

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

Институт Кибернетики

Направление подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра Систем управления и мехатроники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование возможности синтеза регуляторов двухконтурных систем автоматического управления численным методом

УДК 681.515-047.84:519.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ51	Рудко М.И.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. СУМ	Гончаров В.И.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Конотопский В. Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	Пустовойтова М.И.	К.Х.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. СУМ ИК	Губин В.Е.	К.Т.Н.		

Планируемые результаты обучения

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные</i>		
P1	применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, в том числе их систем управления.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-3, ОПК-1, ОПК-4, ОК-1, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических устройств и систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-4, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОК-1, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных мехатронных и робототехнических устройств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-15, ПК-18, ОПК-3, ОПК-6, ОК-1, ОК-5, ОК-6, ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации мехатронных и робототехнических модулей, устройств и систем.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-10, ПК-11, ПК-12, ПК-18, ОПК-4, ОПК-6, ОК-1, ОК-4, ОК-6, ОК-8), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации мехатронных и робототехнических средств и систем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, ПК-6, ПК-13, ПК-17, ПК-18, ОПК-2, ОПК-3, ОК-1, ОК-3, ОК-4, ОК-6, ОК-7, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

P6	понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в мехатронике и робототехнике и знать области их применения, в том числе в автоматизированных производствах.	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-3, ПК-7, ОПК-1, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-9, ОК-10), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные</i>		
P7	эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды	Требования ФГОС (ПК-1, ПК-2 ПК-7, ПК-8, ПК-16, ПК-17, ОК-1, ОК-2, ОК-4, ОК-6, ОК-9), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ПК-9, ПК-16, ОПК-4, ОК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-8, ПК-15, ПК-16, ПК-18, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОК-3, ОК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-8, ОК-9), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3.), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEAN</i>
P10	следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ПК-8, ПК-11, ПК-16, ОПК-3, ОПК-6, ОК-4), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4, ПК-8, ОПК-3, ОПК-4, ОК-5, ОК-6, ОК-7, ОК-8), Критерий 5 АИОР (2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i> .

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

Институт Кибернетики

Направление подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника

Кафедра Систем управления и мехатроники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой СУМ

_____ Губин В.Е.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ51	Рудко М.И.

Тема работы:

Исследование возможности синтеза регуляторов двухконтурных систем автоматического управления численным методом	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	1399/с от 28.02.2017

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2017
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	- САУ прецизионного токарного станка в операторно-структурной форме с заданными динамическими характеристиками системы (временем переходного процесса, перерегулированием).
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	- существующие методы синтеза многоконтурных систем; - возможность синтеза регуляторов двухконтурной системы автоматического управления с помощью вещественного интерполяционного метода на примере САУ точного прецизионного станка; -определение корректности поставленной задачи.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	- Презентация – 13 слайдов;

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Составление и решение уравнений синтеза двухконтурных систем. Решение уравнения синтеза двухконтурных систем вещественным интерполяционным методом. Исследование возможности применения вещественного интерполяционного метода к расчету двухконтурных систем на примере прецизионного токарного станка.	Гончаров В.И.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В. Ю.
Социальная ответственность	Пустовойтова М.И.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
обзор методов синтеза многоконтурных подчинённых систем управления	

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. СУМ	Гочаров В.И.	Д.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8EM51	Рудко М.И.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ51	Рудко Максиму Игоревичу

Институт	Институт кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 Мехатроника и робототехника

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение структуры и трудоёмкости работ в рамках НТИ, разработка графика проведения НТИ, планирование бюджета НТИ.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Альтернативы проведения НИ
2. График проведения и бюджет НИ
3. 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 каф. МЕН	Конотопский Владимир Юрьевич	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ51	Рудко Максиму Игоревичу		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ЕМ51	Рудко М.И.

Институт	Кибернетики	Кафедра	СУМ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	15.04.06 Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение, электрической, пожарной и взрывной природы);
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– электробезопасность; – пожаробезопасность; – требования охраны труда при работе на ПЭВМ.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	Пустовойтова М.И.	К.Х.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЕМ51	Рудко М.И.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 107с., рис., 21 табл., 22 источника, 1 прил.

Ключевые слова: система автоматического управления, многоконтурные системы автоматического управления, уравнение синтеза, синтез регулятора, показатели качества, передаточная функция, численные методы, финансовый менеджмент и социальная ответственность.

Объектом исследования является (САУ) система автоматического управления сверх прецизионного станка с алмазным резцом.

Цель работы – определение, возможности синтеза регуляторов двухконтурной системы автоматического управления прецизионного токарного станка, с помощью вещественного интерполяционного метода.

В процессе исследования проведён анализ методов синтеза многоконтурных САУ, определён порядок синтеза контуров в системах электрического привода с подчинённым регулированием, получена математическая модель системы, произведены расчётные исследования регуляторов вещественным интерполяционным методом САУ для нелинейного уравнения синтеза системы второго порядка и третьего порядка. Произведен расчет стоимости выполнения ВКР, оценена ресурсоэффективность выбранного технического, соблюдены все требования по охране труда при выполнении данной работы.

В результате исследования были получены значения коэффициентов регуляторов САУ прецизионного токарного станка, которые удовлетворяют заданным показателям качества. Определена корректность поставленной задачи.

Степень внедрения: высокая; проект может использоваться в настоящее время, при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: проектирование станков с ЧПУ.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

Сокращения, аббревиатуры, определения

Процесс синтеза системы управления:

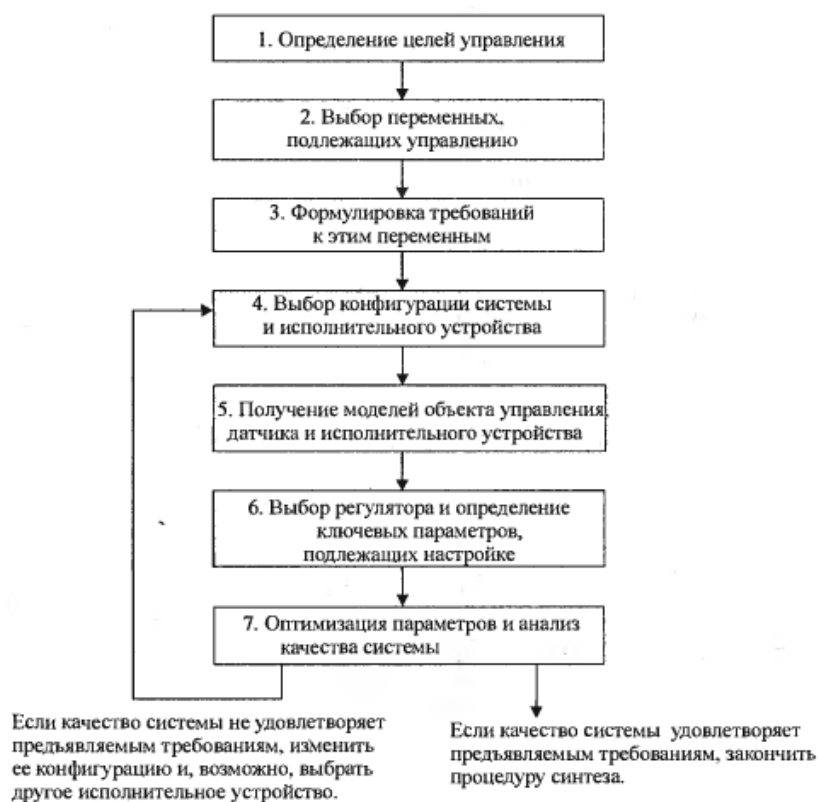


Рисунок 1 – Схема процесса синтеза САУ

САУ – система автоматического управления;

МО – модальный оптимум;

СО – симметричный оптимум;

ВИМ – вещественный интерполяционный метод;

ДПТ – двигатель постоянного тока;

ОУ – объект управления;

ОСС – операторно-структурная схема;

ЛАЧХ – логарифмическая амплитудная частотная характеристика;

ЛФЧХ – логарифмическая фазовая частотная характеристика;

ЛСОН – линейные стационарные обыкновенные непрерывные;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференцирующий;

ЧПУ – числовое программное управление;

ПФ – передаточная функция.

Оглавление

Введение.....	14
Глава 1. Составление и решение уравнения синтеза двухконтурных систем.....	16
1.1. Составление уравнения синтеза двухконтурных систем.....	16
1.2 Существующие пути решения уравнений синтеза многоконтурных систем....	19
1.2.1. Настройка контуров управления на модульный оптимум	22
1.2.2. Настройка контуров управления на симметричный оптимум.....	27
1.2.3. Порядок синтеза контуров в системах электрического привода с подчинённым регулированием	31
1.3 Основы вещественного интерполяционного метода	37
Глава 2. Решение уравнения синтеза двухконтурных систем вещественным интерполяционным методом.....	38
2.1. Упрощение уравнения синтеза на основе перехода к моделям разомкнутых систем	38
2.2. Перевод уравнения синтеза в вещественную форму	39
2.3. Формирование численной формы уравнения синтеза.....	40
Глава 3. Исследование возможности применения вещественного интерполяционного метода к расчету двухконтурных систем на примере прецизионного токарного станка	44
3.1. Система управления прецизионного токарного станка.....	44
3.2. Составление уравнения синтеза системы управления прецизионного токарного станка.....	47
3.3. Выбор метода решения системы нелинейных уравнений.....	49
3.3.1 Постановка задачи.....	49
3.3.2 Метод простой итерации	51

3.3.3 Метод Ньютона	52
3.3.4 Модификация метода Ньютона	54
3.4. Решение уравнения синтеза в случае двух неизвестных коэффициентов	55
3.5. Решение уравнения синтеза в случае трёх неизвестных коэффициентов	62
3.6 Оценивание трудностей численного решения уравнений синтеза	68
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	69
4.1 Организация и планирование научно-исследовательских работ.....	69
4.1.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	69
4.1.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	70
4.1.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	72
4.1.4 Бюджет научно-технического исследования.....	75
4.1.4.1 Расчет материальных затрат.....	75
4.1.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ.....	77
4.1.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды	80
4.1.4.5 Расчёт амортизационных расчётов.....	81
4.1.4.6 Расчет затрат на электроэнергию.....	82
4.1.4.7 Расчет затрат на научные и производственные командировки	84
4.1.4.8 Накладные расходы.....	85
4.1.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	86
4.1.4.10 Оценка экономической эффективности проекта.....	87
5 Социальная ответственность.....	89
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	90

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	92
5.2.1 Организационные мероприятия.....	92
5.2.2 Технические мероприятия.....	93
5.2.3 Условия безопасной работы.....	95
5.3 Электробезопасность	98
5.4 Пожарная и взрывная безопасность	100
Заключение	102
Список литературы:	104

Введение

Текущее время принято называть временем постиндустриальных обществ. Обществ, в экономике которых преобладает высокопроизводительная промышленность и существует индустрия знаний. В особенности, в нынешнее время, промышленности ставятся совершенно уникальные по своим ожидаемым результатам задачи, которые требуют полностью исключить человека, как рабочего элемента, выполняющего рутинные физические и умственные операции и имеющего известные недостатки (усталость, голод, интеллектуальные ограничения), из производственного цикла. Для этого необходимо развитие более технологичных и точных робототехнических комплексов, установок. Поэтому встала задача построения таких технических устройств, нахождения методов синтеза систем управления и вариаций этих методов для конкретизированных и популярных.

В задачах построения исполнительных систем управления главным считается соответствие ряду требований, которые чаще всего носят противоречивый характер. Например, требуется повысить точность отработки траектории рабочим органом робота в условиях максимально высокой скорости движения. Реальные высококачественные системы управления мехатронными устройствами, которые решают подобные задачи, являются многоконтурными. Действительно, электромеханические системы управления положением инструмента, звеном манипулятора или другим объектом имеют несколько контуров.

Все основные вопросы, связанные с процессом синтеза или коррекции, придающие системам заданные свойства, решены для одноконтурных систем управления. Однако в случае многоконтурных систем автоматического управления (САУ), существуют трудности, которые не позволяют достигать, а иногда даже приближаться с заданной точностью к наилучшему решению в рамках заданных структур и критериев.

