

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

Институт Кибернетики
Направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»
Кафедра Автоматики и Компьютерных Систем

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Анализ методов математического описания линейного объекта управления и синтез линейных регуляторов

УДК 681.51:51-047.44+681.515-047.84

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8А31	Каминская Виктория Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры МЕН ИСГТ	Антонова Ирина Сергеевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	Извеков Владимир Николаевич	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.О, зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС	Суходоев М.С..	к.т.н.		

Томск – 2017 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (КОМПЕТЕНЦИИ ВЫПУСКНИКОВ)
по направлению 27.03.04 «Управление в технических системах»

Код результатов	Результаты обучения (выпускник должен быть готов) Профессиональные и общепрофессиональные компетенции
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий.
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам
P10	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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

Институт кибернетики
 Направление подготовки 27.03.04 «Управление в технических системах»
 Кафедра автоматизации и компьютерных систем

УТВЕРЖДАЮ:
 Зав. Кафедрой

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврская работа

Студенту:

Группа	ФИО
8А31	Каминская Виктория Сергеевна

Тема работы:

Анализ методов математического описания линейного объекта управления и синтез линейных регуляторов
--

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№2439/с от 07.04.2017 г.
---	--------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Вектор экспериментальных данных Y .
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор; 2. Идентификация параметров линейного объекта управления методом наименьших квадратов; 3. Метод вещественной интерполяции для математического описания линейного объекта управления; 4. Синтез линейного регулятора по принципу динамической компенсации; 5. Расчет линейного регулятора по уравнениям синтеза; 6. Модальный синтез регулятора; 7. Решение поставленных задач по методике идентификации и синтеза линейных систем; 8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 9. Социальная ответственность.

Перечень графического материала	Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Основная часть	Пушкарев М.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Антонова И.С.
Социальная ответственность	Извеков В.Н.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	09.02.2017
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Пушкарев Максим Иванович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8А31	Каминская Виктория Сергеевна		

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа 8А31	ФИО Каминской Виктории Сергеевне
----------------	-------------------------------------

Институт Уровень образования	ИК Бакалавриат	Кафедра Направление/специальность	АиКС Управление в технических системах
---------------------------------	-------------------	--------------------------------------	--

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Оклады ТПУ, стоимость лицензии на Mathcad, Matlab, прайс-лист интернет-кафе
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Расчётно – аналитические
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Общая система налогообложения с учётом льгот для учебных учреждений (в том числе 27,1% отчислений во внебюджетные фонды)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1. Потенциальные потребители результатов исследования 2. Анализ конкурентных технических решений 3. SWOT – анализ
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	1. Основная заработная плата исполнителей темы 2. Дополнительная заработная плата исполнителей темы 3. Отчисления во внебюджетные фонды 4. Прочие расходы 5. Формирование бюджета затрат НИ
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	Определение ресурсоэффективности проекта расчётом интегрального показателя

Перечень графического материала (в том числе таблиц):

1. Карта сегментирования рынка
2. Оценка для сравнения конкурентных технических решений
3. Матрица SWOT
4. Морфологическая матрица
5. Диаграмма Ганта
6. Материальные затраты
7. Расчёт основной и дополнительной заработной платы
8. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антонова И.С.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8А31	Каминская В.С.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8А31	Каминской Виктории Сергеевне

Институт	ИК	Кафедра	АиКС
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

Тема – «Анализ методов математического описания линейного объекта управления и синтез линейных регуляторов». Объектом исследования является вектор экспериментальных данных. В теории автоматического управления огромное значение уделяется методам идентификация элементов системы автоматического регулирования, а также, синтезу систем. Для того чтобы произвести идентификацию параметров объекта управления и синтез системы необходимо работать за персональным компьютером в различных программах, предназначенных для математических и инженерных вычислений.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;
- действие фактора на организм человека;
- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
- предлагаемые средства защиты;
- (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:

- механические опасности (источники, средства защиты);
- термические опасности (источники, средства защиты);
- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);
- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения:

- микроклимат;
- освещённость рабочего места;
- шум на рабочем месте;
- напряженность магнитного поля.

1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения:

- электрический ток.

<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	<p>Воздействие на литосферу в случае утилизации персонального компьютера, как отход электронной промышленности.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>– Пожар на рабочем месте.</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; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> – Эргономические требования к рабочему месту; – Правовые нормы трудового законодательства.

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

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8А31	Каминская В.С.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 130 страниц текста, 25 рисунков, 12 таблиц, 29 литературных источников, 8 приложений.

Ключевые слова: идентификация параметров объекта управления, метод наименьших квадратов, вещественная интерполяция, синтез регулятора, динамическая компенсация, уравнения синтеза, модальный регулятор.

Объектом исследования является вектор экспериментальные данные кривой переходного процесса, на основании которого необходимо провести структурно-параметрическую идентификацию объекта управления, а также произвести синтез регулятора, обеспечивающего в системе требуемую динамику.

Целью работы на первом этапе является получение математической модели объекта управления на основе вектора экспериментальных значений переходного процесса методом наименьших квадратов и методом вещественной интерполяции, на втором этапе синтез линейных регуляторов по принципу динамической компенсации, на основании уравнений синтеза и с использованием наблюдающего устройства, обеспечивающих в системе заданные динамические характеристики, а также обобщение и сравнение полученных результатов.

Результатом исследования являются формализованные методики идентификации и синтеза линейных регуляторов для систем автоматического регулирования в прикладных программных продуктах MathCAD и MATLAB.

Значимость данной работы состоит в том, что предложенные формализованные методики получения математического описания динамического объекта управления и синтеза линейных регуляторов могут быть использованы инженерными работниками с целью решения аналогичных задач без особых экономических и трудо-временных затрат.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord 2013 с применением программных пакетов MathCAD и MATLAB.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВДУ ЭМП – Временные допустимые уровни электромагнитных полей;

И - инженер;

КЕО – коэффициент естественного освещения;

КУ – корректирующее устройство;

КЧС – комиссия чрезвычайных ситуаций;

МНК – метод наименьших квадратов;

НИР – научно-исследовательская работа;

НР – научный руководитель;

НТЭ – научно-технический эффект;

ОСС – операторно-структурная схема;

ПУЭ – правила установок и эксплуатации;

ПФ – передаточная функция;

САУ – система автоматического управления;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ЧХ – численная характеристика.

Оглавление

Введение.....	14
1. Анализ методов математического описания линейного объекта	15
1.1. Вещественное интегральное преобразование	15
1.1.2. Получение вещественных изображений. Вещественные передаточные функции.....	18
1.1.3. Математические модели динамических систем в форме численных характеристик.....	20
1.2. Метод наименьших квадратов	25
2. Синтез линейных регуляторов	27
2.1. Общие принципы, на которых базируется решение задачи синтеза регуляторов.....	27
2.2. Метод стандартных коэффициентов построения эталонной передаточной функции	28
2.3. Принцип динамической компенсации и анализ его эффективности для класса стационарных систем.....	30
2.4. Расчет регуляторов с помощью уравнения синтеза.....	33
2.5. Синтез модального регулятора	37
3. Получение математической модели объекта управления	42
3.1. Постановка задачи	42
3.1.1. Идентификация объекта управления методом вещественной интерполяции	42
3.1.2. Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов.....	48
4. Решение задач синтеза	52
4.1. Постановка задачи	52
4.1.1. Синтез линейного регулятора по принципу динамической компенсации	52
4.1.2. Расчет линейного регулятора на основании уравнений синтеза...	56
4.1.3. Модальный синтез линейного регулятора.....	59

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	65
5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	65
5.2. Потенциальные потребители результатов исследования	65
5.2.1. Анализ конкурентных технических решений	66
5.3. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований	69
5.4. Планирование научно-исследовательских работ	70
5.4.1. Структура работ научного исследования	70
5.4.2. Определение трудоёмкости работ	71
5.4.3. Разработка графика проведения научного исследования	72
5.5. Бюджет научно технического исследования (НТИ)	73
5.5.1. Основная заработная плата исполнителей темы	73
5.5.2. Дополнительная заработная плата исполнительской темы	74
5.5.3. Отчисление во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	75
5.5.4. Прочие расходы	76
5.5.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	77
5.6. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	78
6. Социальная ответственность	80
6.1. Аннотация	80
6.2. Введение	81
6.3. Производственная безопасность	81
6.3.1. Микроклимат	82
6.3.2. Освещённость рабочего места	83
6.3.3. Шум	85
6.3.4. Напряжённость электромагнитного поля	86
6.4. Электрический ток	87

6.5. Экологическая безопасность	90
6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	90
6.7. Организационно-правовые вопросы обеспечения безопасности	93
Заключение	98
Conclusion.....	99
Список литературы	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ В	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	126
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	128

Введение

Несмотря на то, что теория автоматического управления это научная дисциплина, которая существует со второй половины XIX века, все еще есть актуальные вопросы, посвященные анализу и синтезу линейных систем автоматического управления. И данный факт свидетельствует о том, что вопросы анализа и синтеза актуальны и в наше время.

Термин «идентификация» стал широко применяться в качестве одного из базовых разделов теории управления около пятидесяти лет назад, хотя проблема моделирования является одной из ведущих в теоретической сфере деятельности. Любая инженерная или научная деятельность в разной степени использует формальное или содержательное описание процессов, устройств или явлений в той или иной области техники и науки. В различных научных направлениях создаются свои подходы, способы, методы построения и использования модели. Необходимость повышения эффективности моделирования и создания систем управления вызвали за последние десятилетия значительный прогресс в построении математических моделей на основе результатов наблюдений за поведением объектов и в исследовании их свойств [1].

Однако моделирование на вычислительных машинах не может заменить расчетных методов проектирования, которые помогают определить состав и структуру САУ, которая может удовлетворять заданному комплексу технических средств. Это может быть обеспечение устойчивости (стабилизация) и качество переходных процессов (увеличение быстродействия, недопустимость больших перерегулирований); повышение точности управления в установившихся режимах. Такая задача называется задачей синтеза систем автоматического управления. Увеличение сложности создаваемых в настоящее время объектов ведёт в общем случае к усложнению корректирующих устройств. Практика же требует

необходимость создания регуляторов более простой структуры, которые обеспечивают поставленные условия.

Разработанные методики идентификации и синтеза линейных систем управления являются достаточно простыми в вычислительном отношении и формализованными.

1. Анализ методов математического описания линейного объекта

1.1. Вещественное интегральное преобразование

Существует большое число классификационных признаков используемых при структуризации САУ и их элементов. Это объясняется разнообразием функций, назначений, способов управления, исполнений и другими особенностями систем управления. Одна из наиболее удобных с позиций расчета САУ классификаций в качестве признака использует вид математического описания [2].

Первоначально она была предложена для численных представлений, но, по сути, является более общей. Выделяют три основных группы:

1. Методы преобразования Лапласа, основанные на отображении моделей в виде совокупности нулей и полюсов на всей комплексной плоскости.
2. Методы, использующие проекцию комплексной плоскости на мнимую ось.
3. Методы, использующие проекцию комплексной плоскости на вещественную положительную полуось.

Первая группа методов пояснений не требует – это классический вариант, используемый при описании САУ, синтезе регуляторов и анализе систем. Вторая группа тоже хорошо известна под общим названием «частотный метод». Третья группа наименее представительна, поэтому приведем основные сведения о ней, опираясь на преобразование Лапласа [3].

Обратимся к формуле прямого преобразования Лапласа:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt, \quad p = \delta + j\omega \quad (1.1)$$

В нее входят функция-изображение $F(p)$, преобразуемая функция $f(t)$ и комплексная переменная $p = \delta + j\omega$. Выделим главное с позиций математического описания и расчета САУ: функции $F(p)$ являются изображениями и потому их применение более предпочтительно по сравнению с функциями времени $f(t)$. Примерами, подтверждающими этот тезис, могут служить операции интегрирования и дифференцирования. Так, достаточно сложной операции дифференцирования функции времени $f(t)$ соответствует в области изображений в случае нулевых начальных условий значительно более простая операция умножения функции $F(p) = L\{f(t)\}$ на переменную $p: \frac{d}{dt} f(t) \doteq pF(p)$. Интегрированию в области оригиналов соответствует деление функции-изображения $F(p)$ на переменную p .

Для получения моделей, позволяющих использовать преимущества области изображений, привлекают преобразования Лапласа, Фурье и некоторые другие. Модели в виде функций $F(p)$ и $F(j\omega)$ обладают отмеченными выше преимуществами, но в то же время оказываются недостаточно эффективными при численных реализациях. Источником трудностей при таких операциях является мнимая составляющая $j\omega$ в комплексной переменной $p = \delta + j\omega$. Рассмотрим возможность устранения источника указанных трудностей [3].

Выделим в (1.1) два частных случая:

1. $\delta = 0$, когда комплексная переменная p обращается в чисто мнимую переменную $p = j\omega$, а формула (1.1) принимает вид

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt; \quad (1.2)$$

2. $\omega = 0$, при этом комплексная переменная p вырождается в вещественную $p = \delta$, а исходная формула (1.1) принимает вид

$$W(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-\delta t} dt; \quad (1.3)$$

Можно видеть, что формула (1.2) определяет прямое преобразование Фурье и является базовой для группы частотных методов.

Второй частный случай, приводящий к формуле (1.3), не так широко известен, но имеет привлекательные и существенно новые возможности.

Выделим главное с позиций математического описания и расчета САУ: во-первых, функции $F(\delta)$ являются изображениями и потому их использование более предпочтительно по сравнению с функциями времени $f(t)$; во-вторых, переменная в (1.3) не содержит мнимой составляющей.

Условия существования и единственности функции $F(\delta)$ определяются сходимостью интеграла (1.3). Поэтому наложим ограничение на переменную δ и будем рассматривать преобразование

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-\delta t} dt, \delta \in [C, \infty), C \geq 0. \quad (1.4)$$

В приложении к линейным САУ, когда функция $f(t)$ представляет собой временную динамическую характеристику, сходимость обеспечивают выбором соответствующего значения параметра C . Так, для устойчивой системы, имеющей импульсную переходную характеристику $k(t) = f(t)$, можно принять $C = 0$. В случае использования переходной характеристики $h(t) = f(t)$, соответствующей устойчивой системе, условие сходимости интеграла определяется тоже достаточно просто: $\delta \in [C, \infty), C \geq 0$.

В дальнейшем, если не оговаривается иное, будем полагать, что в (1.4) функция-оригинал $f(t)$ является импульсной реакцией минимально-фазовой системы, так что интеграл в (1.4) сходится уже при $C = 0$. И всегда можно принять: $\delta \in [0, \infty)$. Именно такие системы за редким исключением рассматриваются в практических задачах, и потому, принятое предположение фактически не приводит к снижению общности рассмотрения, но в то же время снимает вопросы ограничения переменной δ [3].

Для эффективного использования вещественных функций $F(\delta)$ важно знать их положительные особенности и свойства. Приведем наиболее важные:

1. Функции $F(\delta)$ относятся к области изображений и потому в большинстве случаев выполнение действий над ними оказывается более экономичным по сравнению с соответствующими операциями в области времени.

2. Функции $F(\delta)$ имеют графические представления, что делает их и действия над ними наглядными.

3. Функции $F(\delta)$ не содержат мнимой составляющей, поэтому численные способы действий над ними оказываются более экономичными по сравнению с изображениями по Фурье и Лапласу [3].

1.1.2. Получение вещественных изображений. Вещественные передаточные функции.

Для получения вещественных функций-изображений $F(\delta)$ по функциям времени $f(t)$ используется формула прямого δ - преобразования (1.4).

Это очевидный, но не единственный путь решения задачи. Кроме того, он не всегда прост в техническом отношении, а в некоторых случаях им трудно или даже невозможно воспользоваться. Действительно, операция интегрирования в (1) при каких-то особенностях функции $f(t)$ может оказаться чрезмерно трудоемкой. Кроме того, в практических задачах аналитическое представление функции $f(t)$ может быть неизвестно, например, в случае использования результатов эксперимента, когда $f(t)$ оказывается заданной таблицей или графиком. Между тем в общем случае эффективность математических моделей во многом определяется тем, насколько просто можно получать такие модели, насколько просто осуществляется переход от одной формы описания САУ к другой. Если эти

условия не выполняются, то прямой путь нахождения $F(\delta)$ не представляет интереса и приходится искать более рациональные способы решения задачи.

Имеется достаточно простой способ получения вещественных изображений $F(\delta)$. Он основан на формальной замене комплексной переменной p на вещественную δ в формуле преобразования Лапласа (1.1), который был рассмотрен в разделе 1.1 как частный случай. Из него следует, что вещественное изображение $F(\delta)$ можно получить по изображению $F(\delta)$ путем замены переменных: $\delta \in [C, \infty), C \geq 0$. Этот путь является особенно важным потому, что позволяет воспользоваться всем имеющимся богатством соответствий оригиналов и изображений по Лапласу, созданных к настоящему времени [3].

Оба рассмотренных способа получения вещественных изображений распространяются на задачи определения изображений сигналов САУ и передаточные функции систем и их элементов. В последнем случае функция времени $f(t)$ должна иметь смысл импульсной переходной характеристики $k(t)$. Тогда в соответствии с формулой (1.4) будем иметь

$$W(\delta) = \int_0^{\infty} k(t) \cdot e^{-\delta t} dt. \quad (1.5)$$

Смысл полученного результата – функция $W(\delta)$ является вещественной передаточной функцией САУ, имеющей импульсную реакцию $k(t)$.

Также функция $W(\delta)$ может быть получена другим путем – на основе определения передаточной функции как отношения изображения выходного сигнала $Y(\delta)$ к изображению входного сигнала $X(\delta)$ (при нулевых начальных условиях):

$$F(\delta) = \frac{Y(\delta)}{X(\delta)} = \frac{\int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-\delta t} dt}{\int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-\delta t} dt} \quad (1.6)$$

При этом соотношение «вход-выход» системы принимает вид:

$$Y(\delta) = W(\delta) \cdot X(\delta). \quad (1.7)$$

Для систем с сосредоточенными параметрами вещественные передаточные функции остаются дробно-рациональными:

$$W(\delta) = \frac{b_m \cdot \delta^m + b_{m-1} \cdot \delta^{m-1} + \dots + b_1 \cdot \delta + b_0}{a_n \cdot \delta^n + a_{n-1} \cdot \delta^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \delta + a_0} \quad (1.8)$$

Для систем с распределенными параметрами получаемые изображения могут содержать не только дроби, но и трансцендентные и иррациональные выражения [3].

1.1.3. Математические модели динамических систем в форме численных характеристик

Получение и применение вещественных функций-изображений как математических описаний систем управления, их элементов и сигналов создает благоприятные предпосылки для решения задач исследования и расчета САУ. Их реализация в условиях широкого применения цифровой вычислительной техники должна быть осуществлена не только в форме аналитических решений, но и численных процедур, ориентированных на компьютерные технологии. Это означает необходимость иметь модели систем не только в виде аналитических функций, но и в форме числовых последовательностей, однозначно связанных с их непрерывными прототипами [3].

С целью получения численных моделей и формирования взаимно однозначной связи с исходными непрерывными функциями воспользуемся дискретизацией вещественных изображений и интерполяционным методом. Для вещественной функции $F(\delta), \delta \in [0, \infty)$ зададим узлы δ_i , где $i = 1, 2 \dots n$, и найдем значения $F(\delta_i), i = \overline{1, \eta}, \eta = m + n + 1$. Множество:

$$\{F(\delta_i)\}_\eta = \{F(\delta_1), F(\delta_2), \dots, F(\delta_\eta)\}, \quad (1.9)$$

называется численной характеристикой (ЧХ) функции $F(\delta)$, а число η ее элементов – размерностью ЧХ.

Выбор узлов интерполирования δ_i является первым этапом при переходе к дискретной форме, оказывая существенное влияние на вычислительные особенности и точность решения последующих задач. При их назначении или выборе требуется определить интервал расположения узлов и закон их распределения. В настоящее время не существует алгоритмов получения распределения узлов, отвечающего наилучшим образом тому или иному критерию, обычно соответствующему требованиям по точности. Поэтому на практике в большинстве случаев используют наиболее простой вариант – равномерное распределение узлов. Практика показывает, что интервал $[\delta_1, \delta_\eta]$ должен охватывать область существенных изменений и значений функции $F(\delta)$ [3].

Для пояснения рекомендации обратимся к дробно-рациональной функции вида (1.8) с распространенным соотношением структурных параметров: $m < n$. График такой функции показан на рисунке 1.1.

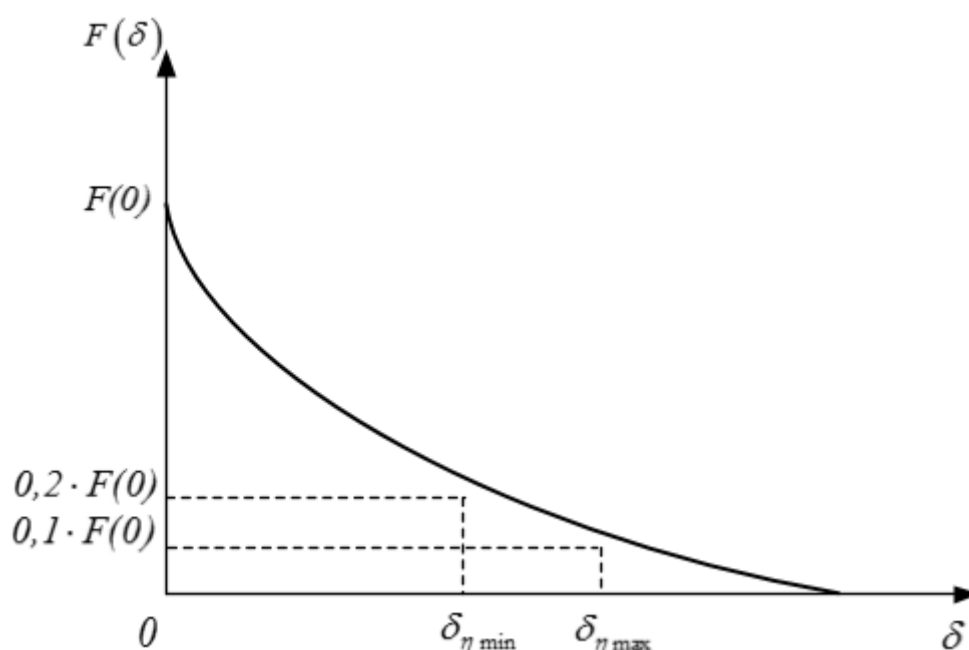


Рисунок 1.1 – График функции $F(\delta)$ при $m < n$.

Определение интервала расположения узлов заключается в выборе значений первого δ_1 и последнего δ_η узлов интервала. Существует, по крайней мере, два способа определения узлов. Первый и наиболее простой

способ направлен на первоначальное получение узла δ_η . Рекомендуется выбирать его из следующего условия: он должен ограничивать сверху интервал существенных значений и изменений функции $F(\delta)$. Его определение сводится к решению уравнения

$$F(\delta_\eta) = (0,1 \div 0,2) \cdot F(0). \quad (1.10)$$

В тех случаях, когда степени полиномов числителя m и знаменателя n функции (1.8) совпадают, для вычисления величины δ_η приходится рассматривать более общее уравнение

$$F(\delta_\eta) = (0,1 \div 0,2) \cdot [F(0) - F(\infty)] + F(\infty). \quad (1.11)$$

Графическое пояснение вида функции $F(\delta)$ при $m = n$ и смысл входящих в уравнение переменных дано на рисунке 1.2.

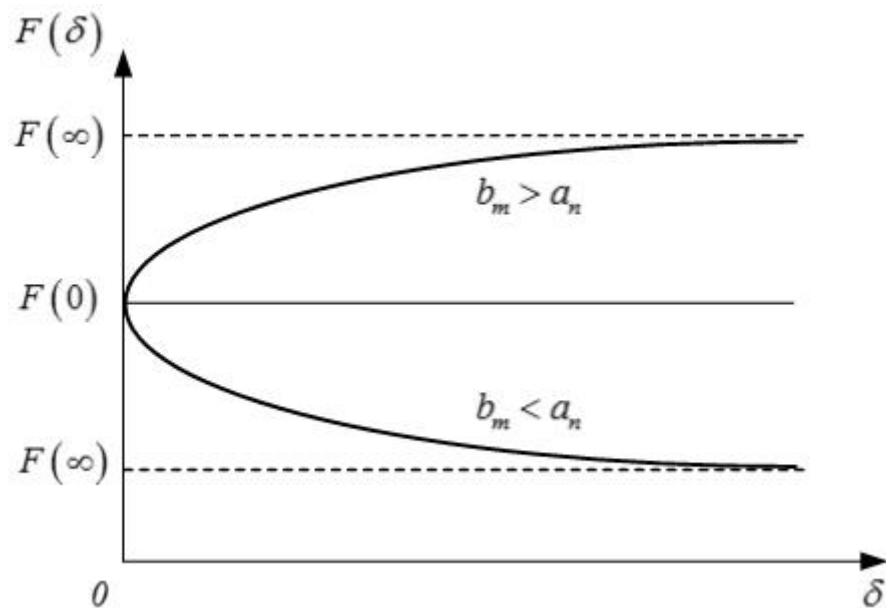


Рисунок 1.2 – График функции $F(\delta)$ при $m = n$.

Поиск решения уравнений (1.7) и (1.8) осуществляется итерационным путем и обычно заканчивается за два-четыре шага, так что здесь проблем не возникает [3].

Узлы внутри интервала $[\delta_1, \delta_\eta]$ в простейшем случае можно найти на основе равномерной сетки узлов по формуле

$$\delta_i = \delta_1 + \frac{\delta_\eta - \delta_1}{\eta - 1} \cdot (i - 1), \quad i = \overline{2, \eta}. \quad (1.12)$$

В практических задачах удобно принимать в качестве первого по порядку узла значение $\delta_1 = 0$. Можно убедиться, что этот узел соответствует статическому режиму, описывая его, и, кроме того, обеспечивает максимально высокую вычислительную точность описания, как самого режима, так и системы в целом. При этом расчетная формула для узлов упрощается:

$$\delta_i = \delta_1 + \frac{\delta_\eta}{\eta - 1} \cdot (i - 1), i = \overline{1, \eta}. \quad (1.13)$$

Второй способ определения узлов базируется на ограничении интервала распределения узлов снизу.

Приведенные здесь рекомендации по выбору узлов интерполирования относятся к весьма широкому кругу задач и условий их решения. В частных случаях, когда размерность ЧХ мала или же существует точное решение задачи синтеза, узлы могут быть выбраны со значительными отступлениями от приведенных соотношений. Следует только помнить, что при этом может возрасти вычислительная погрешность как при получении моделей в форме ЧХ, так и при решении последующих задач с использованием ЧХ. В то же время часто возникают ситуации, когда от упомянутых рекомендаций приходится отходить сознательно. Например, это имеет место при поиске решения приближенных задач, когда необходимо обеспечить повышенную точность на начальном или конечном участке переходного процесса, что будет использовано в дальнейшем [3].

Модели САУ в форме ЧХ ориентированы на численные технологии расчетов и исследований динамических систем. К примеру, уравнение «вход-выход» системы, записанное для комплексной области

$$Y(p) = W(p) \cdot X(p) \quad (1.14)$$

или вещественной области

$$Y(\delta) = W(\delta) \cdot X(\delta) \quad (1.15)$$

можно представить в виде соотношения между численными характеристиками $\{X(\delta_i)\}_\eta$, $\{Y(\delta_i)\}_\eta$, $\{W(\delta_i)\}_\eta$ соответственно входного $x(t)$ и выходного $y(t)$ сигналов и передаточной функции $W(\delta)$:

$$\{Y(\delta_i)\}_\eta = \{W(\delta_i)\}_\eta \cdot \{X(\delta_i)\}_\eta \quad (1.16)$$

Особенность последнего равенства не только в том, что здесь использованы численные модели системы и сигналов, но и в малом числе операций при вычислениях. Их всего $\eta = m + n + 1$, что намного меньше по сравнению с использованием аналитических соотношений (1.14) или (1.15).

