	4,78	$T=4, \tau = 0,75$	5,85	4,12
$T=4, \tau = 1,5$	0	7,56	$T=4, \tau = 0,5$	6,2	3,1
$T=4, \tau = 2$	0	10,2	$T=4, \tau = 0,25$	17,5	6,27
$T=4, \tau = 3$	0	15,6			

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующий вывод, что ошибка при задании запаздывания τ в большую сторону не влияет на перерегулирование переходного процесса. Ошибка в меньшую сторону приводит к увеличению перерегулирования. Время регулирования ПП увеличивается в том и в другом случае.

Изменим параметр T в пределах от 1 до 10. Запоздывание $\tau = 1$ оставим без изменений. Примем параметр $T = 4$ за эталон.

Таблица 4 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора инженерным методом

$W_{\text{модель}}(s) = T = \text{VAR} \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = T = \text{VAR} \downarrow$			
$T=4, \tau = 1$	$K_p = 1,9$	$K_i = 9,6$	$K_d = 1,6$	$T=3, \tau = 1$	$K_p = 1,9$	$K_i = 9,6$	$K_d = 1,6$
$T=6, \tau = 1$				$T=2, \tau = 1$			
$T=8, \tau = 1$				$T=1, \tau = 1$			
$T=10, \tau = 1$							

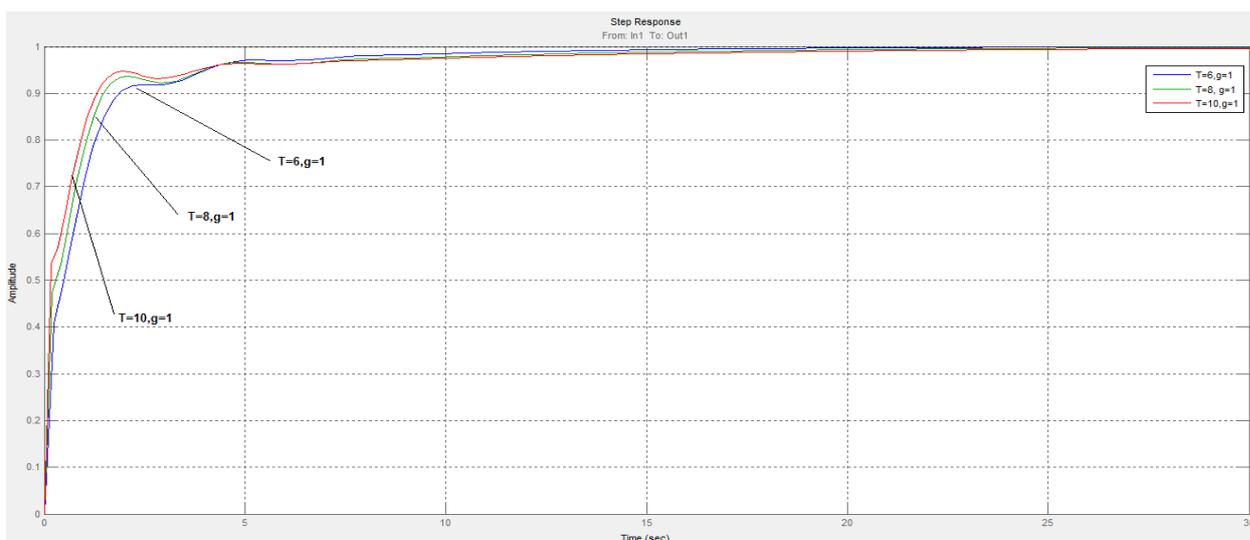


Рисунок 3.3.6 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 1$, $T=6;8;10$ (меняем в большую сторону)

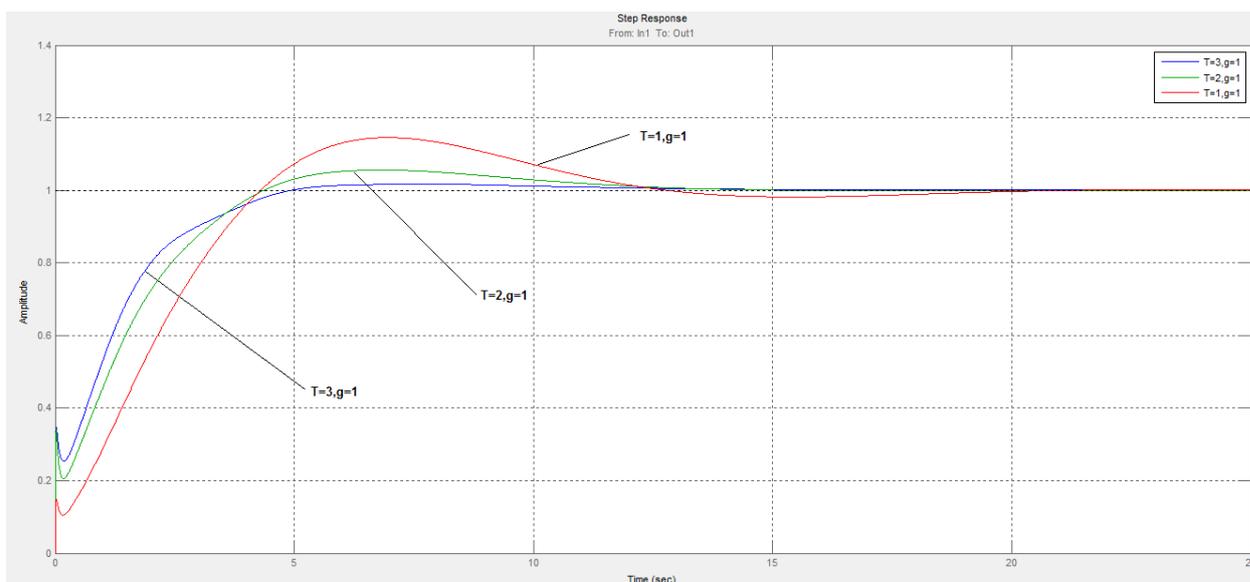


Рисунок 3.3.7 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 1$, $T=3;2;1$ (меняем в меньшую сторону)

По полученным переходным характеристикам определим показатели качества процесса. Более подробное отклонение параметров от эталонных рассмотрим в таблице 5.

Таблица 5 – отклонение параметров при изменении параметра T

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	t_p, c		$\sigma, \%$	t_p, c
T=4, $\tau=1$	0	7,56	T=3, $\tau = 1$	1,71	4,36
T=6, $\tau=1$	0	8,05	T=2, $\tau = 1$	5,45	10,9
T=8, $\tau=1$	0	10,9	T=1, $\tau = 1$	12,9	11,2
T=10, $\tau=1$	0	12,3			

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующий вывод, что ошибка при задании T в большую сторону не влияет на перерегулирование переходного процесса. Ошибка в меньшую сторону приводит к увеличению перерегулирования. Время регулирования ПП увеличивается в том и в другом случае.

Второй вариант исследования, когда коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются по тем значениям, которые используется в регуляторе Смита. Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора инженерным методом показаны на таблице 6.

Таблица 6 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора инженерным методом

$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \downarrow$			
T=4, $\tau = 1,5$	Kp = 1,27	Ki = 9,6	Kd = 1,6	T=4, $\tau = 0,75$	Kp = 2,5	Ki = 9,6	Kd = 1,6
T=4, $\tau = 2$	Kp = 0,95	Ki = 9,6	Kd = 1,6	T=4, $\tau = 0,5$	Kp = 3,8	Ki = 9,6	Kd = 1,6
T=4, $\tau = 3$	Kp = 0,63	Ki = 9,6	Kd = 1,6	T=4, $\tau = 0,25$	Kp = 7,6	Ki = 9,6	Kd = 1,6

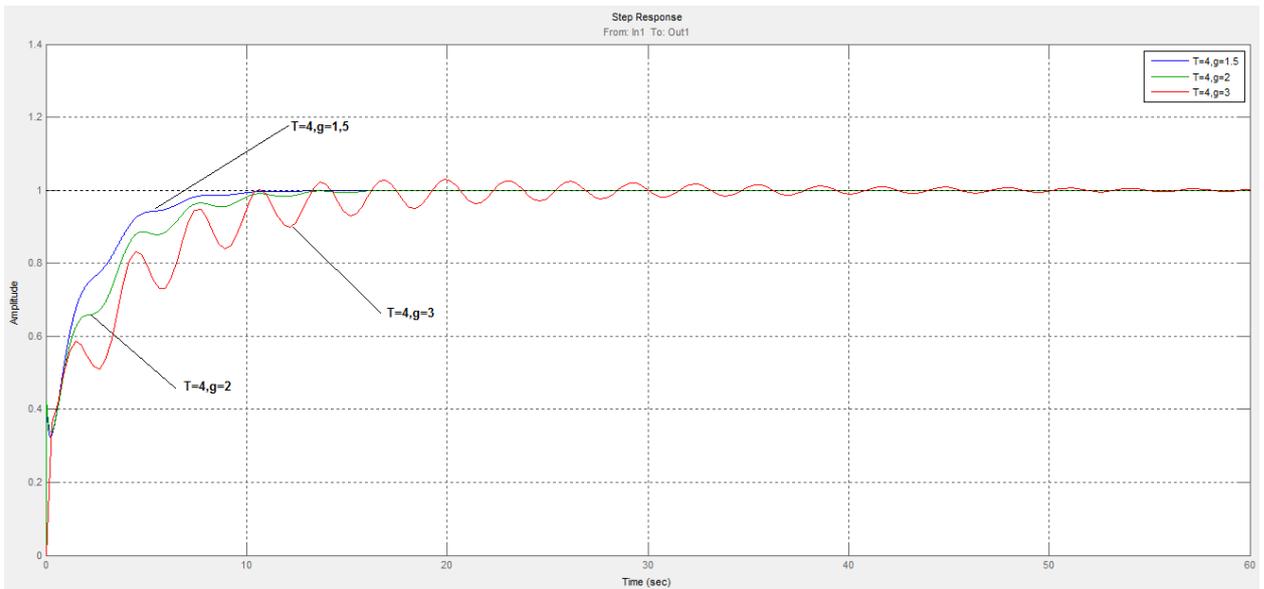


Рисунок 3.3.8 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, $\tau=3,2;1,5$ (меняем в большую сторону)

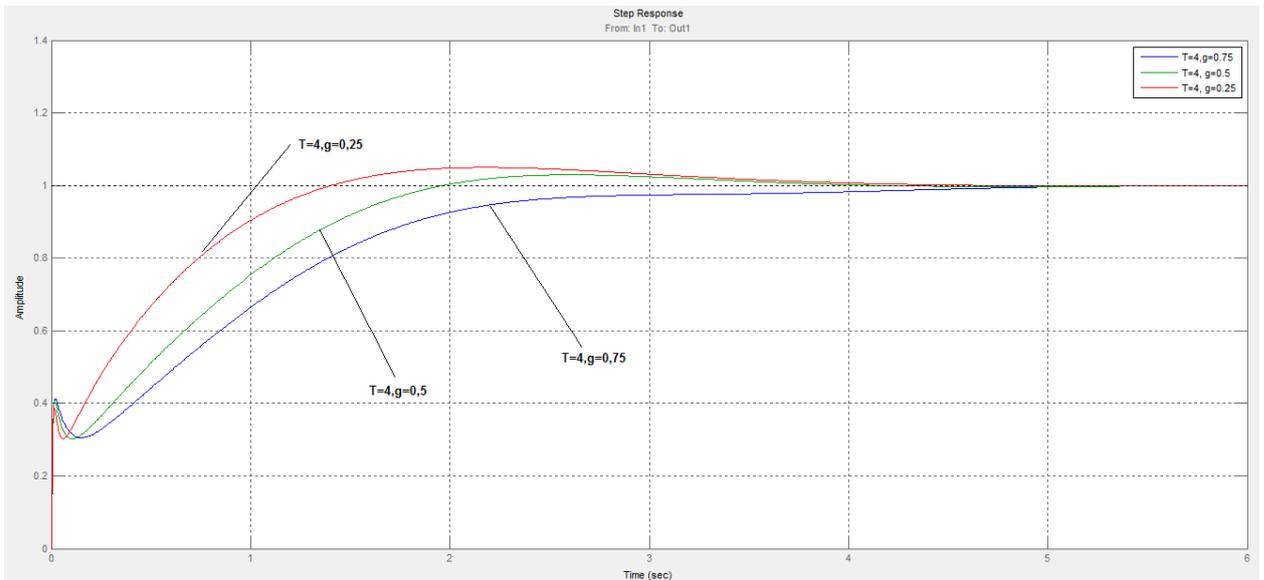


Рисунок 3.3.9 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, $\tau=0,75;0,5;0,25$ (меняем в меньшую сторону)

Из полученных графиков ПП выявим изменения, которые произошли в ходе исследования, а также определим показатели качества процесса, и занесем их в таблицу 7.

Таблица 7 – отклонение параметров при изменении параметра τ

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	t_p, c		$\sigma, \%$	t_p, c
$T=4, \tau = 1$	1	4,78	$T=4, \tau = 0,75$	1,2	1,82
$T=4, \tau = 1,5$	0,8	7,34	$T=4, \tau = 0,5$	2,93	3,16
$T=4, \tau = 2$	0,9	14,5	$T=4, \tau = 0,25$	4,96	3,37
$T=4, \tau = 3$	2,95	51			

Изменим параметр T в пределах от 1 до 10. Запаздывание $\tau = 1$ оставим без изменений.

Таблица 8 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора инженерным методом

$W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \downarrow$			
$T=6, \tau = 1$	$K_p = 2,85$	$K_i = 14,4$	$K_d = 2,4$	$T=3, \tau = 1$	$K_p = 1,4$	$K_i = 7,2$	$K_d = 1,2$
$T=8, \tau = 1$	$K_p = 3,8$	$K_i = 19,2$	$K_d = 3,2$	$T=2, \tau = 1$	$K_p = 0,95$	$K_i = 4,8$	$K_d = 0,8$
$T=10, \tau = 1$	$K_p = 5,7$	$K_i = 24$	$K_d = 4$	$T=1, \tau = 1$	$K_p = 0,47$	$K_i = 2,4$	$K_d = 0,4$

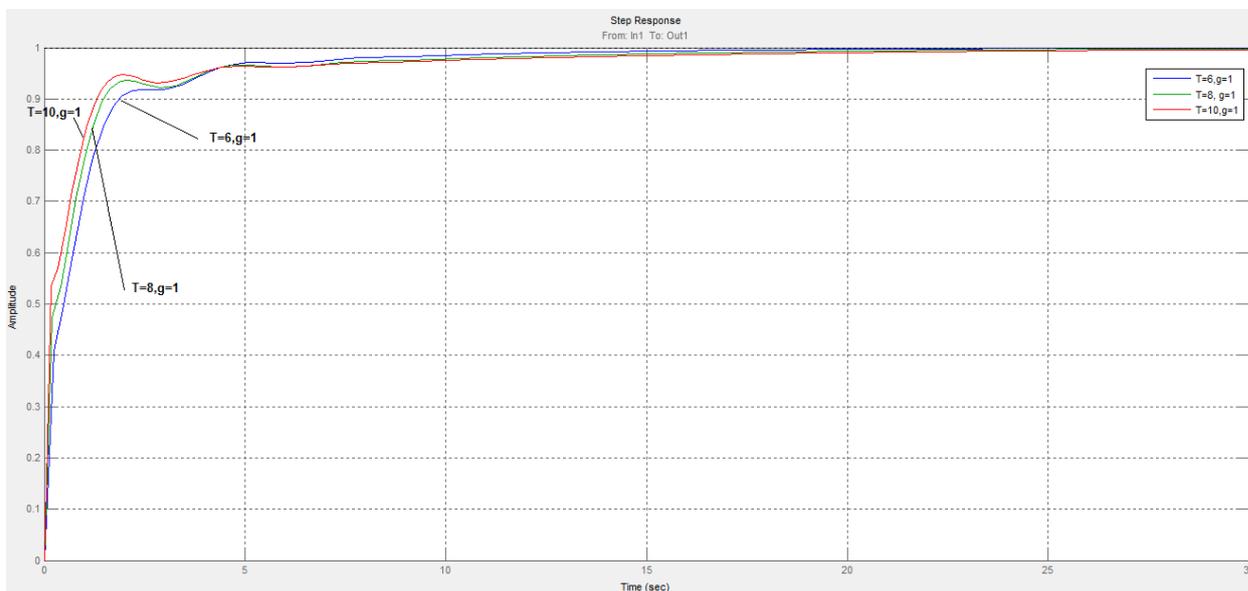


Рисунок 3.3.10 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 1, T=6;8;10$ (меняем в большую сторону)

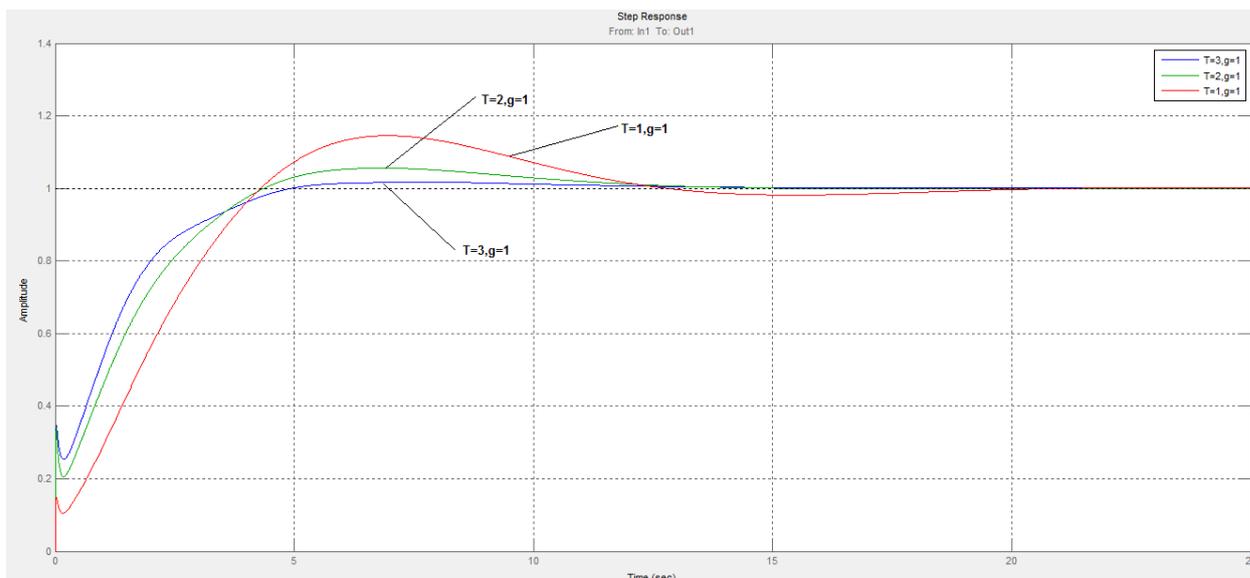


Рисунок 3.3.11 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 1$, $T=3;2;1$ (меняем в меньшую сторону)

По полученным переходным характеристикам определим показатели качества процесса. Более подробное отклонение параметров от эталонных рассмотрим в таблице 9.