Очевидно, что подобные системы оказываются намного сложнее по сравнению с одноконтурными. По крайней мере, число неизвестных может увеличиться в три раза, что уже делает задачи намного сложнее. При этом исходные данные о системе остаются прежними. Число функций и параметров, которые подлежат определению, как уже было сказано, возрастает, что приводит к возрастанию сложности задачи, как в вычислительном плане, так и в алгоритмическом. Поэтому одной из основных современных тенденций в теории управления является проектирование и использование многоконтурных систем. Настройка таких систем является очень интересной, но сложной задачей.

Целью диссертационной работы является определение возможности синтеза регуляторов двухконтурной системы автоматического управления прецизионного токарного станка с помощью вещественного интерполяционного метода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач:

- проведение аналитического обзора по тематике научно-исследовательской работы;
- определить возможность синтеза регуляторов двухконтурной системы автоматического управления с помощью вещественного интерполяционного метода на примере САУ точного прецизионного станка;
- определить корректность поставленной задачи.

Научная новизна основных результатов диссертационной работы состоит в применении вещественного интерполяционного метода для расчёта коэффициентов регуляторов САУ токарного станка управления.

Автор выражает благодарность за научные консультации и техническую помощь в проведении расчетных исследований д.т.н. В.И. Гончарову.

Глава 1. Составление и решение уравнения синтеза двухконтурных систем

1.1. Составление уравнения синтеза двухконтурных систем

Для записи уравнений синтеза и анализа систем широко используют структурные отображения математических моделей, описывающих процессы в этих системах. Это позволяет представлять и определять взаимосвязи между входными и выходными переменными системы, а также решать задачу их модификации.

В большинстве своём графические обозначения, которые описывают процессы и состояния в системах математических моделей, лежит понятие оператора и операторного отображения. Так в математике оператором называют математический символ, который отражает преобразование множеств одного или нескольких переменных во множество какого-либо другого переменного или в множества других переменных. Примером может быть оператор – передаточная функция $W(p)$.

Отображать связь графически можно отображать связь не только входа и выхода систем, описанных передаточной функцией, но и в вход-выходной математической моделью в дифференциальной форме. Отображение более сложных математических моделей систем производится аналогично. Последние отображают либо графами, либо структурными схемами.

Для этих целей в настоящее время используют понятие «структурные схемы». Само словосочетание входит в противоречие с ГОСТ 2.701-76 и стандарте СЭВ 651- 77, поэтому для обозначения математических моделей определяемых ими систем или устройств введено понятие в [1] «операторно-структурная схема» (ОСС). Далее в работе будет использоваться только понятие, которое отражает присущий схемам операторный характер взаимосвязей входных и выходных сигналов в отдельных их элементах.

Операторно-структурные схемы ЛСОН систем состоят из типовых элементов таких как звеньев, узлов, сумматоров и линий связи.

Для рассмотрения принципиальных особенностей уравнений синтеза многоконтурных систем обратимся к частному случаю – двухконтурной САУ, схема которой показана на рисунке 2. Принятые обозначения: $W_{Oy}(p)$ – передаточная функция объекта управления, $W_{pez1}(p)$, $W_{pez2}(p)$, $W_{Oy}(p)$ – передаточные функции регуляторов и объекта управления, K_1 , K_2 – коэффициенты обратных связей.

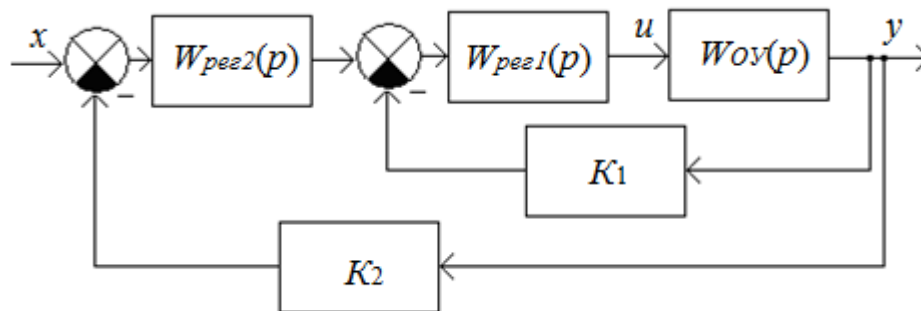


Рисунок 2 – Операторно-структурная схема двухконтурной САУ

Уравнение синтеза такой системы (1.1) содержит передаточные функции желаемой и синтезируемых систем. Можно показать, что такое уравнение содержит характерную особенность описания многоконтурных систем – оно содержит произведения искоемых переменных, то есть является нелинейным.

$$W_{зам}^{жел}(p) \cong W_{зам}^{синт}(p) \quad (1.1)$$

Задача синтеза двухконтурной системы управления сводится к решению уравнения (1.2). В развернутой форме оно сводится к следующему виду:

$$W_{зам}^{жел}(p) \cong W_{Pez2}(p) \cdot \frac{W_{Pez1}(p) \cdot W_{OY}(p)}{1 + K_1 \cdot W_{Pez1}(p) \cdot W_{OY}(p)} \bigg/ 1 + K_2 \cdot W_{Pez2}(p) \cdot \frac{W_{Pez1}(p) \cdot W_{OY}(p)}{1 + K_1 \cdot W_{Pez1}(p) \cdot W_{OY}(p)} \quad (1.2)$$

Для определенности примем, что регуляторы имеют структурные формы:

$$W_{Pez2}(p) = \frac{b_{Pez2_1} p + b_{Pez2_0}}{a_{Pez2_1} p + 1}, \quad W_{Pez1}(p) = \frac{b_{Pez1_1} p + b_{Pez1_0}}{a_{Pez1_1} p + 1} \quad (1.3)$$

Подстановка (1.3) в уравнение (1.2) позволит получить развернутую форму уравнения (1.4). Его решение сводится к определению значений семи неизвестных коэффициентов.

$$W_{зам}^{жел}(p) \cong \frac{\frac{b_{Pez2_1} p + b_{Pez2_0}}{a_{Pez2_1} p + 1} \cdot \frac{\frac{b_{Pez1_1} p + b_{Pez1_0}}{a_{Pez1_1} p + 1} \cdot W_{OY}(p)}{1 + K_1 \cdot \frac{b_{Pez1_1} p + b_{Pez1_0}}{a_{Pez1_1} p + 1} \cdot W_{OY}(p)}}{1 + K_2 \cdot \frac{b_{Pez2_1} p + b_{Pez2_0}}{a_{Pez2_1} p + 1} \cdot \frac{\frac{b_{Pez1_1} p + b_{Pez1_0}}{a_{Pez1_1} p + 1} \cdot W_{OY}(p)}{1 + K_1 \cdot \frac{b_{Pez1_1} p + b_{Pez1_0}}{a_{Pez1_1} p + 1} \cdot W_{OY}(p)}}. \quad (1.4)$$

В итоге получено уравнений синтеза (1.4) для замкнутой, двухконтурной системы, которое полностью отражает свойства системы.