Математическая модель в виде ЧХ должна иметь однозначную связь с вещественной передаточной функцией. Такая связь устанавливается с помощью системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$W(\delta) = \frac{b_m \cdot \delta_i^m + b_{m-1} \cdot \delta_i^{m-1} + \dots + b_1 \cdot \delta_i + b_0}{a_n \cdot \delta_i^n + a_{n-1} \cdot \delta_i^{n-1} + \dots + a_1 \cdot \delta_i + 1} \quad (1.17)$$

для решения которой используют каноническую форму

$$\begin{cases} b_m \cdot \delta_1^m + \dots + b_{m-1} \cdot \delta_1^{m-1} + b_0 - a_n \cdot \delta_1^n \cdot F(\delta_1) - \dots - a_1 \cdot \delta_1 \cdot F(\delta_1) = F(\delta_1), \\ b_m \cdot \delta_2^m + \dots + b_{m-1} \cdot \delta_2^{m-1} + b_0 - a_n \cdot \delta_2^n \cdot F(\delta_2) - \dots - a_1 \cdot \delta_2 \cdot F(\delta_2) = F(\delta_2), \\ \dots \\ b_m \cdot \delta_\eta^m + \dots + b_{m-1} \cdot \delta_\eta^{m-1} + b_0 - a_n \cdot \delta_\eta^n \cdot F(\delta_\eta) - \dots - a_1 \cdot \delta_\eta \cdot F(\delta_\eta) = F(\delta_\eta). \end{cases}$$

Основное практическое значение СЛАУ (1.17) состоит в том, что она позволяет найти коэффициенты функции $F(\delta)$ по ЧХ $\{F(\delta_i)\}_\eta$. Обратим здесь внимание на параметр η и его связь с числом неизвестных коэффициентов: упомянутое ранее соотношение

$$\eta = m + n + 1 \quad (1.18)$$

в данной задаче означает равенство между собой числа уравнений СЛАУ и числа искомых коэффициентов, что является необходимым условием существования единственного решения этой системы [3].

1.2. Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов (МНК) широко применяется для идентификации линейных и нелинейных систем [4, 5, 6].

Критерий МНК – минимизация суммы квадратов невязок между наблюдаемой выходной переменной y и ее оценкой, записанной в виде зависимости y от входной переменной и определяемых параметров.

МНК применяется в детерминированных постановках для аппроксимации экспериментальных результатов аналитическими выражениями.

МНК применяют как при определении параметров статического объекта, описываемого уравнением

$$y_M = b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_m \cdot x_m, \quad (1.19)$$

так и для динамической системы, описываемой дифференциальным уравнением вида

$$T_n \cdot y^{(n)}(t) + T_{n-1} \cdot y^{(n-1)}(t) + \dots + y(t) = k \cdot x(t). \quad (1.20)$$

При определении параметров модели статического объекта проводится N измерений входных переменных x_i и выходной переменной y , причем $N > k$, где k – число неизвестных коэффициентов модели. Предполагается, что входные переменные измеряются без помех, а измерение выходной величины может быть с помехой. Разность $y - y_M = \varepsilon$ называется невязкой. Невязка включает в себя и ошибку измерения y , и все несоответствие между моделью и реальным объектом.

Для определения коэффициентов модели b_1, b_2, \dots, b_k используют критерий

$$J = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = (y - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1.21)$$

Это задача на поиск экстремума функции, зависящей в данном случае от переменных b_1, b_2, \dots, b_k . Решение находится из условия и сводится к

определению k неизвестных переменных в системе, состоящей из k уравнений.

Во втором случае по данным пассивного эксперимента требуется определить параметры дифференциального уравнения. Аналогичным образом, формируется разность между выходом реального объекта и выходом модели $\varepsilon(t) = y(t) - y_M(t)$. Далее записывается квадратичный критерий и, минимизируя его, определяются параметры модели. Однако для динамической системы такой подход является неоправданно сложным, так как $y_M(t)$ является решением дифференциального уравнения, являющегося нелинейной функцией от искомым параметров.

Поэтому далее задачу решают либо численными методами, либо изменяют схему решения, заменяя $y(t), y'(t), x(t)$ на значения, измеренные в дискретные моменты времени. После чего применяют критерий минимизации [7].

Но существует еще один метод реализации МНК. В математическом программной обеспечении – Mathcad, есть встроенная функция **LeastSquaresFit**($v_x, v_y, F, \text{guess}, \text{conf}, [\text{Stdy}], [\text{Acc}]$), которая возвращает параметры и пределы доверительного интервала для нелинейной аппроксимирующей функции F по данным v_x и v_y для доверительной вероятности conf с дополнительными среднеквадратическими отклонениями Stdy и дополнительными границами (нижней и верхней) допустимых значений параметров с точностью Acc и вектором приближенных значений guess . Сложностью данного метода является выбор вектора приближенных значений, но в основном, данная реализация МНК проста для понимания и не требует промежуточных вычислений.

2. Синтез линейных регуляторов

2.1. Общие принципы, на которых базируется решение задачи синтеза регуляторов

Синтез регуляторов (корректирующих устройств) – одна из важнейших задач, изучаемых теорией автоматического управления. Эта задача является весьма сложной, неоднозначной, требующей творческого подхода при ее решения. Если многие задачи теории управления изучаются и другими науками, то задача синтеза – это задача, собственно, теории управления. Указанная задача должна учитывать особенности работы конкретных систем управления, их конструкции, технические характеристики и т.п.

Рассматриваемую задачу решает, как правило, большой коллектив разработчиков: специалисты по отдельным элементам систем; специалисты, изучающие объект управления и строящие его математическую модель; математики (специалисты по численным методам) и др.

Проблема синтеза КУ в большинстве случаев точно не решается. Даже если можно построить алгоритм нахождения точного решения, то такой алгоритм интересен лишь с точки зрения выявления технических трудностей, которые необходимо преодолеть при решении задачи.

При решении сложных инженерных задач общую задачу синтеза регуляторов часто рассматривают как совокупность частных задач, которые вытекают из проектируемой системы и степени сложности задачи синтеза регулятора. К частным можно отнести следующие задачи:

1. стабилизация объекта управления и повышение запаса устойчивости;
2. обеспечение необходимой точности воспроизведения воздействий в установившемся режиме;
3. обеспечение заданного качества в переходном режиме [8].

2.2. Метод стандартных коэффициентов построения эталонной передаточной функции

Между характером переходной и передаточной функции системы существует сложная, но, тем не менее, вполне определенная связь. Вид переходной функции определяется значением нулей (корней числителя) и полюсов (корней знаменателя) передаточной функции. Для любой конкретной формы передаточной функции может быть найдено некоторое «оптимальное» распределение нулей и полюсов, при котором переходная функция будет наиболее благоприятной с точки зрения динамики рассматриваемой системы. Каждому такому оптимальному распределению нулей и полюсов соответствует вполне определенное значение коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции, которое назовем стандартным. Далее построим изложение, следуя [9, 10, 11].

Любой характеристический полином замкнутой САУ:

$$D(s) = a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0 \quad (2.1)$$

можно записать в виде

$$D(s) = s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n \cdot \omega_0} \cdot \omega_0 \cdot s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_n \cdot \omega_0^{n-1}} \cdot \omega_0^{n-1} \cdot s^{n-1} + \omega_0, \quad (2.2)$$

где $\omega_0 = \sqrt[n]{\frac{a_0}{a_n}}$.

Также можно записать иным образом:

$$D(s) = s^n + A_1 \cdot \omega_0 \cdot s^{n-1} + \dots + A_{n-1} \cdot \omega_0^{n-1} \cdot s + \omega_0^n, \quad (2.3)$$

где

$$A_1 = \frac{a_{n-1}}{a_n \cdot \omega_0}, A_2 = \frac{a_{n-2}}{a_{n-2} \cdot \omega_0^2}, \dots, A_{n-1} = \frac{a_1}{a_1 \cdot \omega_0^{n-1}}. \quad (2.4)$$

В качестве первой типовой функции можно взять передаточную функцию вида:

$$W^\ominus(s) = \frac{\omega_0^n}{s^n + A_1 \cdot \omega_0^n \cdot s^{n-1} + \dots + A_{n-1} \cdot \omega_0^{n-1} \cdot s + \omega_0^n} \quad (2.5)$$

Для системы с ПФ (2.5) можно получить переходный процесс без перерегулирования, когда корни знаменателя все вещественны. При всех вещественных корнях и при $w_0 = const$ наименьшее время регулирования будет, если все корни будут кратными. В этом случае коэффициенты A_1, A_2, \dots, A_{n-1} окажутся коэффициентами бинома Ньютона $(s + 1)^n$. В таблице 2.1 приведено значение этих коэффициентов для n равного 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Таблица 2.1

n	Коэффициенты знаменателя	τ_0
1	1 1	3
2	1 $A_1 = 2$ 1	4,8
3	1 $A_1 = 3$ $A_2 = 3$ 1	6
4	1 $A_1 = 4$ $A_2 = 6$ $A_3 = 4$ 1	7,9
5	1 $A_1 = 5$ $A_2 = 10$ $A_3 = 10$ $A_4 = 5$ 1	9
6	1 $A_1 = 6$ $A_2 = 15$ $A_3 = 20$ $A_4 = 15$ $A_5 = 6$ 1	10,6
7	1 $A_1 = 7$ $A_2 = 21$ $A_3 = 35$ $A_4 = 35$ $A_5 = 21$ $A_6 = 7$ 1	11,8
8	1 $A_1 = 8$ $A_2 = 28$ $A_3 = 56$ $A_4 = 70$ $A_5 = 56$ $A_6 = 28$ $A_7 = 8$ 1	13,1

Введем в рассмотрение безмерное время переходного процесса $\tau_0 = \omega_0 \cdot T_p$. Действительное время переходного процесса определяется зависимостью $T_p = \frac{\tau_0}{\omega_0}$. В таблице 2.1 приведено время переходного процесса τ_0 для систем различного порядка.

Рассмотрим передаточную функцию, имеющую один нуль:

$$W^{\exists}(s) = \frac{A_{n-1} \cdot \omega_0^{n-1} \cdot s + \omega_0^n}{s^n + A_1 \cdot \omega_0 \cdot s^{n-1} + \dots + A_{n-1} \cdot \omega_0^{n-1} \cdot s + \omega_0^n} \quad (2.6)$$

Чтобы уменьшить выброс, вызванный влиянием нуля, надо замедлить скорость нарастания переходной функции. Это можно сделать «разведением» корней полинома знаменателя на действительной оси [8].

При передаточной функции с одним нулем корни рекомендуется располагать на отрицательной вещественной полуоси по арифметической прогрессии. Значения коэффициентов полином знаменателя в формуле (2.6) для такого распределения корней приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

n	1-й член прогрессии	Разность прогрессии	Коэффициенты знаменателя	τ_0
1	0,5	-	1 1	1
2	0,183	1,5	1 2,5 1	3
3	0,098	1,517	1 5,1 6,35 1	5
4	0,063	1,138	1 7,22 16,3 11,83 1	7
5	0,039	0,86685	1 9 29 38 18 1	9
6	0,039	0,717	1 11 45,8 92,3 82,3 27,7 1	11

В данном параграфе изложены лишь некоторые подходы к определению эталонных ПФ замкнутых систем. Следующей важной задачей является построение таких регуляторов с ПФ $W_{\text{кв}}(s)$, которые обеспечили бы приближенное в общем случае равенство реальной ПФ замкнутой системы $W(s)$ и заранее выбранной эталонной ПФ $W^{\text{э}}(s)$ [8].

2.3. Принцип динамической компенсации и анализ его эффективности для класса стационарных систем

Основная формула, определяющая оператор регулятора, имеет вид (2.7).

$$A_{\text{кв}} = A_0^{-1} \cdot (1 - A^{\text{э}})^{-1} \cdot A^{\text{э}}, \quad (2.7)$$

где A_0 - оператор неизменяемой части системы (объекта управления), $A_{\text{кв}}$ – оператор регулятора, $A^{\text{э}}$ – эталонный оператор замкнутой системы.

Пусть $W^{\text{э}}(s)$ – эталонная передаточная функция замкнутой системы; она выбрана из условия обеспечения необходимого качества работы САУ в переходном и установившемся режимах.

Найдем передаточную функцию эталонной разомкнутой системы (рисунок 2.1).

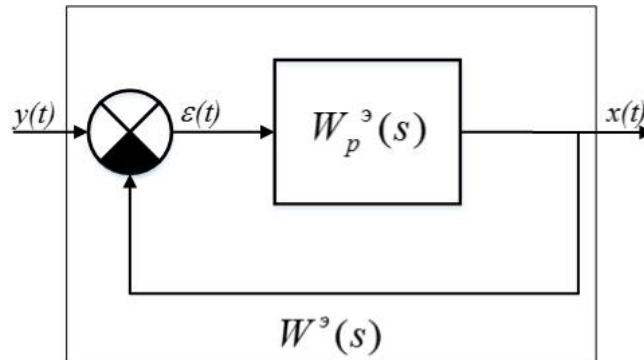


Рисунок 2.1 – Структурная схема эталонной системы.

Имеем

$$W^{\varnothing}(s) = \frac{W_p^{\varnothing}(s)}{1 + W_p^{\varnothing}(s)}; \quad (2.8)$$

тогда

$$W^{\varnothing}(s) \cdot (1 + W_p^{\varnothing}(s)) = W_p^{\varnothing}(s). \quad (2.9)$$

Отсюда находим

$$W^{\varnothing}(s) + W_p^{\varnothing}(s) \cdot W^{\varnothing}(s) = W_p^{\varnothing}(s), \quad (2.10)$$

или, что тоже самое,

$$W^{\varnothing}(s) = W_p^{\varnothing}(s) - W_p^{\varnothing}(s) \cdot W^{\varnothing}(s) = W_p^{\varnothing}(s) \cdot (1 - W^{\varnothing}(s)). \quad (2.11)$$

Легко записать выражение для эталонной ПФ разомкнутой системы

$$W_p^{\varnothing}(s) = \frac{W^{\varnothing}(s)}{1 - W^{\varnothing}(s)}; \quad (2.12)$$

Задача синтеза регулятора иллюстрируется рисунком 2.3.

Из анализа структурных схем 2.1 и 2.3 сразу же следует, что задача коррекции получает решение при выполнении следующего условия

$$W_p^{\varnothing}(s) = W_{\text{кв}} \cdot W_0(s) \quad (2.13)$$

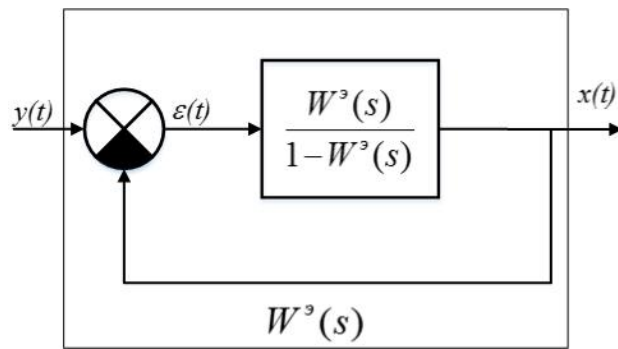


Рисунок 2.2 – Структурная схема эталонной системы.

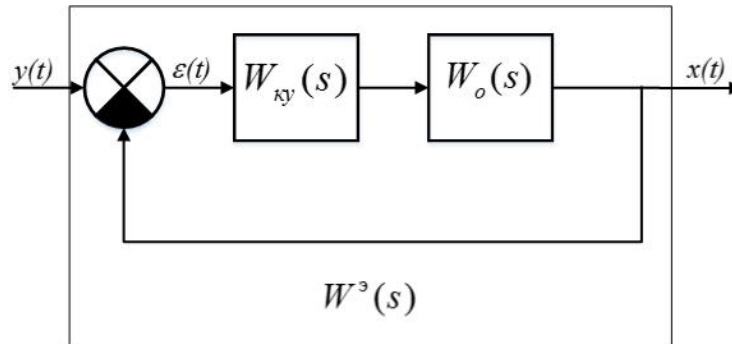


Рисунок 2.3 – К постановке задачи коррекции.

Поставим следующий вопрос, при каких условиях имеет место равенство передаточных функций $W_p^3(s)$ и $W_{кy}(s)$. Очевидно, что такое равенство справедливо, если ПФ объекта управления $W_o(s) = 1$, т.е. объект безынерционный. Равенство $W_o(s) = 1$ может быть достигнуто, если компенсировать динамику объекта, вводя в прямую цепь дополнительное звено, имеющее ПФ, обратную ПФ объекта управления (это звено называют компенсатором); тогда имеет место равенство

$$W_o(s) \cdot W_o(s)^{-1} = 1 \quad (2.14)$$

и структурная схема скорректированной системы принимает вид (рисунок 2.4).

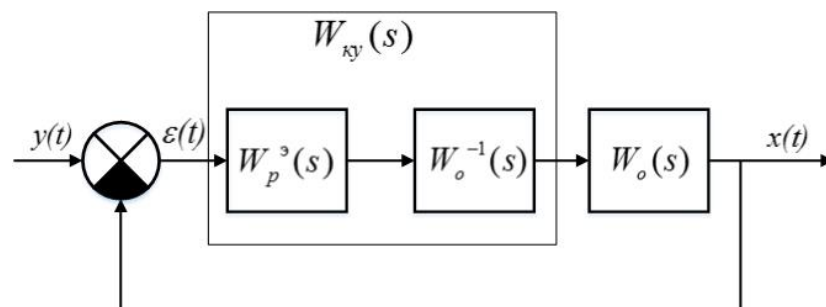


Рисунок 2.4 – Структурная схема скорректированной системы.

Или, что то же самое (см. рисунок 2.5).

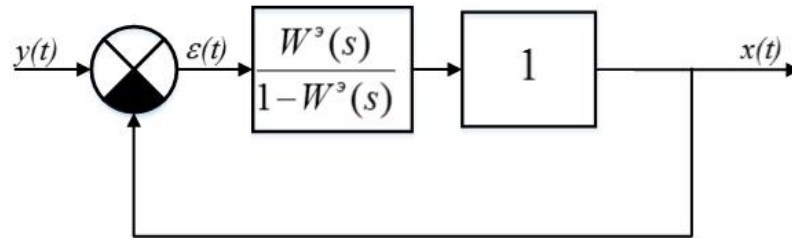


Рисунок 2.5 – Структурная схема скорректированной системы (динамика объекта скомпенсирована).

Таким образом, исходя из физических соображений, получено формальное решение задачи синтеза регулятора с эталонной передаточной функцией замкнутой системы $W^э(s)$. ПФ компенсатора может рассматриваться как часть ПФ регулятора, тогда $W_{кв}(s) = W_p^э(s) \cdot W_o(s)^{-1}$ (рисунок 2.4) [13].

2.4. Расчет регуляторов с помощью уравнения синтеза

Чтобы устранить некоторые недостатки, присущие принципу динамической компенсации, используем метод расчета регуляторов с помощью уравнения синтеза.

Идея подхода состоит в том, что передаточная функция замкнутой эталонной системы при предположении, что

$$W_o(s) = \frac{B(s)}{A(s)}, \quad (2.15)$$

должна удовлетворять следующим условиям:

$$W^э(s) = \frac{R(s) \cdot B(s)}{D(s)} = \frac{P(s)}{D(s)} \text{ – ПФ замкнутой эталонной системы,} \quad (2.16)$$

$$1 - W^э(s) = \frac{C(s) \cdot A(s)}{D(s)} \text{ – ПФ ошибки замкнутой эталонной системы,} \quad (2.17)$$

где

$$D(s) = d_0 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + \dots + d_{2n-1} \cdot s^{2n-1} + s^{2n}, \quad (2.18)$$

где $D(s)$ – эталонный характеристический полином;

$$B(s) = b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_{n-1} \cdot s^{n-1}; \quad (2.19)$$

$$A(s) = a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + \dots + s^n. \quad (2.20)$$

Полиномы $B(s)$ и $A(s)$ – известны, они определяют динамические свойства неизменяемой части; эталонный полином $D(s)$ выбирается специальным образом, например, методом стандартных коэффициентов, но так, чтобы были реализованы предписанные динамические свойства замкнутой системы. Это достигается тем, что $D(s)$ является характеристическим уравнением замкнутой системы, а расположение корней характеристического уравнения s_1, s_2, \dots, s_{2n} в левой полуплоскости комплексной области определяет параметры переходного процесса:

1. Быстродействие (время переходного процесса);
2. Колебательность (число колебаний и их частоту);
3. Перерегулирование $\sigma\%$ и др.

Таким образом, в качестве эталона задается только полином $D(s)$, на числитель же соответствующие требования не накладываются. Вместе с тем изображение переходного процесса выражается зависимостью

$$H(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{R(s) \cdot B(s)}{D(s)} = \frac{P(s)}{s \cdot D(s)} \quad (2.21)$$

ПФ корректирующего устройства определяется зависимостью

$$W_{\text{КУ}} = \frac{R(s)}{C(s)} \quad (2.22)$$

где

$$R(s) = r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2 + \dots + r_{n-1} \cdot s^{n-1}; \quad (2.23)$$

$$C(s) = c_0 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2 + \dots + c_{n-1} \cdot s^{n-1} + s^n; \quad (2.24)$$

коэффициенты полиномов $R(s)$ и $C(s)$ подлежат определению [8].

Для ПФ замкнутой системы справедливо соотношение

$$W^{\text{э}}(s) = \frac{R(s) \cdot B(s)}{D(s)} = \frac{\frac{R(s) \cdot B(s)}{C(s) \cdot A(s)}}{1 + \frac{R(s) \cdot B(s)}{C(s) \cdot A(s)}} = \frac{R(s) \cdot B(s)}{C(s) \cdot A(s) + R(s) \cdot B(s)}. \quad (2.24)$$

Из зависимости (2.24) находим

$$D(s) = A(s) \cdot C(s) + B(s) + R(s). \quad (2.25)$$

Последнее уравнение называется уравнением синтеза, поскольку оно позволяет найти неизвестные $r_0, r_1, \dots, r_{n-1}; c_0, c_1, \dots, c_{n-1}$ [12].

Уравнение синтеза при строгом рассмотрении вопроса находится из соотношений (2.16) и (2.17), поскольку

$$1 - \frac{R(s) \cdot B(s)}{D(s)} = \frac{C(s) \cdot A(s)}{D(s)}. \quad (2.26)$$

Отсюда сразу же следует (2.25). Синтезированная описанным методом система устраняет некоторые недостатки, присущие принципу динамической компенсации и обладает свойством грубости [12]. Свойство грубости – свойство, которое отображает нечувствительность к ошибкам моделирования.

Определим систему алгебраических уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов $r_0, r_1, \dots, r_{n-1}; c_0, c_1, \dots, c_{n-1}$. Из (2.25) следует

$$(a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + s^n) \cdot (c_0 + c_1s + c_2s^2 + \dots + c_{n-1}s^{n-1} + s^n) + (b_0 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_{n-1}s^{n-1}) \cdot (r_0 + r_1s + r_2s^2 + \dots + r_{n-1}s^{n-1}) = d_0 + d_1s + d_2s^2 + \dots + d_{2n-1}s^{2n-1} + s^{2n};$$

отсюда получаем систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} a_0 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_0 = d_0; \\ a_0 \cdot c_1 + a_1 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_1 + b_1 \cdot r_0 = d_1; \\ a_0 \cdot c_2 + a_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_2 + b_1 \cdot r_1 + b_2 \cdot r_0 = d_2; \\ a_0 \cdot c_3 + a_1 \cdot c_2 + a_2 \cdot c_1 + a_3 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_3 + b_1 \cdot r_2 + b_2 \cdot r_1 + b_3 \cdot r_0 = d_3. \end{cases} \quad (2.27)$$

В линейной системе алгебраических уравнений $2n$ неизвестных; число уравнений также равно $2n$.

Решение системы (2.27) приводит к нахождению численных значений неизвестных коэффициентов ПФ регулятора. Назначая соответствующим образом корни характеристического уравнения $D(s) = 0$, можно добиться хорошего качества работы системы в переходном режиме. Для этой цели можно использовать метод стандартных коэффициентов или фильтры

Баттерворса. Качество работы в установившемся режиме определяется наличием интеграторов в прямой цепи. В связи с этим введение интеграторов в прямую цепь изменяет структуру корректирующего устройства, и его передаточная функция будет выражаться зависимостью

$$W_{\text{КУ}}(s) = \frac{R(s)}{s \cdot C(s)}. \quad (2.28)$$

Для удобства проведения расчетов поступают так: интегратор (или интеграторы, в зависимости от порядка астатизма) вносят в структуру объекта (неизменяемой части), и тогда эквивалентная схема принимает вид (рисунок 2.6) [8].

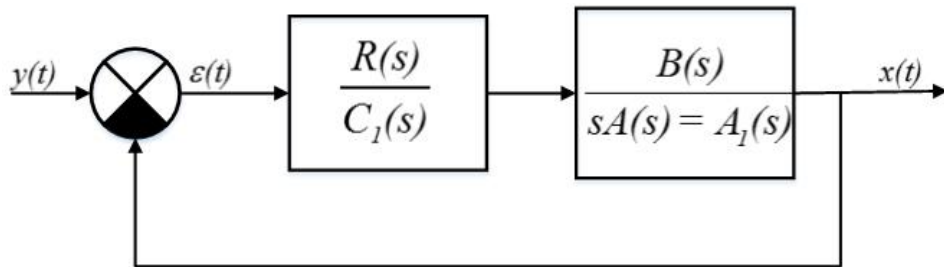


Рисунок 2.10 – Структурная схема эквивалентной системы.

Обозначим

$$s \cdot A(s) = A_1(s) = s \cdot (a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + s^n) = a_0 s + a_1 s^2 + a_2 s^3 + \dots + s^{n+1} \quad (2.29)$$

Степень $A_1(s)$ равна $n + 1$. Запишем уравнение синтеза

$$A_1(s) \cdot C(s) + B(s) \cdot R(s) = D(s). \quad (2.30)$$

Для определения неизвестных коэффициентов c_i, r_j получим систему уравнений, аналогичную (2.27); для этой цели введем обозначения:

$$\begin{cases} R(s) = r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2 + \dots + r_n \cdot s^n; \\ C(s) = c_0 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2 + \dots + c_n \cdot s^n + s^{n+1}; \\ D(s) = d_0 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + \dots + d_{2n} \cdot s^{2n} + s^{2(n+1)}; \\ A_1(s) = a_0 \cdot s + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s^3 + \dots + s^{n+1}. \\ B(s) = b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_{n-1} \cdot s^{n-1} \end{cases} \quad (2.31)$$

С учетом (2.31) уравнение синтеза принимает вид

$$\begin{aligned}
& (a_0 \cdot s + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s^3 + \dots + s^{n+1}) \cdot (c_0 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2 + \dots + c_n \cdot s^n + s^{n+1}) + \\
& + (b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + \dots + b_{n-1} \cdot s^{n-1}) \cdot (r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2 + \dots + r_n \cdot s^n) = \quad (2.32) \\
& = d_0 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + \dots + d_{2n} \cdot s^{2n} + s^{2(n+1)}
\end{aligned}$$

Можно заметить, что когда в прямой цепи есть один интегратор, то задача в точности совпадает с предыдущей, с тем лишь различием, что вместо степени n в уравнении синтеза берется степень $n + 1$. Аналогично изложенному следует поступать и в тех случаях, когда требуется синтезировать систему, обладающую астатизмом более высокого порядка[8].

2.5. Синтез модального регулятора

При анализе и синтезе систем в пространстве состояний все переменные, характеризующие систему или имеющие к ней прямое отношение, делятся на входные переменные, представляющие собой управляющие или возмущающие воздействия u_i , выходные переменные y_i , представляющие интерес для исследователя, и промежуточные переменные x_i или переменные состояния, определяющие динамическое поведение исследуемой системы.

В основе этой формы математического описания лежит представление дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, которое дополняется алгебраическими уравнениями выхода. В векторно-матричной форме эти уравнения записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
X'(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t); \\
Y(t) &= C \cdot X(t) + D \cdot U(t), \quad (2.33)
\end{aligned}$$

где **A**, **B**, **C** и **D** – матрицы коэффициентов размерности $(n \times n)$, $(n \times m)$, $(r \times n)$, $(r \times m)$ соответственно; m – число входов; r – число выходов; **U(t)** – вектор-функция управляющих воздействий размерности m ; **X(t)** – вектор-функция переменных состояния размерности n ; **Y(t)** – вектор-функция выходных координат размерности r .

Матрица **A** характеризует динамические свойства системы, матрицу **B**

называют матрицей управления, она определяет характер воздействия входных переменных $U(t)$ на переменные состояния $X(t)$.

Алгебраическое уравнение связывает выходные переменные $Y(t)$ с переменными состояниями $X(t)$ через матрицу связи C . Обычно в системах автоматического управления матрица $D = 0$, она характеризует непосредственное воздействие входов на выходы [14].