Таблица 9 – отклонение параметров при изменении параметра T

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	t_p, c		$\sigma, \%$	t_p, c
$T=4, \tau=1$	1	4,78	$T=3, \tau = 1$	1,74	4,37
$T=6, \tau=1$	0	7,87	$T=2, \tau = 1$	5,92	11,8
$T=8, \tau=1$	0,95	10,7	$T=1, \tau = 1$	14,5	11
$T=10, \tau=1$	0,97	12,4			

Исходя из полученных графиков, можно сделать следующий вывод, что ошибка при задании постоянной времени T в большую сторону не приводит к уменьшению перерегулирования, при этом время регулирования растет. Ошибка при задании постоянного времени T в меньшую сторону значительно увеличивает перерегулирование, соответственно время регулирования растет.

На следующем графике отображены показатели качества переходного процесса апериодического звена первого порядка, имеющего запаздывание, при соотношении значения запаздывания $\tau = \frac{\tau_{\text{модель}}}{\tau_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow\downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора $const$.

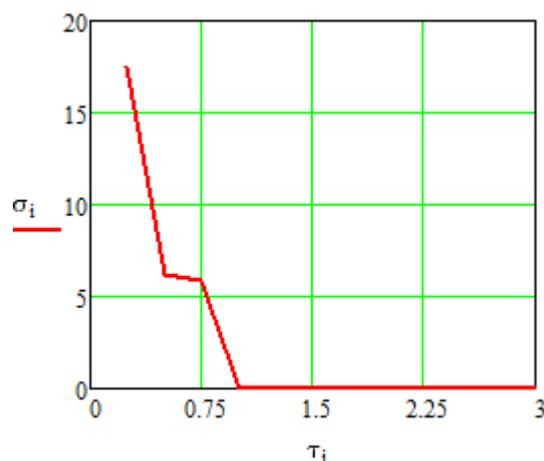


Рисунок 3.3.12 – оценка качества ПП (перерегулирования) при изменении значения запаздывания

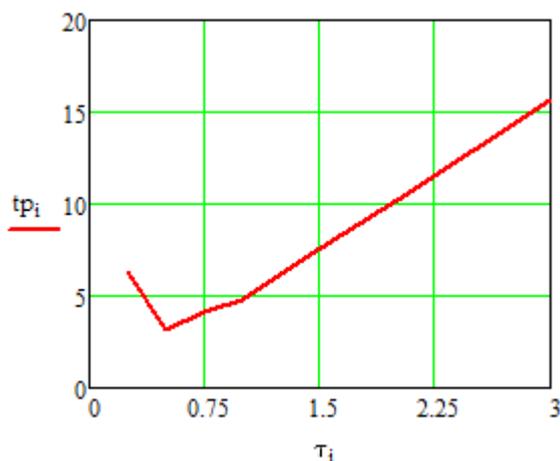


Рисунок 3.3.13– оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения запаздывания

На рисунке 3.3.14 и 3.3.15 показаны показатели качества переходного процесса апериодического звена первого порядка, имеющего запаздывание, при соотношении значения постоянного времени $T = \frac{T_{\text{модель}}}{T_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \uparrow\downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора $const$.

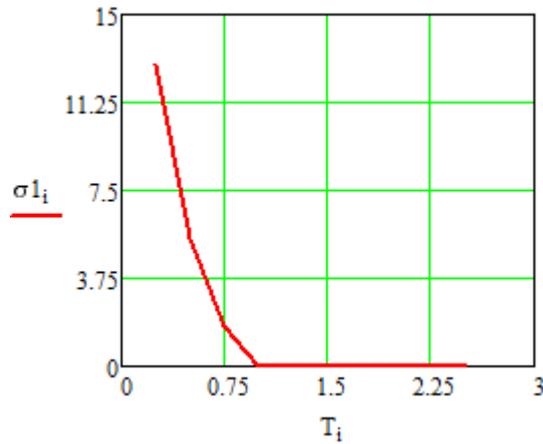


Рисунок 3.3.14 – оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения постоянной времени

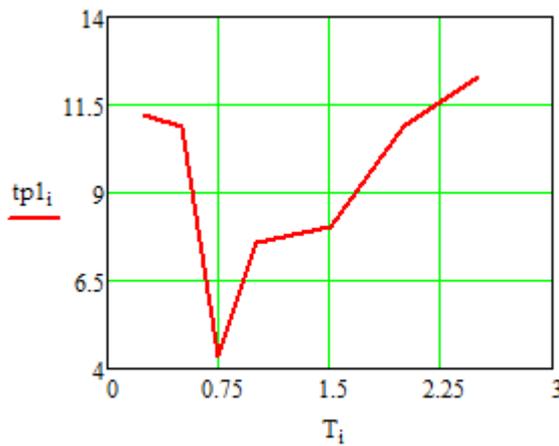


Рисунок 3.3.15 – оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения постоянной времени

На следующем графике отображены показатели качество переходного процесса апериодического звена первого порядка, имеющего запаздывание, при соотношении значения запаздывания $\tau = \frac{\tau_{\text{модель}}}{\tau_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow \downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора рассчитаны по модели объекта.

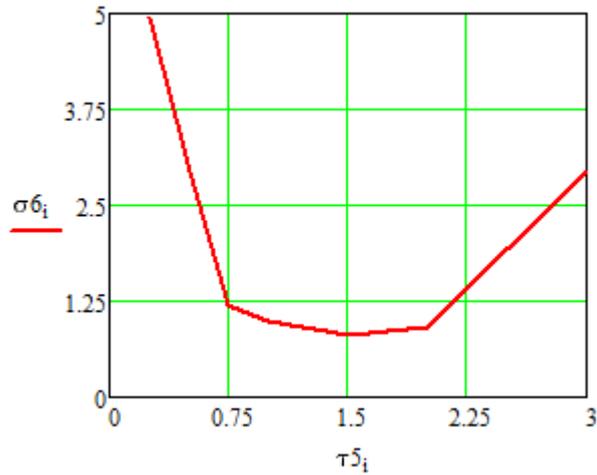


Рисунок 3.3.16 – оценка качества ПП (перерегулирования) при изменении значения запаздывания

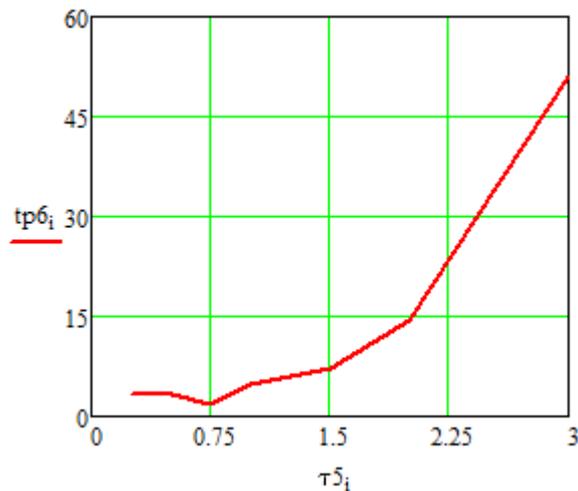


Рисунок 3.3.17– оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения запаздывания

На рисунке 3.3.18 и 3.3.19 показаны показатели качество переходного процесса апериодического звена первого порядка, имеющего запаздывание, при соотношении значения постоянного времени $T = \frac{T_{\text{модель}}}{T_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \uparrow\downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора рассчитаны по модели объекта.

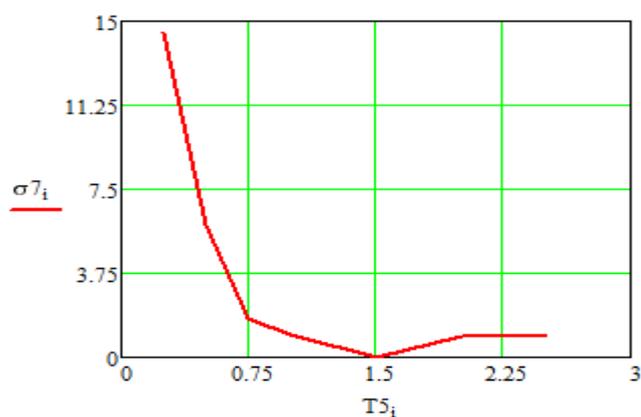


Рисунок 3.3.18 – оценка качества ПП (перерегулирования) при изменении значения постоянного времени

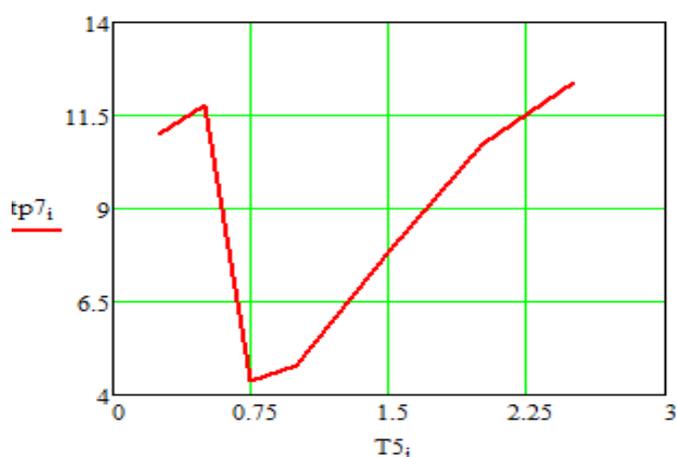


Рисунок 3.3.19– оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения запаздывания

По полученным графикам, можно сделать вывод, что ошибка при задании постоянной времени T в большую сторону не приводит к возникновению перерегулирования, при этом время регулирования растет. Ошибка при задании постоянной времени T в меньшую сторону весьма значительно увеличивает перерегулирование. Ошибки постоянной времени T в ту или в другую сторону ведут к увеличению длительности ПП. В целом графики соотношений при настройке коэффициентов ПИД-регулятора по значениям объекта и модели имеют незначительное различие.

Рекомендация для персонала службы КИПиА:

- ✓ По возможности точнее определять время запаздывание τ объекта
- ✓ При настройке регулятора Смита может быть как: $\tau_{\text{модель}} > \tau_{\text{объект}}$.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В ВИДЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ЗВЕНА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

4.1 Интегрирующее звено с запаздыванием

Интегрирующее звено. Скорость изменения выходной величины такого звена пропорциональна входной величине. Если отвлечься от имеющей иногда место ограниченности рабочего участка соответствующего элемента системы, выходная величина интегрирующего звена может неограниченно нарастать или убывать при неизменном значении входной величины. В отличие от апериодического или колебательного звена в интегрирующем звене нет определенного соотношения между установившимися значениями входной и выходной величин, а есть лишь определенное соотношение между значениями входной величины и скоростью изменения выходной величины[22].

Звено описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dx_2}{dt} = kx_1 \quad (4.1.1)$$

Передаточную функцию интегрирующего звена можно получить в следующем виде:

$$py_2 = ky_2; W(p) = \frac{y_2}{y_1} = \frac{k}{p} \quad (4.1.2)$$

Такое звено является идеализацией реальных интегрирующих звеньев, часть которых будет рассмотрена ниже. Примеры интегрирующих звеньев приведены на рисунке 4.1.1. Часто в качестве такого звена используется операционный усилитель в режиме интегрирования (рис. 4.1.1, а).

Интегрирующим звеном является также обычный гидравлический демпфер (рис. 4.1.1, б).

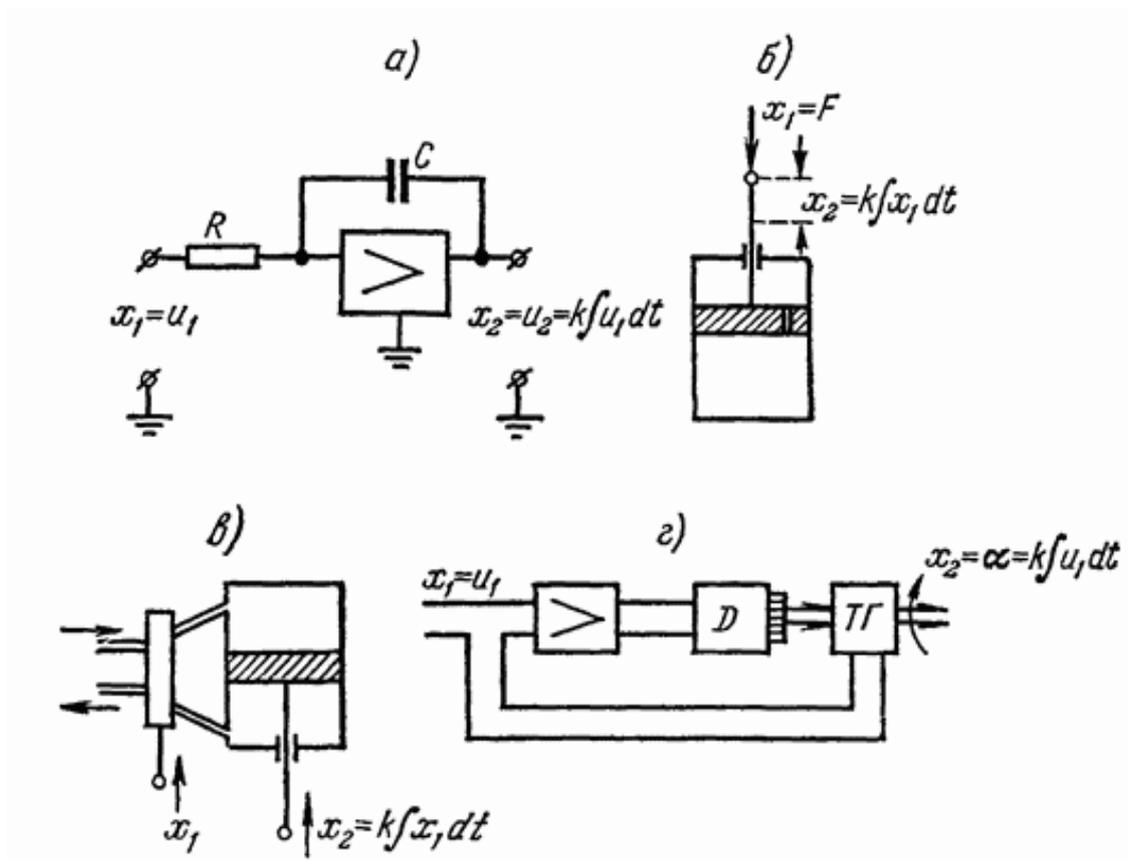
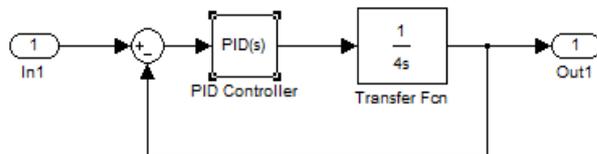


Рисунок 4.1.1 – примеры интегрирующих звеньев

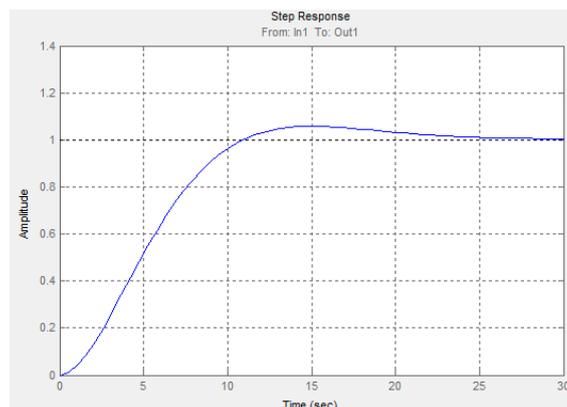
Часто в качестве интегрирующего звена используется интегрирующий привод (рис. 4.21, г). Это особенно удобно делать при необходимости длительного интегрирования (часы, дни и даже месяцы), например в автоматических путепрокладчиках и навигационных системах.

Интегрирующим звеном является также гироскоп (рис. 4.1.1, г), если в качестве входной величины рассматривать момент M на оси σ , а в качестве выходной — угол поворота оси прецессии β (в зоне линейности) [19].

Рассмотрим элементарный объект управления, который описывается пропорционально-интегрально-дифференциальным законом управления и интегрирующим звеном. Коэффициентами регулятора k_p, k_d, k_i определяются показатели качества.



а) Замкнутая САУ



б) Переходная характеристика выходной переменной

Рисунок 4.1.2 – САУ с ПИД-регулятором

Существует сложность при получении необходимых показателей качества при помощи того же самого регулятора, если канал измерения характеризуется звеном запаздывания. Система управления потеряет устойчивость при неопределенной критической величине запаздывания. Поэтому факт, что запаздывающее звено вносит в систему отрицательный сдвиг фазы [],

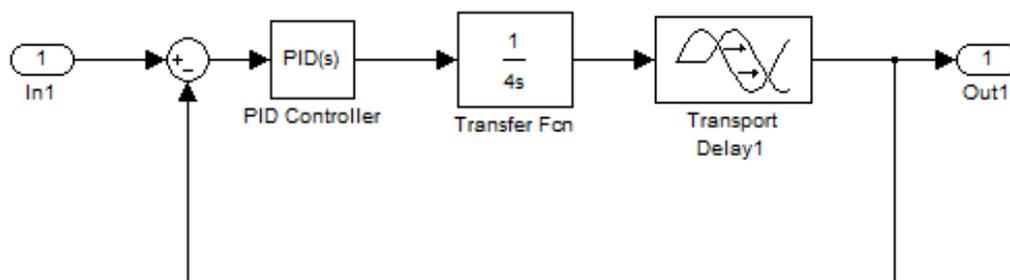


Рисунок 4.1.3 – Структурная схема с запаздыванием в канале измерения

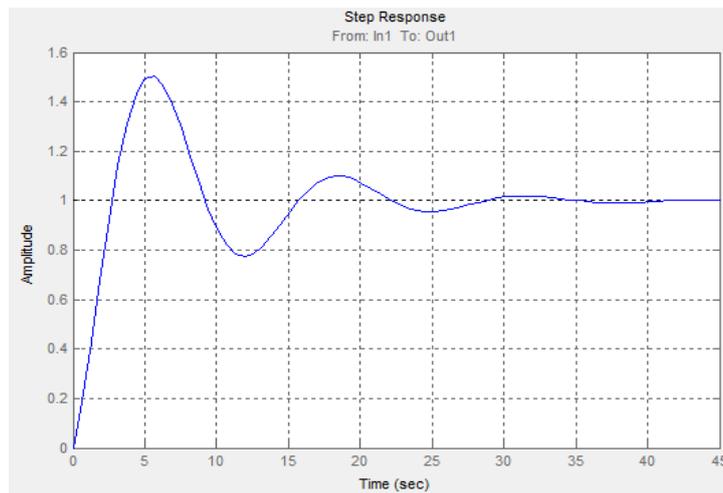


Рисунок 4.1.4 – Переходная характеристика процесса, при запаздывании $\tau = 2\text{c}$

Из сравнения рисунков 4.1.2 б и 4.1.4 видно, что наличие любого запаздывания может негативно повлиять на качество переходного процесса системы управления.