Двухконтурная система является системой с последовательной коррекцией. В системе существует два контура с отрицательными обратными связями, причём один контур входит в другой, как показано на рисунке 2.

1.2 Существующие пути решения уравнений синтеза многоконтурных систем

Многоконтурные системы подчиненного регулирования с последовательной коррекцией распространены практически во всех отраслях, где применяется электропривод как постоянного, так и переменного тока. Основная идея принципа последовательной коррекции заключается в следующем: каждому звену объекта управления с большой постоянной времени соответствует звено с обратной передаточной функцией в составе регулятора. Также регулятор должен содержать соответствующее число форсирующих звеньев, поскольку в составе объекта управления имеются инерционные звенья. Сложность объекта управления в контуре регулирования определяет сложность его регулятора. Ограничиваясь пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД)-регулятором как наиболее сложным, можно говорить об оптимизации двух типов контуров с объектами управления, содержащими инерционное звено с малой постоянной времени T_μ и последовательно включенные с ним:

- инерционные звенья первого порядка (не более двух) с большими постоянными времени $T_1 > T_2 > T_\mu$ (рисунке 3, а);
- интегрирующее звено и не более одного инерционного звена с большими постоянными времени $T_0 > T_2 > T_\mu$ (рисунке 3, б).

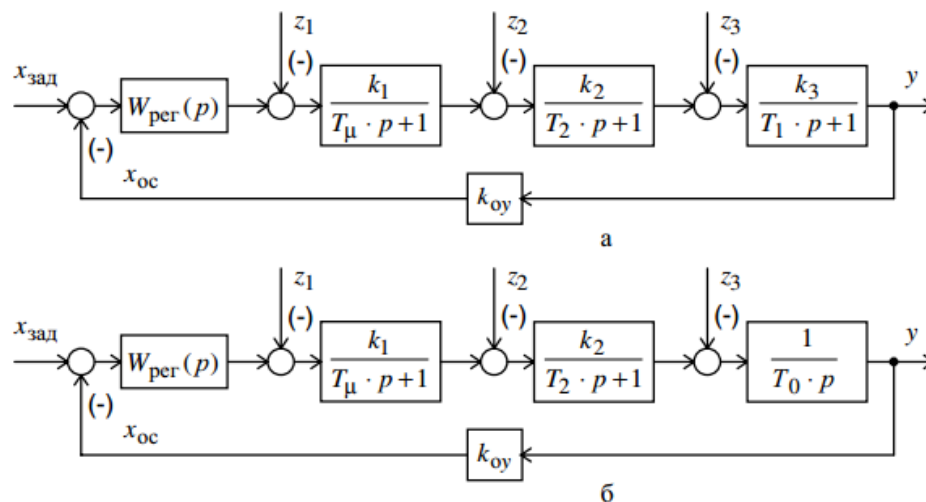


Рисунок 3 – Контура регулирования с объектом управления содержащим: а) только инерционные звенья; б) инерционные звенья и интегрирующее звено

Для настройки контура тип и параметры регулятора выбираются таким образом, что регулятор компенсирует большие инерционности объекта и приводит передаточную функцию контура к нормированному виду с учетом выбранного критерия оптимизации и значения эквивалентной малой постоянной времени. Но в практике наладки систем электропривода существует два критерия оптимальной настройки контуров, которые получили широкое и основное применение: модульный (технический) оптимум (МО) и симметричный оптимум (СО). Предложенные С. Кесслером в 50-е годы прошлого века эти критерии, получившие широкое распространение в электроприводах, и сегодня не утратили своей значимости.

В практическом использовании критерии МО и СО показали себя как простые и удобные для инженерных расчетов. В большинстве случаев эти методы позволяют обеспечить качественные показатели, удовлетворяющие в большинстве случаев предъявляемым требованиям. Для специалистов в области систем управления, занимающихся проектированием и созданием качественных электроприводов, в том числе переменного тока, разработкой

новых методов идентификации технологических процессов, настройкой промышленных регуляторов, эти ставшие классическими методы являются основными.

Несмотря на многочисленные публикации, посвященные практической оптимизации систем регулирования, ряд вопросов, касающихся выбора критериев оптимизации, качества отработки возмущающих воздействий, методики настройки систем с последовательно – параллельной коррекцией и т.д., остается по-прежнему нерешенным [2]. Новые области практического применения требуют не только сравнительного анализа существующих методик оптимизации, но и дальнейшего их развития с учетом возрастающих требования к качеству регулирования и возможностей современной элементной базы. Целью данного пункта является обобщение типовых методик оптимизации систем автоматизированного электропривода.

1.2.1. Настройка контуров управления на модульный оптимум

Замкнутый контур регулирования с единичной обратной связью (вариант с неединичной обратной связью будет рассмотрен в примере) считается настроенным на МО, если его передаточная функция имеет вид:

$$W(p)_{MO} = \frac{1}{a_M T_\mu^2 p^2 + a_M T_\mu p + 1} = \frac{1}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1}, \quad (1.5)$$

где: a_M – коэффициент настройки системы на модальный оптимум;

T_μ – малая постоянная времени некомпенсируемого апериодического звена;

$a_M = 1 \div 4$ – коэффициент модульной настройки;

$a_M = 2$ – коэффициент стандартной настройки контура.

Эту передаточную функцию можно записать в форме, которая соответствует колебательному звену:

$$W(p)_{MO} = \frac{1}{T_e^2 p^2 + 2\xi T_e p + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_k^2} p^2 + 2\xi \frac{1}{\omega_k} p + 1}, \quad (1.6)$$

где: $T_e = T_\mu \sqrt{a_M}$ – эквивалентная постоянная времени колебательного звена;

$\omega_k = \frac{1}{T_e}$ – частота недемпфированных колебаний;

$\xi = \frac{\sqrt{a_M}}{2}$ – коэффициент демпфирования колебаний.