Рассмотрим линейную систему, записанную в уравнениях переменных состояния:

$$\begin{aligned} X'(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t); \\ Y(t) &= C \cdot X(t). \end{aligned} \quad (2.34)$$

Для системы с одним входом и одним выходом переход от ее передаточной функции $W(s)$ к описанию в пространстве состояний осуществляется следующим образом:

1. приведение передаточной функции к виду:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{b_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + b_1 \cdot p + b_0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0} = \\ &= \frac{\frac{b_{n-1}}{a_n} \cdot p^{n-1} + \dots + \frac{b_1}{a_n} \cdot p + \frac{b_0}{a_n}}{p^n + \frac{a_{n-1}}{a_n} \cdot p^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_n} \cdot p + \frac{a_0}{a_n}}; \end{aligned} \quad (2.35)$$

2. представление передаточной функции (2.35) в виде структурной схемы (рисунок 2.7), которая представляет собой n последовательно соединенных интеграторов;

3. переход от структурной схемы к системе дифференциальных уравнений, по которым составляются матрицы коэффициентов:

$$\begin{cases} x_1' = x_2; \\ x_2' = x_3; \\ \vdots \\ x_{n-1}' = x_n; \\ x_n' = u - \frac{a_0}{a_n} x_1 - \frac{a_1}{a_n} x_2 - \dots - \frac{a_{n-1}}{a_n} x_n. \end{cases} \quad (2.36)$$

$$y(t) = \frac{b_0}{a_n} x_1 + \frac{b_1}{a_n} x_2 + \dots + \frac{b_{n-1}}{a_n} x_n.$$

Отсюда

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{a_0}{a_n} & -\frac{a_1}{a_n} & -\frac{a_2}{a_n} & \dots & -\frac{a_{n-1}}{a_n} \end{pmatrix}; \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} -\frac{b_0}{a_n} & -\frac{b_1}{a_n} & \dots & -\frac{b_{n-1}}{a_n} \end{pmatrix}$$

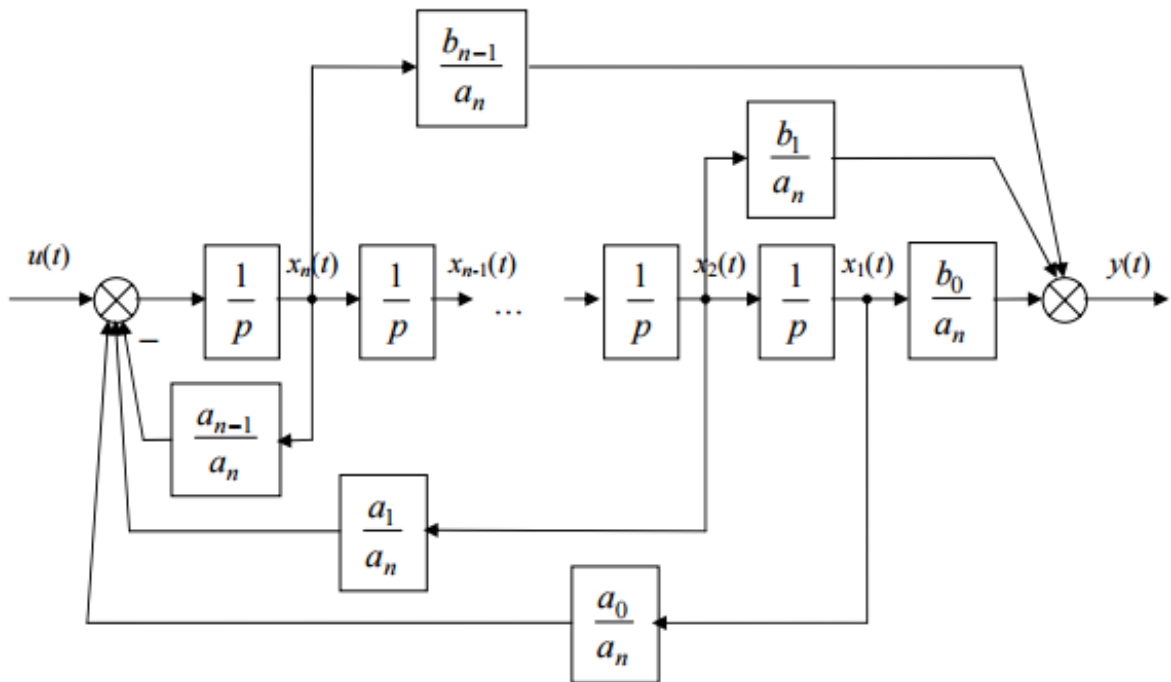


Рисунок 2.13 – Структурная схема объекта, представленная в виде последовательно соединенных интеграторов.

Перейдем от дифференциальных уравнений (2.34) к уравнениям в операторной форме (записанным с помощью оператора Лапласа). Тогда объект можно представить его матричной передаточной функцией

$$\mathbf{W}(p) = \frac{\mathbf{X}(p)}{\mathbf{U}(p)} = (\mathbf{E}_n - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B}, \quad (2.37)$$

где \mathbf{E}_n – единичная матрица.

Замкнутая система в пространстве состояний показана на рисунке 2.8 и представляет собой систему с параллельной коррекцией, где \mathbf{R} – матрица коэффициентов регулятора размерности $m \times n$ [14].

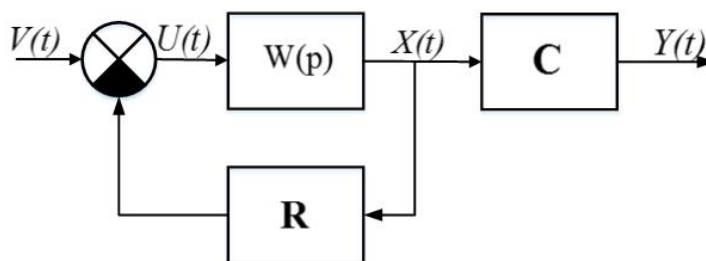


Рисунок 2.14 – Структурная схема замкнутой системы в пространстве состояний.

Матричная передаточная функция замкнутой системы:

$$\mathbf{G}(p) = \frac{\mathbf{X}(p)}{\mathbf{V}(p)} = (\mathbf{E}_n - \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{R})^{-1} \cdot \mathbf{B}, \quad (2.38)$$

Для синтеза модального регулятора объект, описываемый уравнениями (2.34), должен быть полностью управляемым и наблюдаемым.

Полная управляемость – это возможность перевода объекта из начального состояния \mathbf{X}_0 в любое наперед заданное положение \mathbf{X} при ограниченном управляющем воздействии.

Критерием полной управляемости по вектору состояния является равенство ранга его матрицы управляемости вида

$$\mathbf{Q}_y = (\mathbf{B} \quad \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1} \cdot \mathbf{B})$$

порядку системы n :

$$\text{rank } \mathbf{Q}_y = n. \quad (2.39)$$

Наблюдаемость – возможность по выходному вектору $\mathbf{Y}(t)$ определить вектор состояния $\mathbf{X}(t)$.

Критерий наблюдаемости: система, описываемая уравнениями (2.34), наблюдаема, если ранг ее матрицы наблюдаемости вида $\mathbf{Q}_H = (\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T \quad (\mathbf{A}^T)^2 \cdot \mathbf{C}^T \quad \dots \quad (\mathbf{A}^T)^{n-1} \cdot \mathbf{C}^T)$ равен порядку системы n :

$$\text{rank } \mathbf{Q}_H = n. \quad (2.40)$$

Для объекта с одним входом ($m = 1$), описываемого системой уравнений (2.36), модальный регулятор синтезируется следующим образом:

1. Рассматривается система, у которой вектор состояния наблюдаем и совпадает с вектором выхода, т.е. $\mathbf{C} = \mathbf{1}$, тогда $\mathbf{Y}(\mathbf{t}) = \mathbf{X}(\mathbf{t})$.

2. Следует задаться желаемым размещением корней для настройки системы автоматического регулирования. Это может быть биномиальное распределение корней, распределение по Баттерворсу, выбор корней по некоторому интегральному показателю качества и т.д.

Каждая система, настроенная на определенное размещение корней, характеризуется соответствующим характеристическим полиномом $\mathbf{D}(p)$ n -го порядка.

3. Передаточная функция объекта (2.37) записывается в виде

$$\mathbf{W}(p) = \frac{\mathbf{H}(p)}{F(p)}, \quad (2.41)$$

где $F(p) = \det(\mathbf{E}_n - \mathbf{A})$ – характеристический полином объекта, а $\mathbf{H}(p)$ – вектор-столбец, состоящий из n элементов, который требуется извлечь из (2.37).

4. Для того чтобы найти коэффициенты регулятора, необходимо характеристическое уравнение замкнутой системы (вывод формулы опущен)

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{H}(p) + F(p) = 0 \quad (2.42)$$

приравнять к выбранному ранее в п. 2 желаемому стандартному полиному n -го порядка

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{H}(p) + F(p) = D(p) \quad (2.43)$$

Конечное уравнение имеет вид:

$$\mathbf{R} \cdot \mathbf{H}(p) = D(p) - F(p). \quad (2.44)$$

из которого непосредственно находятся коэффициенты вектор-столбца R путем приравнивания коэффициентов, стоящих при одинаковых степенях p в левой и правой частях уравнения соответственно [14].

3. Получение математической модели объекта управления

3.1. Постановка задачи

Пусть математическая модель динамического объекта задана в виде

$$W(s) = \frac{s^n \cdot b_n + s^{n-1} \cdot b_{n-1} + \dots + b_0}{s^n \cdot a_n + s^{n-1} \cdot a_{n-1} + \dots + a_0}.$$

Имеется вектор Y экспериментальных значений переходного процесса (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Необходимо определить параметры передаточной функции объекта управления a_i , b_i на основании метода наименьших квадратов и метода вещественной интерполяции. Оценить адекватность полученных математических моделей и провести сравнительный анализ использованных методов.

3.1.1. Идентификация объекта управления методом вещественной интерполяции

На основании вектора экспериментальных значений Y может быть построена переходная характеристика объекта управления (см. рисунок 3.1).

На основании графика переходного процесса можно сделать вывод, что переходный процесс имеет колебательный характер, а, следовательно, передаточная функция такого объекта должна включать в себя как минимум пару комплексно-сопряженных корней. Таким образом, структуру передаточной функции объекта управления следует подбирать, начиная с колебательного звена второго порядка, последовательно увеличивая степени m и n числителя и знаменателя соответственно.

Основываясь на проведенном анализе можно предположить, что передаточная функция может быть представлена в следующих формах:

$$W_1(s) = \frac{b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0}; \quad W_2(s) = \frac{b_1 \cdot s + b_0}{a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0};$$

$$W_3(s) = \frac{b_0}{a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 s + a_0}; \quad W_4(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 s + a_0} \text{ и так далее.}$$

Вычисления показали, что идентификация объекта передаточными функциями вида $W_1(s)$, $W_2(s)$, $W_3(s)$ не позволяют описать экспериментальную характеристику с требуемой степенью точности, в то время как передаточная функция вида $W_4(s)$ обеспечивает желаемый вид переходного процесса. Таким образом, далее в работе будем рассматривать только передаточную функцию структуры $W_4(s)$.

Рассмотрим методику идентификации объекта управления со структурой

$$W(s) = \frac{b_1 \cdot s + b_0}{a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + 1}, \quad (3.1)$$

методом вещественной интерполяции.

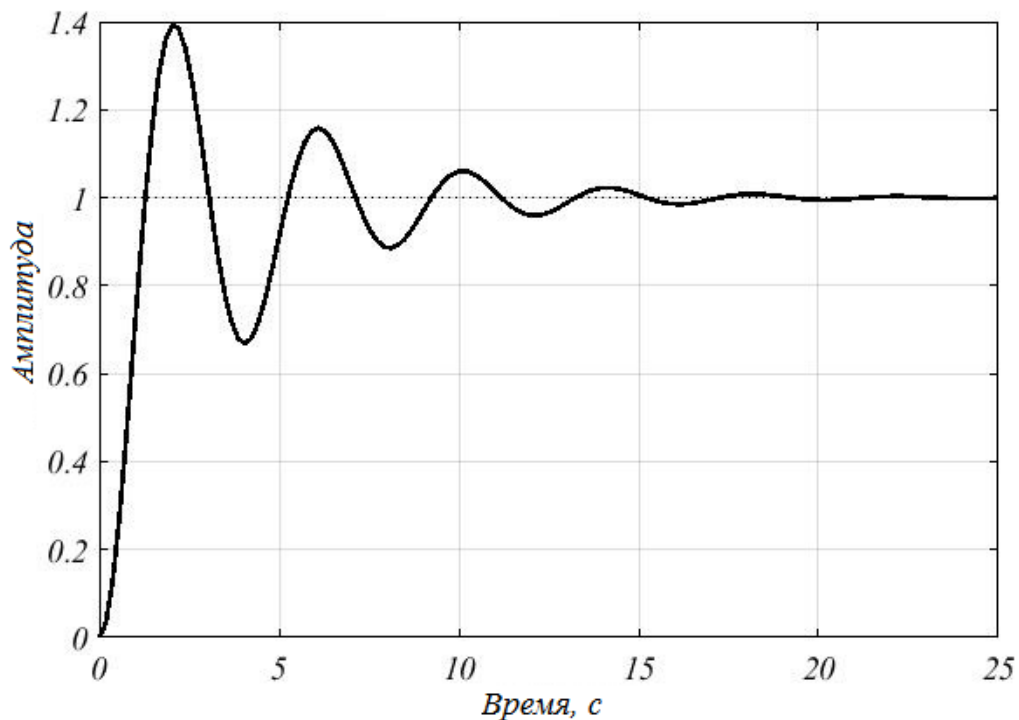


Рисунок 3.1 – График переходного процесса системы.

Техническая сторона задания заключается в определении коэффициентов b_0, b_1, a_3, a_2, a_1 . Данная задача решается в два этапа: на первом вычисляются $\eta = 5$ элементов ЧХ, на второй – значения коэффициентов вещественной передаточной функции в виде:

$$W(\delta) = \frac{b_1 \cdot \delta + b_0}{a_3 \cdot \delta^3 + a_2 \cdot \delta^2 + a_1 \cdot \delta + 1}, \quad (3.2)$$

Для выполнения первого этапа экспериментальные данные экспортируются в Mathcad и рассчитываются значения передаточной функции в точках.

Передаточная функция – это отношение выходного сигнала к входному сигналу системы, преобразованных по Лапласу при нулевых начальных условиях.

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (3.3)$$

где

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) \cdot e^{-st} dt, \quad X(s) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-st} dt, \quad (3.4)$$

Заменяя интеграл суммой и получим:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \sum_{i=0}^{\infty} y(t_i) \cdot e^{-st_i} \cdot (t_i - t_{i-1}), \\ X(s) &= \sum_{i=0}^{\infty} x(t_i) \cdot e^{-st_i} \cdot (t_i - t_{i-1}). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Следовательно, $W(s)$ примет вид:

$$W(s) = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} y(t_i) \cdot e^{-st_i} \cdot (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=0}^{\infty} x(t_i) \cdot e^{-st_i} \cdot (t_i - t_{i-1})}, \quad (3.6)$$

где $y(t_i)$ и t_i – экспериментальные данные.

Заменяя s на δ и построим график функции $W(\delta)$ (см. рисунок 3.2). По формуле (3.7) определяется интервал расположения узлов:

$$\delta_{\eta_{\min}} = 0,1 \cdot F(0), \quad \delta_{\eta_{\max}} = 0,2 \cdot F(0). \quad (3.7)$$

Примем значение последнего узла $\delta_\eta = 3$ в интервале $[\delta_1; \delta_\eta]$. По формуле (1.13) рассчитаем значения оставшихся узлов на интервале $[\delta_1; \delta_\eta]$.

Количество искомых параметров ПФ $\eta = 5$. Получим:

$$\delta_1 = 0, \quad \delta_2 = 0,75, \quad \delta_3 = 1,5, \quad \delta_4 = 2,25, \quad \delta_5 = 3.$$

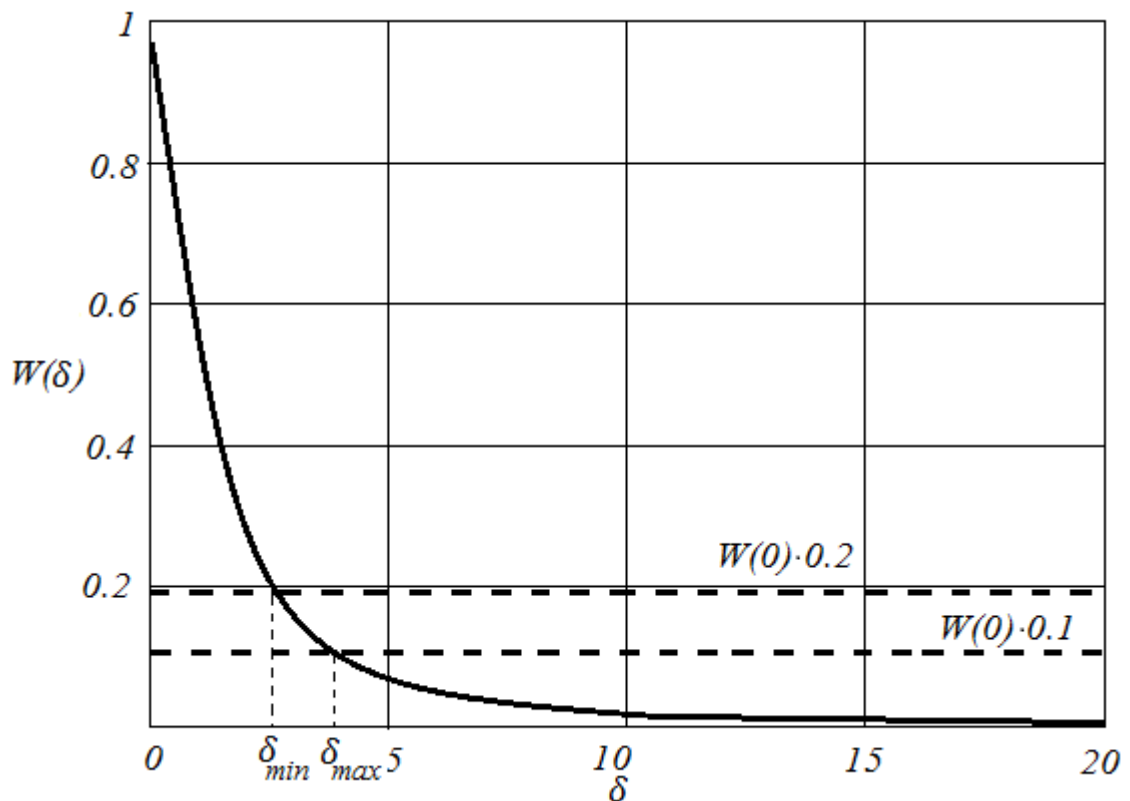


Рисунок 3.2 – График функции $W(\delta)$ при $m < n$.

На основании формулы (1.16) и получим:

$$\{W(\delta_i)\}_5 = \{0,972, 0,635, 0,386, 0,242, 0,161\}.$$

Определив численную модель, перейдем ко второму этапу – вычислению коэффициентов. Для этого необходимо составить СЛАУ вида (3.8) и найти ее решение:

$$\begin{aligned}
W(\delta_5) &= \frac{b_1 \cdot \delta_5 + b_0}{a_3 \cdot \delta_5^3 + a_2 \cdot \delta_5^2 + a_1 \cdot \delta_5 + 1}; \\
W(\delta_4) &= \frac{b_1 \cdot \delta_4 + b_0}{a_3 \cdot \delta_4^3 + a_2 \cdot \delta_4^2 + a_1 \cdot \delta_4 + 1}; \\
W(\delta_3) &= \frac{b_1 \cdot \delta_3 + b_0}{a_3 \cdot \delta_3^3 + a_2 \cdot \delta_3^2 + a_1 \cdot \delta_3 + 1}; \\
W(\delta_2) &= \frac{b_1 \cdot \delta_2 + b_0}{a_3 \cdot \delta_2^3 + a_2 \cdot \delta_2^2 + a_1 \cdot \delta_2 + 1}; \\
W(\delta_1) &= \frac{b_1 \cdot \delta_1 + b_0}{a_3 \cdot \delta_1^3 + a_2 \cdot \delta_1^2 + a_1 \cdot \delta_1 + 1}.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Решение (3.8) дает искомые параметры $a_3 = 1,128$, $a_2 = 1,064$, $a_1 = 2,987$, $b_1 = 2,356$, $b_0 = 0,989$. С учетом полученных параметров передаточная функция (3.1) примет вид

$$W_{ident}(s) = \frac{2,356 \cdot s + 0,989}{1,128 \cdot s^3 + 1,064 \cdot s^2 + 2,987 \cdot s + 1}.$$

построим переходную характеристику идентифицированной передаточной функции объекта управления

На рисунке 3.3 изображены графики переходных процессов экспериментальной характеристики и идентифицированной передаточной функции.

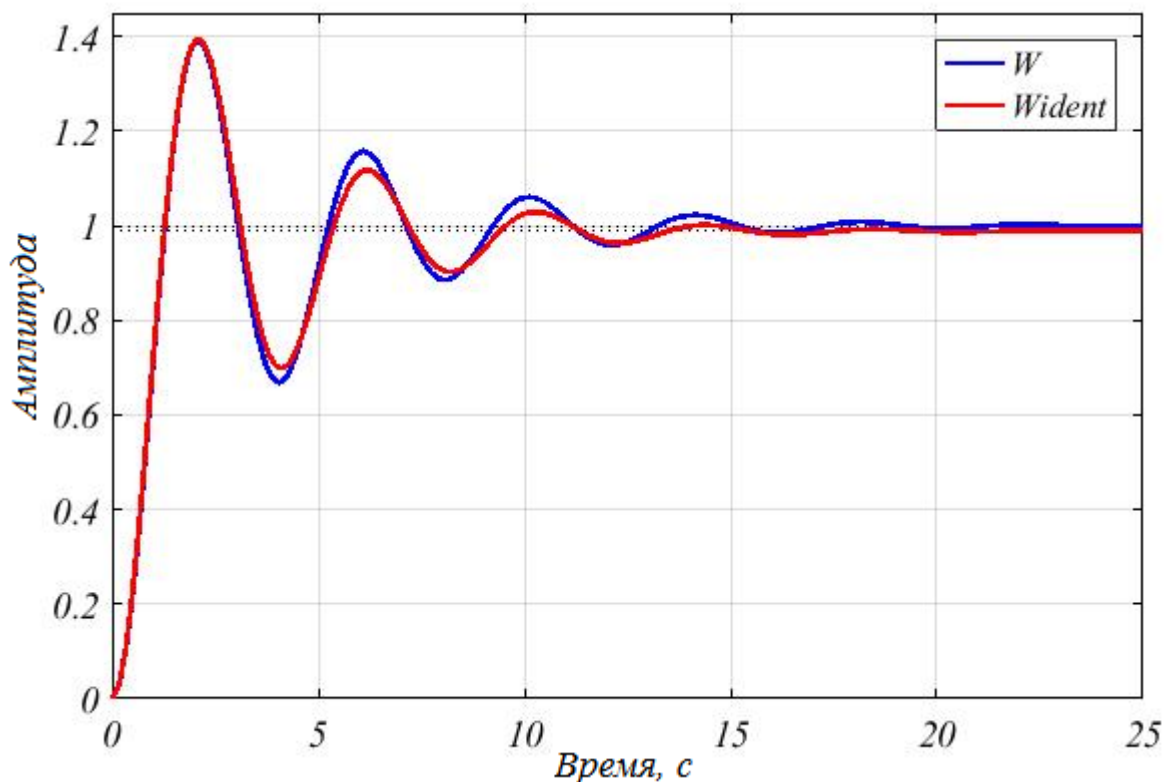


Рисунок 3.3 – Графики переходных процессов экспериментальной характеристики и идентифицированной передаточных функции.

В ходе проделанной работы были получены коэффициенты передаточной функции по экспериментальным данным с небольшой погрешностью.

В результате расчетов были получены коэффициенты передаточной функции по экспериментальным данным, рассчитана величина среднеквадратичного отклонения $\sigma = 0,03$.

На основе вещественного интерполяционного метода был разработан алгоритм идентификации линейных непрерывных объектов. Достоинства данного метода: минимальные затраты времени при проектировании системы автоматического управления, а также простота реализации данного метода. Недостаток данного метода заключается в том, что при получении экспериментальных значений переходной характеристики некоторого объекта управления или системы в целом необходимо учитывать то, что точность данного метода напрямую зависит от периода дискретизации

выбранного временного интервала или размерности вектора экспериментальных значений.

3.1.2. Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов

На рисунке 3.4 представлен график переходного процесса, построенный на основании вектора экспериментальных данных \mathbf{Y} (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

На основании проведенного анализа представим (3.1) в виде:

$$W(s) = \frac{d \cdot s + 1}{(s + a) \cdot (s + b - j \cdot c) \cdot (s + b + j \cdot c)}. \quad (3.9)$$

Применим к (3.9) обратное преобразование Лапласа и получим ее выражение в аналитическое форме с учетом искомым коэффициентов.

$$f(t, a, b, c, d) = L^{-1}\{W(s)\} = \frac{1}{a \cdot (b^2 + c^2)} + \frac{a \cdot d - 1}{a^3 - 2 \cdot a^2 \cdot b + a \cdot b^2 + a \cdot c^2} \cdot e^{-at} - \left(\frac{\sin(c \cdot t) \cdot (b^3 \cdot d - b^2 + c^2 + a \cdot b - a \cdot b^2 \cdot d - a \cdot c^2 \cdot d + b \cdot c^2 \cdot d)}{c \cdot (b^2 + c^2) \cdot (a^2 - 2 \cdot a \cdot b + b^2 + c^2)} + \frac{\cos(c \cdot t) \cdot (a^2 + d \cdot a \cdot b^2 - 2 \cdot a \cdot b + d \cdot a \cdot c^2)}{a \cdot (b^2 + c^2) \cdot (a^2 - 2 \cdot a \cdot b + b^2 + c^2)} \right) \cdot e^{-bt}. \quad (3.10)$$

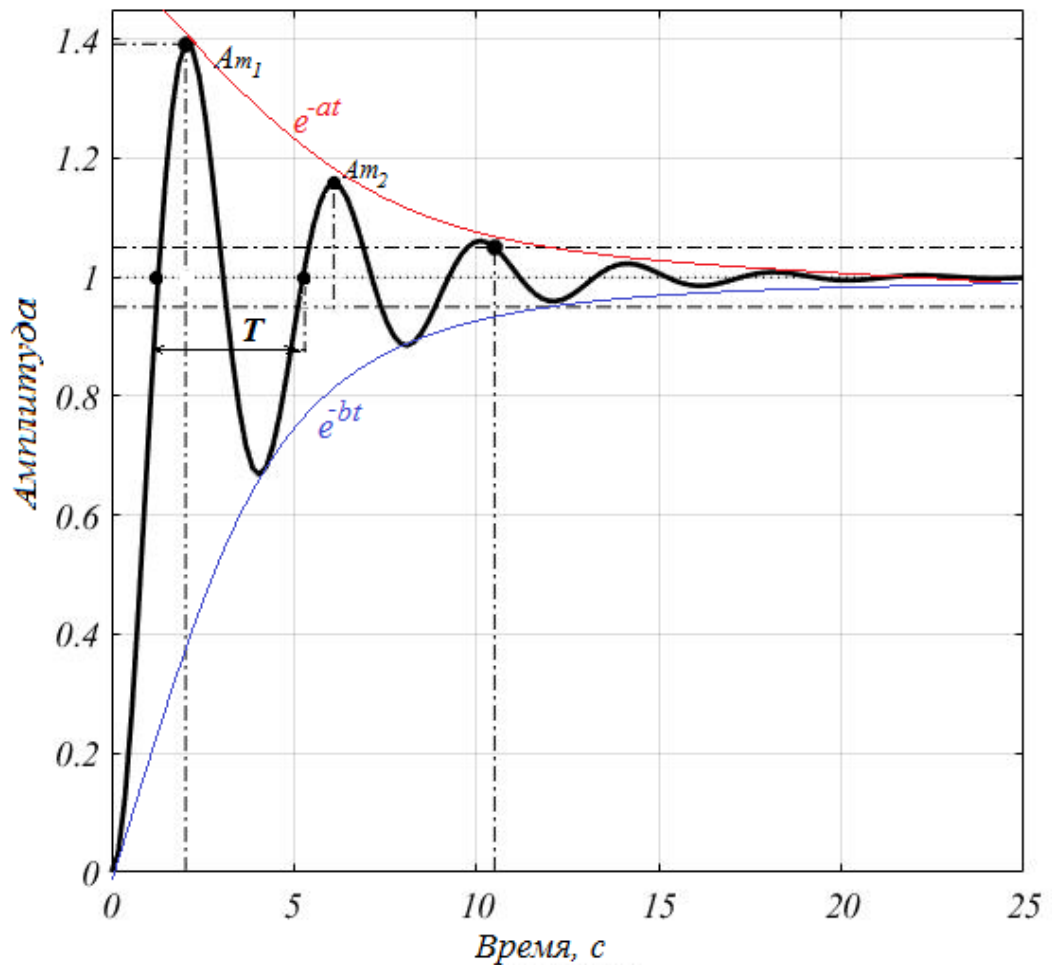


Рисунок 3.4 – График переходного процесса исследуемой функции.