4.2 Формульный метод определения настроек ПИД-регулятора

Для определения параметров k_p, k_i для ПИ-регулятора, а также k_p, k_i, k_d для ПИД- регуляторов можно использовать различные методы, мы подробнее остановимся на формульном методе определения настроек регулятора.

В практике наладочных работ широко используют приближенные формулы для определения оптимальных параметров настройки регуляторов. Метод используется для быстрой, приближенной оценки значений параметров настройки регулятора для трех видов оптимальных типовых процессов регулирования. Метод применим как для объектов с самовыравниванием, так и для объектов без самовыравнивания.

Формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов без самовыравнивания представлен на таблице 10.

Таблица 10 – Настройки ПИД-регуляторов для получения различных переходных процессов

Регулятор	Типовой процесс регулирования	
	Апериодический	С 20% перерегулированием
ПИД	$K_p = \frac{0,6}{\tau_{\text{объект}}/T_{\text{объект}}}$ $K_i = 5 * \tau_{\text{объект}}$ $K_d = 0,2 * \tau_{\text{объект}}$	$K_p = \frac{1,1}{\tau_{\text{объект}}/T_{\text{объект}}}$ $K_i = 2 * \tau_{\text{объект}}$ $K_d = 0,4 * \tau_{\text{объект}}$

Формульный метод определения настроек ПИ-регулятора для статических объектов с самовыравниванием представлен на таблице 11.

Таблица 11 – Настройки ПИ-регуляторов для получения различных переходных процессов

Регулятор	Типовой процесс регулирования	
	Апериодический	С 20% перерегулированием
ПИ	$K_p = \frac{0,6}{k * \tau_{\text{объект}}/T_{\text{объект}}}$ $K_i = 0,6 * T_{\text{объект}}$	$K_p = \frac{0,7}{k * \tau_{\text{объект}}/T_{\text{объект}}}$ $K_i = 0,7 * T_{\text{объект}}$

4.3 Применение предиктора Смита для объектов управления в виде интегрирующего звена с запаздыванием

Чтобы исследовать поведение регулятора Смита для интегрирующего звена с запаздыванием. Рассмотрим передаточную функцию объекта и модели в виде:

$$W_{\text{объект}}(s) = \frac{e^{-2s}}{4s} \quad W_{\text{модель}}(s) = \frac{e^{-2s}}{4s} \quad (4.3.1)$$

Для настройки параметров ПИД-регулятора используется формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов без самовыравнивания (см. таблицу 10).

При настройках ПИД-регулятора. $W_{\text{объект}}(s) = \frac{e^{-2s}}{4s}$ $W_{\text{модель}}(s) = \frac{e^{-2s}}{4s}$

$$W_{\text{модель}}(s) = T = VAR / \tau = VAR$$

Коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются, исходя из параметров объекта управления (см. формула 4.3.1). $K_p = \frac{0.6}{\tau/T} = 1,2$; $T_i = 5 * \tau = 10$; $T_d = 0.2 * \tau = 0,4$.

Построим структурную схему модели замкнутой системы объекта с предиктором Смита в Matlab Simulink.

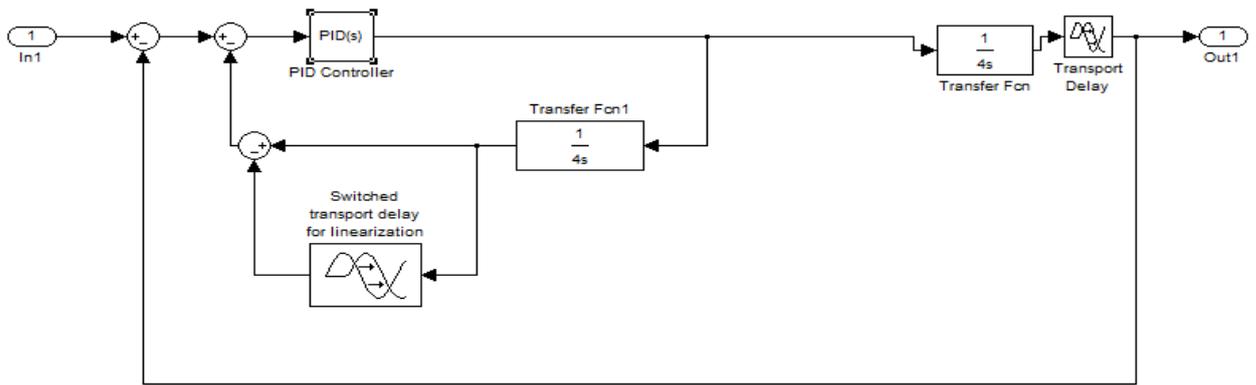


Рисунок 4.3.1 – Структурная схема модели замкнутой системы объекта с предиктором Смита

Изменяем параметр τ в пределах от 0,25 до 3. Параметр постоянной времени $T = 4$ оставим без изменений

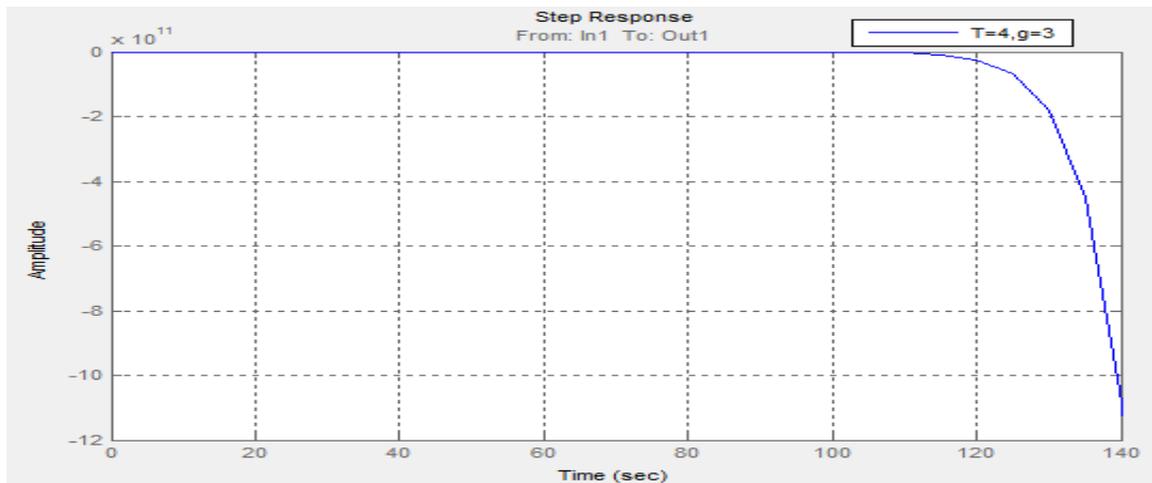


Рисунок 4.3.2 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, запаздывание (эталон $\tau=2$) меняем в большую сторону

Из графика видно, что система неустойчива. Таким образом, задание времени запаздывания в регуляторе Смита больше, чем запаздывание объекта запрещается, так как система становится неустойчивой.

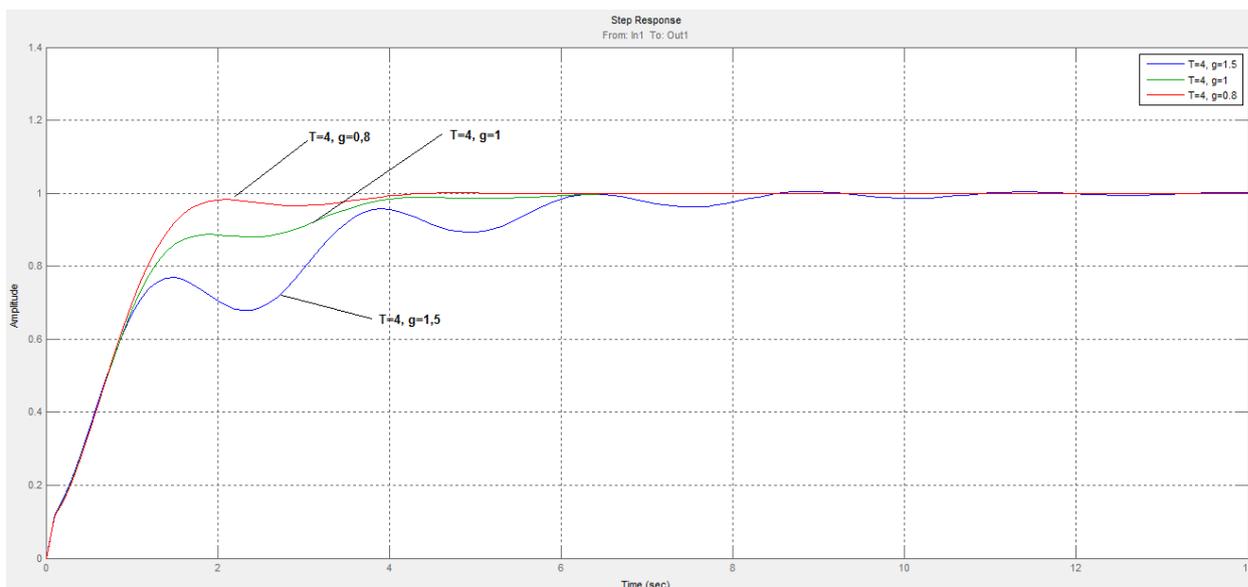


Рисунок 4.3.3 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, $\tau=1;1,5;0,8$ (меняем в меньшую сторону)

Из полученных графиков ПП определим изменения, которые произошли в ходе исследования, а также определим показатели качества процесса, и занесем их в таблицу 12.

Таблица 12 – отклонение параметров при изменении параметра τ

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	
	$\sigma, \%$	t_p, c		t_p, c
$T=4, \tau = 2$	1,08	36,6	$T=4, \tau = 1,5$	12,8
$T=4, \tau = 3$	неустойчива		$T=4, \tau = 1$	5,98
$T=4, \tau = 4$	неустойчива		$T=4, \tau = 0,5$	4,2
$T=4, \tau = 5$	неустойчива			

Изменим параметр T в пределах от 1 до 10. Запаздывание $\tau = 2$ оставим без изменений.

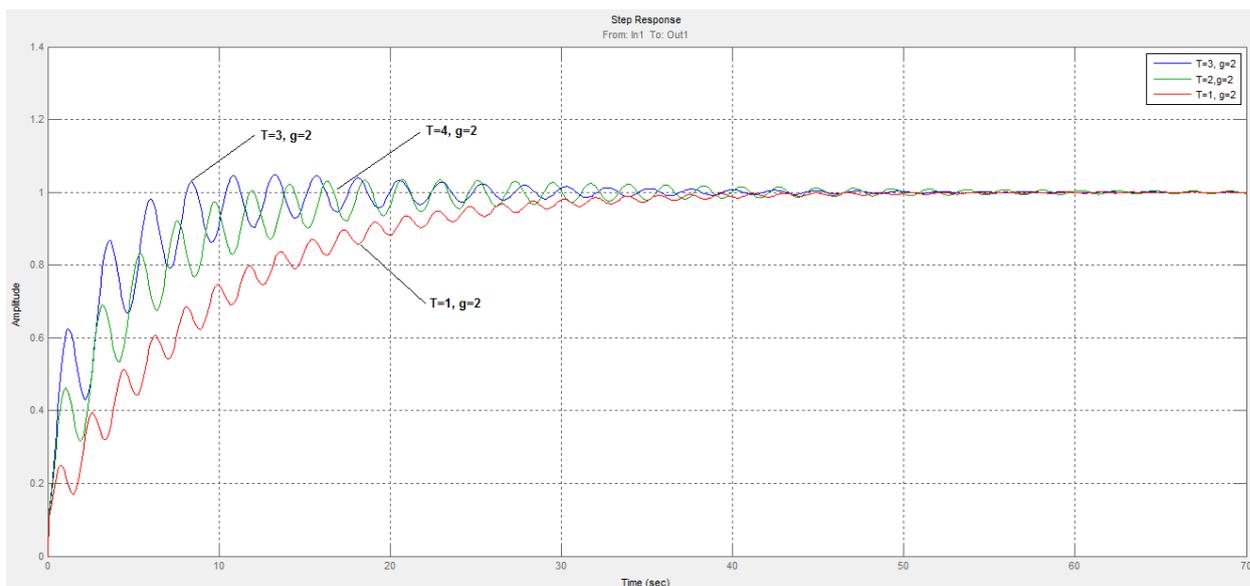


Рисунок 4.3.4 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 2$, $T=3;2;1$ (меняем в меньшую сторону)

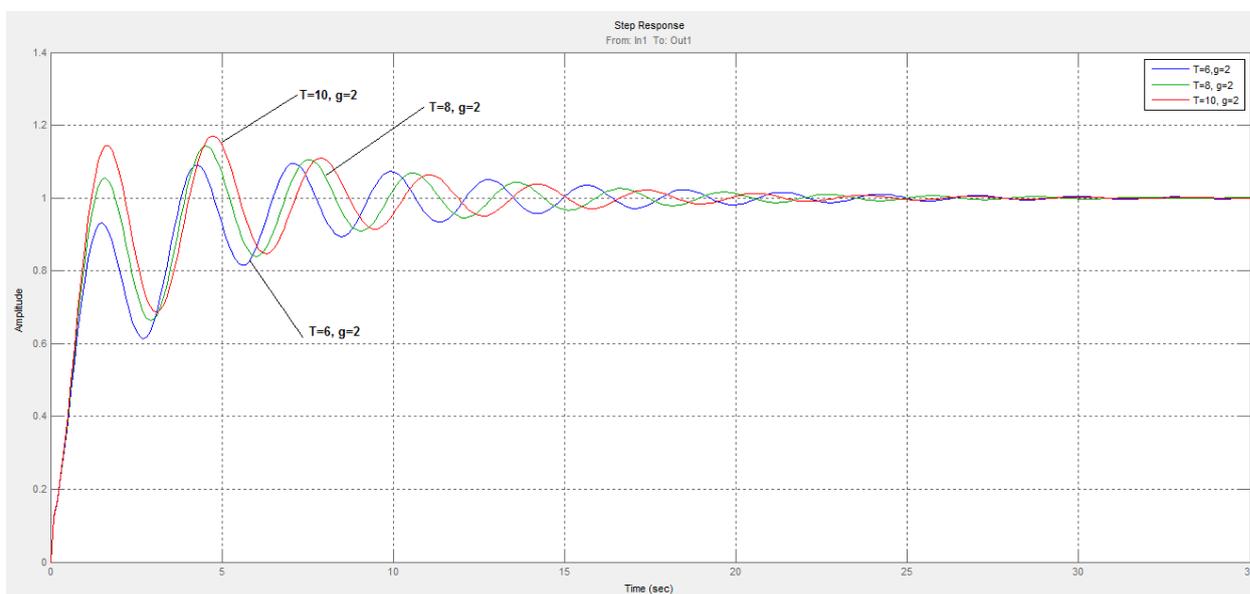


Рисунок 4.3.5 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $\tau = 2$, $T=6;8;10$ (меняем в большую сторону)

По полученным переходным характеристикам определим показатели качества процесса. Более подробное отклонение параметров от эталонных рассмотрим в таблице 13.

Изменение T в ту или иную сторону существенно не влияет на качество ПП – он остается колебательным, но при $T_{\text{модель}} > T_{\text{объект}}$ появляется перерегулирование.

Таблица 13 – отклонение параметров при изменении параметра T

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	β		$\sigma, \%$	β
$T=4, \tau=1$	1,08	27	$T=3, \tau = 1$	1,05	38
$T=6, \tau=1$	1,1	20	$T=2, \tau = 1$	1,03	55
$T=8, \tau=1$	1,15	16	$T=1, \tau = 1$	0	56
$T=10, \tau=1$	1,17	14			

Исходя из графиков, можно сказать, что оценка качества ПП будет определяться по перерегулированию и колебательности. Колебательность будем определять по числу полувольт за время ПП.

Дальнейшие исследования будут проводиться, когда коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются по значениям, используемым в регуляторе Смита. Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора формульным методом показаны на таблице 12.