Для стандартной настройки $T_e = T_\mu \sqrt{2}$, $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}$. Частота системы определяется как $\omega = \omega_k \sqrt{1 - \xi^2}$. Следовательно, действительная частота колебаний в контуре регулирования уменьшается с возрастанием коэффициента демпфирования. При стандартной настройке на МО, когда $a_M = 2$, $\omega = \frac{\omega_k}{\sqrt{2}}$, переходный процесс задающего воздействия представлен на рисунке 4.

Уравнение переходного процесса следующее:

$$y(t) = 1 - e^{\frac{-t}{2T_\mu}} \left(\cos \frac{t}{2T_\mu} + \sin \frac{t}{2T_\mu} \right), \quad (1.7)$$

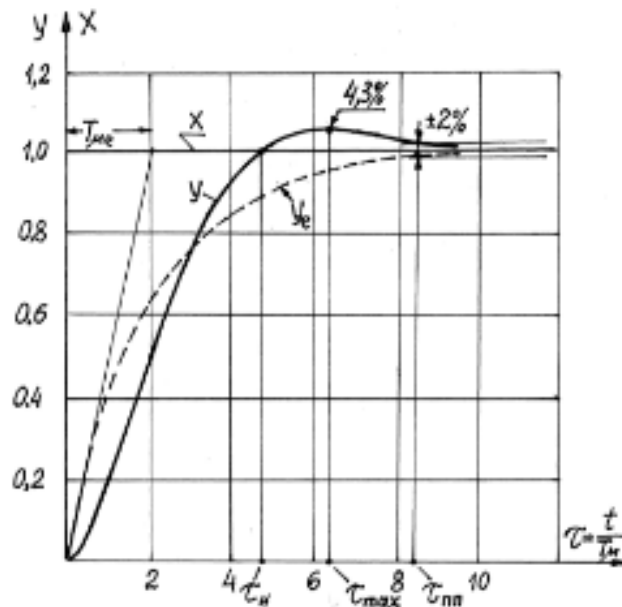


Рисунок 4 – Переходные функции контура регулирования, настроенного на модульный оптимум

Принцип модального оптимума для звена второго порядка обеспечивает следующие показатели качества: число колебаний $n_k = 1$, перерегулирование $\sigma = 4.3\%$, время первого максимума $t_{\max} = 6.3T_\mu$, время нарастания $t_H = 4.7T_\mu$, время переходного процесса $t_{III} = 8.4T_\mu$.

В контуре управления, настроенном на МО, достигнут компромисс между перерегулированием и быстродействием, когда при хорошем времени переходного процесса ($t_{III} = 8.4T_\mu$) перерегулирование составляет менее 5% ($\sigma = 4.3\%$). Для многих технологических установок такой уровень показателей качества считается приемлемым.

Разомкнутый контур, настроенный на МО, имеет передаточную функцию

$$W(p)_{MO}^p = \frac{1}{a_M T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (1.8)$$

$$W(p)_{MO}^p = \frac{1}{k_{oc} a_M T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (1.9)$$

где $k_{oc} = 1$ – коэффициент обратной связи.

Так как передаточная функция содержит одно интегрирующее звено, то настроенный контур является однократно интегрирующей системой. В соответствии с (1.9) ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура на МО, представлены на рисунке 5.

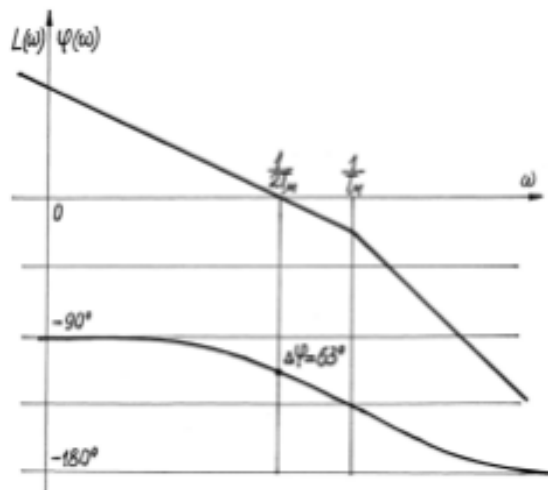


Рисунок – 5 ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура регулирования, настроенного на модульный оптимум

Таким образом, задачей синтеза контура при настройке на модальный оптимум является выбор регулятора – последовательного корректирующего звена, которое имеет такую передаточную функцию, чтобы разомкнутый контур имел передаточную функцию в виде (1.9) [3].

Рассмотрим пример 1, который показывает синтез регулятора в контуре управления током якоря ДПТ.

Пример 1

Для решения поставленной задачи структурную схему токового контура можно представить в виде рисунка 6.

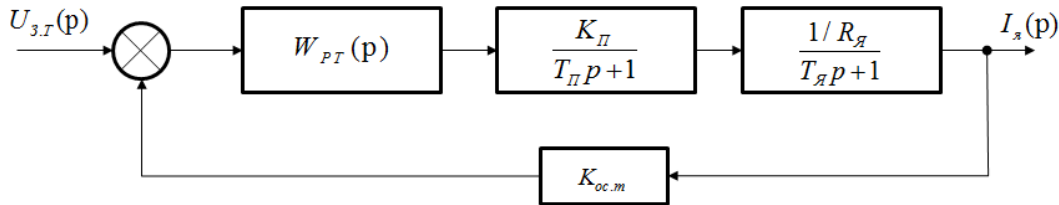


Рисунок 6 – Структурная схема контура скорости

Так как разомкнутый контур системы должен иметь вид желаемой передаточной функции (1.9) приравняем передаточную функцию контура к желаемой передаточной функции:

$$W_{PT}(p) \cdot \frac{K_{\Pi}}{T_{\Pi} p + 1} \cdot \frac{1/R_{\text{я}}}{T_{\text{я}} p + 1} = \frac{1}{k_{oc.m} a_M T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}, \quad (1.10)$$

где: $k_{oc.m}$ - коэффициент обратной связи по току.