Так как передаточная функция имеет вид (3.9), то дальнейшие преобразования и расчеты сильно усложняются, в частности нахождение производных по каждому неизвестному коэффициенту в общем виде. Поэтому для проведения вычислений была использована встроенная функция Mathcad - ***LeastSquaresFit***($v_x, v_y, F, \text{guess}, \text{conf}, [\text{Stdy}], [\text{Acc}]$). Для того чтобы воспользоваться данной функцией необходимо иметь экспериментальные данные, представление передаточной функции в форме обратного преобразования Лапласа, вектор приближенных значений неизвестных коэффициентов и доверительный интервал. Основной сложностью использования данной встроенной функции является выбор вектора приближенных значений. Для выбора наиболее приближенного вектора необходимо проанализировать формулу (3.10) и график переходного процесса (см. рисунок 3.4).

Коэффициент c характеризует частоту колебания системы, функции $e^{-a \cdot t}, e^{-b \cdot t}$ являются огибающими колебания переходного процесса. Чем больше значения a, b тем быстрее график переходного процесса достигнет установившегося значения. Значение d находится только в числителе, поэтому от него не зависит устойчивость системы, он может оказывать влияние только на вид переходного процесса. Таким образом, из графика переходного процесса. Таким образом, из графика переходного процесса (см. рисунок 3.4) необходимо определить следующие прямые показатели качества: период колебаний T и декремент затухания ξ .

$$T = 5,24 - 1,28 = 3,96 \text{ с.} \quad (3.11)$$

$$\frac{A_{m1}}{A_{m2}} = \xi = e^{-\delta \cdot T}, \quad (3.12)$$

где $A_{m1} = 1,3828 - 1 = 0,3828$, $A_{m2} = 1,1586 - 1 = 0,1586$, $\frac{A_{m1}}{A_{m2}} = 2,413$, $T = 3,96 \text{ с.}$

Следовательно, $\delta = -0,225$ – коэффициент затухания.

Частота колебаний равна

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = 1,585 \text{ с}^{-1}.$$

Значения δ и ω – характеризуют колебания переходного процесса, то есть $p_{1,2} = \delta + j\omega$, где в данном случае $\omega = c$, $\delta = b$.

В (3.10) составляющая $\frac{1}{a \cdot (b^2 + c^2)}$ – характеризует устойчивое значение системы, следовательно, мы можем найти значение корня a , подставив найденные выше значения b и c .

$$\frac{1}{a \cdot ((-0,2225)^2 + (1,585)^2)} = 1,$$

следовательно, $a = -0,3879$.

Таким образом, получен вектор приближенных значений: $[-0,3879, -0,2225, 1,585, 1]$. Значение параметра \mathbf{d} выбирается равным единице и при необходимости варьируется.

В результате вычислений получаются следующие значения параметров:

$$a = 0,4, b = 0,25, c = 1,561, d = 1,999.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} W_{ident}(s) &= \frac{1,999 \cdot s + 1}{(s + 0,4) \cdot (s + 0,25 - j \cdot 1,561) \cdot (s + 0,25 + j \cdot 1,561)} = \\ &= \frac{1,999 \cdot s + 1}{s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 2,699 \cdot s + 1}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Построим в одних осях графики переходных процессов экспериментальной характеристики и идентифицированной передаточной функции (см. рисунок 3.5).

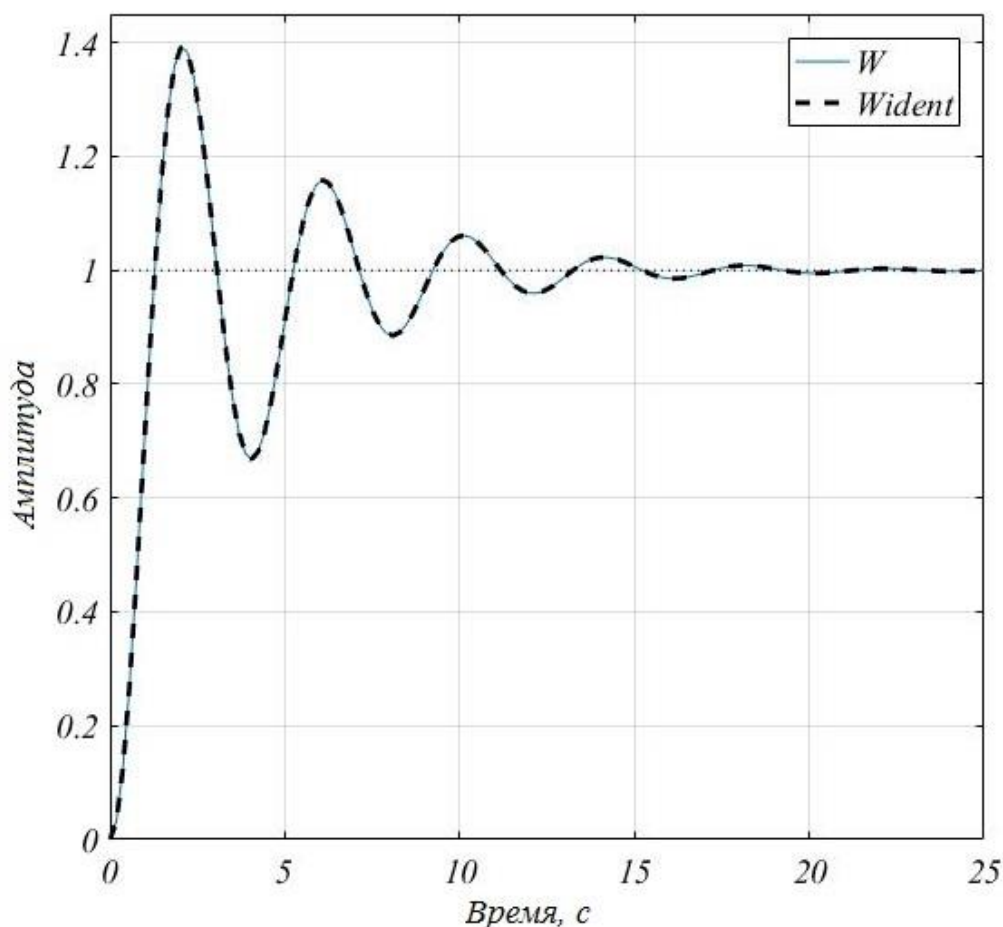


Рисунок 3.5 Графики переходных процессов экспериментальной характеристики и идентифицированной передаточных функции.

В результате расчетов были получены коэффициенты передаточной функции на основании вектора экспериментальных значений. Представленный метод обладает достаточно высокой степенью точности по сравнению с методом вещественной интерполяции, величина среднеквадратичного отклонения $\sigma = 4,6 \cdot 10^{-6}$. Поэтому главным достоинством данного метода является его точность. Однако, данный метод обладает сравнительной сложностью реализации, которая связана с необходимостью проведения предварительного анализа и расчета прямых показателей качества переходной характеристики объекта, без которого выбор вектора приближенных значений становится практически нерешаемой задачей.

4. Решение задач синтеза

4.1. Постановка задачи

Имеется передаточная функция объекта управления (3.13), которую далее будем обозначать $W(s)$. Необходимо определить настроечные параметры k_i передаточной функции регулятора $W_p(s)$, который будет обеспечивать в системе следующие прямые и косвенные показатели качества:

1. Перерегулирование $\sigma_{\max}, \%$ в системе не должно превышать $\sigma_{\text{доп}} = 15\%$;
2. Время переходного процесса T_p не должно превышать $T_{p,\text{доп}} = 5$ с;
3. Коэффициент передачи $K_n = 1$;
4. Колебательность $\mu < 1,6$.

4.1.1. Синтез линейного регулятора по принципу динамической компенсации

Рассмотрим задачу синтеза регулятора по принципу динамической компенсации. Для этого из (3.13) необходимо определить передаточную

функцию разомкнутой системы $W_o(s)$, с учетом единичной отрицательной обратной связи

$$W_o(s) = \frac{2 \cdot s + 1}{s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s} \quad (4.1)$$

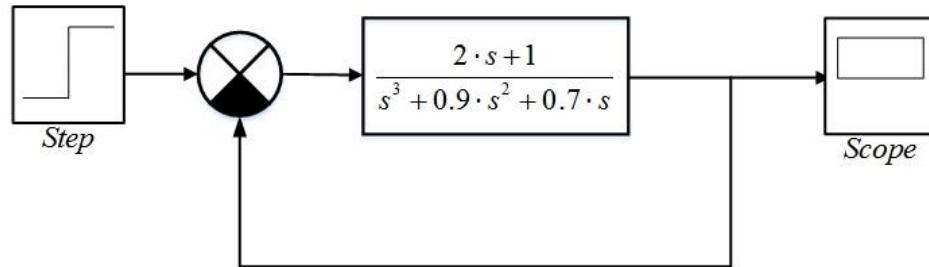


Рисунок 4.1 – Структурная схема системы автоматического управления, построенная в MATLAB.

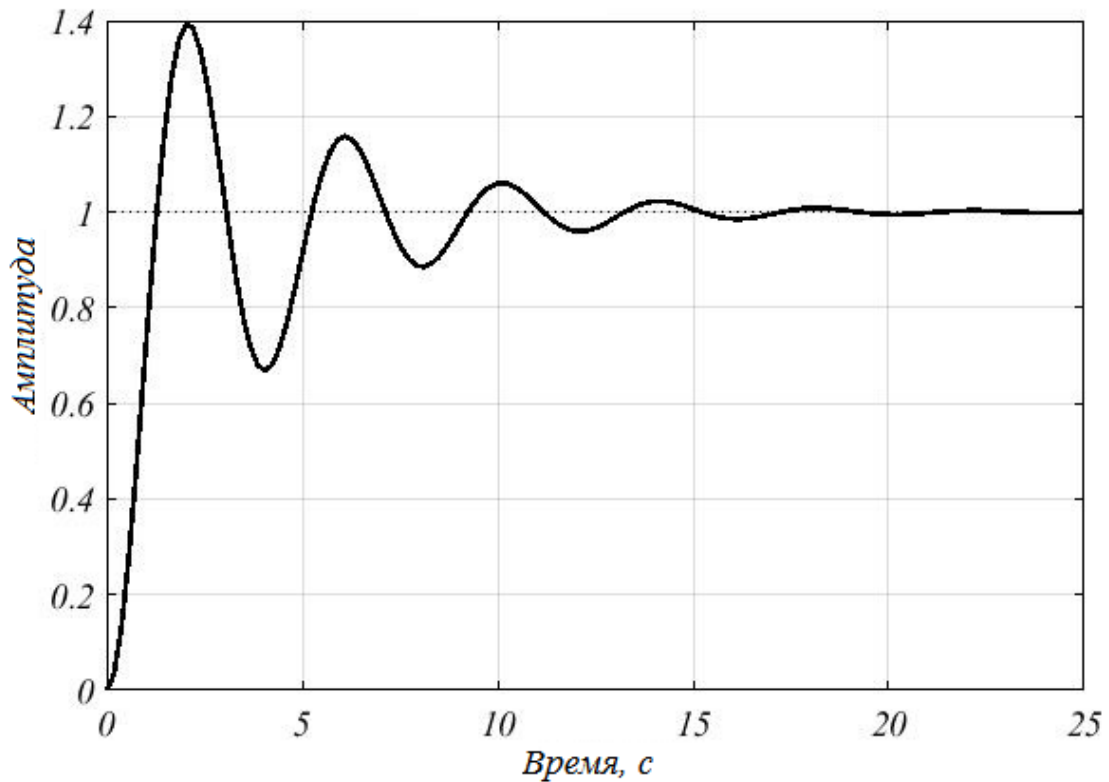


Рисунок 4.2 – График переходного процесса нескорректированной системы.

По рисунку 4.2 можно определить быстродействие системы и перерегулирование системы: $T_p = 10,5$ с и $\sigma = \frac{1,39 - 1}{1} = 39\%$.

Колебательность системы может быть определена на основании значений корней характеристического полинома системы

$$s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 2,7 \cdot s + 1 = 0$$

$$s_1 = -0,4; \quad s_{2,3} = -0,25 \pm j \cdot 1,561.$$

Таким образом, колебательность системы определяется как

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{1,561}{0,25} = 6,244.$$

Данные показатели качества не удовлетворяют желаемым показателям качества системы, поэтому для придания системе желаемых динамических характеристик необходима настройка регулятора.

Согласно методу стандартных коэффициентов эталонная передаточная функция замкнутой системы имеет вид (таблица 2.2):

$$W^o(s) = \frac{6,35 \cdot \omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3}{s^3 + 5,1 \cdot \omega_0 \cdot s^2 + 6,35 \cdot \omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3}.$$

Пусть $T_p = 2$ с, тогда $\omega_0 = \frac{\tau_0}{T_p} = \frac{5}{2} = 2,5$. Следовательно, передаточная

функция замкнутой системы примет вид:

$$W^o(s) = \frac{39,7 \cdot s + 15,6}{s^3 + 12,7 \cdot s^2 + 39,7 \cdot s + 15,6}.$$

Учитывая, что

$$W_p^o(s) = \frac{W^o(s)}{1 - W^o(s)} = \frac{39,7 \cdot s + 15,6}{s^3 + 12,7 \cdot s^2}.$$

Определим $W_o^{-1}(s)$:

$$W_o^{-1}(s) = \left(\frac{2 \cdot s + 1}{s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s} \right)^{-1} = \frac{s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s}{2 \cdot s + 1}.$$

Зная $W_p^o(s)$ и $W_o^{-1}(s)$ определим ПФ регулятора:

$$\begin{aligned} W_{\text{кy}}(s) &= W_o^{-1}(s) \cdot W_p^o(s) = \frac{s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s}{2 \cdot s + 1} \cdot \frac{39,7 \cdot s + 15,6}{s^3 + 12,7 \cdot s^2} = \\ &= \frac{3,97 \cdot s^3 + 5,133 \cdot s^2 + 4,183 \cdot s + 1,092}{0,2 \cdot s^3 + 2,64 \cdot s^2 + 1,27 \cdot s}. \end{aligned}$$

Передаточную функцию замкнутой скорректированной системы $W_3(s)$ (рисунок 4.3):

$$W_9(s) = \frac{W_{ky}(s) \cdot W_O(s)}{1 + W_{ky}(s) \cdot W_O(s)}$$

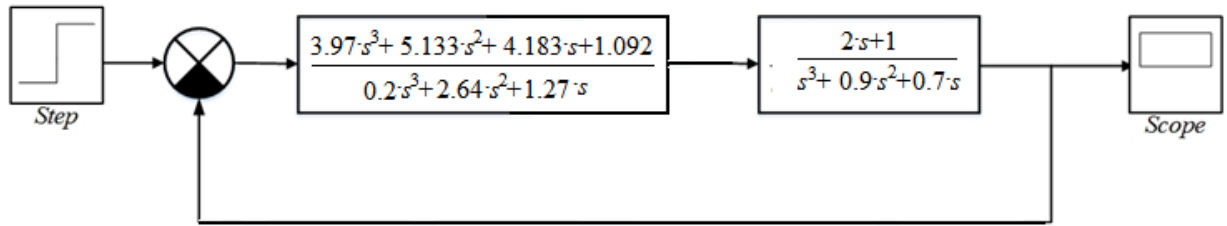


Рисунок 4.3 - Структурная схема системы автоматического управления с корректирующим устройством, построенная в MATLAB.

График переходного процесса скорректированной системы представлен на рисунке 4.4.

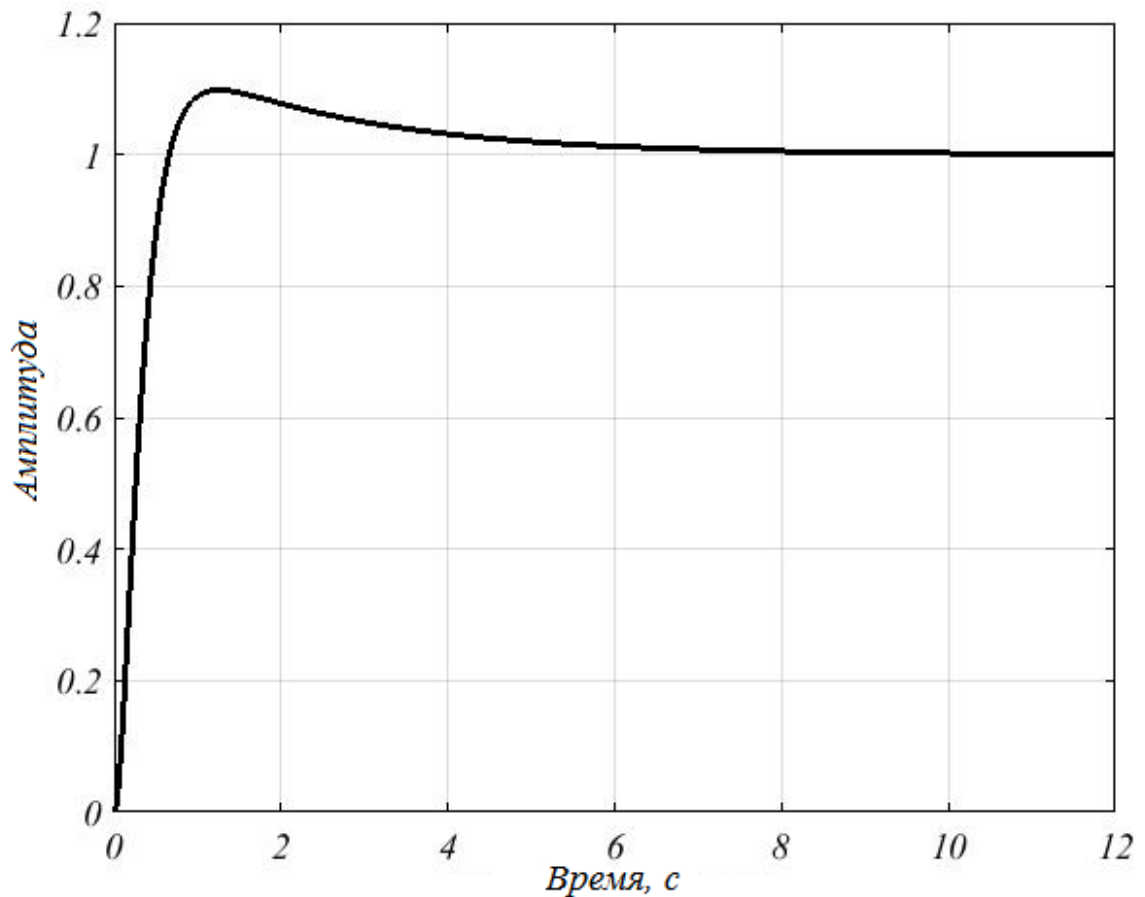


Рисунок 4.4 – График переходного процесса скорректированной системы.

Показатели качества скорректированной системы:

1. Перерегулирование $\sigma = 9,81 \%$;
2. Время переходного процесса $T_p = 2.98 \text{ с}$;

3. Коэффициент передачи $K_{\Pi} = 1$;
4. Колебательность $\mu = 1.56$.

Показатели качества скорректированной системы удовлетворяют требованиям технического задания.

Проанализируем полученный результат с точки зрения эффективности применения принципа динамической компенсации для синтеза корректирующих устройств.

1. КУ является весьма сложным, поскольку должно включать две части: компенсирующую (обратная передаточная функция объекта) и эталонную (ПФ разомкнутой эталонной системы).

2. Регулятор, в общем случае, содержит дифференцирующие звенья, входящие в составляющую $W_o(s)^{-1}$. Эти звенья физически трудно реализуемы.

3. Метод достаточно эффективен, так как показатели качества скорректированной системы удовлетворяют требуемым.

4.1.2. Расчет линейного регулятора на основании уравнений синтеза

Рассчитаем параметры регулятора с помощью уравнения синтеза. Передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем определяются уравнениями (4.1) и (3.13) соответственно

Из передаточной функции (4.1) определяются $A(s)$ и $B(s)$:

$$A(s) = s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s;$$

$$B(s) = 2 \cdot s + 1.$$

Следовательно, эталонный характеристический полином в общем виде равен:

$$D(s) = d_0 + d_1 \cdot s + d_2 \cdot s^2 + d_3 \cdot s^3 + d_4 \cdot s^4 + d_5 \cdot s^5 + s^6.$$

Положим, что $T_p = 8,5$ с, тогда $\omega_0 = \frac{\tau_0}{T_p} = \frac{10,6}{8,5} = 1,247$. Передаточная

функция в общем виде для корректирующего устройства имеет вид:

$$W_{ky}(s) = \frac{r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2}{c_0 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2 + s^3}$$

На основании метода стандартных коэффициентов, в качестве эталонной ПФ выберем ПФ вида

$$W_9(s) = \frac{\omega_0^6}{s^6 + 6 \cdot \omega_0 \cdot s^5 + 15 \cdot \omega_0^2 \cdot s^4 + 20 \cdot \omega_0^3 \cdot s^3 + 15 \cdot \omega_0^4 \cdot s^2 + 6 \cdot \omega_0^5 \cdot s + \omega_0^6}$$

Подставляя ω_0 получим

$$W_9(s) = \frac{3,761}{s^6 + 7,482 \cdot s^5 + 123,33 \cdot s^4 + 38,79 \cdot s^3 + 136,28 \cdot s^2 + 18,1 \cdot s + 3,761} = \frac{P(s)}{D(s)}$$

Уравнение синтеза в развернутой форме имеет вид:

$$\begin{aligned} (s^3 + 0,9 \cdot s^2 + 0,7 \cdot s) \cdot (c_0 + c_1 \cdot s + c_2 \cdot s^2 + s^3) + (2 \cdot s + 1)(r_0 + r_1 \cdot s + r_2 \cdot s^2) = \\ = s^6 + 7,482 \cdot s^5 + 23,33 \cdot s^4 + 38,79 \cdot s^3 + 18,1 \cdot s + 3,761. \end{aligned} \quad (4.2)$$

На основании (4.2) формируется система линейных алгебраических уравнений для расчета неизвестных коэффициентов (4.3):

$$\begin{cases} a_0 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_0 = d_0; \\ a_0 \cdot c_1 + a_1 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_1 + b_1 \cdot r_0 = d_1; \\ a_0 \cdot c_2 + a_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot c_0 + b_0 \cdot r_2 + b_1 \cdot r_1 = d_2; \\ a_0 + a_3 \cdot c_0 + a_1 \cdot c_2 + a_2 \cdot c_1 + b_1 \cdot r_2 = d_3; \\ a_1 + a_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot c_1 = d_4; \\ a_2 + a_3 \cdot c_2 = d_5. \end{cases} \quad (4.3)$$

Вводя в рассмотрение матрицу-столбец $\mathbf{q} = (c_0, c_1, c_2, r_0, r_1, r_2)$, систему (4.3) для определения неизвестных коэффициентов можно переписать в виде:

$$\begin{pmatrix} a_0 & 0 & 0 & b_0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 & 0 \\ a_2 & a_1 & a_0 & 0 & b_1 & b_0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & b_1 \\ 0 & a_3 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ r_0 \\ r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 - a_0 \\ d_4 - a_1 \\ d_5 - a_2 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Решение системы (4.4) дает искомые параметры регулятора:

$$c_0 = 6,136, c_1 = 16,703, c_2 = 6,582, r_0 = 3,761, r_1 = 6,279, r_2 = 6,506.$$

Таким образом, передаточная функция корректирующего устройства имеет вид:

$$W_{\text{кy}}(s) = \frac{6,506 \cdot s^2 + 6,279 \cdot s + 3,761}{s^3 + 6,582 \cdot s^2 + 16,703 \cdot s + 3,136}$$

Передаточная функция замкнутой системы с корректирующим устройством в общем виде равна:

$$W_{\text{з}}(s) = \frac{W_{\text{кy}}(s) \cdot W_{\text{о}}(s)}{1 + W_{\text{кy}}(s) \cdot W_{\text{о}}(s)}$$

Структурная схема скорректированной системы приведена на рисунке 4.5. Построим в одних координатах графики экспериментальной переходной характеристики и скорректированной передаточной функций (рисунок 4.6).

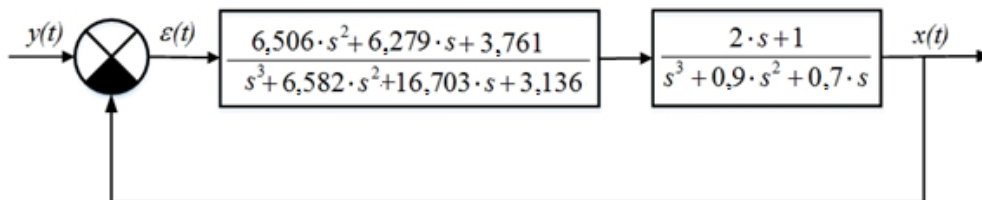


Рисунок 4.5 – Структурная схема скорректированной системы.

Показатели качества скорректированной системы:

1. Перерегулирование $\sigma = 13,5\%$;
2. Время переходного процесса $T_p = 4,45$ с;
3. Коэффициент передачи $K_{\text{п}} = 1$;
4. Колебательность $\mu = 1,4$.

Показатели качества скорректированной системы удовлетворяют требованиям технического задания.

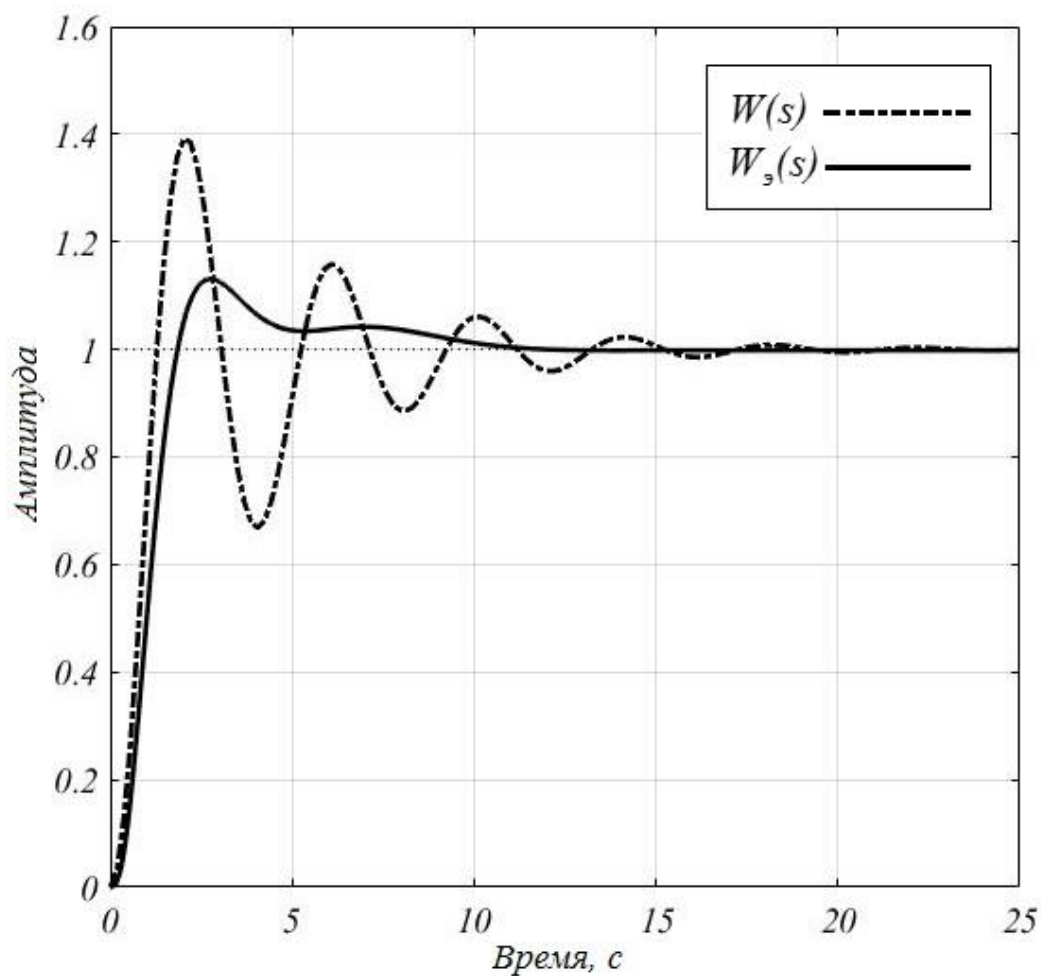


Рисунок 4.6 – Графики переходных процессов реальной и скорректированной систем.

Данный метод синтеза системы имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести то, что данный метод физически реализуем. К недостаткам можно отнести следующее: сложность расчета регулятора.