Таблица 12 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора формульным методом

$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \downarrow$			
$T=4, \tau = 3$	$K_p = 0,8$	$K_i = 15$	$K_d = 0,6$	$T=4, \tau = 1,5$	$K_p = 1,6$	$K_i = 7,5$	$K_d = 0,3$
$T=4, \tau = 4$	$K_p = 0,6$	$K_i = 20$	$K_d = 0,8$	$T=4, \tau = 1$	$K_p = 2,3$	$K_i = 5$	$K_d = 0,2$
$T=4, \tau = 5$	$K_p = 0,48$	$K_i = 25$	$K_d = 1$	$T=4, \tau = 0,5$	$K_p = 4,8$	$K_i = 2,5$	$K_d = 0,1$

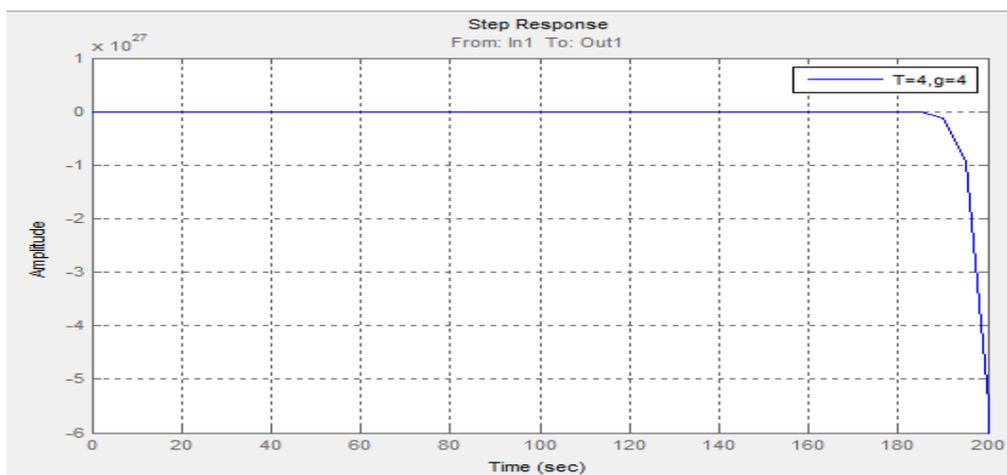


Рисунок 4.3.6 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, запаздывание (эталон $\tau=2$) меняем в большую сторону

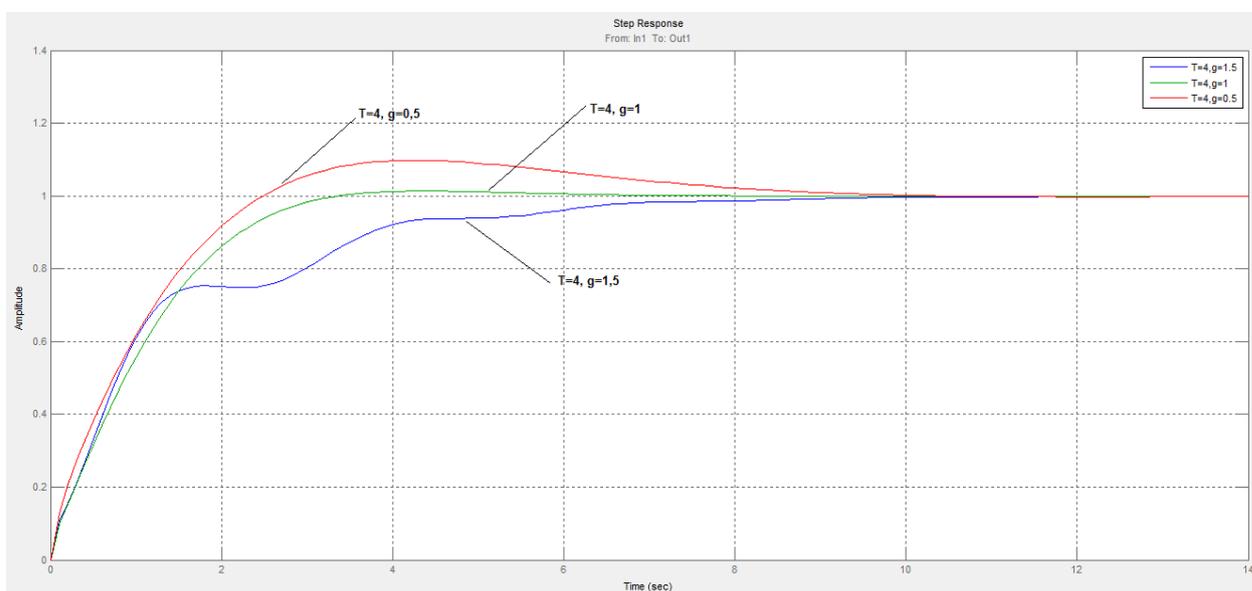


Рисунок 4.3.7 – Переходная характеристика ЗС объекта с предиктором Смита, параметр $T=4$, $\tau=1; 1,5; 0,8$ (меняем в меньшую сторону)

Из полученных графиков ПП выявим изменения, которые произошли в ходе исследования, а также определим показатели качества процесса, и занесем их в таблицу 13.

Таблица 13 – отклонение параметров при изменении параметра τ

Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов		Отклонение параметров от истины	Характеристики переходных процессов	
	$\sigma, \%$	t_p, c		$\sigma, \%$	t_p, c
$T=4, \tau = 2$	1,05	33,8	$T=4, \tau = 1,5$	0,9	9,2
$T=4, \tau = 3$	неустойчива		$T=4, \tau = 1$	1	8,06
$T=4, \tau = 4$	неустойчива		$T=4, \tau = 0,5$	1,15	7,5
$T=4, \tau = 5$	неустойчива				

Переходные процессы на рисунках 4.3.7 имеют более высокое качество, чем на рисунках 4.3.3. Отсюда вывод: настройки ПИ-, ПИД-регуляторов необходимо рассчитывать, исходя из той модели объекта, которая используется в предикторе Смита.

Изменяем параметр T в пределах от 1 до 10. Запаздывание $\tau = 2$ оставим без изменений.

Таблица 14 – Расчеты коэффициентов ПИД-регулятора формульным методом

$W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \uparrow$				$W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \downarrow$			
$T=6, \tau = 2$	$K_p = 1,8$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$	$T=3, \tau = 2$	$K_p = 0,9$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$
$T=8, \tau = 2$	$K_p = 2,4$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$	$T=2, \tau = 2$	$K_p = 0,6$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$
$T=10, \tau = 2$	$K_p = 3$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$	$T=1, \tau = 2$	$K_p = 0,3$	$K_i = 10$	$K_d = 0,4$

При изменении параметра постоянной времени в пределах от 1 до 10, значение запаздывания берем равным 2. Коэффициенты ПИД-регулятора рассчитываются по модели объекта управления (см. на таблицу 14). Полученные графики существенно не отличаются от рисунков 4.3.4 и 4.3.5.

На следующем графика отображены показатели качества переходного процесса интегрирующего звена, имеющего запаздывание, при соотношении значения запаздывания $\tau = \frac{\tau_{\text{модель}}}{\tau_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow \downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора *const*.

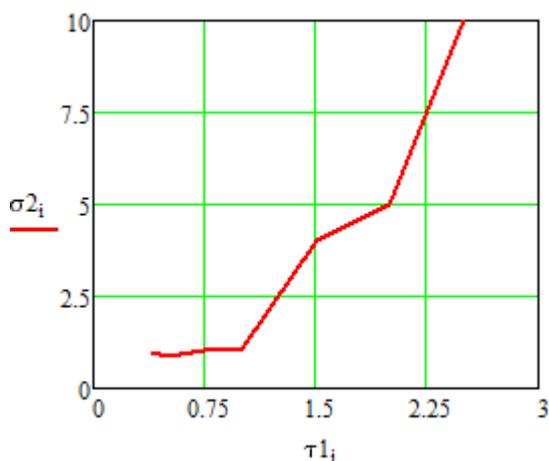


Рисунок 4.3.10 – оценка качества ПП (перерегулирования) при изменении значения запаздывания

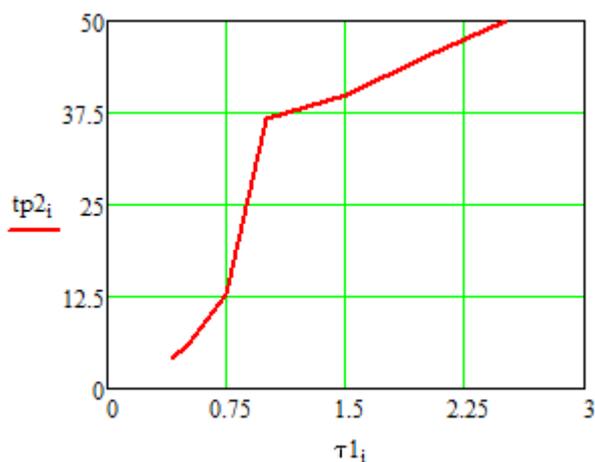


Рисунок 4.3.11– оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения запаздывания

На рисунке 4.3.10 и 4.3.11 показаны показатели качества переходного процесса интегрирующего звена, имеющего запаздывание,

при соотношении значения постоянного времени $T = \frac{T_{\text{модель}}}{T_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = T = VAR \uparrow\downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора *const*.

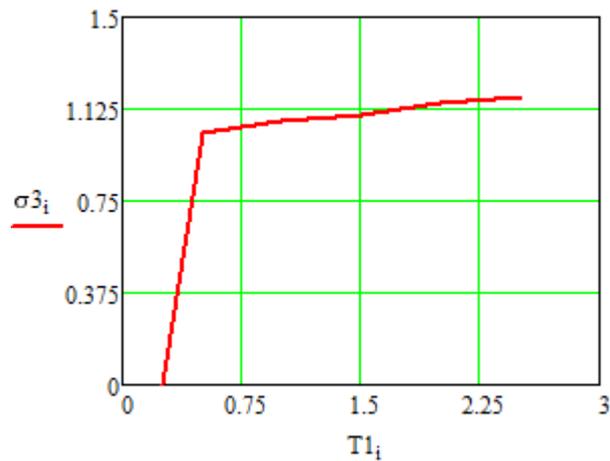


Рисунок 4.3.12 – оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения постоянного времени

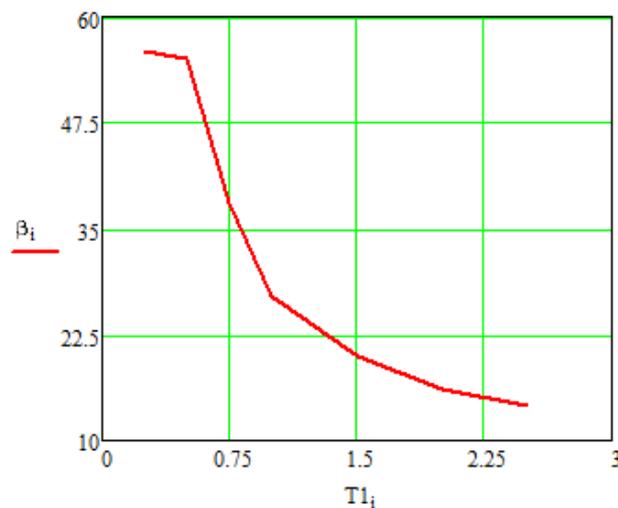


Рисунок 4.3.13 – оценка качества ПП (колебательность) при изменении значения постоянной времени

На следующем графике отображены показатели качества переходного процесса апериодического звена первого порядка, имеющего запаздывание, при соотношении значения запаздывания $\tau = \frac{\tau_{\text{модель}}}{\tau_{\text{объект}}}$. Когда $W_{\text{модель}}(s) = \tau = VAR \uparrow\downarrow$, а коэффициенты ПИД-регулятора рассчитаны по модели объекта.

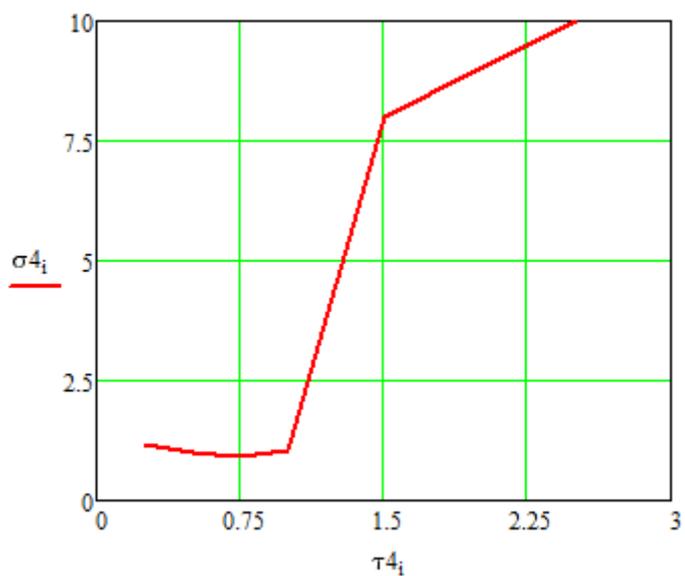


Рисунок 4.3.14 – оценка качества ПП (перерегулирования) при изменении значения запаздывания

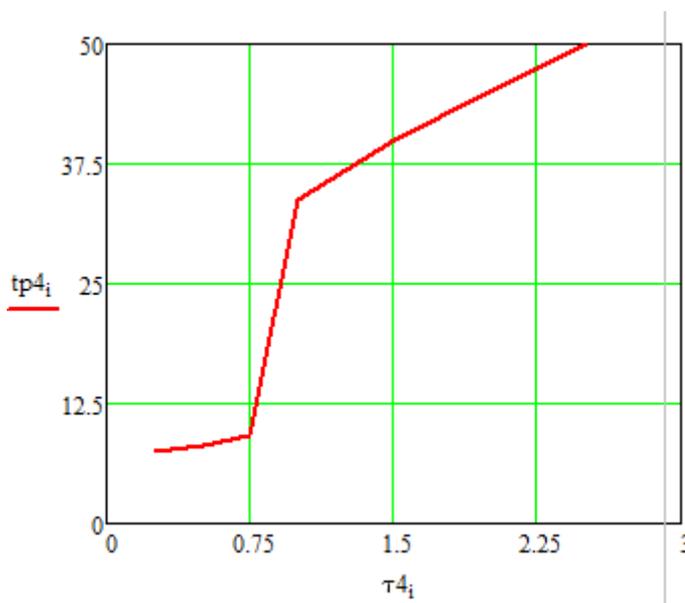


Рисунок 4.3.15– оценка качества ПП (время регулирования) при изменении значения запаздывания

5 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

В работе осуществляется исследование влияния настроек регулятора Смита на качества регулирования. Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

5.1 Предпроектный анализ

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

		Характеристика оценок на контроль толщины стенки ЛБТ		
		ПИД-регулятор	ПИ-регулятор	П-регулятор
Размер компании	Производители регулятора			
	Нефтедобывающие компании			
	Аттестационные центры по НК			

Рис. 5.1.1 Карта сегментирования рынка услуг по настройке регуляторов

Потенциальными потребителями разработки могут являться как организации, которые производят ленточные транспортеры и теплообменники, так и производства, которые занимаются технической диагностикой оборудования. Целевым рынком являются компании, занимающиеся производством и продажей ПИД-регуляторов.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Для сравнения выбраны два коммерчески успешных прибора наиболее близкие с разрабатываемым прибором по назначению:

1. Терморегулятор ОВЕН ТРМ500.Щ2.5А.
2. Измеритель ПИД-регулятор с дополнительным реле ОВЕН ТРМ10А-Щ2.ТС.Р.

Промышленный терморегулятор ТРМ500 предназначен для управления процессами поддержания температуры в печах, термопласт автоматах, экструдерах, термопрессах, машинах для выдува ПЭТ тары, гомогенизаторах, запайщиках, термоусадочном оборудовании, оборудовании для термоформинга, термопрессах (перенос изображений), оборудовании для производства строительных материалов, сушилках и другого оборудования в работе которого требуется управление температурой.

Таблица 5.1.2.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок).

Критерии оценки	Вес критерии	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бф	Бк1	Кф	Кк1
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,09	5	4	0,5	0,4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	5	5	0,25	0,25
3. Помехоустойчивость	0,09	5	4	0,25	0,2
4. Энергоэкономичность	0,01	4	4	0,12	0,12

5. Надежность	0,03	5	5	0,35	0,35
6. Уровень шума	0,07	5	5	0,15	0,15
7. Безопасность	0,07	5	3	0,45	0,45
8. Потребность в ресурсах памяти	0,01	4	4	0,2	0,2
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,02	4	4	0,12	0,12
10. Простота эксплуатации	0,04	5	4	0,25	0,25
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	5	5	0,25	0,15
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,07	5	5	0,25	0,1
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	5	5	0,75	0,75
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	5	5	0,5	0,5
3. Цена	0,07	4	4	0,08	0,08
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,04	5	5	0,1	0,1
5. Послепродажное обслуживание	0,025	5	5	0,15	0,15
6. Финансирование научной разработки	0,05	5	5	0,05	0,05
7. Срок выхода на рынок	0,015	5	5	0,05	0,05
8. Наличие сертификации разработки	0,02	5	5	0,05	0,05
Итого	1			4,87	4,47

После расчёта средневзвешенного показателя, который составил 4,87, можно судить о конкурентоспособности разработки.

5.1.3 Fast - анализ

В качестве объекта FAST - анализа выступает регулятор с предиктором Смита для объектов с запаздыванием.

Описание главных, основных и вспомогательных функции, выполняемых объектом приведено в таблице 5.3.1.

Таблица 5.1.3.1 – Классификация функций, выполняемых объектом исследования.

Наименование детали	Количество деталей	Выполняемая функция	Ранг функции		
			Главная	Основная	Вспомогательная
Блок питания	1	Предоставлен ия питания			X

Преобразователь	1	Измерение толщины стенки трубы	X		
Усилитель мощности	1	Усиление мощности сигнала		X	
Микро-контроллер	1	Обработка данных измерения		X	
ЖКИ и клавиатура	2	Ввод и вывод информации			X

На первом этапе необходимо построить матрицу смежности функции (табл. 5.1.3.1).

Таблица 5.1.3.2 – Матрица смежности функций.

	Предоставления питания	Измерение толщины стенки трубы	Усиление мощности сигнала	Обработка данных измерения	Ввод и вывод информации
Предоставления питания	=	<	<	<	<
Измерение толщины	>	=	>	>	>
Усиление мощности сигнала	>	<	=	<	>
Обработка данных измерения	>	<	>	=	>
Ввод и вывод информации	>	<	<	<	=

Далее происходит определение значимости функции путем деления балла, полученного по каждой функции, на общую сумму баллов по всем функциям (табл. 5.1.3.3).

Таблица 5.1.3.3 – Значимость функции.

Функция	Балл	Значимость функции
Предоставления питания для блока сбора данных и усилителя мощности	3	0,122
Измерение толщины стенки трубы	7	0,286
Генерация сигнала и сбор данных	5	0,204

Обработка данных измерения	6	0,244
Усиление мощности сигнала	3,5	0,144

Задача данной стадии заключается в том, что с помощью специальных методов оценить уровень затрат на выполнение каждой функции. Сделать это возможно с помощью применения нормативного метода. Расчет стоимости функций приведен в таблице 5.1.3.4.