Выразим из (1.10) передаточную функцию регулятора $W_{PT}(p)$, учтя $T_{\mu} = T_{\Pi}$:

$$W_{PT}(p) = \frac{R_{\text{я}} (T_{\text{я}} p + 1)}{k_{oc.m} a_M T_{\mu} p K_{\Pi}}. \quad (1.11)$$

Подставляя все известные коэффициенты ($K_{\Pi}, T_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}}, k_{oc.m}, a_M, T_{\mu}$), получим передаточную функцию регулятора тока:

$$W_{PT}(p) = \frac{0.0449p + 14.6}{0.02676p} = 1.677 + \frac{1}{0.001833p}. \quad (1.12)$$

Очевидно, что в выражении (1.12) мы получили пропорционально – интегральный (ПИ) регулятор. Найдя передаточную функцию замкнутого контура (1.13) и смоделировав систему, выясним, что введение регулятора тока позволит скомпенсировать значительную постоянную времени T_{μ} и обеспечить оптимальный характер переходных процессов якорной цепи с постоянной времени T_{μ} .

$$\begin{aligned}
 W(p)_{MO} &= \frac{1/k_{oc.m}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} = \frac{2.325}{0.43(2 \cdot 0.000001 p^2 + 2 \cdot 0.001 p + 1)} = \\
 &= \frac{2.325}{0.000002 p^2 + 0.002 p + 1}.
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

1.2.2. Настройка контуров управления на симметричный оптимум

Если замкнутый контур регулирования с единичной обратной связью имеет передаточную функцию третьего порядка вид (1.14), то считается, что контур настроен на симметричный оптимум.

$$W(p)_{CO} = \frac{4T_\mu p + 1}{a_C T_\mu^3 p^3 + a_C T_\mu^2 p^2 + a_C T_\mu p + 1} = \frac{4T_\mu p + 1}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1}, \quad (1.14)$$

где: a_C - коэффициент настройки на симметричный оптимум;

T_μ – малая постоянная времени некомпенсируемого апериодического звена;

$a_C = 3.5 \div 8$ – коэффициент симметричной настройки;

$a_C = 8$ – коэффициент стандартной настройки контура.

Для контура, который имеет стандартную настройку на СО ($a_C = 8$), переходной процесс на ступенчатое воздействие представлен на рисунке 7. Он описывается уравнением:

$$y(t) = 1 + e^{\frac{-t}{2T_\mu}} - e^{\frac{-t}{4T_\mu}} \cos \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{t}{T_\mu}, \quad (1.15)$$

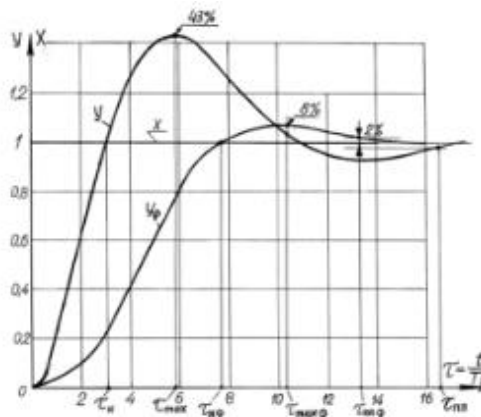


Рисунок 7 - Переходные функции контура регулирования, настроенного на симметричный оптимум

y – переходная характеристика без фильтра на входе, x_ϕ – переходная характеристика без фильтра на входе

Принцип симметричного оптимума обеспечивает следующие показатели качества: число колебаний $n_k = 2$, перерегулирование $\sigma = 43\%$, время первого максимума $t_{\text{макс}} = 5.8T_\mu$, время первого минимума $t_{\text{мин}} = 12.75T_\mu$, время нарастания $t_H = 3.1T_\mu$, время переходного процесса $t_{\text{III}} = 16.5T_\mu$.

Анализ показателей качества «говорит», что они в значительной степени отличаются от показателей контура, настроенного на МО. Большое перерегулирование равное $\sigma = 43\%$, обусловлено влиянием форсирующего звена $W(p) = 4T_\mu p + 1$ в числе передаточной функции (1.14).

Значительно уменьшить перерегулирование можно, если скомпенсировать числитель передаточной функции, установив на входе в контуре управления фильтр т.е. апериодическое звено (1.16) с постоянной времени $T_\phi = 4T_\mu$.

$$W(p) = \frac{1}{4T_\mu p + 1}. \quad (1.16)$$

При стандартной настройке по задающему воздействию передаточная функция запишется в следующем виде:

$$W(p)_{CO+\Phi} = \frac{1}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1}. \quad (1.17)$$

Контур, настроенный на симметричный оптимум с фильтром на входе, при ступенчатом воздействии представлен на рисунке 7. Он описывается уравнением:

$$y(t) = 1 + e^{\frac{-t}{2T_\mu}} - \frac{1}{\sqrt{3}} e^{\frac{-t}{4T_\mu}} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{t}{4T_\mu}\right), \quad (1.18)$$

Контур управления настроенный на симметричный оптимум с применением фильтра обеспечивает следующие показатели качества: перерегулирование $\sigma = 8\%$, число колебаний $n_k = 1$, время первого максимума $t_{\text{макс}} = 10.2T_\mu$, время переходного процесса $t_{\text{III}} = 13.3T_\mu$, время нарастания $t_H = 7.6T_\mu$.

Следовательно, за счёт компенсирующего действия фильтра на входе контура управления достигнуто значительное улучшение динамических показателей.

Ниже представлена передаточная функция разомкнутого контура управления настроенного на СО:

$$W(p)_{CO}^p = \frac{4T_\mu p + 1}{a_C T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)}. \quad (1.19)$$

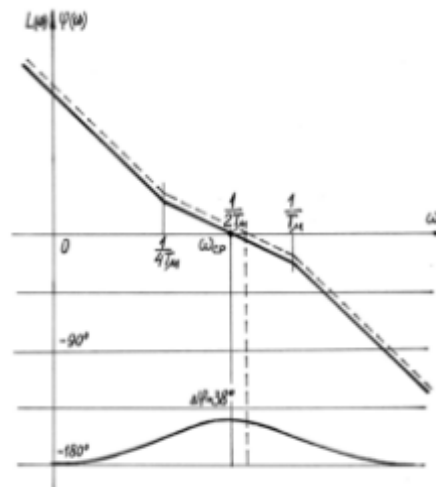


Рисунок 8 – ЛАЧХ и ЛФЧХ для разомкнутого контура регулирования, настроенного на СО

В прямой цепи контура регулирования, который настраивается на СО, содержится два интегрирующих звена именно такую систему называют двукратноинтегрирующей.