4.1.3. Модальный синтез линейного регулятора

Рассчитаем параметры регулятора с помощью модального синтеза. Передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем определяются уравнениями (4.1) и (3.13) соответственно.

Задача заключается в синтезе непрерывного модального регулятора по полному вектору состояния, обеспечивающего заданное время переходного процесса.

Сформируем матрицу \mathbf{A} , матрицу \mathbf{B} и матрицу \mathbf{C} . Для этого приведем передаточную функцию замкнутой системы к виду (разделим числитель и знаменатель на $a_n = 1$, где $n = 3$):

$$s \rightarrow p$$

$$W(p) = \frac{2 \cdot p + 1}{p^3 + 0,9 \cdot p^2 + 2,7 \cdot p + 1}.$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -2,7 & -0,9 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = (1 \ 2 \ 0).$$

Проверим данный объект на управляемость и наблюдаемость. Для начала определим управляемость системы:

$$\mathbf{Q}_y = [\mathbf{B} \ \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \ \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B}],$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -2,7 & -0,9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -0,9 \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

$$\mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -2,7 & -0,9 \end{bmatrix}^2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -0,9 \\ -1,89 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, $\mathbf{Q}_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -0,9 \\ 1 & -0,9 & -1,89 \end{bmatrix}$. Определим ранг матрицы \mathbf{Q}_y по

методу перебора миноров.

Если есть хотя бы один элемент матрицы, отличный от нуля, то ранг матрицы как минимум равен единице (так как есть минор первого порядка, не равный нулю). Далее перебираем миноры второго порядка. Если все миноры второго порядка равны нулю, то ранг матрицы равен единице. Если существует хотя бы один ненулевой минор второго порядка, то переходим к перебору миноров третьего порядка, а ранг матрицы как минимум равен двум. Далее по аналогии.

Матрица \mathbf{Q}_y ненулевая, следовательно, ее ранг не меньше единицы.

Миноры второго порядка равны:

$$M_2^1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \cdot 1 - 0 \cdot 0 = 0, \quad M_2^2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0,9 \end{vmatrix} = 0 \cdot (-0,9) - 0 \cdot 1 = 0,$$

$$M_2^3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -0,9 \end{vmatrix} = 0 \cdot (-0,9) - 1 \cdot 1 = -1,$$

так как M_2^3 не равен нулю, то ранг матрицы не меньше двух. Далее найдем минор третьего порядка:

$$M_3 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -0,9 \\ 1 & -0,9 & -1,89 \end{vmatrix} = 0 \cdot \begin{vmatrix} 1 & -0,9 \\ -0,9 & -1,89 \end{vmatrix} - 0 \cdot \begin{vmatrix} 0 & -0,9 \\ 1 & -1,89 \end{vmatrix} + 1 \cdot \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -0,9 \end{vmatrix} = -1.$$

Минор третьего порядка не равен нулю, следовательно, ранг матрицы равен $r=3$, что удовлетворяет критерию полной управляемости, так как порядок системы $n=3$.

Данная система наблюдаема, если ранг матрицы вида $\mathbf{Q}_H = (\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T \quad (\mathbf{A}^T)^2 \cdot \mathbf{C}^T)$ будет равен 3. Найдем матрицу \mathbf{Q}_H .

$$\mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad (\mathbf{A}^T)^2 \cdot \mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} -2 \\ -5,4 \\ -0,8 \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{Q}_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -5,4 \\ 0 & 2 & -0,8 \end{bmatrix}.$$

Найдем ранг матрицы \mathbf{Q}_H . Матрица \mathbf{Q}_H ненулевая, следовательно, ее ранг не меньше единицы. Миноры второго порядка равны:

$$M_2^1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = 1 \cdot 1 - 2 \cdot 0 = 1,$$

так как M_2^1 не равен нулю, то не нужно находить остальные миноры второго порядка. Ранг матрицы не меньше двух. Далее найдем минор третьего порядка:

$$M_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -5,4 \\ 0 & 2 & -0,8 \end{vmatrix} = 1 \cdot \begin{vmatrix} 1 & -5,4 \\ 2 & -0,8 \end{vmatrix} - 0 \cdot \begin{vmatrix} 2 & -5,4 \\ 0 & -0,8 \end{vmatrix} - 2 \cdot \begin{vmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{vmatrix} = 2.$$

Минор третьего порядка не равен нулю, следовательно, ранг матрицы равен $r=3$, что удовлетворяет критерию наблюдаемости, так как порядок системы равен $n=3$.

Так как система полностью управляема и наблюдаема, то мы можем приступить к синтезу регулятора. Для начала составим операторно-структурную схему в среде MATLAB (рисунок 4.7).

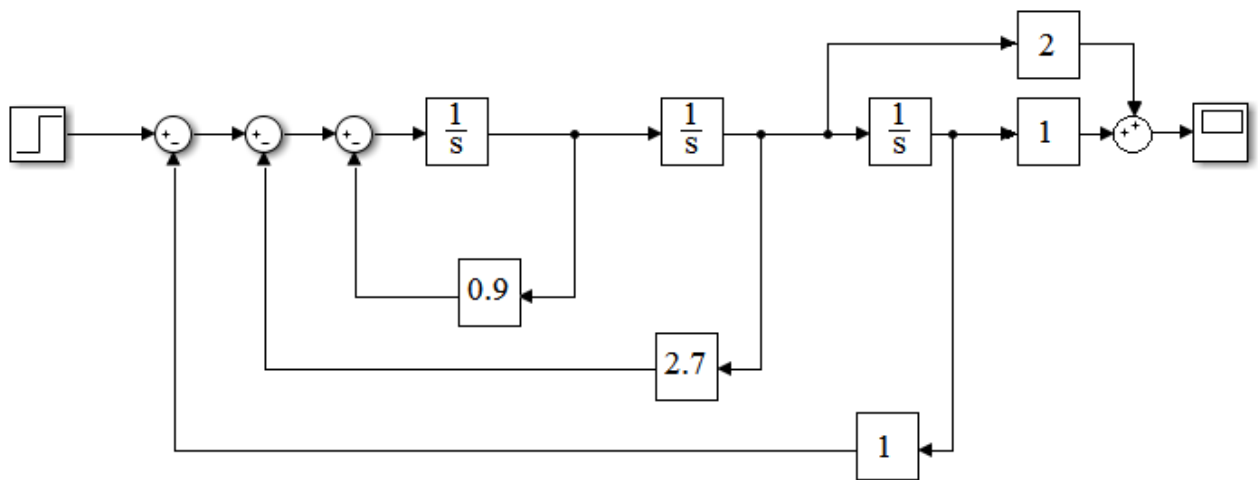


Рисунок 4.7 – Операторно-структурная схема исследуемой системы в численном виде.

Для того, чтобы синтезировать модальный регулятор по полному вектору состоянию, нужно в ОСС из выходов интеграторов провести отрицательную обратную связь с коэффициентами регулятора ко входу. Коэффициенты регулятора рассчитываются по методике биномиального распределения корней замкнутой системы, так как исследуемая система является системой третьего порядка, то желаемый характеристический полином имеет вид:

$$D(p) = p^3 + 3 \cdot \omega_0 \cdot p^2 + 3 \cdot \omega_0^2 p + \omega_0^3.$$

Пусть $T_p = 6$ с, тогда $\omega_0 = \frac{\tau_0}{T_p} = \frac{6}{6} = 1$. Тогда

$$D(p) = p^3 + 3 \cdot p^2 + 3 \cdot p + 1. \quad (4.3)$$

Найдем характеристическое уравнение ОСС матричного характеристического уравнения:

$$M(p) = \det(p \cdot \mathbf{E}_n - \mathbf{A} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{K}),$$

Где $\mathbf{K} = [K_1 \ K_2 \ K_3]$ – неизвестные коэффициенты регулятора. Получим:

$$M(p) = p^3 + (K_3 + 0,9) \cdot p^2 + (K_2 + 2,7) \cdot p + K_1 + 1. \quad (4.4)$$

Приравняв коэффициенты при одинаковых степенях p в уравнениях (4.3) и (4.4) определяем коэффициенты обратных связей. Они имеют следующие значения:

$$K_3 + 0,9 = 3, \quad K_2 + 2,7 = 3, \quad K_1 + 1 = 1,$$

где $K_3 = 2,1$, $K_2 = 0,3$, $K_1 = 0$.

На рисунке 4.8 приведена ОСС с учетом коэффициентов регулятора рассчитанных по методу биннома Ньютона.

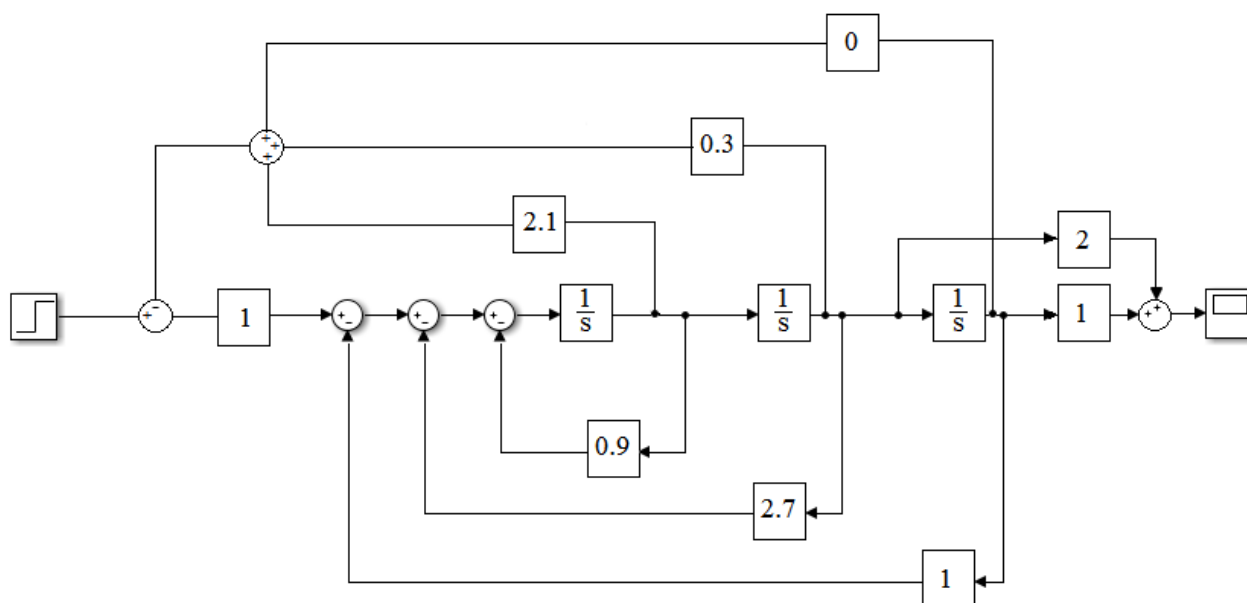


Рисунок 4.8 – Операторно-структурная схема исследуемой системы в численном виде с регулятором.

На рисунке 4.9 изображены графики переходных процессов экспериментальной характеристики и скорректированной системы.

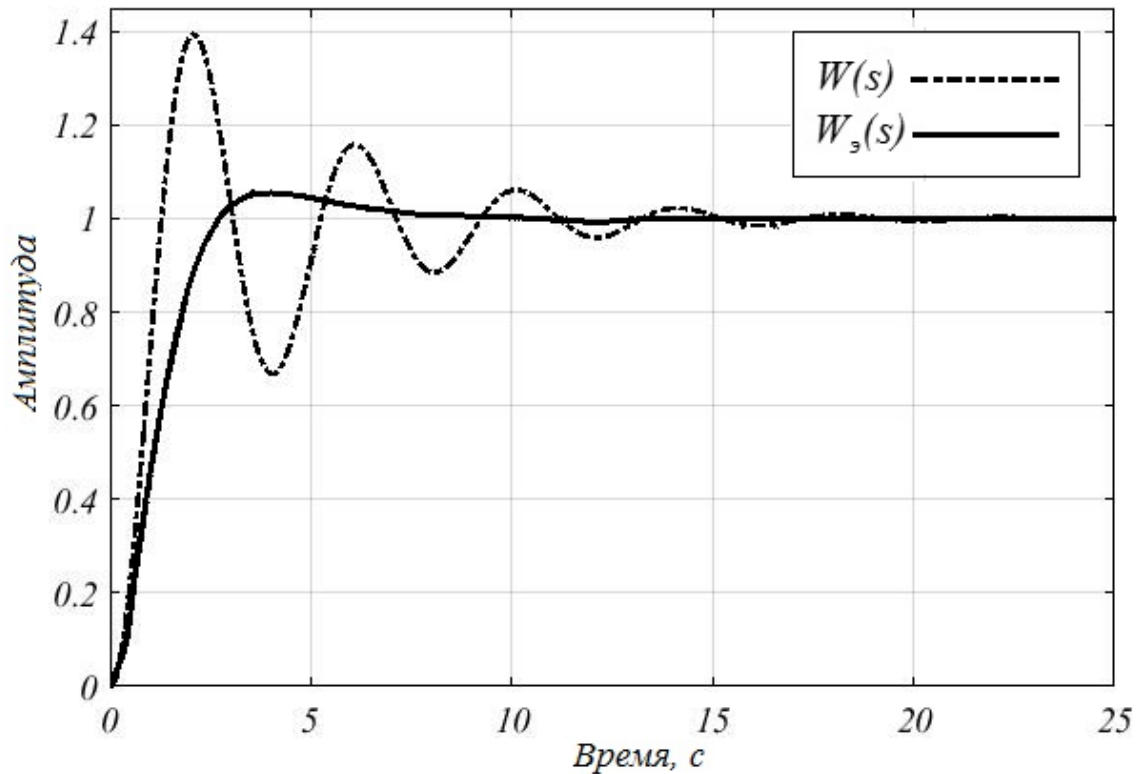


Рисунок 4.9– Графики переходных процессов реальной и скорректированной систем.

Показатели качества скорректированной системы:

1. Перерегулирование $\sigma = 5\%$;
2. Время переходного процесса $T_p = 4,6\text{с}$;
3. Коэффициент передачи $K_n = 1$;
4. Колебательность $\mu \approx 0$.

Данные показатели качества удовлетворяют требованиям технического задания.

Данный метод синтеза системы имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам можно отнести его физическую реализуемость и обеспечение наилучших динамических характеристик переходного процесса по сравнению с методом динамической компенсации и методом расчета регуляторов на основании уравнений синтеза. К недостаткам можно отнести следующее: дополнительный анализ системы (проверка на управляемость и наблюдаемость).

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности. В работе рассмотрены методы идентификации параметров объекта управления и синтез системы. Объектом исследования являются экспериментальные данные некоторой абстрактной системы автоматического управления. В теории автоматического управления огромное значение уделяется методам идентификация элементов системы автоматического регулирования, а также, синтезу систем. В итоге получается продукт в виде набора готовых программ в среде Mathcad по идентификации параметров объекта управления и синтезу систем. С помощью этих программ инженеры могут документировать все вычисления в процессе их проведения.

5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.2. Потенциальные потребители результатов исследования

Потенциальными потребителями данного исследования могут быть промышленные предприятия, производственные фирмы и различные коммерческие организации.

В ПРИЛОЖЕНИИ Б изображена карта сегментации рынка для промышленного предприятия по разработке и применению синтеза регулятора и идентификации параметров объекта управления для систем автоматического управления.

Из приведенной в ПРИЛОЖЕНИИ Б карты сегментирования можно сделать следующие выводы:

1. Крупные предприятия предпочитают использовать синтез регулятора по принципу динамической компенсации и модальный синтез. Это связано с тем, что, в первом случае: расчет данного регулятора очень прост, но регулятор содержит дифференцирующие звенья и поэтому реализация физически трудно реализуема, следовательно, нужны необходимые ресурсы: материалы, время, а также грамотные специалисты. Во втором случае: расчет данного регулятора сложен, поэтому потребуется время на расчет и реализацию. Преимуществами данного метода является то, что область применения достаточно широка и применима к сложным системам автоматического регулирования, а также метод не требует дополнительных корректирующих устройств.

2. Средние предприятия могут использовать все методы, так как ограничения по сложности систем и по необходимости некоторых ресурсов не существенны.

3. Мелкие предприятия предпочитают расчет регулятора по принципу динамической компенсации. Это связано с тем, что порядок системы не велик, и поэтому, расчет и реализация регулятора не займет много времени. Остальные же методы не применимы, так как сложны и требуют квалифицированных специалистов в этой области.

4. Метод вещественной интерполяции и метод наименьших квадратов могут использовать любые предприятия, так как он прост для понимания и не требует дополнительных ресурсов.

5.2.1. Анализ конкурентных технических решений

В рамках работы не представляется возможным полностью оценить конкурентные технические решения проекта, потому что для этого необходимо проводить полноценное исследование.

В процессе работы был произведен анализ методов математического описания линейного объекта управления и синтез линейных регуляторов.

Важнейшим фактором конкурентоспособности любого предприятия является качество выпускаемой продукции, которое представляет собой совокупность свойств, куда входят надежность, эргономичность, безопасность и экологичность продукции. Методика синтеза регулятора основана на фиксировании ближайшего к мнимой оси вещественного корня системы в точке, обеспечивающей желаемую степень устойчивости системы и, соответственно, переходный процесс определенной длительности без перерегулирования.

Результатом выполнения работы является получение параметров передаточной функции системы по экспериментальным данным и синтез регулятора для обеспечения заданных показателей качества.

Значимость данной работы состоит в том, что на ее примере возможен анализ методов математического описания линейного объекта управления и синтез линейных регуляторов систем высоких порядков без особых экономических затрат.

Представленные методы могут быть реализованы в широком круге производств.

Экономический эффект характеризуется повышением качества регулирования систем автоматического управления, с переходным процессом заданной длительности без перерегулирования. В таблице 1 представлена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

По таблице 5.1 можно сделать следующий вывод: использование методов идентификации и синтеза по предложенным методикам позволяет добиться высоких технических и экономических оценок эффективности. Однако есть и другие представители, которые создают существенную конкуренцию. Следовательно, необходима доработка данного продукта.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вид критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1.Повышение производительности труда пользователя	0,15	5	4	4	0,75	0,6	0,6
2.Функциональная мощность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
3.Качество интеллектуального интерфейса	0,15	5	3	4	0,75	0,45	0,6
4.Удобство в эксплуатации	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Экономические критерии оценки эффективности							
1.Конкурентоспособность продукта	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
2.Цена	0,05	4	5	5	0,2	0,25	0,25
3.Послепродажное обслуживание	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
4.Срок выхода на рынок	0,1	4	5	5	0,4	0,5	0,5
6.Уровень проникновения на рынок	0,1	3	5	4	0,3	0,5	0,4
Итого	1	45	46	46	4,8	4,55	4,75

5.2.2. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта.

SWOT-анализ для данного продукта представлен в ПРИЛОЖЕНИИ В.

5.3. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований

Морфологический подход основан на систематическом исследовании всех теоретически возможных вариантов, вытекающих из закономерностей строения (морфологии) объекта исследования. В данном случае объектом исследования являются экспериментальные данные, полученные опытным путем. Синтез охватывает как известные, так и новые, необычные варианты, которые при простом переборе могли быть упущены. Путем комбинирования вариантов получают большое количество различных решений, ряд которых представляет практический интерес [15].

Реализация метода предусматривает следующие этапы.

1. Точная формулировка проблемы исследования – определение параметров объекта управления по экспериментальным данным с малой ошибкой идентификации и расчет корректирующего устройства, который бы обеспечил заданные показатели качества.

2. Раскрытие всех важных морфологических характеристик объекта исследования.

3. Раскрытие возможных вариантов по каждой характеристике. В рамках этого этапа составляется морфологическая матрица. В ПРИЛОЖЕНИИ Г приведена морфологическая матрица для определения и улучшения показателей качества системы автоматического регулирования по экспериментальным данным.

4. Выбор наиболее желательных функционально конкретных решений. Для данной матрицы предложена три варианта решения

технической задачи (по экспериментальным данным получить передаточную функцию объекта управления и произвести синтез системы).

1. А- 1, Б-3, В-1, Г-1, Д-1, Е-1, Ж-1, И-1;
2. А- 1, Б-3, В-1, Г-2, Д-3, Е-1, Ж-2, И-2;
3. А- 3, Б-3, В-2, Г-2, Д-2, Е-2, Ж-3, И-3.

5.4. Планирование научно-исследовательских работ

5.4.1. Структура работ научного исследования

Технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности.

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ. На данном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является **сетевой**, либо **линейный график** реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в ПРИЛОЖЕНИИ Д.

5.4.2. Определение трудоёмкости работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

1. технико-экономическим;
2. опытно-статистическим.

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

1. аналоговый;
2. экспертный.

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

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (5.1)$$

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

Для выполнения перечисленных в таблице 1 работ требуются специалисты:

1. инженер;
2. научный руководитель.

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

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (5.2)$$

где $\frac{t_{ож}}{K_{ВН}}$ – трудоемкость работы, чел/дн.; $K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ ($K_{ВН} = 1$); $K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ($K_{Д} = 1,2$).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} \cdot T_{\text{К}}, \quad (5.3)$$

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

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (5.4)$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни ($T_{\text{КАЛ}} = 365$); $T_{\text{ВД}}$ – выходные дни, $T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни ($T_{\text{ВД}} + T_{\text{ПД}} = 66$).

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 66} = 1,22,$$

В ПРИЛОЖЕНИИ Е приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

5.4.3. Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

На основе ПРИЛОЖЕНИЯ Ж, где отражены временные показатели проведения научного исследования, строится календарный план-график. По календарному-план графику определяется календарный план научного исследования с указанными периодами начала и завершения каждого этапа (см. ПРИЛОЖЕНИИ И).

Диаграмма Ганта строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта на основе ПРИЛОЖЕНИЯ И с разбивкой по месяцам и декадам за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различным цветом в зависимости от исполнителя, ответственного за ту или иную работу.

5.5. Бюджет научно технического исследования (НТИ)

5.5.1. Основная заработная плата исполнителей темы

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 5.2. При расчете учитывалось, что в 2017 году 299 рабочих дней.

Основная заработная плата сотрудника от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (5.5)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником (раб. дн.) (см. ПРИЛОЖЕНИЕ Д);

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника (руб.).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D}, \quad (5.6)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

1. при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
2. при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_D – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (примем 299 рабочих дней).

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{\text{ок}} \cdot k_p, \quad (5.7)$$

где $Z_{\text{ок}}$ – оклад (руб.);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 5.2 – Расчет основной заработной платы

Исполни- тель	$Z_{ок}$, руб.	k_p	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб.дн.	$Z_{ос}$, руб.
НР	26300	1,3	1189	12	14268
И	17000	1,3	769	88	67672
Итого:					81940

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили 81940 рублей.

5.5.2. Дополнительная заработная плата исполнительской темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (5.8)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (0,12-0,15), $Z_{осн}$ – основная заработная плата.

Следовательно,

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 14268 = 1712 \text{ руб. – для НР.}$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,12 \cdot 67672 = 8121 \text{ руб. – для И.}$$

Таким образом, получим полную заработную плату сотрудника без вычетов:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}. \quad (5.9)$$

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} = 14268 + 1712 = 15980 \text{ руб. – для НР.}$$

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} = 67672 + 8121 = 75793 \text{ руб.} - \text{ для И.}$$

5.5.3. Отчисление во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [15].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.10)$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (см. таблицу 5.3).

Таблица 5.3 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плат, руб.	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	$Z_{\text{внеб}}$, руб.
НР	14268	1712	0,271	4331
И	67672	8121	0,271	20540
Итого:				24871

Таким образом, отчисления во внебюджетные фонды составили 24871 рублей.

5.5.4. Прочие расходы

1. Данная статья включает стоимость всех материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам и приведена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб
Блокнот	40	2 шт.	80
Бумага для принтера формата А4	150	2 уп.	300
Ручка	10	4 шт.	40
Карандаш	10	2 шт.	20
Итого:			440

Расходы на материалы составили 440 рублей.

2. Прочие расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Будем считать, что данная работа разрабатывалась по услугам интернет-кафе с 10.00 до 17.00. Стоимость одного часа равна 25 рублей. Рабочие дни – 88. Следовательно, услуги интернет-кафе стоили:

$$Z_{\text{пр}} = 25 \cdot 7 \cdot 88 = 15400 \text{ руб.}$$

3. Стоимость лицензии программ Mathcad и Matlab равна 4500 рублей для студентов и сотрудников ТПУ, а для физического лица стоимость данной услуги равна 10200 рублей.

5.5.5. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб. (1 исп/)	Сумма, руб.(2 исп.)	Сумма, руб.(3 исп.)
1. Материальные затраты НИИ и прочие расходы	15840	17000	14200
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	81940	81940	81940
3. Затраты по дополнительной заработной плате	9833	9833	9833
4. Отчисления во внебюджетные фонды	24871	24871	24871
5. Лицензия ПО Mathcad (ТПУ или физ. лицо)	4500	10200	4500
6. Лицензия ПО Matlab (ТПУ или физ. лицо)	4500	10200	4500
7. Бюджет затрат НИИ	141484	154044	139844

5.6. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Научно-технический уровень характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается научно-технический прогресс в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод бальных оценок.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения объекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Уровень новизны	0,4	4	4	4
Теоретический уровень	0,1	6	2	2
Возможность реализации	0,5	10	10	10

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,4 + 6 \cdot 0,1 + 0,5 \cdot 10 = 7,2$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,5 = 6,8$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,1 + 10 \cdot 0,5 = 6,8$$

Таким образом, исходя из данных в таблице 5.6, проект имеет средний уровень научно-технического эффекта, так как уровень НТЭ находится в пределах от 4 до 7.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования п.5.2. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } j} = \frac{\Phi_{pj}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.11)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } j}$ - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pj} – стоимость j -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения;

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля) [15].

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.12)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{исп } i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп } 1} = \frac{I_{\text{р-исп } 1}}{I_{\text{исп } 1}^{\text{финр}}}, \text{ и т. д.} \quad (5.13)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см. таблицу 5.7) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп 1}}}{I_{\text{исп 2}}} \quad (5.14)$$

Таблица 5.7 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,918	1	0,907
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	7,2	6,8	6,8
3	Интегральный показатель эффективности	7,84	6,8	7,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,15	0,907	0,96

Таким образом, исполнение № 1 является наиболее функциональным и ресурсоэффективным по сравнению с исполнениями № 2 и № 3.

6. Социальная ответственность

6.1. Аннотация

Представление понятия «Социальная ответственность» сформулировано в международном стандарте (МС) ICCSR-08260008000: 2011 «Социальная ответственность организации».

В соответствии с МС - Социальная ответственность - ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

1. содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
2. учитывает ожидания заинтересованных сторон;
3. соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность);

4. интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность) [16].

6.2. Введение

В работе рассмотрены методы идентификации параметров объекта управления и синтез системы. Объектом исследования являются экспериментальные данные некоторой абстрактной системы автоматического управления. В теории автоматического управления огромное значение уделяется методам идентификация элементов системы автоматического регулирования, а также, синтезу систем. Для того чтобы произвести идентификацию параметров объекта управления и синтез системы необходимо работать за персональным компьютером в различных программах, предназначенных для математических и инженерных вычислений.

6.3. Производственная безопасность

В данной главе будет разработан комплекс мероприятий, который позволит свести к минимуму или ликвидировать негативные влияния факторов, возникающие при работе с компьютером. Отрицательное влияние компьютера на человека является комплексным, во время работы за компьютером, а именно (см. таблицу 6.1):

Таблица 6.1 – Факторы и их источники.

Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Персональный компьютер	1. Микроклимат; 2. Освещенность рабочего места; 3. Уровень шума на рабочем месте; 4. Напряженность магнитного поля.	Электрический ток	ГОСТ 12.0.003-74; СанПиН 2.2.4-548-96; СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03; ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ; СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

Далее более подробно рассмотрим данные опасные и вредные факторы.

6.3.1. Микроклимат

Микроклимат производственных помещений - это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Лаборатория является помещением, относящимся к категории помещений, где выполняются легкие физические работы. В таблице 6.2 приведены оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах согласно [17] и [18].

Таблица 6.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений при исследовании методов идентификации и синтеза систем.

Период года	Наименование параметра			
	Температура воздуха, С°	Температура поверхностей, С°	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,1
Теплый	23-25	22-26	40-60	0,1

Для создания автоматического поддержания в лаборатории независимо от наружных условий оптимальных значений температуры, влажности, чистоты и скорости движения воздуха, в холодное время года должно использоваться водяное отопление, в теплое время года должно применяться кондиционирование воздуха. Кондиционер представляет собой вентиляционную установку, которая с помощью приборов автоматического регулирования поддерживает в помещении заданные параметры воздушной среды. Параметры микроклимата, при отоплении и вентиляции помещения (кроме помещений, для которых метеорологические условия установлены другими нормативными документами) следует принимать по [19] и [20].