Таблица 5.1.3.4 – Расчет стоимости функций

Наименование детали (узла, процесс)	Количество деталей на узел	Выполняемая функция	Норма расхода, кг	Трудоёмкость детали, нормо-ч	Стоимость материала, руб.	Заработная плата, руб.	Себестоимость, руб.
Блок питания	1	Предоставление питания		-	-	-	250
Преобразователь	1	Измерение толщины трубы	0,5	-	-	-	350
Усилитель мощности	1	Усиление мощности сигнала		-	-	-	200
Микроконтроллер	1	Обработка данных измерения		-	-	-	300
ЖКИ и клавиатура	2	Ввод и вывод информации		-	-	-	500

Построенная функционально-стоимостная диаграмма позволяет выявить диспропорции между важностью функций и затратами на них.

5.1.4 SWOT-анализ

В рамках третьего этапа должна быть составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приводится в данной работе.

Таблица 5.1.4.1 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей). С2. Функциональная мощность (предоставляемые</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Отсутствие прототипа научной разработки. Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей</p>
--	---	--

	<p>возможности).</p> <p>С3. Конкурентоспособность продукта.</p> <p>С4. Срок выхода на рынок.</p> <p>С5. Высоко квалифицированный научный труд.</p>	<p>квалифицированных кадров.</p> <p>Сл3. Отсутствие необходимого оборудования для проведения испытания ПО.</p> <p>Сл4. Уровень проникновения на рынок.</p> <p>Сл5. Большой срок поставок плат, используемых для проведения научного исследования.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ для быстрого внедрения ПО на рынок.</p> <p>В2. Использование развитой международной инфраструктуры для более быстрой доставки плат.</p> <p>В3. Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p>В4. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях.</p> <p>В5. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p>	<p>Использование инновационной структуры ТПУ позволит повысить конкурентоспособность ПО и ускорить выход на рынок. Так же использование развитой международной инфраструктуры поможет ускорить выход ПО на рынок. Возможно появление дополнительного спроса на новый продукт благодаря использованию высоко квалифицированного научного труда. Благодаря снижению таможенных пошлин на платы возможно повышение конкурентоспособности ПО.</p>	<p>Появление дополнительного спроса на новый продукт может привести к отсутствию у потенциальных потребителей квалифицированных кадров. Снижение таможенных пошлин на сырье и материалы, используемые при научных исследованиях может привести к увеличению срока поставки плат, используемых для проведения научного исследования.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Развитая конкуренция производителей ПО.</p> <p>У3. Ограничения памяти регулятора и контроллера.</p> <p>У4. Ограничения регулятора и контроллера.</p>	<p>Отсутствие спроса на новые технологии производства может замедлить срок выхода ПО на рынок и понизить квалификацию научного труда. Развитая конкуренция производителей ПО может привести к снижению конкурентоспособности продукта.</p>	

Благодаря SWOT-анализу, можно сделать вывод о том, что сильной стороной проекта является его простота и экономичность, что позволит уменьшить влияние угроз на реализацию проекта.

5.1.5 Диаграмма Исикавы

Диаграмма причины-следствия Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram) – это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство в форме рыбьей кости для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления [45].

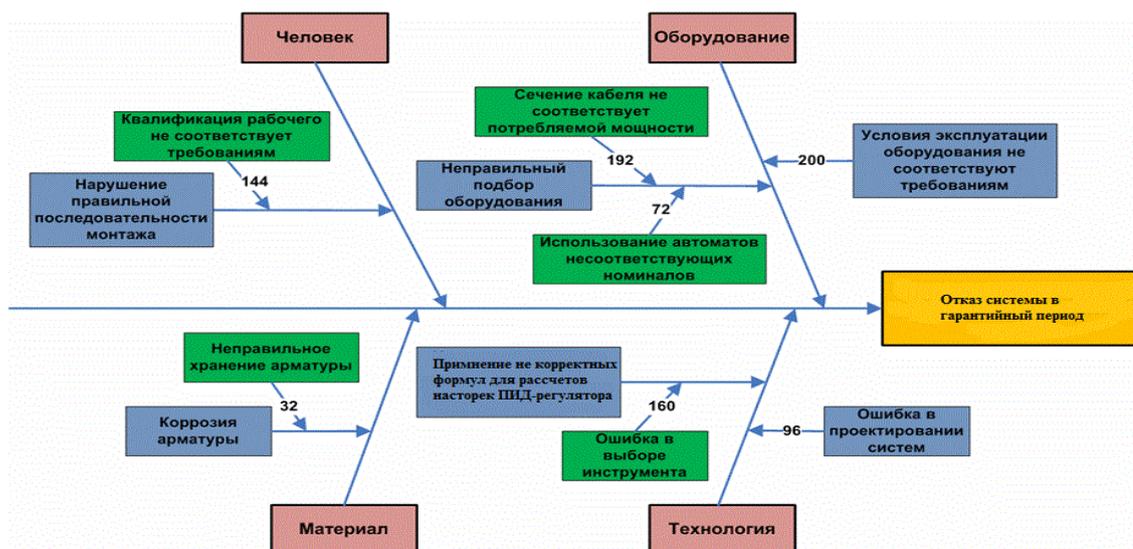


Рисунок 5.1.5.1 – принцип метода диаграммы Исикавы.

В результате использования данного инструмента в своей деятельности предприятие получает возможность в достаточно простой форме систематизировать причины рассматриваемой проблемы-следствия, при этом провести отбор наиболее важных и выделить среди них приоритетные путем ранжирования.

5.2 Инициация проекта

5.2.1 Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, функции исполнителей проекта.

Потенциальными потребителями моего исследования могут являться как физические, юридические лица, так и коммерческие организации различных размеров, ориентирующиеся на выпуск оборонной, авиакосмической, гражданской промышленности и науки.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- 1) определение структуры работ в рамках научного исследования;
- 2) определение участников каждой работы;
- 3) установление продолжительности работ;
- 4) построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 5.2.1.1.

Таблица 5.2.1.1 - Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Постановка целей и задач, получение исходных данных	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, инженер
	3	Проведение патентных исследований	Научный руководитель, инженер
	4	Разработка календарного плана	Научный руководитель, инженер
Проектирование структуры ПО	5	Обсуждение литературы	Научный руководитель, инженер
	6	Проектирование структуры ПО	Научный руководитель, инженер

	7	Разработка ПО	Научный руководитель, инженер
	8	Тестирование ПО	Инженер
Проведение ОКР			
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	9	Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер
	10	Оформление графического материала	Инженер
	11	Подведение итогов	Научный руководитель, инженер

5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Для успешной организации процесса работы на конкретной задаче необходимо рационально спланировать занятость каждого из участников и сроки проведения отдельных этапов работы.

На данном этапе составляется полный список необходимых работ, назначаются их исполнители и продолжительность. Результатом планирования работ является линейный график реализации проекта.

Перечень этапов настоящей работы и продолжительность их выполнения в процентном соотношении для научного руководителя (НР) и исполнителя (И) представлены в табл. 5.3.1.

Таблица 5.3.1. – Распределение занятости научного руководителя и исполнителя по этапам работы

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач	НР	НР – 100 %
Разработка и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100 % И – 10 %
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	НР – 40 % И – 100 %
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100 %

		И – 10 %
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 30 % ИП – 100 %
Проектирование структуры ПО	НР, И	НР – 40 % И – 100 %
Разработка ПО	НР, И	НР – 30 % И – 100 %
Тестирование и отладка ПО	НР, И	НР – 30 % И – 100 %
Устранение проблем и оптимизация	И	И – 100 %
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100 %
Оформление графического материала	И	И – 100 %

5.3.1 Продолжительность этапов работ

Для определения ожидаемой продолжительности работ $t_{ож}$ с помощью экспертных оценок была использована следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (4.1)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работ, дн.; t_{max} – максимальная продолжительность работ, дн.

Длительность этапов в рабочих днях $T_{РД}$ вычислялась по формуле:

$$T_{РД} = t_{ож} \cdot K_{д}, \quad (4.2)$$

где $K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_{д}=1,2$).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях $T_{КД}$ ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (4.3)$$

где $T_{РД}$ – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;
 $T_{К}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4.4)$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни ($T_{\text{КАЛ}} = 366$);

$T_{\text{ВД}}$ – выходные дни ($T_{\text{ВД}} = 53$);

$T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни ($T_{\text{ПД}} = 14$).

$$T_{\text{К}} = \frac{366}{366-53-14} \approx 1,224$$

Все расчеты по трудозатратам представлены в таблице, в которой итоги по продолжительности этапов работы в рабочих и календарных днях являются общими трудоемкостями для каждого из участников проекта. Далее они будут использованы для расчетов. Величины трудоемкости этапов по исполнителям $T_{\text{КД}}$ позволяют построить линейный график осуществления проекта.

5.3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта и на материалы

Для проекта по созданию программного обеспечения сегментации и визуализации легкого человека производится оценка затрат по следующим статьям:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- прочие расходы.

Так как работа выполнялась без привлечения сторонних организаций и для ее выполнения не требовалась аренда какого-либо имущества, а также не было необходимости в командировках, расходы по соответствующим статьям отсутствуют.

В материальных затратах будут учтены только расходы на канцелярские принадлежности и картриджи для принтера, так как все необходимые для работы над проектом материалы имелись в распоряжении кафедры, на которой велась разработка [48].

Материалы необходимые для выполнения данной работы и расчет материальных затрат представлены в табл. 5.3.3.1.

Таблица 5.3.3.1 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	210	1 уп.	210
Ручка шариковая	30	2 шт.	60
Картридж	1600	1 шт.	1600
Блокнот	45	2 шт.	90
Итого:			1960

5.3.3 Расчет заработной платы и социального налога

Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Месячный оклад (МО) НР, занимающего должность доцента и имеющего степень кандидата технических наук, составляет 33 669 руб./мес. МО исполнителя, являющегося инженером первого уровня составляет 7864,11 руб./мес.

Исходя из того, что в месяце в среднем 24,83 рабочих дня при шестидневной рабочей неделе среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{дн-т}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = МО/24,83 \quad (5.3.3.1)$$

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в табл. 5.3.3.1. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы трудозатрат в Приложении В. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: премиальный $K_{ГП} = 1,1$; дополнительной заработной платы $K_{доп.ЗП} = 1,188$ (для шестидневной рабочей недели); и районный $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо

первую умножить на интегральный коэффициент $K_{и} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$.

Таблица 5.3.3.1 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23484,86	1355,98	38	1,699	61064,68
И	7864,11	316,72	108	1,62	58115,59
Итого:					119180,26

Затраты на единый социальный налог (ЕСН) включают в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование и составляют 30% от полной заработной платы по проекту.

То есть ЕСН ($C_{соц.}$) определяется следующим образом:

$$C_{соц.} = C_{зп} * 0,27 = 119180,26 * 0,27 = 32178,67 \text{ руб.}$$

5.3.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования, а именно компьютера и принтера. Затраты на электроэнергию при работе оборудования $C_{эл.об.}$ рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} \cdot Ц_{э} \cdot t_{об}, \quad (5.3.4.1)$$

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

$Ц_{э}$ – тарифная цена за 1 кВт·час;

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

Мощность $P_{об}$, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} \cdot K_C, \quad (5.3.4.2)$$

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

K_C – коэффициент загрузки (для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$).

Номинальная мощность персонального компьютера составляет 0,3 кВт, принтера – 0,1 кВт.

Для ТПУ с учетом налога на добавленную стоимость (НДС)

$$Ц_0 = 5,257 \text{ руб./кВт}\cdot\text{час}$$

Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ для исполнителя вычисляется на основе данных таблицы трудозатрат Приложения В:

$$t_{\text{ОБ}} = T_{\text{РД}} \cdot K_t, \quad (5.3.4.3)$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{РД}}$.

Из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов, а работа выполнялась 108 рабочих дней, получим, что общее время выполнения проекта составляет 864 часа.

Так как работа на компьютере проводилась по 7 часов в день из 8, то $K_t = 0,88$. Тогда из 864 часов, потраченных исполнителем на осуществление проекта, 760 часов были проведены за компьютером. Принтер использовался примерно в течении 15 часов.

Затраты на электроэнергию при работе оборудования сведены в табл. 5.3.4.1.

Таблица 5.3.4.1 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $\text{Э}_{\text{ОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	760	0,3	1198,60
Лазерный Принтер	15	0,1	7,89
Итого:			1206,48

5.3.5 Расчет амортизационных расходов

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

Амортизационные отчисления рассчитываются по времени использования компьютера по формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB}}{F_D} \cdot t_{рф} \cdot n, \quad (5.3.5.1)$$

где:

N_A - годовая норма амортизации

C_{OB} – цена оборудования;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени;

$t_{рф}$ – время работы вычислительной техники;

n – число задействованных единиц оборудования, $n = 1$.

Годовая амортизация N_A определяется как величина, обратная сроку амортизации оборудования C_A , который определяется согласно постановлению правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Для компьютера примем $C_A = 3$ года, тогда $N_A = 0,33$. Для принтера примем $C_A = 2$ года, тогда $N_A = 0,5$.

Таблица 5.3.5.1–Затраты на амортизационные отчисления

Наименование оборудования	Норма амортизации оборудования N_A	Стоимость оборудования C_{OB} , руб.	Фактич. время работы оборудования $t_{рф}$, ч	Действ. годовой фонд раб.времени F_D , ч	Амортизац. отчисления C_{AM} , руб.
Персональный компьютер	0,33	45000	760	2384	4734,06
Лазерный принтер	0,5	15000	15	500	225
Итого:					4959,06

5.3.6 Расчет прочих расходов

В данном разделе производится оценка расходов на выполнение проекта, которые не были учтены в предыдущих статьях, оплата услуг связи,

копирование материалов и др. Величина прочих расходов составляет 10% от суммы всех предыдущих затрат и вычисляется по следующей формуле:

$$C_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}). \quad (5.3.6.1)$$

$$C_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (1960 + 119180,26 + 35754,08 + 1206,48 + 4959,06) = 16305,95 \text{руб.}$$

Таким образом, накладные расходы составили 16305,95 руб.

5.3.7 Расчет общей себестоимости разработки

Общая стоимость разработки по созданию математического и программного обеспечения сегментации и визуализации легкого человека определяется путем суммирования затрат по всем статьям и представлена в табл. 5.3.7.1.

Таблица 5.3.7.1– Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	1960
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	119180,25
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	35754,08
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.об.}}$	1206,48
Амортизационные отчисления	$\mathcal{E}_{\text{ам}}$	4959,06
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	16305,95
Итого:		179365,43

5.3.8 Расчет прибыли и налога на добавленную стоимость. Цена разработки НИР

Прибыль от реализации данного проекта предполагается равной 15% от расходов на разработку и составляет 26904,81 руб.

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

$$(179365,43 + 26904,81) \cdot 0,18 = 37128,64 \text{руб.}$$

Данный параметр представляет сумму полной себестоимости, прибыли и НДС. Таким образом, получаем:

$$C_{\text{НИР}} = 179365,43 + 26904,81 + 37128,64 = 243398,89 \text{ руб.}$$

5.4 Оценка экономической эффективности проекта

5.4.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается научно-технический прогресс в данной области.

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

$$I_{\text{НТУ}} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (6.4.1.1)$$

где $I_{\text{НТУ}}$ – интегральный индекс научно-технического уровня;
 R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;
 n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Результаты оценок признаков научно-технического уровня для данного проекта приведены в табл. 5.4.1.

Таблица 5.4.1 .1– Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	Балл	R_i
Уровень новизны	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	6	0,3
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	6	0,2
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	10	0,5

Исходя из оценки признаков НИОКР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:

$$I_{\text{НТУ}} = 0,3 \cdot 6 + 0,2 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 1,8 + 1,2 + 5 = 8$$

Таким образом, исходя из полученной оценки признаков НИОКР, проект имеет высокий уровень научно-технического эффекта благодаря

новому подходу к анализу медицинских изображений и визуализации их результатов.

Оценка научно-технического уровня представлена в табл. 4.9.

Таблица 5.4.1 .2 – Оценка научно технического уровня НИР

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,3	Уровень новизны	Новая	6	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты
0,2	Теоретический уровень	Разработка способа	6	Разработка нового способа сегментации и визуализации легких
0,5	Возможность реализации	В течение первых лет	10	Реализуется на основе хорошо известных технологий

Таким образом, проект имеет высокий уровень научно-технического эффекта (т.к. $I_{НТУ} = 8$) и достаточно быструю возможность реализации в течение первых лет.

В данном разделе был рассмотрен перечень вопросов, подлежащих исследованию и проектированию, а именно, был проведен:

1. Предпроектный анализ;
2. Инициация проекта;
3. Планирование управления научно-техническим проектом;
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

В предпроектном анализе была проведена сегментация рынка, в которой были выведены потребители, использующие данный продукт. Также были приведены конкуренты, которые делают схожий продукт. Было проведено сравнение конкурентных, технических решений, в результате которого было установлено, что разработка имеет высокий уровень конкурентоспособности. В дальнейшем был произведен SWOT-анализ, согласно которого были определены сильные и слабые стороны проекта, а

также возможности и угрозы, которым может быть подвержен проект. Также была сделана диаграмма Исикавы, по которой можно увидеть все возможные слабые места проекта.

В инициации проекта был разработан перечень этапов, работ и распределение исполнителей. Было выполнено определение трудоёмкости выполнения работ.

В планировании управления научно-техническим проектом были рассмотрены затраты по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы.

6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Вопрос производственной и экологической безопасности является одним из наиболее важных при разработке проекта любой сложности. Причины нежелательных событий могут быть естественными (природными), социально-экономическими и техногенными. Основной задачей при решении данного вопроса в рамках конкретного научного или производственного процесса является создание безопасных и благоприятных условий труда для каждого из его участников, а также экологической безопасности окружающей среды.

В рамках квалификационной работы, было исследовано влияния настроек регулятора Смита на качество регулирования. Реализация исследования проводилось в программном продукте Matlab Simulink. Разработка настроек регулятора Смита велась исключительно при помощи компьютера. Область применения данной разработки – промышленное производство.

6.1 Производственная безопасность

Данная научно-исследовательская работа выполнялась в рабочем кабинете отделения автоматизации и робототехники, оснащённым персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ).

Рабочее место находится на первом этаже учебного корпуса №10 НИТПУ. Общая площадь рабочего помещения составляет 64 м^2 (длина $A=12 \text{ м}$, ширина $B=8 \text{ м}$), объем составляет $97,2 \text{ м}^3$ (высота $H=2,8 \text{ м}$). В комнате установлено 6 персональных компьютеров, на одном из которых производилась работа. На каждого человека, работающего в кабинете 416, приходится в среднем 15 м^2 площади и $32,4 \text{ м}^3$ объема. Площадь на одно рабочее место для взрослых пользователей должна составлять не менее $6,0 \text{ м}^2$, а объем - не менее $20,0 \text{ м}^3$ (по СанПиН 2.2.2.542-96). Можно сделать вывод, что рабочее помещение соответствует санитарным нормам.