Контур управления, настроенный на СО, содержит в прямой цепи регулирования два интегрирующих звена и поэтому является двукратноинтегрирующей системой. В соответствии с (1.19) на рисунке представлены ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура, настроенного на СО, где:

$$\omega_{cp} = \frac{1}{2T_{\mu}} - \text{частота среза};$$

$$\omega_{c1} = \frac{1}{4T_{\mu}} - \text{первая частота сопряжения асимптот};$$

$$\omega_{c2} = \frac{1}{T_{\mu}} - \text{вторая частота сопряжения}.$$

На частоте среза запас по фазе $\Delta\varphi = 38^\circ$. Симметричную форму ЛАЧХ относительно частоты среза с наклонами асимптот -40 дб/дек , -20 дб/дек , -40 дб/дек . Именно это и обозначает настройку на симметричный оптимум. Показатели настройки контура можно улучшить, увеличив в 1,25 раза частоту среза контура, приняв коэффициент настройки равным $a_c = 6.4$. В таком случае реализуемая настройка имеет название «минимальную колебательность». Сопрягающие частоты при этом должны оставаться неизменными. Такая настройка увеличивает быстродействие и снижает перерегулирование следующим образом: $t_{III} = 16.5T_{\mu}$, $\sigma = 42\%$. Запас по фазе становится равным $\Delta\varphi = 35^\circ$ т.е. уменьшается всего на 3% [4].

Для расчёта параметров регулятора контура, в котором присутствует несколько апериодических звеньев с малыми постоянными времени, необходимо заменить эти звенья в одно апериодическое звено, с постоянной времени $T_{\mu e}$.

$$W(p)_{\mu e} = \frac{1}{T_{\mu e} p + 1}, \quad (1.20)$$

где: $T_{\mu e} = T_1 + \dots + T_n$ - эквивалентная некомпенсируемая постоянная времени.

1.2.3. Порядок синтеза контуров в системах электрического привода с подчинённым регулированием

После того как принято решение о числе контуров регулирования и о выделении в силовой части электропривода динамических звеньев (объектов регулирования), производится синтез контуров системы управления электропривода с подчинённым регулированием в соответствии с выходными регулируемыми координатами.

Для регулирования момента достаточно одноконтурной системы управления. Двухконтурными обычно строятся системы регулирования скорости, которые должны содержать контур тока и контур скорости. При управлении положением инструмента или вала двигателя системы регулирования строятся как трехконтурные. Которые должны содержать контур тока, контур скорости и контур положения.

Порядок синтеза следующий:

1. Первый контур – внутренний, контур тока;
2. Второй контур – контур скорости, он включает в себя первый контур;
3. Последний контур – контур положения, он включает в себя второй и первый.

В зависимости от требований, которые предъявляются к контуру и к системе управления в целом, тип настройки каждого контура может меняться (т.е. контура могут настраиваться и на МО, и на СО).

Исходя из вида передаточной функции разомкнутого оптимизированного контура регулирования, находится передаточная функция регулятора.

Передаточная функция разомкнутого контура, при настройке на МО, имеет вид:

$$W(p)_{MP}^p = \frac{1}{a_M T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (1.21)$$

Для настройки контура на МО из уравнения (1.22) находится передаточная функция регулятора $W(p)_{MP}$.

$$W(p)_{MP} W(p)_\mu W(p)_{OP} = \frac{1}{a_M T_\mu p (T_\mu p + 1)} \quad (1.22)$$

где: $W(p)_{OP}$ - передаточная функция объекта регулирования, $W(p)_\mu$ - передаточная функция апериодического звена с малой некомпенсируемой постоянной времени.

Тогда ПФ регулятора:

$$W(p)_{MP} = \frac{1}{a_M T_\mu p} \frac{1}{W(p)_{OP}} \quad (1.23)$$

Передаточная функция разомкнутого контура, при настройке на СО, имеет вид:

$$W(p)_{CP}^p = \frac{4T_\mu p + 1}{a_C T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)}. \quad (1.24)$$

Для настройки контура на МО из уравнения (1.25) находится передаточная функция регулятора $W(p)_{CP}$.

$$W(p)_{CP} W(p)_\mu W(p)_{OP} = \frac{4T_\mu p + 1}{a_c T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)} \quad (1.25)$$

Тогда ПФ регулятора:

$$W(p)_{CP} = \frac{4T_\mu p + 1}{a_c T_\mu^2 p^2 W(p)_{OP}} \quad (1.26)$$

В контуре тока $W(p)_{\mu T}$ - передаточная функция тиристорного (транзисторного) преобразователя, питающего якорную цепь.

В контуре скорости $W(p)_{\mu C}$ - эквивалентная упрощенная передаточная функция замкнутого контура тока, - апериодическое звено с малой постоянной времени $T_{\mu C}$.

В контуре положения $W(p)_{\mu П}$ - эквивалентная упрощенная передаточная функция замкнутого контура скорости, - апериодическое звено с малой постоянной времени $T_{\mu П}$.

Из уравнений (1.23) и (1.26) регуляторов, которые обеспечивают оптимальные настройки контуров, видно, что в знаменателе они содержат передаточную функцию объекта регулирования $W(p)_{op}$, т.е. определёнno содержит динамическое звено с передаточной функцией обратной передаточной функции объекта регулирования. Отсюда следует, что регулятор компенсирует динамические свойства объекта регулирования. Тогда два динамических звена с передаточными функциями $W(p)$ и $1/W(p)$ включенных последовательно, образуют соотношение (1.27).

$$X(p)W(p) \frac{1}{W(p)} = X(p) \quad (1.27)$$

т.е. эти два звена, последовательно включенных компенсируют друг, друга.

Следует сказать, что оптимизирующий регулятор контура выполняет несколько задач: первая — это компенсация инерционности объекта регулирования, и, вторая — это введение в контур регулирования дополнительные динамические звенья. Задача звеньев совместно с некомпенсируемым динамическим звеном, имеющим малую постоянную времени, образовать контур регулирования с желаемой оптимальной

настройкой. При этом параметры динамических звеньев объектов регулирования не содержатся в коэффициентах передаточных функций оптимизированных контуров, а содержатся только коэффициенты настройки и малые некомпенсируемые постоянные времени T_μ .