6.3.2. Освещенность рабочего места

Работа, выполняемая с использованием вычислительной техники относится к III разряду зрительной работы, имеют следующие недостатки: – отражение экрана. – вероятность появления прямой блескости; – ухудшенная контрастность между изображением и фоном. Помещение с ПК имеет естественное и искусственное освещение. При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3...0,5мм) величина коэффициента естественного освещения (КЕО) должна быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности

(наименьший размер объекта различения 0,5...1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения используются люминесцентные лампы белого свечения (ЛБ) или холодного свечения (ЛХБ), металлогалогенные лампы (МГЛ), ртутные лампы высокого давления (ДРЛ). Они должны располагаться над рабочими поверхностями равномерно. На рабочем месте желательно применение комбинированной системы освещения: люминесцентные лампы типа ЛБ. Люминесцентные лампы имеют ряд существенных преимуществ: излучаемый ими свет близок к дневному, естественному свету; обладают повышенной светоотдачей, имеют более длительный срок службы.

Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300лк, а комбинированная - 750лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности - 200 и 300лк соответственно. При недостатке на рабочем месте естественного освещения, можно выполнить следующие мероприятия:

1. в случае наличия в помещении зон с достаточным и недостаточным естественным освещением изменение расположения рабочих мест с их перемещением в зону с достаточным естественным освещением;
2. анализ степени загрязнения стекол в светопроемах, их чистка и последующие контрольные измерения КЕО;
3. установка более мощных ламп в светильник;
4. установка дополнительного количества светильников;
5. установка дополнительного светильника для местного освещения рабочей поверхности;
6. косметический ремонт помещения с использованием светлых отделочных материалов и последующие контрольные измерения КЕО.

Требования к освещению рабочих мест, оборудованных персональными компьютерами, изложены в документах: [16], [21] и [22]. Для общего освещения помещений следует использовать лампы со световой отдачей не

менее 55 лм/Вт. Для освещения помещений, оборудованных персональными компьютерами, следует применять систему общего освещения. Также допускается применение комбинированного освещения с целью дополнительного освещения бумажного носителя при исключении засветки от экрана монитора.

Мероприятия по обеспечению нормативных требований к показателю ослеплённости (прямой блескости):

1. увеличением высоты установки светильников;
2. уменьшением яркости светильников путем закрытия источников света светорассеивающими стеклами;
3. уменьшением яркости светильников путем закрытия источников света светорассеивающими стеклами;
4. уменьшением яркости светильников путем закрытия источников света светорассеивающими стеклами.

6.3.3. Шум

Источниками шумовых помех могут стать вентиляционные установки, кондиционеры, ЭВМ и его периферийные устройства, а также серверные комнаты. Длительное воздействие этих шумов отрицательно сказывается на эмоциональном состоянии персонала.

Согласно [17] эквивалентный уровень звука не должен превышать 50 дБА. Мероприятия по защите от шума:

1. облицовка потолка и стен звукопоглощающим материалом. Снижает шум на 6-8 дБ;
2. экранирование рабочего места, путем постановкой перегородок, диафрагм;

Защиту от шума следует выполнять в соответствии с [23], звукоизоляция ограждающих конструкций должна отвечать требованиям СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» [24].

6.3.4. Напряжённость электромагнитного поля

Электромагнитные поля, характеризующиеся напряженностями электрических и магнитных полей, наиболее вредны для организма человека. Основным источником этих проблем, связанных с охраной здоровья людей, использующих в своей работе автоматизированные информационные системы на основе персональных компьютеров, являются дисплеи (мониторы), они представляют собой источники наиболее вредных излучений, неблагоприятно влияющих на здоровье человека.

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с [17] приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электростатического поля	В диапазоне частот 5 Гц – 2кГц	25 В/м
	В диапазоне частот 2 кГц – 400кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	В диапазоне частот 5 Гц – 2кГц	250 нТл
	В диапазоне частот 2 кГц – 400кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

На расстоянии 5-10 см от экрана и корпуса монитора уровни напряженности могут достигать 140 В/м по электрической составляющей, что значительно превышает допустимые значения.

Все дисплеи должны проходить испытания на соответствие требованиям безопасности, например, международным стандартам MRP 2, TCO 99.

6.4. Электрический ток

На рабочем месте из всего оборудования металлическим является лишь корпус системного блока компьютера, но здесь используются системные блоки, отвечающие стандарту фирмы IBM, в которых кроме рабочей изоляции предусмотрен элемент для заземления и провод с заземляющей жилой для присоединения к источнику питания.

Электробезопасность рабочего места обеспечивается в соответствии с [25]. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. Опасное и вредное воздействие на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляется в виде электротравм.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

1. рода и величины напряжения и тока;
2. частоты электрического тока;
3. пути тока через тело человека;
4. продолжительности воздействия на организм человека.

Согласно ПУЭ лабораторию по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности.

Электробезопасность в помещении лаборатории должна обеспечиваться техническими способами и средствами защиты, а также организационными и техническими мероприятиями.

Рассмотрим основные причины поражения человека электрическим током на рабочем месте:

1. прикосновение к металлическим нетоковедущим частям (корпусу, периферии компьютера), которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции;
2. нерегламентированное использование электрических приборов;

3. отсутствие инструктажа сотрудников по правилам электробезопасности.

Кроме того, при неисправности каких-либо блоков компьютера, приборов корпус может оказаться под током, что может привести к электрическим травмам или электрическим ударам. Для устранения этого обеспечивается подсоединение металлических корпусов оборудования к заземляющей жиле.

Так как все токоведущие части ЭВМ и других используемых приборов изолированы, то случайное прикосновение к токоведущим частям исключено. Для обеспечения защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяется защитное заземление.

Заземление корпуса ЭВМ обеспечено подведением заземляющей жилы к питающим розеткам. Сопротивление заземления 4 Ом, согласно ПУЭ для электроустановок с напряжением до 1000 В.

Основным организационным мероприятием является инструктаж и обучение безопасным методам труда, а также проверка знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью применительно к выполняемой работе. При проведении незапланированного и планового ремонта вычислительной или любой другой техники выполняются следующие действия:

1. отключение приборов от сети;
2. проверка отсутствия напряжения.

После выполнения этих действий проводится ремонт неисправного оборудования. Если ремонт проводится на токоведущих частях, находящихся под напряжением, то выполнение работы проводится не менее чем двумя лицами с применением электрозащитных средств.

Общие требования по электробезопасности отражены в [25] и [26].

Опасность поражения людей электрическим током в помещениях появляется при несоблюдении мер безопасности, а также при отказе или неисправности электрического оборудования и приборов.

Безопасность при работе с электроустановками обеспечивается применением различных технических и организационных мер.

Рабочие места должны быть оборудованы отдельными щитами с общим рубильником электропитания, который должен находиться в легкодоступном месте, иметь закрытый зануленный металлический корпус и четкую надпись, указывающую величину номинального напряжения.

Так же нужно соблюдать некоторые правила по безопасности с электроприборами:

1. все электроприёмники и электропроводка должна быть с исправной изоляцией;
2. нельзя подвешивать провода на гвоздях, металлических и деревянных предметах, перекручивать или завязывать их в узел;
3. все токоведущие элементы, электроприборы, розетки, должны быть удалены от труб отопления и водопровода и других металлических коммуникаций;
4. протирать осветительную арматуру от пыли можно только сухой тряпкой;
5. при возгорании электроприборов или электрических проводов нельзя их гасить водой. Необходимо сначала их обесточить, а затем приступить к тушению пожара;
6. при включении любого электрооборудования в сеть сначала подключается шнур к прибору, а затем - к сети. Отключение электроприбора нужно производить в обратном порядке;
7. нельзя прикасаться мокрыми или влажными руками к электроприборам, находящимся под напряжением.

6.5. Экологическая безопасность

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

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

При завершении срока службы ПК, их можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка таких отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования (например, кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы). Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию подлежат захоронению на полигонах. Предельно допустимые концентрации токсичных веществ (ПДКп, мг/кг) должны быть соблюдены в соответствии с ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ [27].

6.6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Вероятной чрезвычайной ситуацией возникающей при работе с компьютером является пожар.

Причинами возникновения пожара могут быть:

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

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара (ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения. [28]). Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасности здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожар предупреждения и защиты.

Согласно Техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности, помещения производственного и складского назначения независимо от их функционального назначения подразделяются на следующие категории по пожарной и взрывопожарной опасности:

1. повышенная взрывопожароопасность (А);
2. взрывопожароопасность (Б);
3. пожароопасность (В1 - В4);
4. умеренная пожароопасность (Г);
5. пониженная пожароопасность (Д).

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности - ликвидация возможных источников воспламенения.

В целях предотвращения пожара предлагается проводить с инженерами, работающими в лаборатории, противопожарный инструктаж.

В лаборатории источниками воспламенения могут быть неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

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

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, т.к. в помещении находятся бумажные документы и справочная литература. Следовательно, использование открытого нагревательного прибора неприемлемо.

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

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

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

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

При наличии небольшого очага пламени можно воспользоваться подручными средствами с целью прекращения доступа воздуха к объекту возгорания. Первичными средствами пожаротушения являются специальные материалы, устройства и инструменты, используемые при локализации и (или) при ликвидации возгораний начальной стадии. К ним относятся

асбестовое полотно, песок, внутренний пожарный кран, лопата, кошма, ведро, вода, ручные и переносные огнетушители и прочее.

План эвакуации из помещения представлен на рисунке 6.1.

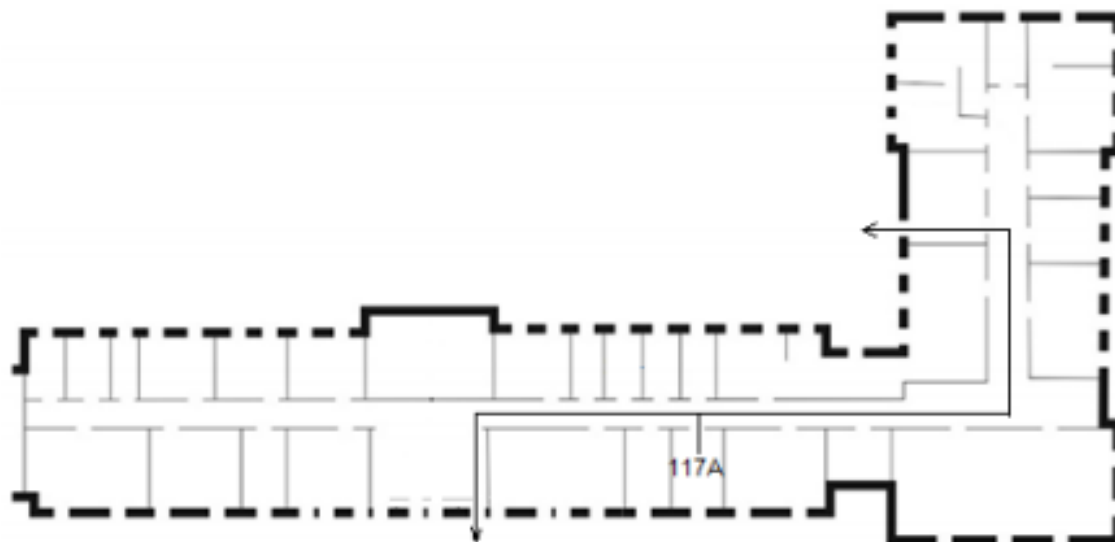


Рисунок 6.1 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещения учебного корпуса №10, пр. Ленина 2, 1 этаж.

6.7. Организационно-правовые вопросы обеспечения безопасности

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”.

За состоянием безопасности труда установлены строгие государственный, ведомственный и общественный надзор и контроль. Государственный надзор осуществляют специальные государственные органы и инспекции, которые в своей деятельности не зависят от администрации контролируемых предприятий. Это Прокуратура РФ, Федеральный горный и промышленный надзор России, Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности, Государственный энергетический надзор РФ, Государственный комитет санитарно-

эпидемиологического надзора РФ (Госкомсанэпиднадзор России), Федеральная инспекция труда при Министерстве труда РФ; Министерство РФ по атомной энергии.

Контроль за состоянием условий труда на предприятиях осуществляют специально созданные службы охраны труда совместно с комитетом профсоюзов. Контроль за состоянием условий труда заключается в проверке состояния производственных условий для работающих, выявлении отклонений от требований безопасности, законодательства о труде, стандартов, правил и норм охраны труда, постановлений, директивных документов, а также проверке выполнения службами, подразделениями и отдельными группами своих обязанностей в области охраны труда. Этот контроль осуществляют должностные лица и специалисты, утвержденные приказом по административному подразделению. Ответственность за безопасность труда в целом по предприятию несут директор и главный инженер.

Ведомственные службы охраны труда совместно с комитетами профсоюзов разрабатывают инструкции по безопасности труда для различных профессий с учетом специфики работы, а также проводят инструктажи и обучение всех работающих правилам безопасной работы. Различают следующие виды инструктажа: вводный, первичный на рабочем месте, повторный внеплановый и текущий.

Результаты всех видов инструктажа заносят в специальные журналы. За нарушение всех видов законодательства по безопасности жизнедеятельности предусматривается следующая ответственность: дисциплинарная, административная, уголовная, материальная.

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

работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно [29] конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места должны быть соблюдены следующие основные условия:

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

Главными элементами рабочего места являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

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

Рабочий стул должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах (400 - 550) мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина - не менее 400 мм.

Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина - не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах (90 – 110)°. Схема рабочего места приведена на рисунке 6.2.

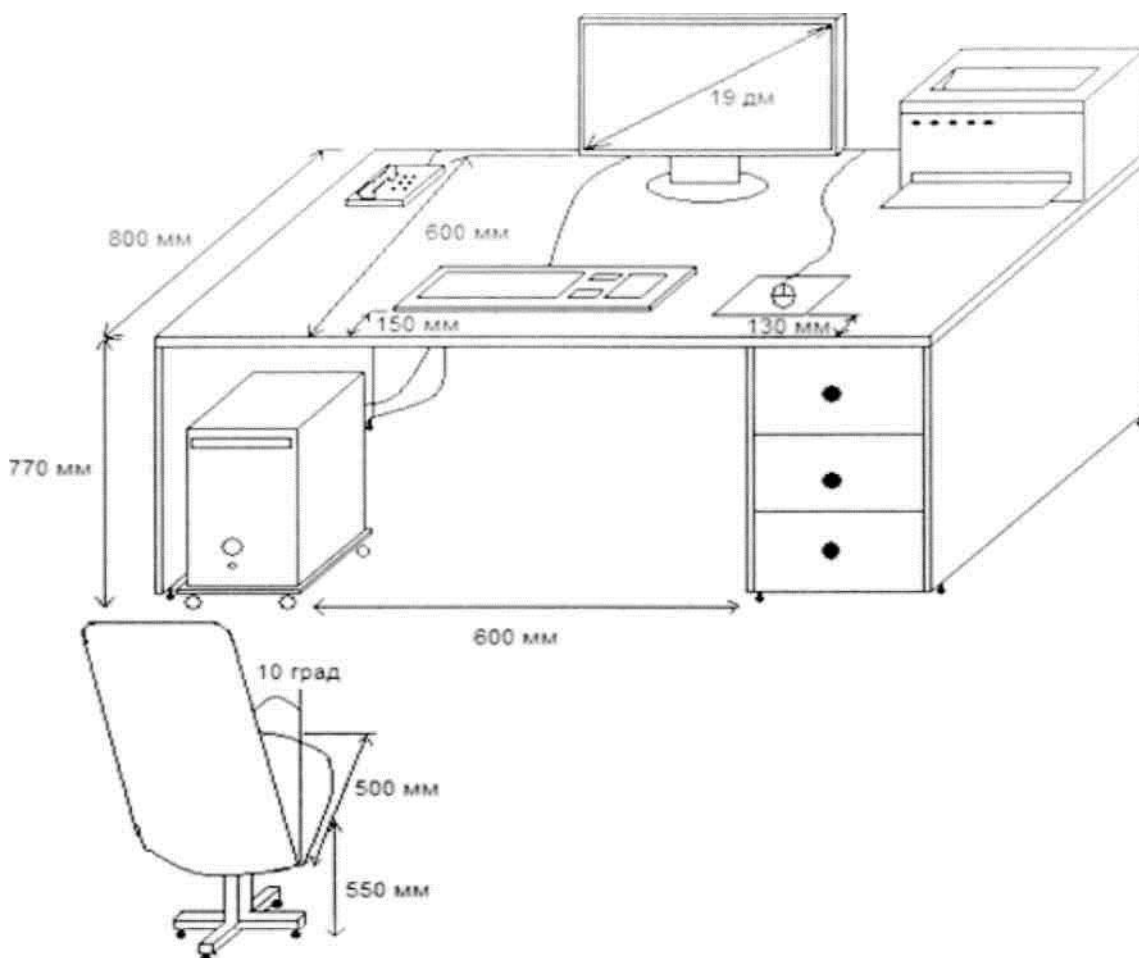


Рисунок 6.2 – Схема рабочего места.

При анализе методов идентификации параметров объекта управления и синтеза систем никаких специальных требований трудового законодательства не предусмотрено. В организации должна быть сформирована комиссия по чрезвычайным ситуациям (КЧС). В ряде случаев при отсутствии КЧС предусмотрено возложение координирующих функций на руководителя организации. Основными задачами объектовой КЧС являются:

1. руководство разработкой и осуществлением мероприятий по предупреждению ЧС, повышению надежности работы объекта;

2. организация работ по созданию на потенциально опасном объекте локальной системы оповещения, поддержание ее в постоянной готовности;
3. обеспечение готовности органов управления, сил и средств к действиям при чрезвычайных ситуациях, руководство их ликвидацией и эвакуацией персонала объекта;
4. руководство созданием и использованием резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций;
5. организация подготовки руководящего состава.

Заключение

В данной выпускной квалификационной работе были изучены и проанализированы методы идентификации параметров линейного объекта управления и методы синтеза линейных систем.

На основании вектора экспериментальных данных была получена передаточная функция линейного объекта управления методом наименьших квадратов и методом вещественной интерполяции. Сравнительный анализ методов показал, что более высокой точностью идентификации обладает метод наименьших квадратов. Однако результаты определения параметров динамического объекта, получаемых на основании решения системы линейных уравнений, зависят от вектора приближенных значений. В этой связи были сформулированы рекомендации по формированию вектора приближенных значений на основании анализа кривой переходного процесса. Также было установлено, что точность метода вещественной интерполяции напрямую зависит от размерности вектора исходных данных, достоинством метода является относительная простота реализации. Для решения задачи синтеза линейного регулятора был применен метод динамической компенсации, метод уравнений синтеза и метод расчета параметров модального регулятора. В результате были получены настроечные параметры регуляторов, обеспечивающих в системе заданные показатели качества. Также для линейного объекта управления были формализованы методики синтеза линейных регуляторов в ППП Mathcad и MATLAB.

Значимость данной работы состоит в том, что на ее примере возможна работа с экспериментальными данными по составленным в программных средах методикам идентификации и синтеза линейных регуляторов для линейных объектов управления в достаточно краткие сроки.

Conclusion

In this graduation qualification work, linear plant parameters identification and synthesis methods were studied and analyzed.

On the basis of experimental data linear plant transfer function by means of least squares method and real interpolation method was obtained. Comparative analysis of these two methods has shown that the least squares method is more precise. However the identification result of dynamic object obtained from the linear equation system solution strongly depend on the approximation values vector. In this connection the recommendations for the approximation values vector chose based on the analysis of the transient response shape were formulated. It was also found that the accuracy of the real interpolation method is directly depends on the dimension of experimental data vector. The advantage of the real interpolation method is in its relative realization simplicity. For the linear controller synthesis problem solution the dynamic compensation method, synthesis equations approach and modal synthesis method were implemented. As a result the controller settings providing the desired performance indices were obtained. The offered techniques for linear plant controller synthesis were formalized in application software packages Mathcad and MATLAB.

The significance of this work is that it can be used as a theoretical and practical example for experimental data modeling on the basis of formalized dynamic object identification and linear controller synthesis methods in application software packages in a relatively short time.

Список литературы

1. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления: учебное пособие / Самарский государственный технический университет. – Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета, 2009 г. – 136 с.
2. Скворцов Л.М. Интерполяционные методы синтеза систем управления / Проблемы управления и информатики, 1998, №6.
3. Алексеев А.С., Антропов А.А., Гончаров В.И., Замятин С.В., Рудницкий В.А. Вещественный интерполяционный метод в задачах автоматического управления: учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. -219 с.
4. Коновалов В.И. Идентификация и диагностика систем. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 156 с.
5. Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления: учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2003. – 211 с.
6. Справочник по теории автоматического управления под ред. А.А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.
7. Ефимов С.В. Анализ и синтез стационарных и интервальных систем управления на основе зависимости расположения их полюсов и нулей от прямых показателей качества: диссертация. – Томск, 2011. – 157 с.
8. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х томах. Т.2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.
9. Доброленский Ю.П., Иванова В.И., Поспелов Г.С. Автоматика управляемых снарядов. – М.: Оборониздат, 1963. -386 с.

10. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 274 с.
11. Поспелов Г.С., Доброленский Ю.П. Метод стандартных коэффициентов для выбора параметров линейных систем автоматического регулирования / Сб. статей по автоматике и электротехнике. – Изд. АН СССР. 1956, - с. 53-61.
12. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем. Линейные модели. – М.: Наука, 1987. -304 с.
13. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
14. Ишматов З.Ш., Казаков Е.Г., Мезеушева Д.В. Современная теория управления: учебное пособие: – Екатеринбург. Изд-во РИС ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 50 с.
15. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. -36 с.
16. Романенко С.В., Анищенко Ю.В. Социальная ответственность: методическое указание / Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. -21 с.
17. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
18. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
19. ГОСТ 21.602—79. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
20. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.
21. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

22. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному и искусственному освещению жилых и общественных зданий.
23. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности.
24. СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий».
25. ГОСТ Р 12.1.019- 2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
26. ГОСТ 12.1.038-82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
27. ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.99 М 96-ФЗ.
28. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения.
29. ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
0	0	0,3	0,084918	0,6	0,309284	0,91	0,622395	1,21	0,932908	1,51	1,188659	1,81	1,347691
0,01	9,99E-05	0,31	0,090442	0,61	0,31849	0,92	0,633017	1,22	0,942611	1,52	1,195683	1,82	1,351058
0,02	0,000399	0,32	0,096122	0,62	0,32778	0,93	0,643642	1,23	0,95225	1,53	1,202596	1,83	1,354296
0,03	0,000896	0,33	0,097774	0,63	0,337153	0,94	0,654269	1,24	0,961821	1,54	1,209397	1,84	1,357406
0,04	0,001591	0,34	0,107938	0,64	0,346605	0,95	0,664895	1,25	0,971325	1,55	1,216084	1,85	1,360388
0,05	0,002482	0,35	0,114071	0,65	0,356135	0,96	0,675518	1,26	0,980757	1,56	1,222658	1,86	1,363241
0,06	0,003569	0,36	0,12035	0,66	0,365739	0,97	0,686134	1,27	0,990117	1,57	1,229116	1,87	1,365965
0,07	0,00485	0,37	0,126775	0,67	0,375415	0,98	0,696742	1,28	0,999403	1,58	1,235459	1,88	1,368561
0,08	0,006324	0,38	0,133342	0,68	0,385161	0,99	0,707339	1,29	1,008613	1,59	1,241685	1,89	1,371029
0,09	0,00799	0,39	0,14005	0,69	0,394973	1	0,717922	1,3	1,017745	1,6	1,247793	1,9	1,373368
0,1	0,009848	0,4	0,146897	0,7	0,404849	1,01	0,72854	1,31	1,026798	1,61	1,253782	1,91	1,37558
0,11	0,011895	0,41	0,153879	0,71	0,414787	1,02	0,739039	1,32	1,035769	1,62	1,259652	1,92	1,377663
0,12	0,01413	0,42	0,160995	0,72	0,424784	1,03	0,749568	1,33	1,044657	1,63	1,265402	1,93	1,379619
0,13	0,016553	0,43	0,168243	0,73	0,434837	1,04	0,760073	1,34	1,05346	1,64	1,271031	1,94	1,381447
0,14	0,019161	0,44	0,17562	0,74	0,444943	1,05	0,770553	1,35	1,062177	1,65	1,276539	1,95	1,383148
0,15	0,021954	0,45	0,183124	0,75	0,4551	1,06	0,781006	1,36	1,070806	1,66	1,281924	1,96	1,384722
0,16	0,02493	0,46	0,190752	0,76	0,465306	1,07	0,791428	1,37	1,079345	1,67	1,287187	1,97	1,386169
0,17	0,028088	0,47	0,198503	0,77	0,475557	1,08	0,801817	1,38	1,087793	1,68	1,292326	1,98	1,387491
0,18	0,031425	0,48	0,206374	0,78	0,485851	1,09	0,812172	1,39	1,096148	1,69	1,297341	1,99	1,388686
0,19	0,034941	0,49	0,214362	0,79	0,496186	1,1	0,82249	1,4	1,104409	1,7	1,302232	2	1,389756
0,2	0,038634	0,5	0,222465	0,8	0,506558	1,11	0,832768	1,41	1,112574	1,71	1,306997	2,01	1,390701
0,21	0,042502	0,51	0,230681	0,81	0,516966	1,12	0,843005	1,42	1,120642	1,72	1,311638	2,02	1,391522
0,22	0,046544	0,52	0,239007	0,82	0,527406	1,13	0,853198	1,43	1,128612	1,73	1,316152	2,03	1,392219
0,23	0,050757	0,53	0,247441	0,83	0,537875	1,14	0,863345	1,44	1,136481	1,74	1,32054	2,04	1,392792
0,24	0,055141	0,54	0,25598	0,84	0,548372	1,15	0,873444	1,45	1,14425	1,75	1,324801	2,05	1,393243
0,25	0,059694	0,55	0,264622	0,85	0,558894	1,16	0,883493	1,46	1,151915	1,76	1,328935	2,06	1,393571
0,26	0,064413	0,56	0,273364	0,86	0,569437	1,17	0,893489	1,47	1,159477	1,77	1,332942	2,07	1,393778
0,27	0,069296	0,57	0,282204	0,87	0,58	1,18	0,903431	1,48	1,166933	1,78	1,336821	2,08	1,393863
0,28	0,074343	0,58	0,291139	0,88	0,59058	1,19	0,913316	1,49	1,174283	1,79	1,340572	2,09	1,393828
0,29	0,079551	0,59	0,300167	0,9	0,61178	1,2	0,923143	1,5	1,181526	1,8	1,344196	2,1	1,393674