6.1.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения

На рабочем месте должны быть предусмотрены меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства. Уровни этих факторов не должны превышать предельных значений, оговоренных правовыми, техническими и санитарно-техническими нормами. Эти нормативные документы обязывают к созданию на рабочем месте условий труда, при которых влияние опасных и вредных факторов на работающих либо устранено совсем, либо находится в допустимых пределах.

Оборудованием для выполнения данной работы является персональный компьютер. Это учитывается при рассмотрении вредных и опасных факторов. Классификация вредных и опасных факторов проведена в соответствии с ГОСТ 12.0.003-74 [50].

К вредным производственным факторам, при выполнении работы следует отнести:

- ✓ показатели микроклимата и освещения;
- ✓ шум и вибрация;
- ✓ электромагнитное излучение;
- ✓ психофизические факторы (нервно психологические, статические, умственные, монотонность).

В связи с тем, что современные ЖК мониторы отвечают всем нормам по ионизирующему излучению, оно не рассматривается.

Опасными факторами при работе с ПЭВМ являются:

- ✓ возможность поражения электрическим током;
- ✓ короткое замыкание;
- ✓ статическое электричество

6.1.2 Показатели микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность,

скорость движения воздуха. Эти параметры по отдельности и в комплексе влияют на организм человека, определяя его самочувствие.

Параметры микроклимата в помещении, где находится рабочее место, регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность 40%, скорость движения воздуха 0,1 м/с, температура летом 20 – 25°C, зимой 16 – 18°C, что соответствует допустимым требованиям [30]. Оптимальные величины показателей микроклимата приведены в табл. 6.1.2.

По степени физической тяжести работа инженера-программиста относится к лёгкой физической работе категории I, с энергозатратами организма до 172 Дж/с, т.к. работа проводилась сидя, не требуя систематического физического напряжения.

Таблица 6.1.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха не более, м/с
Холодный	Ia	22-24	21-25	60-40	0,1
	Iб	21-23	20-24	60-40	0,1
Теплый	Ia	23-35	22-26	60-40	0,1
	Iб	22-24	21-25	60-40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещении должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Рекомендации по улучшению микроклимата в помещении. В зимнее время в помещении необходимо предусмотреть систему отопления. Она

должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление.

При обеспечении оптимальных показателей микроклимата температура внутренних поверхностей, ограждающих рабочую зону конструкций (стен, пола, потолка) или устройств, а также температура наружных поверхностей технологического оборудования или его ограждающих устройств соответственно СанПиН 2.2.4.548–96 не должны выходить более чем на 2°С за пределы оптимальных величин температуры воздуха. При температуре внутренних поверхностей ограждающих конструкций ниже или выше оптимальных величин температуры воздуха рабочие места должны быть удалены от них на расстояние не менее 1 м.

Во всех случаях температура нагретых поверхностей технологического оборудования или его ограждающих устройств в целях профилактики типовых травм не должна превышать 45°С.

В рассматриваемом помещении используется водяное отопление со встроенными нагревательными элементами и стояками.

6.1.3 Шум и вибрация

Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Длительное воздействие интенсивного шума [выше 80 дБ(А)] на слух человека приводит к его частичной или полной потере [25].

В табл. 6.1.3 указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 6.1.3 Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах.

Категория напряженности труда	Категория тяжести труда			
	II. Средняя	III. Тяжелая	IV. Очень тяжелая	II. Средняя
I. Мало напряженный	80	80	75	75
II. Умеренно напряженный	70	70	65	65
III. Напряженный	60	60	-	-
IV. Очень напряженный	50	50	-	-

Исходя из вышеуказанной информации, даётся рекомендация для программистов и операторов не превышает 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров снижен путем установки оборудования на специальные виброизоляторы.

6.1.4 Освещение

Работа с использованием ЭВМ относится к зрительным работам высокой точности для любого типа помещений.

В помещении, где проводится выполнение дипломного проекта, используется смешанное освещение, т.е. сочетание естественного и искусственного освещения.

Естественным освещением является освещение через окна. Искусственное освещение используется при недостаточном естественном освещении. В данном помещении используется общее искусственное освещение.

Искусственное освещение в помещениях эксплуатации ПК должно соответствовать действующим нормам освещения, представленным в табл. 6.1.4. Согласно [33] для данных работ установлена необходимая освещенность рабочего места $E_H=300$ лк.

Таблица 6.1.4 – Нормирование освещенности помещений

Характеристика зрительных работ	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Относительная продолжительность зрительной работы, %	Освещенность на рабочей поверхности от системы общего искусственного освещения, лк	Цилиндрическая освещенность, лк	Показатель дискомфорта	Коэффициент пульсации освещенности, %;
Высокой Точности	От 0,3	Более 70	300	100	40	15
	До 0,5	Менее 70	200	75	60	20

Для устранения негативного влияния недостаточного освещения необходимо использовать равномерное освещение и лампы с подходящими характеристиками, а также совмещенное освещение.

Приведем проверочный расчет искусственного освещения в помещении. Помещение, где проходит выполнение дипломного проекта, освещается 2 потолочными плафонами типа Л71Б03, в каждом из которых установлено по 1 люминесцентной лампе типа ЛХБ-30.

Наиболее приемлемыми для рассматриваемого помещения являются люминесцентные лампы ЛБ (белого света) или ЛХБ (холодного-белого света), мощностью 20 или 30 Вт. Световой поток одной лампы ЛБ40 составляет не менее $F_{л}=1782$ лм. Таким образом, при использовании для освещения двух ламп типа ЛХБ40 требования к освещенности на рабочем месте, согласно [50] выполняются. Электрическая мощность одной лампы ЛХБ30 $W_{л}=30$ Вт. Число ламп $N=2$. Мощность всей осветительной системы: $W_{общ}=W_{л}*N=30*2=60$ Вт.

6.1.5 Электромагнитное излучение

Большинство ученых считают, что как кратковременное, так и длительное воздействие всех видов излучения от экрана монитора не опасно для здоровья персонала, обслуживающего компьютеры. Однако

исчерпывающих данных относительно опасности воздействия излучения от мониторов на работающих с компьютерами не существует, из-за этого исследования в этом направлении продолжаются [42].

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в табл. 6.1.5.1.

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора компьютера обычно не превышает 10мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и ин-фра-красного излучений от экрана монитора лежит в пределах 10...100мВт/м².

Таблица 6.1.5.1 – Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений (в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96)

Наименование параметра	Допустимые значения
Напряженность электрической составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50см от поверхности видеомонитора	10В/м
Напряженность магнитной составляющей электромагнитного поля на расстоянии 50см от поверхности видеомонитора	0,3А/м
Напряженность электростатического поля не должна превышать: для взрослых пользователей для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	20кВ/м 15кВ/м

Основной способ защиты от электромагнитных полей – это увеличение расстояния от их источника и уменьшение времени нахождения человека у источников излучения. К инженерно-техническим мероприятиям относится рациональное размещение оборудования, использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии на рабочие места персонала (поглотители мощности, установка отражающих и поглощающих экранов). Для понижения уровня напряженности электромагнитного поля следует использовать мониторы с пониженным уровнем излучения (MPR-II, TCO-92, TCO-99), устанавливать защитные экраны, устранять неисправности.

6.1.6 Психофизиологические факторы условий труда

К психофизиологическим вредным факторам относятся статические физические перегрузки, умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки. Необходимо минимизировать их влияние на здоровье и производительность труда работника.

Правила сохранения работоспособности работников и обеспечения эффективности деятельности:

1. В работу входить постепенно. Время, необходимое для вхождения в процесс труда, называется периодом вработываемости. Сократить длительность вработываемости можно за счет ограничения в это время контактов с другими работниками, продумывания порядка выполнения работы на предстоящий день, выполнения простых операций по обслуживанию рабочего места.

2. Работу начинать с выполнения более простых ее элементов с постепенным переходом к более сложным.

3. Соблюдать ритм в работе. Ритмичный труд менее утомителен. Его обеспечивают за счет оперативного планирования, упорядочения информационного обслуживания во времени.

4. Соблюдать чередование труда и отдыха, а также форм деятельности. Для предупреждения преждевременного утомления необходима разработка и применение рационального режима труда и отдыха.

Общее время на отдых для работника управленческого труда можно установить двумя способами:

1) укрупненный расчет времени на отдых и личные надобности в процентах от сменного времени или времени работы: 6 % сменного времени или 6,5 % от времени работы.

2) Расчет времени на отдых по показателю утомления, который определяется по данным физиологических исследований и может изменяться

от 1 до 100 отн. ед. Для видов умственного труда он составляет 10-54 отн. ед. Для определения времени на отдых используют формулу

$$T_{от} = 0,58 \times Y = 0,58 \times (2,15 \times \Sigma B - 10,3)$$

где: $T_{от}$ – время на отдых работника в течение смены; Y – показатель утомления в отн. ед.; B – оценка влияния на работника того или иного фактора условий труда в баллах. К этому времени всем работникам добавляются 10-15 мин. в смену на личные надобности.

При работах, требующих большого внимания и напряжения зрения (операторы ЭВМ), перерывы по 5 минут через каждый час; у машинисток – 3-4 мин. через каждые 45 мин. работы; у большинства специалистов – по 5-8 мин. через каждые 2 часа работы. Перерыв следует устанавливать в период, предшествующий началу падения работоспособности как в первой, так и во второй половине дня.

6.1.7 Короткое замыкание и статическое электричество

Более половины всех коротких замыканий, заканчивающихся пожаром, происходит в жилых помещениях, а наиболее подвержены коротким замыканиям внутридомовая электропроводка и воздушные электровводы в зданиях.

При коротком замыкании образуются разлетающиеся расплавленные частицы металла, температура которых составляет 2050° - 2700° С, и которые способны поджечь практически любой сгораемый материал. Профилактикой КЗ служит правильный выбор, монтаж и эксплуатация электроустановок. Все электрооборудование должно соответствовать особенностям окружающей среды, величине тока и напряжению, мощности нагрузки. Эксплуатация электрооборудования требует регулярных планово-предупредительных ремонтов и замера сопротивления изоляции проводов.

Для предохранения от КЗ служат аппараты защиты. Это быстродействующие автоматы и плавкие предохранители. Они отключают от

электропитания неисправный участок до наступления опасных последствий короткого замыкания.

Вредное воздействие на организм человека статическое электричество оказывает не только при непосредственном его контакте с зарядом, но и за счет действия электрического поля, возникающего вокруг заряженных поверхностей.

Основные способы защиты от статического электричества следующие: заземление оборудования, сосудов и коммуникаций, в которых накапливается статическое электричество; увеличение поверхностной проводимости диэлектрика; увлажнение окружающего воздуха; ионизация воздуха или среды нейтрализатором статического электричества; подбор контактных пар; изменение режимов технологического процесса, использование операторами спецобуви с электропроводящей подошвой и др.

6.2 Экологическая безопасность

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным, малоотходным и энергосберегающим технологиям и производствам.

При выполнении данной квалификационной работе не осуществляется выбросов вредных веществ в атмосферу. Загрязнение атмосферного воздуха может возникнуть в случае возникновения пожара в помещении, в этом случае дым и газы от пожара будут являться антропогенным загрязнением атмосферного воздуха.

В ходе выполнения данной работы не происходило значительного загрязнения гидросферы. Образовывались лишь хозяйственно – бытовые воды.

Бытовые сточные воды помещения образуются при эксплуатации туалетов, столовой, а также при мытье рук, полов и т.п. Данные воды отправляются на городскую станцию очистки.

Загрязнение гидросферы осуществляют производственные отходы, в качестве которых в данном случае выступают бумажные отходы (макулатура) и неисправные детали персональных компьютеров, плат, контроллеров. Бумажные отходы должны передаваться в соответствующие организации для дальнейшей переработки во вторичные бумажные изделия. Неисправные комплектующие персональных компьютеров должны передаваться либо государственным организациям, осуществляющим вывоз и уничтожение бытовых и производственных отходов, либо организациям, занимающимся переработкой отходов. Важнейшим этапам обращения с отходами является их сбор, а в дальнейшем переработка, утилизация и захоронение [54]. Еще одним из способов снижения бумажных отходов является хранение данных на электронных носителях.

Механизм обращения и утилизации ртутных и ртутьсодержащих ламп отражен в СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления» и в Постановлении Правительства Российской Федерации от 3 сентября 2010 г. N 681 г. Москва "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде".

Необходимо помнить, что контроль за соблюдением норм и правил по сбору, хранению и утилизации люминесцентных и энергосберегающих ламп осуществляется органами СЭС и территориальными экологическими инспекциями. Невыполнение предписаний контролирующих органов влечет за собой наложение административного штрафа.

Порядок утилизации. Основные требования и правила.

Согласно требованиям и правилам, порядок действий утилизации ламп накаливания, вышедших из строя, должен начинаться с помещения их на хранение в специальные контейнеры в оборудованных под эти нужды

помещениях. При накоплении определенного количества ртутьсодержащих и прочих опасных видов ламп их сортируют, помещают в отдельные ячейки и отправляют в профильную компанию для последующей нейтрализации и переработки. Правила сбора и утилизации люминесцентных ламп обязательны для всех граждан РФ. Предприниматели обязаны заключать договора со специальной компанией, занимающейся вывозом таких отходов.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией, которая может возникнуть при выполнении данного дипломного проекта, является пожар, так как происходит эксплуатация устройств электропитания, электронных схем ЭВМ и других источников возникновения пожара. В результате различных неполадок, образующих перегретые элементы и электрические искры, может произойти возгорание горючих материалов.

В соответствии с правилами определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, регламентируемыми [35], помещение, в котором была написана данная работа, относится к категории В по НПБ 105-03, так как в помещении находятся сгораемые вещества и материалы (шкафы, столы, стулья, документация), для питания вычислительной техники используется напряжение 220В переменного тока.

Для предупреждения возникновения пожара в помещении необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- ✓ организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта;
- ✓ эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;
- ✓ технические и конструктивные, связанные с правильные размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Организационные мероприятия:

- Противопожарный инструктаж работников;
- Изучение правил техники безопасности;
- Издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

- Соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- Обеспечение свободного подхода к оборудованию. В комнате рабочие места размещены так, что расстояние между рабочими местами с видеотерминалами (от поверхности экрана одного, до поверхности экрана другого) составляет порядка 2,5 м, расстояния между боковыми поверхностями порядка 1,5 м, что соответствует нормам. Из вышесказанного следует, что дополнительных мер защиты не требуется (по СП 12.13130.2009);

В коридоре помещения, в котором выполнялся дипломный проект, имеется углекислотный огнетушитель типа ОУ-2, приведен план эвакуации в случае пожара, и, на достигаемом расстоянии, находится пожарный щит.

Для осуществления эффективного тушения огня используют пожарные рукава и стволы, находящиеся в специальных шкафах, расположенных в коридоре. В пунктах первичных средств огнетушения должны располагаться ящик с песком, пожарные ведра и топор.

Если возгорание произошло в электроустановке, для его устранения должны использоваться огнетушители углекислотные типа ОУ-2. Кроме устранения самого очага пожара нужно, своевременно, организовать эвакуацию людей.

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.4.1 Охрана труда для операторов и пользователей ПК

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018), к работе оператора или программиста допускаются люди, достигшие совершеннолетия и прошедшие:

- обязательные медицинские освидетельствования, которые необходимо проводить не только при приеме на работу;
- вводный инструктаж по охране труда;
- инструктаж по охране труда на конкретном рабочем месте по данной инструкции;
- обучение безопасным приемам и методам труда по программе, утвержденной руководителем предприятия;
- обучение работе на персональном компьютере с использованием конкретного программного обеспечения.

На основании ТК РФ, женщины в период беременности и кормления грудью не допускаются к работам, связанным с использованием персонального компьютера. Требования безопасности во время работы, согласно НТД (ГОСТ 12.2.032-78), оператор во время работы обязан:

- выполнять только работу, порученную ему и по которой он прошел инструктаж;
- содержать в чистоте и порядке свое рабочее место в течение всего рабочего дня;
- держать открытыми все вентиляционные отверстия устройств;
- корректно закрывать все активные задачи, даже для прекращения работы на некоторое время;
- соблюдать правила эксплуатации вычислительной техники в соответствии с инструкциями по эксплуатации;

- соблюдать установленные регламентированные перерывы в работе и выполнять в физкультурминутках рекомендованные упражнения для рук, ног, глаз, шеи, туловища; а также соблюдать расстояние от экрана до глаза от 60 до 80 см.

6.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Организация работы с ПЭВМ должна осуществляться в зависимости от вида и категории трудовой деятельности. Для предупреждения преждевременной утомляемости пользователей ПЭВМ рекомендуется организовывать рабочую смену путем чередования работ с использованием ПЭВМ и без него. Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и гипокинезии, предотвращения утомления целесообразно выполнять комплексы упражнений [50]. Кроме того, для минимизации влияния вредных психофизиологических факторов необходимо организовать рабочие места согласно нормам и требованиям НТД (ГОСТ 12.2.032-78).

Организация рабочих мест пользователей ПК должна осуществляться в соответствии со следующими требованиями согласно [50]:

- расстояние делается между рабочими столами с видеомониторами не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м;
- поверхность рабочего стола сделано коэффициентом отражения от 0,5 до 0,7;
- конструкция рабочего стула сделана для поддержания рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины; тип рабочего стула выбирается с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

В рамках данного раздела были рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением безопасности труда оператора. На основании данных исследований были проанализированы вредные факторы, влияющие на операторов в процессе работы, такие как длительные статические нагрузки, неправильное освещение рабочего места, излучения мониторов, производственные шумы, а также следствие влияния психофизиологических факторов условий труда на рабочего, в виде переутомляемости или профессиональных заболеваний. Были рассмотрены случаи безопасности в чрезвычайных ситуациях, а также правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Проанализировали меры защиты от возможного воздействия опасных и вредных факторов производства, и о соответствии всем требованиям СанПин рабочего места сотрудника. С учетом этого приведены рекомендации по организации рабочего места оператора, позволяющие повысить производительность труда и свести к минимуму вероятность профессионального заболевания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении данной выпускной квалификационной работы были поставлены следующие цели:

- ✓ исследовать САУ с объектами с запаздыванием;
- ✓ рассмотреть примеры промышленных объектов управления с запаздыванием;
- ✓ провести анализ и классификацию методов управления объектов с запаздыванием;
- ✓ выяснить, насколько сильно можно ошибаться при задании параметров объекта управления и как будут меняться показатели переходного процесса при больших или меньших ошибках при задании модели.

В процессе выполнения работы был произведен анализ систем автоматического управления с запаздываниями, были рассмотрены основные виды запаздываний. Приведены примеры промышленных объектов управления с запаздыванием. Был произведен анализ возможных технических предложений по применению регулятора Смита, а также были рассмотрены основные примеры.

Реализация данного исследования проведена в ПП Matlab Simulink. Для настройки ПИД-регулятора для объектов с запаздыванием используется «Инженерный метод» и «Формульный метод определения настроек регулятора для статических объектов без самовыравнивания». В ходе исследования регулятора Смита, при рассмотрении полученных переходных характеристик, было приведено сравнение показателей качества ПП при изменении одного или нескольких параметров в объекте управления и модели.

По результатам моделирования получены зависимости качества переходных процессов от того, насколько велики ошибки в задании параметров постоянного времени T и запаздывания τ в модели объекта управления.

Отклонение от рекомендуемых настроек приводит к колебательному переходному процессу и даже к потере устойчивости при изменении настроек. Произведено исследование алгоритмов управления объектами с запаздыванием на примере апериодического звена первого порядка и интегрирующего звена.

Таким образом, при использовании всех рассмотренных в работе решений и предложений по устранению запаздываний может быть облегчено проектирование систем. Исследования могут быть использованы в дальнейших разработках и при исследованиях САУ с запаздыванием.

Предлагается следующая методика настройки предиктора Смита:

1. При определении модели объекта управления основное внимание уделить определению времени запаздывания. Главное – не ошибиться в большую сторону.

2. Найденная модель используется в предикторе Смита

3. Настройки собственно ПИ- или ПИД-регулятора могут быть определены простым инженерным методом или формульным методом, на основе значения T , τ , k модели объекта (T и τ для интегрирующего звена)

4. Данная методика может быть использована для объектов с самовыравниванием (апериодическое звено) и без самовыравнивания (интегрирующее звено)

5. Использование в структуре предиктора Смита ПИ- или ПИД-регуляторов принципиально не отражается на качестве переходных процессов.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» проведено планирование научной работы, а также выявлен целевой рынок потребителей исследования.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены вопросы производственной и экологической безопасности, а также правовые вопросы обеспечения безопасности труда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. 3-е издание.: Наука, 1957. 768 с.
2. Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием / М. : Наука, 1978. 416 с.
3. Блох З.Ш. Переходные процессы в линейных системах автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1961. 492 с.
4. Ключев А.С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием / А.С. Ключев, В.С. Карпов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
5. Ашорин В.В. Синтез оптимальных алгоритмов непосредственного цифрового управления для процессов с чистым запаздыванием / В.В. Ашорин М.З. Зауровский // Адаптивные системы автоматического управления : республиканский межвузовский научно-технический сборник. – 1978. – № 6. – С. 39 – 44.
6. Павлов А.А. Синтез релейных систем оптимизации по быстродействию / А.А. Павлов. – М. : Наука, 1988. – 150 с.
7. Дядик В.Ф., Ливенцов С.Н., Савельева Е.В. Руководство по определению характеристик технологических объектов управления и настройке параметров регуляторов.–Томск.: РИТ, 1998. – 234с.
8. Королев Н.А. О компенсации запаздывания в релейных системах / Н.А. Королев // Автоматика и телемеханика. –1961. – № 5. – С. 605 – 612.
9. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие/ А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев А.Г. Товарнов; под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Новосельцев В.Н. Об оптимальном управлении при помощи запаздывания / В.Н. Новосельцев // Автоматика и телемеханика. – 1964. – №11. – С. 1545 – 1548.

11. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
12. Расчет автоматических систем /под ред. Фатеева А.В. – М.: Высшая школа, 1973
13. Круг Е.К., Минина О.М. Электрические регуляторы промышленной автоматики. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962.
14. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
15. Дядик В.Ф. Руководство по определению характеристик технологических объектов управления.–Томск.: РиТ, 1999. – 132с.
16. Денисенко В. В. ПИД - регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. с. 66 - 74; 2007. № 1. с. 78 - 88.
17. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. - IFAC Professional Brief, <http://www.ifac-control.org>.
18. Пыркин А.А. Адаптивный алгоритм компенсации параметрический неопределенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и Телемеханика. — 2010. № 8. — С. 62–78.
19. Smith O.J.M. A controller to overcome dead time // ISA. — 1959. vol. 6. — P. 28–33.
20. Миркин Е.Л. Метод адаптивного управления с эталонной моделью объектами с последствием // Автоматизация технологических процессов. Фрунзе.: Изд. ФПИ. — 1987. — С. 64– 69.
21. Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с запаздыванием по выходу // Изв. вузов. Приборостроение. — 2005. № 7. — С. 15–19.
22. Furtat I., Tsykunov A. Output adaptive control for plants using time delay in output signal based on the modified algorithm of adaptation of high order

// IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 07). — Saint-Petersburg, Russia, 2007.

23. Niculescu S.I., Annaswamy A.M. An adaptive Smith-controller for time-delay systems with relative degree ≥ 2 // *Systems & Control Letters*. — 2004. vol. 49. — P.347–358.

24. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием. — М.: Наука, 1997. — 216 с.

25. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учеб.пособ. — М.: Наука. Гл. ред. физ.- мат.лит., 1986.— 616 с.

26. Проскурников А.В., Якубович В.А. Универсальные регуляторы для оптимального отслеживания полигармонических сигналов в системах с запаздыванием // *Докл. РАН*. — 2006. Т. 406. № 2. — С. 109–174.

27. Проскурников А.В., Якубович В.А. Задача об абсолютной инвариантности для систем управления с запаздыванием // *Докл. РАН*. — 2004. Т. 397. № 5. — С. 610–614.

28. Цыпкин Я.З. Устойчивость систем с запаздывающей обратной связью // *Автоматика и телемеханика*. — 1947. Т. 7. № 2, 3.— С. 107–129.

29. Цыпкин Я.З. Оптимальные адаптивные системы управления объектами с запаздыванием // *Автоматика и Телемеханика*. — 1949. Т. 12. № 7.— С. 97–132.

30. Mondie S., Michiels W. Finite spectrum assignment of unstable time-delay systems with a safe implementation // *IEEE Trans. on Automatic Control*. — 2003. vol. 48. — P.2207–2212.

31. Richard J.P. Time-delaysystems: an overview of some recent advances and open problems // *Automatica*. — 2003. vol. 39.P. 1667–1694.

32. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием. — М.: Наука, 1997. — 216 с.

33. Evesque S., Annaswamy A.M., Niculescu S., Dowling A.P. Adaptive control of a class of time-delay systems // *ASME Transactions on Dynamics, Systems, Measurement, and Control*.—2003. vol. 125. — P. 186–193.

34. Управление систем с запаздыванием. [электронный курс]. – Режим доступа: [//http://edu.alnam.ru/book_v_tau1.php?id61](http://edu.alnam.ru/book_v_tau1.php?id61). – заглавие с экрана. – (дата обращения 15.04.2018)
35. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1982. — 504 с. Режим доступа: [//http://stu.scask.ru/book_las.php?id=77](http://stu.scask.ru/book_las.php?id=77)
36. Белов С.В. Охрана окружающей среды. Учебное пособие. – М.: изд. Высшая школа, 1991. -141с.
37. ГОСТ 12.2.003-91 - Система стандартов безопасности труда. ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ. Общие требования безопасности
38. ГОСТ 12.2.003-91 - Система стандартов безопасности труда. ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ. Общие требования безопасности
39. ГОСТ 12.1.018-93 - Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывобезопасность статического электричества. Общие требования
40. ГОСТ 12.1.027-80 - Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в реверберационном помещении. Технический метод
41. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 - Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий
42. СанПиН 2.2.4.548-96 - Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений
43. «Трудовой кодекс Российской Федерации» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018). Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/
44. Брусов П. Н. Финансовый менеджмент. Финансовое планирование : учеб. пособие / П. Н. Брусов, Т. В. Филатова. – М. : КНОРУС, 2012. – 226 с.

45. Григорьева Т. И. Финансовый анализ для менеджеров: оценка, прогноз : учеб. для магистров / Т. И. Григорьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2012. – 462 с.
46. Ермасова Н.Б. Финансовый менеджмент. Учебное пособие для вузов. — М.:Издательство Юрайт, 2010 г. — 621 с
47. Шапкин А. С. Экономические и финансовые риски: оценка, управление, портфель инвестиций : [учеб. пособие] / А. С. Шапкин, В. А. Шапкин. – 9-е изд. – М. : Дашков и К, 2013. – 543 с. – 5 экз.
48. Финансовый менеджмент : учебник / под ред. Е. И. Шохина. – 4-е изд., стер. – М. : КНОРУС, 2012. – 475 с.
49. Финансовый менеджмент: проблемы и решения : учеб. для магистров / под ред. А. З. Бобылевой. – М. : Юрайт, 2012. – 903 с.
50. Шапкин А. С. Финансовый менеджмент: [учеб. пособие] / А. С. Шапкин, В. А. Шапкин. – 5-е изд. – М. : Дашков и К, 2014. – 478 с. – 10 экз.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ANALYTICAL REVIEW

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ61	Аскарова Айгерим Сапаргаликызы		

Консультант школы отделения (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР	Коновалов Виктор Иванович	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы: Отделение иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шепетовский Денис Владимирович	-		

INTRODUCTION

Currently, the problem of optimal performance control of objects and processes has become of paramount importance. Since the duration of the transient process during control is one of the main indicators of the quality of automatic systems operation. Reduction of the transient processes duration in the regulation of many technological objects increases the productivity of aggregates, improves the quality of products, and allows obtaining a significant economic efficiency. It is known the system that satisfies the requirements of maximum speed is the best indicator of quality.

Catalyst development of production process automation is a rapid increase in the requirements for development rates of production and quality of products. As a result, the increase in the pace leads to the controlled quantity to be changed with a high speed in time. Time plays a key role, which has a value from the start of the signal measurement of the controlled variable to the decision making and the output of the control signal. The delay effect appears in the automatic control of large systems in the presence of feedback. For example, systems with large distances, missile control systems and high-speed flying devices.

The delayed reaction leads to:

- the occurrence of a process violation in the control system;
- to auto-oscillations in a closed system;
- to complete loss of system stability.

At the moment a number of objects of chemical technology, biology, economics, a number of science and technology areas are described with differential equations with a delayed argument. Such equations characterize the objects operation in which one element or groups have a delay component. The phenomenon of signals time-delay is due to the fact that when the input signals change, the output signal of the control object (CO) begins to change not at once, but with some delay in time.

Recently, requirement strengthening for the operation of the automatic control system has led to the need take into account even insignificant delays in the communication channels of the facility. Accounting for the phenomenon of delay, which can adversely affect the management processes, will give the opportunity to improve the quality of control systems.

Delays occurring in control objects negatively affect the regulatory processes and can lead to a loss of sustainability of the management system and deterioration in the quality of management processes. Therefore, it is important to take them into account when designing automation systems.

However, the practical application of regulators for various types of technological processes is often difficult due to the occurrence of delay in the processes. Constant, variable or random delays are one of the main factors that significantly reduce the dynamic characteristics of the optimal performance of control systems. Therefore, there is a need to develop and investigate methods for the synthesis of optimal controller performance that ensure the effective operation of control systems in these conditions.

In the synthesis of automatic control systems with delay, it is necessary not only to take into account the influence on the dynamics of processes occurring in the system, but also apply control laws that allow improving the quality of regulation, even if there is a delay in magnitude. Among these laws, Smith's predictor is the most well-known.

In this research, examples of industrial control object with delay and methods for managing objects with delay will be considered. The study of object will describes of the influence of the Smith regulator adjustments on the regulation quality. The implementation of this research will be carried out in the software product Matlab Simulink. The problem is how to set the Smith predictor correctly to obtain the desired quality indicators of the ACS, when the control objects is both an aperiodic link of the first order and integrating link. Transient processes in the system will be considered when the parameters of the control object model are changed. The closed system with Smith's predictor will also be analyzed.

In this study, the "Engineering method" and "Formal method for determining controller settings for static objects without self-leveling" are used to adjust the PI and PID controller, which involves calculating the regulator and then varying the parameters to obtain an "optimal" process.

1 EXAMPLES OF INDUSTRIAL OBJECT OF CONTROL WITH DELAY

1.1 General information about delays

In recent times the large number of objects in chemical technology, biology, economics, a number of science fields and technology are described with differential equations with time delays argument. Such equations characterize operation of objects in which one element or group are time-delays elements.

In general, the delay time can be a constant, variable or random function.

The phenomena of delay can be found in many modern technological control objects (CO). When the signal at the input of the control object changes, the signal at the output of the object starting to change after a certain period of time.

Delays are divided into concentrated, known as "clean" and distributed. Concentrated delays can be localized in management, for example, belt conveyors, jet engines in transient modes, rolling mills, drying and combustion processes. Condition-based, for example, processes with recycling, in particular processes in grinding machines or processes in chemical reactors. On output, for example, objects of management with inertial gauges of measurement.

Delays, concentrated by state of control objects, negatively affect the system synthesis. They can lead to self-oscillation, deterioration in quality of control processes, and loss of system stability. Consequently, there is a need to manage such objects taking into account the negative effect of delays on the control system.

1.2 Delay in industrial object of control

Transport delay is encountered in a number of technological processes in metallurgy, petrochemistry, chemical industry. This delay occurs when in technological process an object (energy, matter, etc.) transits from one point to another at a certain speed. However, the characteristics and properties do not change.

An example of an object with transport delay is a metal cold rolling mill, where the sheet thickness sensor cannot be placed directly under the rolls, but only at a certain distance from them. As a result, the output value of the object is the thickness of the sheet that has a transport or "clean" delay relative to the regulating effect - the degree of metal crimping by rollers.

Another example of objects containing transport delay is the production of glass and paper. At many stages of these productions, there are delays, their values several times exceed the object time constant, which creates great difficulties by controlling processes.

Large transport delays are considered when regulating combustion processes, for example, the output value characterizing the combustion process in a furnace. The oxygen content of the flue gases can facilitate to the appearance of a transport delay about a minute. At the same time, a significant part of this delay is concentrated in the sensor and is determined by the gas transit time through the sampling device of the gas analyzer.

Transport delays cannot be ignored when adjusting the level of liquid in tanks, when controlling ball mills and other objects with delays in pipelines and volumes.

The presence of transport or, as it is also called, "clean" delays in the technological process leads to the result in the signal at the object output remains unchangeable for some time after the application of the input signal. Apart from, there is another kind of delay in real control objects. If an object is characterized by several sources of time that are close in value or is an object with distributed parameters. In this relation, the mathematical formalization is represented by a

partial differential equation, and then the output signal also remains practically unchanged for some time after the control action is applied. In this case, the object has a capacitive or effective delay.

In many thermal processes, as well as in processes where signals are transmitted over a distance by means of long electrical, hydraulic or other lines, there is a delay distributed throughout the entire length of the line. This delay, in contrast to the "clean" delay, leads to a distortion of the transmitted signals. Thermal processes can be fully described with partial differential equations.

Passing of signals through objects with distributed parameters using some simplifying channels can lead to the passage of the signal via the coordinates of the distance. Such things happen with electrical and hydraulic long lines and sometimes in heat transfer. In these cases, the objects under consideration can be described by first-order and second-order linear partial differential equations.

Progressive growth of communication and information technologies has led to a wide use of digital controllers applied for modern automation systems. However, despite the high performance, due to the complexity of the control algorithm, modern controllers can cause more than an unacceptable delay.

Delays occur in objects of a different physical nature. They are observed not only in technological application but also in biology and economics and have a significant impact on the sustainability and quality of management processes. Delay affects the dynamics of the optimal relay systems, which value optimal performance control systems most frequently.

1.3 Examples of control objects with delay

A vivid example of a technical system which operates under the non-stationary outdoor environment can be a surface vessel. The vessel is subjected to disturbances, which have different origins and nature. There are three types of disturbances that can significantly affect the quality of vessel control: wave impacts, wind effects and water flow. The vessel control system solves a variety of tasks:

- movement in a predetermined path;
- course stabilization;
- stabilization of transverse and longitudinal velocities;
- dynamic positioning of the vessel at the point.

The dynamic quality indicators are producing high requirements in automated control systems. For example, to solve the problem of course stabilization, a steady-state error cannot exceed one degree. Oil vessels that have a large displacement and a length of more than 100 meters can synthesize a dynamic positioning system at a certain point. The vessel can be located more than a day under the oil-derrick, the control system must provide positioning accuracy with a possible deviation, with different kinds of disturbances, not more than 20 centimeters.

At the present time, full compensation task of disturbing influences is urgent for a broad class of technical control objects, there is no doubt about this. To date, a huge number of control algorithms have been obtained under various conditions of external influences. In the presence of a disturbance, approaches to control, as a rule, assume the use of integral regulators, the incorporation of disturbing effects of a known model (combined regulators) or an increase the order of astatism in the system.

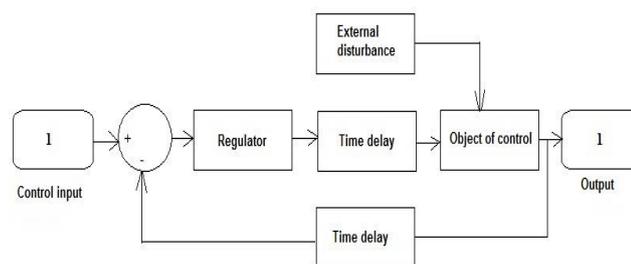


Figure 1.3.1 – Generalized block diagram of the control system with delay

1.3.1 Rotating furnace

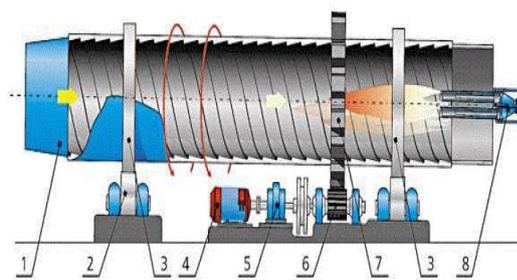
Via example of rotating furnaces, let us consider the features of technological control objects.