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
2,11	1,3934	2,41	1,334447	2,71	1,199492	3,01	1,028561	3,31	0,863285	3,61	0,738155	3,91	0,674472
2,12	1,393009	2,42	1,330971	2,72	1,194136	3,02	1,022742	3,32	0,858308	3,62	0,734968	3,92	0,673517
2,13	1,3925	2,43	1,327411	2,73	1,188742	3,03	1,01693	3,33	0,853378	3,63	0,731851	3,93	0,672638
2,14	1,391874	2,44	1,323768	2,74	1,183311	3,04	1,011129	3,34	0,848496	3,64	0,728805	3,94	0,671835
2,15	1,391133	2,45	1,320044	2,75	1,177845	3,05	1,005339	3,35	0,843663	3,65	0,72583	3,95	0,671107
2,16	1,390276	2,46	1,31624	2,76	1,172345	3,06	0,999562	3,36	0,83888	3,66	0,722926	3,96	0,670454
2,17	1,389306	2,47	1,312357	2,77	1,166813	3,07	0,993799	3,37	0,834149	3,67	0,720095	3,97	0,669877
2,18	1,388222	2,48	1,308397	2,78	1,161251	3,08	0,988052	3,38	0,829469	3,68	0,717336	3,98	0,669375
2,19	1,387026	2,49	1,304362	2,79	1,15566	3,09	0,982322	3,39	0,824842	3,69	0,714649	3,99	0,668947
2,2	1,385719	2,5	1,300252	2,8	1,150041	3,1	0,97661	3,4	0,820269	3,7	0,712036	4	0,668594
2,21	1,384302	2,51	1,29607	2,81	1,144397	3,11	0,970919	3,41	0,815751	3,71	0,709497	3,91	0,674472
2,22	1,382775	2,52	1,291817	2,82	1,138729	3,12	0,965248	3,42	0,811288	3,72	0,707031	3,92	0,673517
2,23	1,38114	2,53	1,287493	2,83	1,133038	3,13	0,9596	3,43	0,806883	3,73	0,704639	3,93	0,672638
2,24	1,379397	2,54	1,28441	2,84	1,127326	3,14	0,953977	3,44	0,802534	3,74	0,702322	3,94	0,671835
2,25	1,377548	2,55	1,280494	2,85	1,121595	3,15	0,948378	3,45	0,798244	3,75	0,700079	3,95	0,671107
2,26	1,375594	2,56	1,276579	2,86	1,115847	3,16	0,942806	3,46	0,794014	3,76	0,697911	3,96	0,670454
2,27	1,373536	2,57	1,272663	2,87	1,110082	3,17	0,937262	3,47	0,789843	3,77	0,695819	3,97	0,669877
2,28	1,371375	2,58	1,268748	2,88	1,104303	3,18	0,931748	3,48	0,785733	3,78	0,693801	3,98	0,669375
2,29	1,369112	2,59	1,264832	2,89	1,098511	3,19	0,926264	3,49	0,781684	3,79	0,691859	3,99	0,668947
2,3	1,366748	2,6	1,260917	2,9	1,092707	3,2	0,920811	3,5	0,777698	3,8	0,689992	4	0,668594
2,31	1,364284	2,61	1,257001	2,91	1,086894	3,21	0,915392	3,51	0,773775	3,81	0,688202	4,01	0,668316
2,32	1,361723	2,62	1,253086	2,92	1,081072	3,22	0,910007	3,52	0,769915	3,82	0,686487	4,02	0,668111
2,33	1,359064	2,63	1,24917	2,93	1,075244	3,23	0,904658	3,53	0,76612	3,83	0,684847	4,03	0,66798
2,34	1,356309	2,64	1,245255	2,94	1,069411	3,24	0,899345	3,54	0,76239	3,84	0,683284	4,04	0,667923
2,35	1,35346	2,65	1,24134	2,95	1,063574	3,25	0,894071	3,55	0,758726	3,85	0,681797	4,05	0,667939
2,36	1,350517	2,66	1,237424	2,96	1,057735	3,26	0,888835	3,56	0,755128	3,86	0,680386	4,06	0,668028
2,37	1,347482	2,67	1,233509	2,97	1,051895	3,27	0,88364	3,57	0,751597	3,87	0,679051	4,07	0,668189
2,38	1,344356	2,68	1,229593	2,98	1,046056	3,28	0,878486	3,58	0,748134	3,88	0,677793	4,08	0,668422
2,39	1,341141	2,69	1,225678	2,99	1,04022	3,29	0,873375	3,59	0,744739	3,89	0,67661	4,09	0,668728
2,4	1,337837	2,7	1,221762	3	1,034388	3,3	0,868308	3,6	0,741412	3,9	0,675503	4,1	0,669104

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
4,11	0,669552	4,41	0,713338	4,71	0,80278	5,01	0,913972	5,31	1,021791	5,61	1,105221	5,91	1,151107
4,12	0,67007	4,42	0,715703	4,72	0,806278	5,02	0,917754	5,32	1,025062	5,62	1,107402	5,92	1,15192
4,13	0,670658	4,43	0,718119	4,73	0,8098	5,03	0,92153	5,33	1,028305	5,63	1,109541	5,93	1,152687
4,14	0,671316	4,44	0,720585	4,74	0,813344	5,04	0,9253	5,34	1,031519	5,64	1,111636	5,94	1,153407
4,15	0,672043	4,45	0,7231	4,75	0,81691	5,05	0,929064	5,35	1,034703	5,65	1,113687	5,95	1,15408
4,16	0,672839	4,46	0,725663	4,76	0,820496	5,06	0,93282	5,36	1,037856	5,66	1,115695	5,96	1,154707
4,17	0,673702	4,47	0,728273	4,77	0,824102	5,07	0,936567	5,37	1,040979	5,67	1,117659	5,97	1,155288
4,18	0,674634	4,48	0,73093	4,78	0,827726	5,08	0,940305	5,38	1,04407	5,68	1,119578	5,98	1,155822
4,19	0,675632	4,49	0,733632	4,79	0,831367	5,09	0,944032	5,39	1,047128	5,69	1,121453	5,99	1,156311
4,2	0,676698	4,5	0,736378	4,8	0,835025	5,1	0,947749	5,4	1,050154	5,7	1,123283	6	1,156753
4,21	0,677829	4,51	0,739169	4,81	0,838699	5,11	0,951453	5,41	1,053147	5,71	1,125068	6,01	1,15715
4,22	0,679025	4,52	0,742002	4,82	0,842387	5,12	0,955145	5,42	1,056106	5,72	1,126808	6,02	1,157501
4,23	0,680287	4,53	0,744878	4,83	0,846089	5,13	0,958823	5,43	1,05903	5,73	1,128503	6,03	1,157806
4,24	0,681613	4,54	0,747795	4,84	0,849804	5,14	0,962486	5,44	1,061919	5,74	1,130152	6,04	1,158066
4,25	0,683002	4,55	0,750751	4,85	0,85353	5,15	0,966134	5,45	1,064773	5,75	1,131756	6,05	1,158281
4,26	0,684454	4,56	0,753748	4,86	0,857267	5,16	0,969766	5,46	1,067591	5,76	1,133313	6,06	1,158451
4,27	0,685969	4,57	0,756782	4,87	0,861014	5,17	0,973382	5,47	1,070372	5,77	1,134825	6,07	1,158576
4,28	0,687546	4,58	0,759854	4,88	0,86477	5,18	0,976979	5,48	1,073116	5,78	1,13629	6,08	1,158657
4,29	0,689183	4,59	0,762963	4,89	0,868533	5,19	0,980558	5,49	1,075823	5,79	1,137709	6,09	1,158693
4,3	0,690881	4,6	0,766107	4,9	0,872304	5,2	0,984118	5,5	1,078491	5,8	1,139082	6,1	1,158685
4,31	0,692639	4,61	0,769286	4,91	0,876081	5,21	0,987657	5,51	1,081122	5,81	1,140409	6,11	1,158633
4,32	0,694455	4,62	0,772499	4,92	0,879863	5,22	0,991176	5,52	1,083713	5,82	1,141689	6,12	1,158538
4,33	0,69633	4,63	0,775745	4,93	0,883648	5,23	0,994674	5,53	1,086265	5,83	1,142922	6,13	1,158399
4,34	0,698262	4,64	0,779023	4,94	0,887437	5,24	0,998149	5,54	1,088778	5,84	1,144109	6,14	1,158217
4,35	0,700252	4,65	0,782331	4,95	0,891229	5,25	1,001601	5,55	1,09125	5,85	1,145249	6,15	1,157993
4,36	0,702297	4,66	0,78567	4,96	0,895021	5,26	1,005029	5,56	1,093682	5,86	1,146342	6,16	1,157725
4,37	0,704397	4,67	0,789037	4,97	0,898814	5,27	1,008433	5,57	1,096073	5,87	1,147388	6,17	1,157416
4,38	0,706553	4,68	0,792433	4,98	0,902607	5,28	1,011812	5,58	1,098423	5,88	1,148388	6,18	1,157065
4,39	0,708762	4,69	0,795856	4,99	0,906398	5,29	1,015165	5,59	1,100731	5,89	1,149341	6,19	1,156672
4,4	0,711024	4,7	0,799305	5	0,910187	5,3	1,018491	5,6	1,102997	5,9	1,150248	6,2	1,156237

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
6,21	1,155762	6,51	1,124409	6,81	1,068881	7,11	1,004273	7,41	0,945402	7,71	0,903811	8,01	0,885861
6,22	1,155246	6,52	1,122869	6,82	1,066787	7,12	1,002142	7,42	0,943687	7,72	0,902813	8,02	0,885692
6,23	1,15469	6,53	1,121302	6,83	1,064683	7,13	1,000019	7,43	0,941991	7,73	0,901842	8,03	0,885551
6,24	1,154094	6,54	1,119709	6,84	1,062571	7,14	0,997903	7,44	0,940316	7,74	0,900898	8,04	0,885437
6,25	1,153458	6,55	1,11809	6,85	1,06045	7,15	0,995796	7,45	0,938662	7,75	0,899981	8,05	0,88535
6,26	1,152783	6,56	1,116447	6,86	1,058321	7,16	0,993697	7,46	0,937028	7,76	0,899091	8,06	0,88529
6,27	1,152069	6,57	1,114779	6,87	1,056186	7,17	0,991607	7,47	0,935416	7,77	0,898229	8,07	0,885258
6,28	1,151317	6,58	1,113087	6,88	1,054044	7,18	0,989528	7,48	0,933825	7,78	0,897394	8,08	0,885252
6,29	1,150527	6,59	1,111371	6,89	1,051896	7,19	0,987458	7,49	0,932257	7,79	0,896587	8,09	0,885272
6,3	1,149699	6,6	1,109633	6,9	1,049742	7,2	0,985399	7,5	0,930711	7,8	0,895807	8,1	0,885319
6,31	1,148834	6,61	1,107873	6,91	1,047584	7,21	0,983351	7,51	0,929187	7,81	0,895055	8,11	0,885393
6,32	1,147932	6,62	1,106091	6,92	1,045421	7,22	0,981314	7,52	0,927686	7,82	0,89433	8,12	0,885493
6,33	1,146994	6,63	1,104288	6,93	1,043255	7,23	0,97929	7,53	0,926208	7,83	0,893634	8,13	0,885619
6,34	1,14602	6,64	1,102464	6,94	1,041085	7,24	0,977278	7,54	0,924753	7,84	0,892965	8,14	0,885771
6,35	1,14501	6,65	1,10062	6,95	1,038914	7,25	0,975279	7,55	0,923322	7,85	0,892324	8,15	0,885948
6,36	1,143966	6,66	1,098757	6,96	1,03674	7,26	0,973294	7,56	0,921915	7,86	0,891711	8,16	0,886152
6,37	1,142887	6,67	1,096876	6,97	1,034564	7,27	0,971322	7,57	0,920531	7,87	0,891126	8,17	0,886381
6,38	1,141773	6,68	1,094976	6,98	1,032388	7,28	0,969365	7,58	0,919172	7,88	0,890569	8,18	0,886635
6,39	1,140626	6,69	1,093058	6,99	1,030212	7,29	0,967422	7,59	0,917838	7,89	0,890039	8,19	0,886914
6,4	1,139446	6,7	1,091123	7	1,028036	7,3	0,965494	7,6	0,916528	7,9	0,889538	8,2	0,887218
6,41	1,138233	6,71	1,089172	7,01	1,025861	7,31	0,963582	7,61	0,915244	7,91	0,889065	8,21	0,887547
6,42	1,136987	6,72	1,087205	7,02	1,023687	7,32	0,961686	7,62	0,913984	7,92	0,888619	8,22	0,8879
6,43	1,13571	6,73	1,085222	7,03	1,021515	7,33	0,959806	7,63	0,91275	7,93	0,888202	8,23	0,888278
6,44	1,134402	6,74	1,083225	7,04	1,019345	7,34	0,957943	7,64	0,911542	7,94	0,887812	8,24	0,88868
6,45	1,133062	6,75	1,081214	7,05	1,017179	7,35	0,956097	7,65	0,910359	7,95	0,88745	8,25	0,889106
6,46	1,131693	6,76	1,079189	7,06	1,015016	7,36	0,954269	7,66	0,909202	7,96	0,887116	8,26	0,889555
6,47	1,130294	6,77	1,077151	7,07	1,012857	7,37	0,952458	7,67	0,908071	7,97	0,88681	8,27	0,890028
6,48	1,128865	6,78	1,0751	7,08	1,010703	7,38	0,950666	7,68	0,906966	7,98	0,886531	8,28	0,890525
6,49	1,127408	6,79	1,073038	7,09	1,008554	7,39	0,948892	7,69	0,905888	7,99	0,88628	8,29	0,891044
6,5	1,125923	6,8	1,070965	7,1	1,00641	7,4	0,947138	7,7	0,904836	8	0,886057	8,3	0,891586

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
8,31	0,89215	8,61	0,918202	8,91	0,956089	9,21	0,996541	9,51	1,031037	9,81	1,053451	10,11	1,060973
8,32	0,892737	8,62	0,919325	8,92	0,957447	9,22	0,997828	9,52	1,032004	9,82	1,053947	10,12	1,060965
8,33	0,893346	8,63	0,92046	8,93	0,958808	9,23	0,999109	9,53	1,032957	9,83	1,054427	10,13	1,060942
8,34	0,893976	8,64	0,921608	8,94	0,960171	9,24	1,000382	9,54	1,033897	9,84	1,054889	10,14	1,060902
8,35	0,894628	8,65	0,922768	8,95	0,961536	9,25	1,001648	9,55	1,034821	9,85	1,055335	10,15	1,060847
8,36	0,895302	8,66	0,92394	8,96	0,962902	9,26	1,002906	9,56	1,035732	9,86	1,055763	10,16	1,060776
8,37	0,895996	8,67	0,925124	8,97	0,964269	9,27	1,004155	9,57	1,036628	9,87	1,056174	10,17	1,060689
8,38	0,896711	8,68	0,926319	8,98	0,965637	9,28	1,005396	9,58	1,037509	9,88	1,056569	10,18	1,060587
8,39	0,897447	8,69	0,927525	8,99	0,967006	9,29	1,006628	9,59	1,038375	9,89	1,056946	10,19	1,060469
8,4	0,898203	8,7	0,928741	9	0,968374	9,3	1,007851	9,6	1,039226	9,9	1,057307	10,2	1,060336
8,41	0,898978	8,71	0,929967	9,01	0,969742	9,31	1,009065	9,61	1,040063	9,91	1,05765	10,21	1,060188
8,42	0,899773	8,72	0,931203	9,02	0,97111	9,32	1,01027	9,62	1,040884	9,92	1,057976	10,22	1,060024
8,43	0,900588	8,73	0,932449	9,03	0,972476	9,33	1,011464	9,63	1,04169	9,93	1,058285	10,23	1,059846
8,44	0,901421	8,74	0,933704	9,04	0,973841	9,34	1,012649	9,64	1,04248	9,94	1,058578	10,24	1,059653
8,45	0,902273	8,75	0,934968	9,05	0,975205	9,35	1,013823	9,65	1,043254	9,95	1,058853	10,25	1,059445
8,46	0,903144	8,76	0,93624	9,06	0,976566	9,36	1,014987	9,66	1,044013	9,96	1,059111	10,26	1,059222
8,47	0,904033	8,77	0,93752	9,07	0,977926	9,37	1,01614	9,67	1,044756	9,97	1,059352	10,27	1,058985
8,48	0,904939	8,78	0,938807	9,08	0,979282	9,38	1,017283	9,68	1,045484	9,98	1,059577	10,28	1,058733
8,49	0,905864	8,79	0,940103	9,09	0,980636	9,39	1,018414	9,69	1,046195	9,99	1,059784	10,29	1,058468
8,5	0,906805	8,8	0,941405	9,1	0,981987	9,4	1,019533	9,7	1,04689	10	1,059975	10,3	1,058188
8,51	0,907763	8,81	0,942713	9,11	0,983334	9,41	1,020641	9,71	1,047569	10,01	1,060148	10,31	1,057894
8,52	0,908738	8,82	0,944028	9,12	0,984677	9,42	1,021737	9,72	1,048232	10,02	1,060305	10,32	1,057587
8,53	0,909729	8,83	0,945349	9,13	0,986016	9,43	1,022822	9,73	1,048878	10,03	1,060446	10,33	1,057266
8,54	0,910735	8,84	0,946676	9,14	0,98735	9,44	1,023893	9,74	1,049508	10,04	1,060569	10,34	1,056931
8,55	0,911758	8,85	0,948008	9,15	0,98868	9,45	1,024953	9,75	1,050121	10,05	1,060676	10,35	1,056583
8,56	0,912796	8,86	0,949344	9,16	0,990004	9,46	1,026	9,76	1,050718	10,06	1,060767	10,36	1,056222
8,57	0,913848	8,87	0,950686	9,17	0,991324	9,47	1,027034	9,77	1,051298	10,07	1,060841	10,37	1,055848
8,58	0,914916	8,88	0,952031	9,18	0,992637	9,48	1,028055	9,78	1,051861	10,08	1,060898	10,38	1,055461
8,59	0,915997	8,89	0,95338	9,19	0,993945	9,49	1,029062	9,79	1,052408	10,09	1,060939	10,39	1,055062
8,6	0,917093	8,9	0,954733	9,2	0,995246	9,5	1,030057	9,8	1,052938	10,1	1,060964	10,4	1,05465

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
10,41	1,054225	10,71	1,036661	11,01	1,013461	11,31	0,990231	11,61	0,971796	11,91	0,961317	12,21	0,95988
10,42	1,053789	10,72	1,035948	11,02	1,012657	11,32	0,989517	11,62	0,971306	11,92	0,961123	12,22	0,959982
10,43	1,05334	10,73	1,035228	11,03	1,011854	11,33	0,988808	11,63	0,970826	11,93	0,96094	12,23	0,960093
10,44	1,05288	10,74	1,034502	11,04	1,011051	11,34	0,988105	11,64	0,970355	11,94	0,960767	12,24	0,960213
10,45	1,052407	10,75	1,03377	11,05	1,010248	11,35	0,987407	11,65	0,969893	11,95	0,960604	12,25	0,960342
10,46	1,051924	10,76	1,033033	11,06	1,009446	11,36	0,986716	11,66	0,969441	11,96	0,960451	12,26	0,96048
10,47	1,051429	10,77	1,032291	11,07	1,008645	11,37	0,986031	11,67	0,968998	11,97	0,960308	12,27	0,960627
10,48	1,050923	10,78	1,031544	11,08	1,007846	11,38	0,985353	11,68	0,968564	11,98	0,960176	12,28	0,960783
10,49	1,050406	10,79	1,030791	11,09	1,007048	11,39	0,984681	11,69	0,96814	11,99	0,960054	12,29	0,960947
10,5	1,049878	10,8	1,030035	11,1	1,006251	11,4	0,984016	11,7	0,967726	12	0,959942	12,3	0,961119
10,51	1,04934	10,81	1,029274	11,11	1,005457	11,41	0,983357	11,71	0,967321	12,01	0,95984	12,31	0,961301
10,52	1,048791	10,82	1,028509	11,12	1,004664	11,42	0,982705	11,72	0,966926	12,02	0,959749	12,32	0,96149
10,53	1,048233	10,83	1,027739	11,13	1,003874	11,43	0,982061	11,73	0,96654	12,03	0,959667	12,33	0,961688
10,54	1,047664	10,84	1,026966	11,14	1,003086	11,44	0,981423	11,74	0,966165	12,04	0,959595	12,34	0,961894
10,55	1,047085	10,85	1,02619	11,15	1,002301	11,45	0,980793	11,75	0,965799	12,05	0,959534	12,35	0,962108
10,56	1,046497	10,86	1,02541	11,16	1,001518	11,46	0,98017	11,76	0,965443	12,06	0,959482	12,36	0,962331
10,57	1,0459	10,87	1,024627	11,17	1,000738	11,47	0,979555	11,77	0,965098	12,07	0,959441	12,37	0,962561
10,58	1,045293	10,88	1,023842	11,18	0,999962	11,48	0,978948	11,78	0,964762	12,08	0,959409	12,38	0,962799
10,59	1,044677	10,89	1,023053	11,19	0,999189	11,49	0,978348	11,79	0,964436	12,09	0,959387	12,39	0,963044
10,6	1,044053	10,9	1,022263	11,2	0,998419	11,5	0,977756	11,8	0,96412	12,1	0,959376	12,4	0,963298
10,61	1,04342	10,91	1,021469	11,21	0,997653	11,51	0,977172	11,81	0,963815	12,11	0,959373	12,41	0,963559
10,62	1,042778	10,92	1,020674	11,22	0,996891	11,52	0,976596	11,82	0,963519	12,12	0,959381	12,42	0,963827
10,63	1,042128	10,93	1,019877	11,23	0,996132	11,53	0,976029	11,83	0,963233	12,13	0,959398	12,43	0,964103
10,64	1,041471	10,94	1,019079	11,24	0,995378	11,54	0,975469	11,84	0,962958	12,14	0,959425	12,44	0,964386
10,65	1,040805	10,95	1,018279	11,25	0,994629	11,55	0,974919	11,85	0,962693	12,15	0,959462	12,45	0,964676
10,66	1,040132	10,96	1,017478	11,26	0,993883	11,56	0,974376	11,86	0,962438	12,16	0,959508	12,46	0,964973
10,67	1,039452	10,97	1,016676	11,27	0,993143	11,57	0,973843	11,87	0,962193	12,17	0,959564	12,47	0,965277
10,68	1,038765	10,98	1,015873	11,28	0,992407	11,58	0,973318	11,88	0,961959	12,18	0,959629	12,48	0,965587
10,69	1,03807	10,99	1,015069	11,29	0,991677	11,59	0,972801	11,89	0,961735	12,19	0,959703	12,49	0,965905
10,7	1,037369	11	1,014265	11,3	0,990951	11,6	0,972294	11,9	0,96152	12,2	0,959787	12,5	0,966229

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
12,51	0,966559	12,81	0,978891	13,11	0,993589	13,41	1,007338	13,71	1,017475	14,01	1,022447	14,31	1,021972
12,52	0,966896	12,82	0,979361	13,12	0,994079	13,42	1,007746	13,72	1,017729	14,02	1,022517	14,32	1,02187
12,53	0,967239	12,83	0,979835	13,13	0,994569	13,43	1,008149	13,73	1,017977	14,03	1,02258	14,33	1,021763
12,54	0,967589	12,84	0,980311	13,14	0,995057	13,44	1,008549	13,74	1,018219	14,04	1,022638	14,34	1,02165
12,55	0,967944	12,85	0,980789	13,15	0,995544	13,45	1,008944	13,75	1,018455	14,05	1,02269	14,35	1,021533
12,56	0,968305	12,86	0,981269	13,16	0,996029	13,46	1,009335	13,76	1,018686	14,06	1,022735	14,36	1,021411
12,57	0,968672	12,87	0,981751	13,17	0,996513	13,47	1,009722	13,77	1,01891	14,07	1,022774	14,37	1,021284
12,58	0,969044	12,88	0,982235	13,18	0,996994	13,48	1,010103	13,78	1,019128	14,08	1,022808	14,38	1,021152
12,59	0,969422	12,89	0,982721	13,19	0,997474	13,49	1,01048	13,79	1,01934	14,09	1,022835	14,39	1,021015
12,6	0,969806	12,9	0,983208	13,2	0,997952	13,5	1,010853	13,8	1,019546	14,1	1,022856	14,4	1,020873
12,61	0,970195	12,91	0,983697	13,21	0,998427	13,51	1,01122	13,81	1,019746	14,11	1,022872	14,41	1,020727
12,62	0,970589	12,92	0,984187	13,22	0,998901	13,52	1,011583	13,82	1,01994	14,12	1,022881	14,42	1,020576
12,63	0,970988	12,93	0,984679	13,23	0,999372	13,53	1,011941	13,83	1,020128	14,13	1,022885	14,43	1,020421
12,64	0,971392	12,94	0,985171	13,24	0,999841	13,54	1,012294	13,84	1,020309	14,14	1,022882	14,44	1,020261
12,65	0,9718	12,95	0,985665	13,25	1,000307	13,55	1,012641	13,85	1,020484	14,15	1,022874	14,45	1,020097
12,66	0,972214	12,96	0,986159	13,26	1,00077	13,56	1,012984	13,86	1,020654	14,16	1,02286	14,46	1,019929
12,67	0,972632	12,97	0,986654	13,27	1,001231	13,57	1,013322	13,87	1,020817	14,17	1,02284	14,47	1,019756
12,68	0,973054	12,98	0,98715	13,28	1,001689	13,58	1,013654	13,88	1,020973	14,18	1,022814	14,48	1,019579
12,69	0,973481	12,99	0,987646	13,29	1,002143	13,59	1,013981	13,89	1,021124	14,19	1,022782	14,49	1,019398
12,7	0,973912	13	0,988142	13,3	1,002595	13,6	1,014303	13,9	1,021268	14,2	1,022745	14,5	1,019212
12,71	0,974347	13,01	0,988639	13,31	1,003044	13,61	1,014619	13,91	1,021407	14,21	1,022702	14,51	1,019023
12,72	0,974786	13,02	0,989135	13,32	1,003489	13,62	1,01493	13,92	1,021539	14,22	1,022654	14,52	1,01883
12,73	0,975228	13,03	0,989632	13,33	1,003931	13,63	1,015235	13,93	1,021664	14,23	1,0226	14,53	1,018633
12,74	0,975675	13,04	0,990128	13,34	1,00437	13,64	1,015535	13,94	1,021784	14,24	1,02254	14,54	1,018432
12,75	0,976124	13,05	0,990624	13,35	1,004805	13,65	1,015829	13,95	1,021897	14,25	1,022475	14,55	1,018227
12,76	0,976578	13,06	0,99112	13,36	1,005237	13,66	1,016118	13,96	1,022004	14,26	1,022405	14,56	1,018019
12,77	0,977034	13,07	0,991615	13,37	1,005665	13,67	1,016401	13,97	1,022105	14,27	1,022329	14,57	1,017807
12,78	0,977494	13,08	0,99211	13,38	1,006089	13,68	1,016678	13,98	1,0222	14,28	1,022248	14,58	1,017591
12,79	0,977957	13,09	0,992604	13,39	1,006509	13,69	1,016949	13,99	1,022288	14,29	1,022161	14,59	1,017372
12,8	0,978422	13,1	0,993097	13,4	1,006925	13,7	1,017215	14	1,02237	14,3	1,022069	14,6	1,01715

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
14,61	1,016924	14,91	1,008991	15,21	1,000213	15,51	0,992521	15,81	0,987351	16,11	0,985422	16,41	0,986685
14,62	1,016696	14,92	1,0087	15,22	0,99993	15,52	0,992302	15,82	0,987233	16,12	0,985415	16,42	0,986775
14,63	1,016464	14,93	1,008409	15,23	0,999647	15,53	0,992086	15,83	0,987118	16,13	0,985411	16,43	0,986869
14,64	1,016228	14,94	1,008117	15,24	0,999367	15,54	0,991873	15,84	0,987007	16,14	0,985411	16,44	0,986964
14,65	1,01599	14,95	1,007824	15,25	0,999087	15,55	0,991662	15,85	0,9869	16,15	0,985415	16,45	0,987063
14,66	1,015749	14,96	1,007531	15,26	0,998809	15,56	0,991455	15,86	0,986797	16,16	0,985422	16,46	0,987164
14,67	1,015505	14,97	1,007237	15,27	0,998533	15,57	0,991251	15,87	0,986697	16,17	0,985433	16,47	0,987268
14,68	1,015259	14,98	1,006942	15,28	0,998258	15,58	0,99105	15,88	0,986601	16,18	0,985447	16,48	0,987375
14,69	1,015009	14,99	1,006647	15,29	0,997985	15,59	0,990852	15,89	0,986508	16,19	0,985465	16,49	0,987484
14,7	1,014757	15	1,006352	15,3	0,997714	15,6	0,990658	15,9	0,98642	16,2	0,985486	16,5	0,987596
14,71	1,014502	15,01	1,006057	15,31	0,997445	15,61	0,990466	15,91	0,986335	16,21	0,985511	16,51	0,98771
14,72	1,014245	15,02	1,005761	15,32	0,997177	15,62	0,990278	15,92	0,986254	16,22	0,985539	16,52	0,987826
14,73	1,013986	15,03	1,005466	15,33	0,996911	15,63	0,990093	15,93	0,986177	16,23	0,98557	16,53	0,987945
14,74	1,013724	15,04	1,00517	15,34	0,996648	15,64	0,989911	15,94	0,986103	16,24	0,985605	16,54	0,988066
14,75	1,01346	15,05	1,004875	15,35	0,996386	15,65	0,989733	15,95	0,986033	16,25	0,985643	16,55	0,98819
14,76	1,013193	15,06	1,004579	15,36	0,996127	15,66	0,989558	15,96	0,985967	16,26	0,985685	16,56	0,988316
14,77	1,012925	15,07	1,004284	15,37	0,995869	15,67	0,989386	15,97	0,985905	16,27	0,985729	16,57	0,988444
14,78	1,012654	15,08	1,003989	15,38	0,995614	15,68	0,989218	15,98	0,985846	16,28	0,985777	16,58	0,988574
14,79	1,012382	15,09	1,003694	15,39	0,995361	15,69	0,989053	15,99	0,985791	16,29	0,985829	16,59	0,988706
14,8	1,012108	15,1	1,0034	15,4	0,995111	15,7	0,988892	16	0,98574	16,3	0,985883	16,6	0,988841
14,81	1,011832	15,11	1,003107	15,41	0,994862	15,71	0,988734	16,01	0,985693	16,31	0,985941	16,61	0,988977
14,82	1,011554	15,12	1,002814	15,42	0,994617	15,72	0,98858	16,02	0,985649	16,32	0,986002	16,62	0,989116
14,83	1,011275	15,13	1,002521	15,43	0,994373	15,73	0,988429	16,03	0,985609	16,33	0,986065	16,63	0,989256
14,84	1,010994	15,14	1,002229	15,44	0,994133	15,74	0,988281	16,04	0,985573	16,34	0,986132	16,64	0,989398
14,85	1,010712	15,15	1,001938	15,45	0,993894	15,75	0,988138	16,05	0,98554	16,35	0,986202	16,65	0,989543
14,86	1,010428	15,16	1,001648	15,46	0,993659	15,76	0,987998	16,06	0,985511	16,36	0,986275	16,66	0,989689
14,87	1,010143	15,17	1,001359	15,47	0,993426	15,77	0,987861	16,07	0,985486	16,37	0,986352	16,67	0,989836
14,88	1,009856	15,18	1,001071	15,48	0,993195	15,78	0,987728	16,08	0,985464	16,38	0,986431	16,68	0,989986
14,89	1,009569	15,19	1,000784	15,49	0,992968	15,79	0,987599	16,09	0,985446	16,39	0,986512	16,69	0,990137
14,9	1,00928	15,2	1,000498	15,5	0,992743	15,8	0,987473	16,1	0,985432	16,4	0,986597	16,7	0,99029