A rotating furnace is a process unit in the form of a continuous cylinder. Due to the tilting of the furnace and the rotation, the material is moved, fuel is burned and heat is released. The furnaces differ in size and design.

Furnaces can be used for baking zinc, cement, mercury-containing substances, for sintering bauxite, calcination of alumina, as well as for drying metallurgical intermediate materials.

Rotating furnaces are heat exchanger furnaces. The temperature in such furnaces sometimes reaches up to 1650 °C. When moving along the length of the furnace combustion products of fuel, they are cooled, and the mode of furnace operation becomes convective. Depending on the type and parameters of the process in the furnace are zones with a convective and radiation mode of operation.

Except from for drying sulphide raw materials, all other furnaces perform counter-current operation. Materials falling into the oven can have a moisture content of up to 40% water. The charge (material) enters the tail (upper) part of the furnace and systematically moves towards the gases that arise during combustion of fuel in the head part of the furnace. Processed materials get into the refrigerator from the drum, and gases and gaseous products enter a special dust-gas cleaning system. In order to heat such furnaces, it is possible to use materials in the form of solid fuel and fuel oil, as well as natural gas, etc.



Part number: 1 - body, 2 – support station, 3 - support band, 4 - engine, 5-reducer, 6-drive gear, 7 - ring gear, 8 - burner arrangement

Figure 1.3.1.1 – Rotating furnace

1.3.2 Regulation of the coal amount on belt conveyors

The coal conveyor belt due to its metal construction, consisting of interconnected steels, tape, drive and roller supports, allows one to move coal of any fractions up to a distance of 60 meters and at an angle of 15 degrees. It is also used in the production of coal due to high performance.

The principle of operation of the conveyor belt is simple. An endless flexible belt, leaning on the upper and lower roller supports, bends around the drive and tension drums located at both ends of the equipment. It is located either perpendicular to the horizontal line or at an angle of 1-30 degrees.

The belt is driven through the drive drum, and the required tension is received from the tensioning drum. Charging hopper is used to load bulk materials on the work surface. Usually, repair the upper part of the equipment, over the end drum. By dint of the drive drum, material is unloaded. However, unloading can be intermediate, for this use traversing trolley or a stationary plow switch. The flow of products discharged from the drum is sent by a discharge box.

The task of the system is a continuous supply of coal to the mill. The process begins with the filing of coal in the bunker. Further, with the help of a belt conveyor, coal is fed to the scales, after weighing it is poured into the mill. The weight of the coal is controlled by a load suspended on the shoulder of the scales. If there is a mismatch between the weight of the coal specified and the actual value, an error is issued. The amount of coal that comes from the hopper to the belt conveyor is not measured immediately, but after some exact time-delay, which depends on the speed of coal transportation.

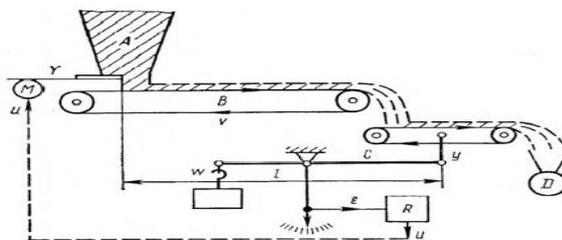


Figure 1.3.2.1 - Conveyor belt for coal feeding

2 OVERVIEW AND ANALYSIS OF METHODS OF OBJECT CONTROL WITH DELAY

Improving the quality of management of objects with delay can be carried out in the following ways:

- Realization of a complex structure for the control objects that will reduce the negative impact of delay;
- Reducing delay in a control system with certain changes in construction;
- Application of different predictors–controllers with delay compensation (Smith predictor, regulators of Risvica Kalman, Ostrom, etc.);
- Using of digital methods of synthesis of algorithms for control of objects with delay, which include controller Tsytkina, aperiodic controllers and controllers with finite settling time.

In general, all control systems that are characterized by a delay can be divided into three classes:

- objects with delay by control;
- objects with delay by the state from including objects class of a neutral type;
- objects with delay by state and control.

The characteristic equation of a system with a constant delay differs from the characteristic equation of the system without delay in that the left-hand side is not a polynomial, but a transcendental function of the operator s . Regardless of where the delay unit is added, the characteristic equation of the system with delay is:

$$D_{\tau}(s) = Q(s) + R(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (2.1)$$

where $Q(s)$ – transfer-function denominator, $R(s)$ - transfer-function numerator, $e^{-s\tau}$ - delay.

In contrast to the ordinary algebraic equation, it has an infinite set of roots.

$$e^{-s\tau} = 1 - s\tau + \frac{s^2\tau^2}{2!} - \frac{s^3\tau^3}{3!} + \dots \quad (2.2)$$

For objects with delayed control, in the synthesis of automatic control systems, it is required to take into account the influence of the delay parameter on the quality of transient processes and stability in a closed system. Otto Smith's idea was a unique approach, for control object with delay.

The synthesis of systems for control objects with delay requires taking into account the influence of the delay value on the stability and quality of transients in a closed system. The main idea was to build control systems in which the delay do not affects the quality of the transient processes and the stability of the system. However, the disadvantages of this approach are that it is designed only for symptomatically stable control objects. It is necessary to know exactly all the parameters of the system. In subsequent years, scientists from all over the world have studied complex control problems under conditions of delay. Problems were solved for discrete control objects, for parametric undefined control objects, for unstable control objects..

In order for a linear system with constant delay to be stable, it is necessary and sufficient that all the roots of equation (2.1) are left. Finding the root of equation (2.1) is difficult; therefore stability criteria are used to investigate the stability of systems with delay.

It should be taken into account that for the study of delayed systems, the algebraic criteria for the stability of Hurwitz and Routh in their usual form are unsuitable, and for the stability of first-order and second-order linear systems with delay only the positivity of the coefficients of the characteristic equation is already insufficient. There are various algebraic stability criteria for delayed systems that are analogous to the Raus and Hurwitz criteria, but they have not been widely used in engineering practice because of their relative complexity.

For investigation of the stability of delayed systems, we can use the frequency-based stability criteria of Mikhailov and Nyquist or the D-decomposition method based on the argument principle.

2.1 Stability of delayed systems (Nyquist stability criterion)

The stability of systems for control objects without delay can be determined by conventional methods, in particular, by means of Hurwitz determinants. If the system has a delay component, then the equation becomes transcendental. Determine the stability of system with a delay component, via of Hurwitz determinants is practically impossible.

The equation of the Mikhailov curved (hodograph) with delay is after the substitution of into the characteristic equation (2.1), that is.

$$D_{\tau}(j\omega, e^{-j\omega\tau}) = Q(j\omega) + R(j\omega)e^{-j\omega\tau} = 0 \quad (2.3)$$

The presence of the multiplier $e^{-j\omega\tau}$ in (2.3) makes the outlines of the Mikhailov curve rather complicated, and the formulation of this criterion for the automatic control system, which has a delay component, is not so simple as for conventional systems.

It is most appropriate to apply the Nyquist stability criterion to investigate the stability of delayed systems.

The formulation of the Nyquist stability criterion for delayed systems in this case is identical to the formulation for ordinary systems with fractional-rational transfer functions, namely:

In order for a system with constant delay, stable in the open state, to be stable also in the closed state, it is necessary and sufficient that the amplitude-phase characteristic $KW(j\omega)$ does not cover the point $(-1, j0)$.

The phase vector of the system with delay in comparison with the system without a delay component has a negative increment proportional to the frequency ω . The proportionality coefficient is the time- delay τ .

By increasing the negative phase increment in the system with escalating ω it is possible to destroy stability of the system stable at $\tau = 0$.

The characteristic equation will have two roots, the real part of which is equal to zero, provided that the amplitude-phase characteristic does not cover the point $(-1, j0)$. The remaining roots will have negative real parts.

The time-delay τ_{oi} and the corresponding frequencies ω_{oi} , at which the amplitude-phase characteristic passes through the point $(-1, j0)$, is called critical.

The critical time-delay and frequency are determined by the following equation:

$$\begin{cases} |KW(j\omega)| = 1 \\ \theta(\omega) - \tau\omega = +\pi * (2 * n - 1) \end{cases} \quad (2.1.1)$$

Determining from the equation (2.1.1) ω_{oi} , we can calculate the critical time-delay τ_{oi} . Accordingly, if ω_{oi} is determined based on equation (2.1.1), then the critical delay time is:

$$\tau_{oi} = \frac{\theta_i}{\omega_{oi}} \quad (2.1.2)$$

The solution of $|KW(j\omega)| = 1$ is very simple to perform graphically (Figures 2.1.1 and 2.1.2), by determining at the intersection point of curve $KW(j\omega)$ with the unit circle centered at the origin. The point of intersection of coordinates can determine both ω_{oi} , and the angle $\theta(\omega_o)$, which, being divided into ω_o , will give a critical time-delay.

Consider a number of cases arising from the study of this technique:

- Let $KW(\omega) < 1$, for $0 \leq \omega \leq \infty$ in this case there are no critical frequencies; the system will be stable for any τ (Figure 2.1.2);
- Let $KW(j\omega) > 1$, (Figure 2.1.1) in a certain frequency range, then we have several critical frequencies ω_{oi} .

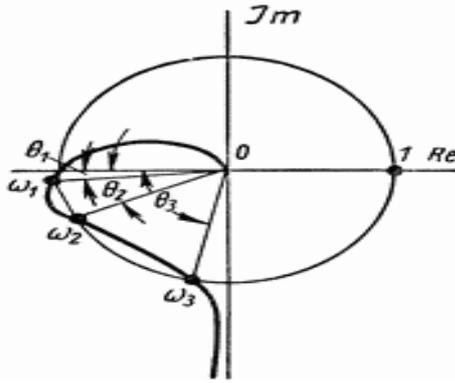


Figure 2.1.1 - Determination of the critical time-delay on the plane, using graphical method

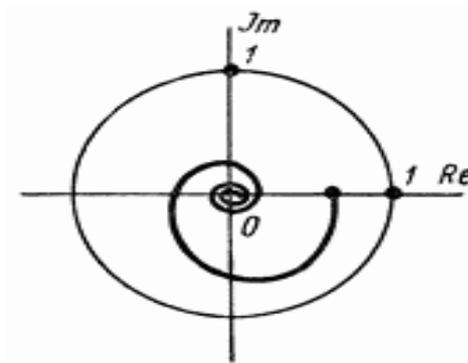


Figure 2.1.2 - Amplitude-phase characteristic of a stable system

In sequential order, consider successively the critical frequencies ω_{oi} . Obviously, for the frequency ω_1 the angle θ_1 will be the smallest, starting from $\tau_1 = \frac{\theta_1}{\omega_1}$, the system with time-delay $\tau > \tau_1$ will be unstable.

A system with a constant delay $\tau > \tau_1$ will be unstable until the value of $\frac{\theta}{\omega}$ will not exceed the value τ_2 .

$$\tau_2 = \frac{\theta_2}{\omega_2} \quad (2.1.3)$$

At values τ_1 of equal and greater τ_2 , the automatic control system with delay will be stable, since in the frequency range $\omega_2 + \omega_3$ the amplitude-phase response will be less than one in modulus. Apparently, for all values of τ in the range $\tau_2 \leq \tau \leq \tau_3$ where the system $\tau_3 = \frac{\theta_3}{\omega_3}$ (with delay τ) will be stable. Further on, when $\tau > \tau_3$ the system becomes again unstable. The alternation of the phenomena

of stability and instability of the system with a continuous variation of τ , as well as other parameters, is a characteristic feature of many systems with delay.

If automatic control system with delay is unstable, then the oscillations arising can have frequencies determined by the frequencies of the amplitude-phase characteristic lying outside the unit circle.

In conclusion, the following observations should be made:

- ✓ in automatic control systems, in order to increase the performance and precision, there is usually a drive to reduce time delay τ , because of this, a stability criterion is often formulated only for the minimum time delay;
- ✓ automatic control system is stable if the time delay τ is less than the minimum time delay $\tau_{0\ min}$.

2.2 Examples of stability estimation of ACS with delay.

Let us construct harmonic locus of open-loop ACS with delay, if its transfer function has the following form:

$$W = \frac{2}{0.1s + 1} e^{-j0,02} \quad (2.2.1)$$

Firstly, we construct the harmonic locus of the linear part W_0 (Fig.2.2.1) from its frequency transfer function:

$$\overline{W_0} = \frac{2}{0.1j\omega + 1} = \frac{2(1 - j0,1\omega)}{1 + 0,01\omega^2} \quad (2.2.2)$$

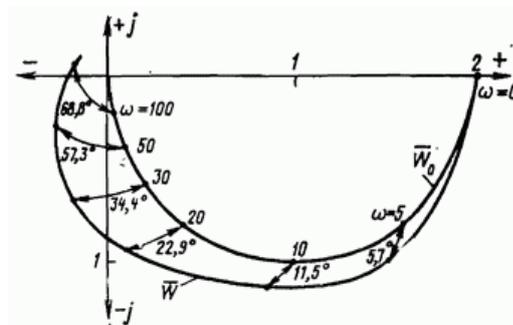


Figure 2.2.1 - Construction of harmonic locus systems with delay

The required rotation angle of the vectors $\overline{W}_0(j\omega_i)$ is defined in this case by the expression:

$$\Delta\varphi_i = -0,02\omega_i 57,3^\circ \quad (2.2.3)$$

Angle at frequencies of 5; 10; 20; 30; 50; and 60 c^{-1} turn it to $-5,7$; $-22,5$; $-22,9$; $-34,4$; $57,3$ and $68,8^\circ$. At the same time, joining the identify points of the smooth curve, we obtain harmonic locus \overline{W} of the considered ACS.

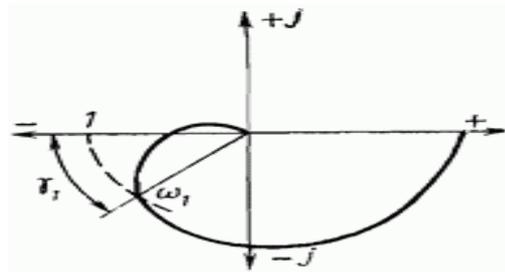


Figure 2.2.2 - Determination of the critical time delay for the harmonic locus open-loop systems

The additional phase shift $\Delta\varphi = -\omega\theta$ "twists" the hodograph \overline{W}_0 clockwise and the stronger the higher the frequency. Because of this, the stability conditions are most often worsened. However, in some cases, with the complex shape of the harmonic locus \overline{W}_0 , the delay improves the stability conditions.

For an absolutely stable system, the determination of the critical delay time θ_{cf} is shown in Fig. 2.2.2. On the harmonic locus of the linear part \overline{W}_0 found the point where the modulus is equal to one. Let this frequency correspond to the frequency ω_1 and the excess phase γ_1 . Then the critical value of the delay time will be represented in the form:

$$\theta_{cf} = \frac{\gamma_1}{\omega_1} \quad (2.2.4)$$

where γ_1 is shown in radians.

If the transfer function W_0 does not have zero and imaginary poles and $|\overline{W_0}| < 1$, then the ACS is stable for all values of the time delay θ_{cf} .

Investigation of the stability of ACS with delay is conveniently carried out according to the logarithmic frequency characteristics of its open circuit. Firstly, we construct the Bode plot of the linear part. phase $\Delta\varphi = -\omega\theta$ created by the pure delay link, is added to the Bode phase plot. The critical value of the time delay is determined by the formula (6.54), where a phase margin (excess phase at the cutoff frequency) of the open system without delay is taken for γ_1 .

Example. Find the critical value of the delay time and determine the stability in the ACS, which is expressed by the open-loop transfer function:

$$W = \frac{ke^{-\tau s}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2.2.5)$$

where $k = 2$, $\theta = 20$ s, $T_1 = 40$ s, $T_2 = 10$ s.

Firstly, we construct the Bode plot L_0 and φ_0 linear part of the ACS (Fig. 6.32) taking into account value: $20 \lg k = 6$ dB; corner frequency $\omega_1 = \frac{1}{T_1} = 0,025s^{-1}$, $\omega_2 = \frac{1}{T_2} = 0,1s^{-1}$

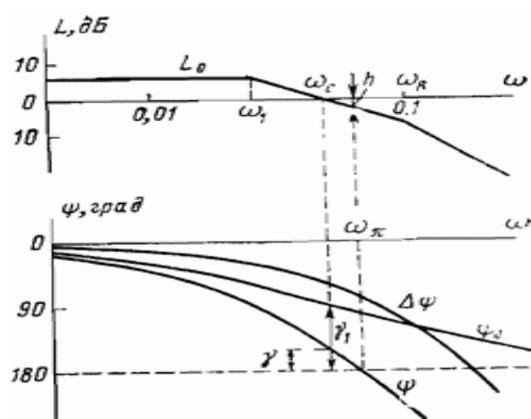


Figure 2.2.3 - Logarithmic frequency characteristics of the linear part of the ACS

Then we determine the additional phase shift $\Delta\varphi = -\omega\theta$ produced by the pure delay component, and bode phase plot φ of the open system with delay. In the

frequency range below the cutoff frequency ω_c the ordinates of the Bode phase plot are larger than $-\pi$. Consequently, in the closed state the investigated ACS will be stable.

The reserve in the phase of the system without delay $\gamma_1 = 90^\circ$ or 1,57 radians, cutoff frequency $\omega_c = 0,048s^{-1}$. Critical value of time delay:

$$\theta_{cf} = \frac{1,57}{0,048} = 32,7 \text{ s} \quad (2.2.6)$$

Using the Nyquist criterion, it is possible to find out the stability of ACS with several delay components, as well as with components of half-delay.

Half-delay components have a transfer function:

$$W_{h-d} = e^{-\sqrt{\theta}s} \quad (2.2.7)$$

and characterize the processes in some diffusion and thermal objects. Its harmonic locus and Bode plot are defined by the following equations:

$$\begin{aligned} \overline{W_{h-d}} &= e^{-(1+j)\sqrt{\theta\omega/2}} = e^{-\sqrt{\theta\omega/2}} e^{-j\sqrt{\theta\omega/2}} \\ L_{h-d} &= -20 \lg e^{\sqrt{\frac{\theta\omega}{2}}} \approx -8,7 \sqrt{\frac{\theta\omega}{2}} \text{ dB} \\ \varphi_{h-d} &= -\sqrt{\theta\omega/2} \end{aligned} \quad (2.2.8)$$