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
16,71	0,990445	17,01	0,995589	17,31	1,000875	17,61	1,005206	17,91	1,00783	18,21	1,008451	18,51	1,007225
16,72	0,990601	17,02	0,995769	17,32	1,00104	17,62	1,005324	17,92	1,007883	18,22	1,008438	18,52	1,007157
16,73	0,990758	17,03	0,99595	17,33	1,001204	17,63	1,00544	17,93	1,007934	18,23	1,008423	18,53	1,007088
16,74	0,990917	17,04	0,996131	17,34	1,001367	17,64	1,005554	17,94	1,007983	18,24	1,008405	18,54	1,007018
16,75	0,991078	17,05	0,996312	17,35	1,001529	17,65	1,005666	17,95	1,008029	18,25	1,008386	18,55	1,006946
16,76	0,991239	17,06	0,996493	17,36	1,001689	17,66	1,005776	17,96	1,008074	18,26	1,008365	18,56	1,006873
16,77	0,991402	17,07	0,996673	17,37	1,001848	17,67	1,005883	17,97	1,008115	18,27	1,008342	18,57	1,006798
16,78	0,991567	17,08	0,996854	17,38	1,002006	17,68	1,005989	17,98	1,008155	18,28	1,008316	18,58	1,006722
16,79	0,991732	17,09	0,997035	17,39	1,002162	17,69	1,006093	17,99	1,008193	18,29	1,008289	18,59	1,006645
16,8	0,991899	17,1	0,997215	17,4	1,002317	17,7	1,006195	18	1,008228	18,3	1,00826	18,6	1,006566
16,81	0,992067	17,11	0,997395	17,41	1,002471	17,71	1,006295	18,01	1,00826	18,31	1,008228	18,61	1,006486
16,82	0,992236	17,12	0,997574	17,42	1,002623	17,72	1,006392	18,02	1,008291	18,32	1,008195	18,62	1,006405
16,83	0,992406	17,13	0,997754	17,43	1,002774	17,73	1,006487	18,03	1,008319	18,33	1,00816	18,63	1,006323
16,84	0,992577	17,14	0,997933	17,44	1,002923	17,74	1,006581	18,04	1,008346	18,34	1,008123	18,64	1,006239
16,85	0,992749	17,15	0,998111	17,45	1,003071	17,75	1,006672	18,05	1,008369	18,35	1,008084	18,65	1,006155
16,86	0,992922	17,16	0,998289	17,46	1,003217	17,76	1,006761	18,06	1,008391	18,36	1,008044	18,66	1,006069
16,87	0,993095	17,17	0,998467	17,47	1,003362	17,77	1,006848	18,07	1,00841	18,37	1,008001	18,67	1,005982
16,88	0,99327	17,18	0,998644	17,48	1,003505	17,78	1,006932	18,08	1,008427	18,38	1,007957	18,68	1,005894
16,89	0,993445	17,19	0,99882	17,49	1,003646	17,79	1,007015	18,09	1,008442	18,39	1,007911	18,69	1,005805
16,9	0,993621	17,2	0,998996	17,5	1,003786	17,8	1,007095	18,1	1,008455	18,4	1,007863	18,7	1,005714
16,91	0,993797	17,21	0,999171	17,51	1,003924	17,81	1,007173	18,11	1,008466	18,41	1,007813	18,71	1,005623
16,92	0,993975	17,22	0,999345	17,52	1,00406	17,82	1,007249	18,12	1,008474	18,42	1,007762	18,72	1,005531
16,93	0,994152	17,23	0,999519	17,53	1,004195	17,83	1,007322	18,13	1,00848	18,43	1,007709	18,73	1,005438
16,94	0,994331	17,24	0,999691	17,54	1,004327	17,84	1,007394	18,14	1,008484	18,44	1,007654	18,74	1,005344
16,95	0,994509	17,25	0,999863	17,55	1,004458	17,85	1,007463	18,15	1,008486	18,45	1,007597	18,75	1,005249
16,96	0,994688	17,26	1,000034	17,56	1,004588	17,86	1,007529	18,16	1,008485	18,46	1,007539	18,76	1,005154
16,97	0,994868	17,27	1,000205	17,57	1,004715	17,87	1,007594	18,17	1,008483	18,47	1,007479	18,77	1,005057
16,98	0,995048	17,28	1,000374	17,58	1,004841	17,88	1,007656	18,18	1,008478	18,48	1,007418	18,78	1,00496
16,99	0,995228	17,29	1,000542	17,59	1,004964	17,89	1,007716	18,19	1,008471	18,49	1,007355	18,79	1,004861
17	0,995408	17,3	1,000709	17,6	1,005086	17,9	1,007774	18,2	1,008462	18,5	1,007291	18,8	1,004762

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
18,81	1,004663	19,11	1,001479	19,21	1,000411	19,51	0,997535	19,81	0,995548	19,9	0,995175
18,82	1,004562	19,12	1,001372	19,22	1,000306	19,52	0,997452	19,82	0,995501	19,91	0,99514
18,83	1,004461	19,13	1,001264	19,23	1,000201	19,53	0,99737	19,83	0,995455	19,92	0,995107
18,84	1,00436	19,14	1,001156	19,24	1,000097	19,54	0,997289	19,84	0,995411	19,93	0,995075
18,85	1,004258	19,15	1,001049	19,25	0,999993	19,55	0,997209	19,85	0,995368	19,94	0,995045
18,86	1,004155	19,16	1,000942	19,26	0,99989	19,56	0,99713	19,86	0,995327	19,95	0,995016
18,87	1,004051	19,17	1,000835	19,27	0,999787	19,57	0,997053	19,87	0,995287	19,96	0,994988
18,88	1,003948	19,18	1,000728	19,28	0,999685	19,58	0,996976	19,88	0,995248	19,97	0,994962
18,89	1,003843	19,19	1,000622	19,29	0,999584	19,59	0,996901	19,89	0,995211	19,98	0,994937
18,9	1,003738	19,2	1,000516	19,3	0,999483	19,6	0,996827	19,9	0,995175	19,99	0,994913
18,91	1,003633	19,21	1,000411	19,31	0,999382	19,61	0,996753	19,91	0,99514	20	0,994891
18,92	1,003527	19,22	1,000306	19,32	0,999282	19,62	0,996681	19,92	0,995107	20,01	0,99487
18,93	1,003421	19,23	1,000201	19,33	0,999183	19,63	0,996611	19,93	0,995075	20,02	0,99485
18,94	1,003315	19,24	1,000097	19,34	0,999085	19,64	0,996541	19,94	0,995045	20,03	0,994832
18,95	1,003208	19,25	0,999993	19,35	0,998987	19,65	0,996473	19,95	0,995016	20,04	0,994815
18,96	1,003101	19,26	0,99989	19,36	0,99889	19,66	0,996405	19,96	0,994988	20,05	0,9948
18,97	1,002994	19,27	0,999787	19,37	0,998794	19,67	0,996339	19,97	0,994962	20,06	0,994786
18,98	1,002886	19,28	0,999685	19,38	0,998698	19,68	0,996275	19,98	0,994937	20,07	0,994773
18,99	1,002779	19,29	0,999584	19,39	0,998604	19,69	0,996211	19,99	0,994913	20,08	0,994762
19	1,002671	19,3	0,999483	19,4	0,99851	19,7	0,996149	20	0,994891	20,09	0,994752
19,01	1,002563	19,11	1,001479	19,41	0,998417	19,71	0,996088	19,81	0,995548	20,1	0,994743
19,02	1,002454	19,12	1,001372	19,42	0,998324	19,72	0,996028	19,82	0,995501	20,11	0,994736
19,03	1,002346	19,13	1,001264	19,43	0,998233	19,73	0,995969	19,83	0,995455	20,12	0,99473
19,04	1,002238	19,14	1,001156	19,44	0,998142	19,74	0,995912	19,84	0,995411	20,13	0,994725
19,05	1,002129	19,15	1,001049	19,45	0,998053	19,75	0,995856	19,85	0,995368	20,14	0,994721
19,06	1,002021	19,16	1,000942	19,46	0,997964	19,76	0,995801	19,86	0,995327	20,15	0,994719
19,07	1,001912	19,17	1,000835	19,47	0,997876	19,77	0,995748	19,87	0,995287	20,16	0,994719
19,08	1,001804	19,18	1,000728	19,48	0,997789	19,78	0,995696	19,88	0,995248	20,17	0,994719
19,09	1,001696	19,19	1,000622	19,49	0,997703	19,79	0,995645	19,89	0,995211	20,18	0,994721
19,1	1,001588	19,2	1,000516	19,5	0,997618	19,8	0,995596	19,9	0,995175	20,19	0,994724

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
20,19	0,994724	20,49	0,995374	20,79	0,996871	21,09	0,998791	21,39	1,000682	21,69	1,002162	21,99	1,002986
20,2	0,994729	20,5	0,995413	20,8	0,996931	21,1	0,998857	21,4	1,00074	21,7	1,002201	22	1,003001
20,21	0,994734	20,51	0,995452	20,81	0,996991	21,11	0,998923	21,41	1,000797	21,71	1,00224	22,01	1,003015
20,22	0,994741	20,52	0,995492	20,82	0,997051	21,12	0,998988	21,42	1,000854	21,72	1,002277	22,02	1,003028
20,23	0,99475	20,53	0,995533	20,83	0,997113	21,13	0,999054	21,43	1,00091	21,73	1,002314	22,03	1,00304
20,24	0,994759	20,54	0,995575	20,84	0,997174	21,14	0,99912	21,44	1,000966	21,74	1,00235	22,04	1,003052
20,25	0,99477	20,55	0,995618	20,85	0,997236	21,15	0,999185	21,45	1,001021	21,75	1,002385	22,05	1,003062
20,26	0,994782	20,56	0,995662	20,86	0,997298	21,16	0,99925	21,46	1,001076	21,76	1,002419	22,06	1,003072
20,27	0,994795	20,57	0,995707	20,87	0,997361	21,17	0,999316	21,47	1,00113	21,77	1,002453	22,07	1,003081
20,28	0,994809	20,58	0,995752	20,88	0,997423	21,18	0,999381	21,48	1,001184	21,78	1,002485	22,08	1,003089
20,29	0,994825	20,59	0,995798	20,89	0,997487	21,19	0,999446	21,49	1,001237	21,79	1,002517	22,09	1,003097
20,3	0,994842	20,6	0,995845	20,9	0,99755	21,2	0,99951	21,5	1,001289	21,8	1,002548	22,1	1,003103
20,31	0,99486	20,61	0,995893	20,91	0,997614	21,21	0,999575	21,51	1,001341	21,81	1,002579	22,11	1,003109
20,32	0,994879	20,62	0,995942	20,92	0,997678	21,22	0,999639	21,52	1,001392	21,82	1,002608	22,12	1,003114
20,33	0,994899	20,63	0,995991	20,93	0,997742	21,23	0,999703	21,53	1,001443	21,83	1,002637	22,13	1,003118
20,34	0,994921	20,64	0,996041	20,94	0,997807	21,24	0,999767	21,54	1,001493	21,84	1,002665	22,14	1,003121
20,35	0,994944	20,65	0,996092	20,95	0,997872	21,25	0,99983	21,55	1,001542	21,85	1,002692	22,15	1,003124
20,36	0,994967	20,66	0,996144	20,96	0,997936	21,26	0,999893	21,56	1,001591	21,86	1,002719	22,16	1,003125
20,37	0,994992	20,67	0,996196	20,97	0,998002	21,27	0,999956	21,57	1,001639	21,87	1,002744	22,17	1,003126
20,38	0,995018	20,68	0,996249	20,98	0,998067	21,28	1,000019	21,58	1,001686	21,88	1,002769	22,18	1,003126
20,39	0,995045	20,69	0,996303	20,99	0,998132	21,29	1,000081	21,59	1,001733	21,89	1,002793	22,19	1,003126
20,4	0,995074	20,7	0,996357	21	0,998198	21,3	1,000143	21,6	1,001779	21,9	1,002816	22,2	1,003124
20,41	0,995103	20,71	0,996412	21,01	0,998263	21,31	1,000204	21,61	1,001825	21,91	1,002838	22,21	1,003122
20,42	0,995133	20,72	0,996467	21,02	0,998329	21,32	1,000265	21,62	1,001869	21,92	1,002859	22,22	1,003119
20,43	0,995165	20,73	0,996523	21,03	0,998395	21,33	1,000326	21,63	1,001913	21,93	1,00288	22,23	1,003115
20,44	0,995197	20,74	0,99658	21,04	0,998461	21,34	1,000387	21,64	1,001957	21,94	1,0029	22,24	1,003111
20,45	0,995231	20,75	0,996637	21,05	0,998527	21,35	1,000447	21,65	1,001999	21,95	1,002919	22,25	1,003105
20,46	0,995265	20,76	0,996695	21,06	0,998593	21,36	1,000506	21,66	1,002041	21,96	1,002937	22,26	1,003099
20,47	0,9953	20,77	0,996753	21,07	0,998659	21,37	1,000565	21,67	1,002082	21,97	1,002954	22,27	1,003092
20,48	0,995337	20,78	0,996812	21,08	0,998725	21,38	1,000624	21,68	1,002123	21,98	1,00297	22,28	1,003085

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d	t	d
22,29	1,003076	22,59	1,002518	22,89	1,001516	23,19	1,000338	23,49	0,999252	23,79	0,998466	24,09	0,998102
22,3	1,003067	22,6	1,00249	22,9	1,001478	23,2	1,000299	23,5	0,99922	23,8	0,998447	24,1	0,998097
22,31	1,003058	22,61	1,002462	22,91	1,00144	23,21	1,00026	23,51	0,999188	23,81	0,998428	24,11	0,998093
22,32	1,003047	22,62	1,002434	22,92	1,001402	23,22	1,000222	23,52	0,999157	23,82	0,99841	24,12	0,99809
22,33	1,003036	22,63	1,002404	22,93	1,001363	23,23	1,000183	23,53	0,999126	23,83	0,998392	24,13	0,998087
22,34	1,003024	22,64	1,002375	22,94	1,001324	23,24	1,000144	23,54	0,999095	23,84	0,998375	24,14	0,998085
22,35	1,003012	22,65	1,002345	22,95	1,001286	23,25	1,000106	23,55	0,999065	23,85	0,998358	24,15	0,998083
22,36	1,002998	22,66	1,002315	22,96	1,001247	23,26	1,000068	23,56	0,999035	23,86	0,998341	24,16	0,998081
22,37	1,002984	22,67	1,002284	22,97	1,001208	23,27	1,00003	23,57	0,999006	23,87	0,998325	24,17	0,99808
22,38	1,00297	22,68	1,002252	22,98	1,001169	23,28	0,999992	23,58	0,998977	23,88	0,99831	24,18	0,99808
22,39	1,002954	22,69	1,002221	22,99	1,001129	23,29	0,999954	23,59	0,998948	23,89	0,998295	24,19	0,99808
22,4	1,002938	22,7	1,002189	23	1,00109	23,3	0,999917	23,6	0,99892	23,9	0,998281	24,2	0,99808
22,41	1,002922	22,71	1,002156	23,01	1,00105	23,31	0,999879	23,61	0,998892	23,91	0,998267	24,21	0,998081
22,42	1,002904	22,72	1,002123	23,02	1,001011	23,32	0,999842	23,62	0,998865	23,92	0,998253	24,22	0,998082
22,43	1,002886	22,73	1,00209	23,03	1,000971	23,33	0,999805	23,63	0,998838	23,93	0,99824	24,23	0,998084
22,44	1,002868	22,74	1,002056	23,04	1,000932	23,34	0,999769	23,64	0,998811	23,94	0,998228	24,24	0,998086
22,45	1,002848	22,75	1,002022	23,05	1,000892	23,35	0,999732	23,65	0,998785	23,95	0,998216	24,25	0,998089
22,46	1,002829	22,76	1,001988	23,06	1,000852	23,36	0,999696	23,66	0,99876	23,96	0,998205	24,26	0,998092
22,47	1,002808	22,77	1,001953	23,07	1,000813	23,37	0,99966	23,67	0,998734	23,97	0,998194	24,27	0,998096
22,48	1,002787	22,78	1,001919	23,08	1,000773	23,38	0,999625	23,68	0,99871	23,98	0,998183	24,28	0,9981
22,49	1,002765	22,79	1,001883	23,09	1,000733	23,39	0,999589	23,69	0,998685	23,99	0,998173	24,29	0,998105
22,5	1,002743	22,8	1,001848	23,1	1,000694	23,4	0,999554	23,7	0,998661	24	0,998164	24,3	0,99811
22,51	1,00272	22,81	1,001812	23,11	1,000654	23,41	0,999519	23,71	0,998638	24,01	0,998155	24,31	0,998115
22,52	1,002697	22,82	1,001776	23,12	1,000614	23,42	0,999485	23,72	0,998615	24,02	0,998147	24,32	0,998121
22,53	1,002673	22,83	1,001739	23,13	1,000575	23,43	0,999451	23,73	0,998592	24,03	0,998139	24,33	0,998128
22,54	1,002648	22,84	1,001703	23,14	1,000535	23,44	0,999417	23,74	0,99857	24,04	0,998131	24,34	0,998134
22,55	1,002623	22,85	1,001666	23,15	1,000496	23,45	0,999383	23,75	0,998548	24,05	0,998125	24,35	0,998142
22,56	1,002598	22,86	1,001629	23,16	1,000456	23,46	0,99935	23,76	0,998527	24,06	0,998118	24,36	0,998149
22,57	1,002572	22,87	1,001591	23,17	1,000417	23,47	0,999317	23,77	0,998506	24,07	0,998112	24,37	0,998157
22,58	1,002545	22,88	1,001554	23,18	1,000378	23,48	0,999284	23,78	0,998486	24,08	0,998107	24,38	0,998166

ПРИЛОЖЕНИЕ А

t	d	t	d	t	d
24,39	0,998175	24,69	0,998609	24,99	0,999266
24,4	0,998184	24,7	0,998628	25	0,99929
24,41	0,998194	24,71	0,998648		
24,42	0,998204	24,72	0,998668		
24,43	0,998214	24,73	0,998688		
24,44	0,998225	24,74	0,998708		
24,45	0,998236	24,75	0,998728		
24,46	0,998248	24,76	0,998749		
24,47	0,99826	24,77	0,998769		
24,48	0,998272	24,78	0,99879		
24,49	0,998285	24,79	0,998812		
24,5	0,998298	24,8	0,998833		
24,51	0,998312	24,81	0,998854		
24,52	0,998326	24,82	0,998876		
24,53	0,99834	24,83	0,998898		
24,54	0,998354	24,84	0,99892		
24,55	0,998369	24,85	0,998942		
24,56	0,998384	24,86	0,998965		
24,57	0,9984	24,87	0,998987		
24,58	0,998416	24,88	0,99901		
24,59	0,998432	24,89	0,999033		
24,6	0,998448	24,9	0,999056		
24,61	0,998465	24,91	0,999079		
24,62	0,998482	24,92	0,999102		
24,63	0,998499	24,93	0,999125		
24,64	0,998517	24,94	0,999148		
24,65	0,998535	24,95	0,999172		
24,66	0,998553	24,96	0,999195		
24,67	0,998572	24,97	0,999219		
24,68	0,99859	24,98	0,999243		

Карта сегментирования рынка

		Виды предоставленных услуг				
		Синтез системы по принципу динамической компенсации	Расчет регулятора при помощи уравнений синтеза	Модальный синтез регулятора	Идентификация методом наименьших квадратов	Идентификация методом вещественной интерполяции
Потребители	Крупные предприятия					
	Средние предприятия					
	Мелкие предприятия					

SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявленная экономичность и эффективность разработанных технологий.</p> <p>С2. Квалифицированный персонал.</p> <p>С3. Новизна проекта.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров.</p> <p>Сл2. Отсутствие рекламы продукта.</p> <p>Сл3. Узкая продуктивная линейка.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Повышение стоимости продукта у конкурента.</p> <p>В2. Новые виды продукции.</p> <p>В3. Сотрудничество с другими компаниями.</p> <p>В4. Определение целевой аудитории.</p>	<p>СиВ:</p> <p>Разработка методов идентификации и синтеза в программной среде Mathcad для повышения эффективности труда и уменьшения производственных затрат (времени) с высоким качеством и инжиниринговой услугой.</p>	<p>СлиВ:</p> <p>1. Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей..</p> <p>2. Создание инжиниринговой услуги с целью обучения работе с выпускаемым продуктом.</p> <p>3. Размещение рекламы в сети Internet.</p> <p>4. Разработка методов идентификации и синтеза для нелинейных систем.</p>

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкая репутация компании.</p> <p>У2. Развитая конкуренция.</p> <p>У3. Ограничения на экспорт технологии.</p>	<p>СиУ:</p> <p>1.Реклама продукции.</p> <p>2.Создание конкурентных преимуществ продукта.</p> <p>3. Расширение линейки продукта.</p>	<p>СлиУ:</p> <p>1.Повышение квалификации кадров у потенциальных потребителей..</p> <p>2.Создание инжиниринговой услуги с целью обучения работе с выпускаемым продуктом.</p> <p>3.Размещение рекламы в сети Internet.</p> <p>4.Разработка методов идентификации и синтеза для нелинейных систем.</p> <p>5. Создание конкурентных преимуществ продукта.</p>

Морфологическая матрица для определения и улучшения показателей качества системы автоматического регулирования по экспериментальным данным

	1	2	3
А. Устойчивость	Устойчива	На границе устойчивости	Не устойчива
Б. Предполагаемый порядок системы	1 порядок	2 порядок	3 порядок и выше
В. Допустимое время, потраченное на идентификацию и синтез, дни	1-7	7-14	14 и более
Г. Идентификация параметров объекта управления	Метод наименьших квадратов	Метод вещественной интерполяции	Корреляционный метод
Д. Синтез регулятора	Принцип динамической компенсации	Уравнение синтеза	Модальный синтез
Е. Допустимое перерегулирование скорректированной системы, %	0-15	15-30	30 и более
Ж. Допустимая колебательность скорректированной системы	0-1	1-2	2 и более
И. Допустимое быстродействие системы, с.	До 0,5 с	0,5 -3	3 и более

Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Подготовительный этап		
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР - 50% И - 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР - 100% И – 100%
Изучение предметной области	И	И-100%
Идентификация параметров объекта управления		
Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов	И	И – 100%
Идентификация параметров объекта управления вещественно интерполяционным методом		
Синтез регулятора		
Синтез регуляторов принципом динамической компенсации	И	И – 100%
Расчет регулятора с помощью уравнений синтеза		
Синтез модального регулятора		

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Экономическое обоснование		
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	И – 100%
Анализ опасных и вредных производственных факторов		
Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях	И	И – 100%
Документирование		
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	НР, И	НР – 10% И – 100%
Оформление графического материала	И	И -100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 100% И -100%
Оформление данного материала в программе для удобства использования	И	И-100%

Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{рд}$		$T_{кд}$	
					НР	И	НР	И
Подготовительный этап								
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	1	2	2	3	-	4	-
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	4	6	5	3	6	4	8
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	2	3	3	4	4
Изучение предметной области	И	7	10	9	-	11	-	14
Идентификация параметров объекта управления								
Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов	И	7	10	9	-	12	-	15

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{рд}$		$T_{кд}$	
					НР	И	НР	И
Идентификация параметров объекта управления вещественно интерполяционным методом	И	5	7	6	-	8	-	10
Синтез регулятора								
Синтез регуляторов принципом динамической компенсации	И	4	5	5	-	6	-	8
Расчет регулятора с помощью уравнений синтеза		4	5	5	-	6	-	8
Синтез модального регулятора		5	8	7	-	9	-	11

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
Экономическое обоснование								
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	5	8	7	-	9	-	11
Анализ опасных и вредных производственных факторов								
Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях	И	4	7	6	-	8	-	10
Документирование								
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	НР, И	6	8	7	1	9	1	11

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	$T_{РД}$		$T_{КД}$	
					НР	И	НР	И
Оформление графического материала	И	4	8	6	-	8	-	10
Подведение итогов	НР, И	2	4	3	4	4	5	5
Оформление данного материала в программе для удобства использования	И	2	4	3	-	4	-	5

Календарный план проведения научного исследования

Вид работ	Исполнители	Длительность работ	Начало	Окончание
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	4	Ср. 01.03.2017	Пт. 03.03.2017
Составление и утверждение ТЗ	НР	4	Пт. 03.03.2017	Ср. 08.03.2017
Составление и утверждение ТЗ	И	8	Пт. 03.03.2017	Пн. 13.03.2017
Разработка календарного плана	НР	4	Пн. 13.03.2017	Ср.15.03.2017
Разработка календарного плана	И	4	Пн. 13.03.2017	Ср.15.03.2017
Изучение предметной области	И	14	Ср.15.03.2017	Сб. 25.03.2017
Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов	И	15	Сб. 25.03.2017	Вт. 04.04.2017
Идентификация параметров объекта управления вещественно интерполяционным методом	И	10	Вт. 04.04.2017	Вт. 11.04.2017
Синтез регуляторов принципом динамической компенсации	И	8	Вт. 11.04.2017	Вс. 16.04.2017

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Вид работ	Исполнители	Длительность работ	Начало	Конец
Расчет регулятора с помощью уравнений синтеза	И	8	Вс. 16.04.2017	Пт. 21.04.2017
Синтез модального регулятора	И	11	Пт. 21.04.2017	Сб. 29.04.2017
Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	11	Сб. 29.04.2017	Вс. 07.05.2017
Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в ЧС	И	10	Вс. 07.05.2017	Вс. 14.05.2017
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	НР	1	Пн. 15.05.2017	Пн. 15.05.2017
Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	И	11	Пн. 15.05.2017	Вт. 23.05.2017
Оформление графического материала	И	10	Вт. 23.05.2017	Ср. 31.05.2017
Подведение итогов	НР	5	Ср. 31.05.2017	Вт. 06.06.2017
Подведение итогов	И	5	Ср. 31.05.2017	Вт. 06.06.2017
Оформление данного материала в программе	И	5	Вт. 06.06.2017	Вс. 11.06.2017

Диаграмма Ганта

№ работ	Вид работ	Исполнители	T_{ki} , дни	Продолжительность выполнения работ												
				Март			Апрель			Май			Июнь			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2		
1	Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	2	■												
2	Составление и утверждение ТЗ	НР, И	6	■	■											
3	Разработка календарного плана	НР, И	2		■											
4	Изучение предметной области	И	10		■	■										
5	Идентификация параметров объекта управления методом наименьших квадратов	И	10			■	■									
6	Идентификация параметров объекта управления вещественно интерполяционным методом	И	7				■	■								
7	Синтез регуляторов принципом динамической компенсации	И	5					■	■							

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , дни	Продолжительность выполнения работ													
				Март			Апрель			Май			Июнь				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2			
8	Расчет регулятора с помощью уравнений синтеза	И	5														
9	Синтез модального регулятора	И	8														
10	Анализ перспективности разработки, оценка целесообразности разработки и затрат	И	8														
11	Анализ выявленных вредных и опасных факторов производственной среды, защита в чрезвычайных ситуациях	И	7														
12	Составление и согласование расчетно-пояснительной записки	НР, И	8														
13	Оформление графического материала	И	8														
14	Подведение итогов	НР, И	4														
		И	4														

 - НР  - И