С физической точки зрения этот результат связан с тем, что регуляторы обеспечивают строго определенную форсировку сигнала управления на входе ОР и тем самым происходит компенсирование их инерционности и динамических свойств.

Желаемые технические характеристики определяют варианты настроек контуров двухконтурных систем регулирования скорости. Когда ограничен требуемый диапазон регулирования скорости и лежит в промежутках $D=20\div 50$, а к динамическим характеристикам предъявляются повышенные требования, то: настройка контур тока осуществляется на МО, настройка контура скорости также производится на МО.

Динамические характеристики таких систем регулирования скорости следующие:

- жесткость механической характеристики $\beta_{MO} = \frac{T_M}{a_{MC} T_{\mu C}} \beta_{раз}$;
- время переходного процесса $t_{пл} \cong 9T_{\mu C} \cong 18T_{\mu T}$;
- число колебаний $n_k = 1$;
- перерегулирование $\sigma = 8\%$;

Если требования к динамическим характеристикам не столь высоки, а желаемый диапазон регулирования скорости лежит в пределах $D=1000\div 10000$, то производится настройка контура тока на МО, контур скорости - на СО причём включается фильтр с ПФ (1.28) на управляющем входе контура.

$$w(p) = \frac{1}{4T_{\mu C} p + 1} \quad (1.28)$$

Такая система регулирования скорости обладает следующими динамическими характеристиками:

- жесткость механической характеристики $|\beta| = \infty$;
- время переходного процесса $t_{пп} \cong 17T_{\mu C} \cong 34T_{\mu T}$;
- перерегулирование при отработке задающего воздействия $\sigma_z \approx 12\%$;
- число колебаний $n_k = 1$;
- перерегулирование момента при отработке возмущения по M_c $\sigma_{MC} \approx 55\%$;
- число колебаний $n_{km} = 2$.

Варианты настроек контуров регулирования для трехконтурных систем регулирования положения.

Если к динамическим характеристикам предъявляют повышенные требования, а требования к точности не столь высоки, то контур тока настраивают на МО, контур скорости на МО и контур положения также настраивают на МО.

Динамические характеристики таких систем регулирования положения следующие:

- перерегулирование при отработке задающего воздействия $\sigma \cong 8\%$;
- число колебаний $n_k = 1$;
- время переходного процесса регулирования положения $t_{пп} \cong 9T_{\mu C} \cong 18T_{\mu C} \cong 36T_{\mu T}$;
- точностные характеристики удовлетворительные.

Контур тока настраивают на МО, контур скорости настраивают на МО, контур положения настраивают на СО, если к точности системы регулирования положения предъявляются повышенные требования.

Динамические характеристики такой системы регулирования положения следующие:

- перерегулирование $\sigma \cong 60\%$;
- быстродействие системы регулирования положения
 $t_{\text{пп}} \cong 17T_{\mu\text{П}} \cong 34T_{\mu\text{С}} \cong 68T_{\mu\text{Т}}$;
- число колебаний $n_k = 2$;
- точностные характеристики хорошие.

Прямых показателей качества, робастности, которые могут обеспечить принципы МО и СО, не достаточно для синтеза САУ прецизионного токарного станка, поэтому ставится задача получения более точных результатов с помощью вещественного интерполяционного метода. Рассмотрим более подробно основы этого метода в следующем пункте [5].

1.3 Основы вещественного интерполяционного метода

Вещественный интерполяционный метод (ВИМ) относится к классу операторных методов, которые ставят в соответствие функции-оригиналу $f(t)$ изображение $F(\delta)$ [7,8,9]. Из формулы прямого преобразования Лапласа может быть получена функция-изображение $F(\delta)$.

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

при замене комплексной переменной $p = \delta + j\omega$ на вещественную δ . Такая замена может быть осуществлена при условии сходимости интеграла в (3), что гарантирует существование и единственность функции $F(\delta)$ (7).

Особенностью ВИМ состоит в том, что изображение функции времени $f(t)$ может быть использовано не только в аналитической форме $F(\delta)$, но и в дискретной $F(\delta_i)$, называемой численной характеристикой (7)

Последнее представление позволяет привлечь численные методы и цифровую технику для действий над вещественными функциями-изображениями. В частности, уравнение синтеза может иметь численную форму:

$$W_{зам}^{жел}(\delta_i) = W_{зам}^{синт}(\delta_i),$$

где δ_i - узел интерполирования/дискретизации, i - номер узла интерполирования.

В следующей главе рассмотрим возможности и особенности представленного метода при решении задач синтеза регуляторов многоконтурных САУ. Для упрощения задачи с сохранением ее принципиальных особенностей рассмотрение выполним на примере двухконтурной системы.

Глава 2. Решение уравнения синтеза двухконтурных систем вещественным интерполяционным методом

2.1. Упрощение уравнения синтеза на основе перехода к моделям разомкнутых систем

При решении уравнений синтеза вида (1.1) возникают неизменные вычислительные погрешности. Для снижения их влияния используем прием сопоставления передаточных функций, описывающих желаемую и синтезируемую системы в разомкнутом состоянии. Такое уравнение имеет вид: $W_{раз}^{жел}(p) \cong W_{раз}^{синт}(p)$ (2.1). Обе передаточные функции однозначно связаны с моделями замкнутых АУ и потому трудностей их получения не существует. Ниже, указан рисунок разомкнутой системы.

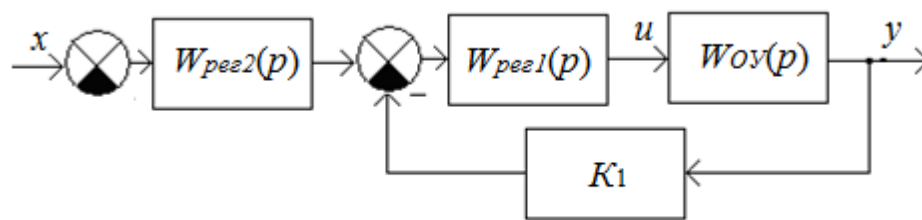


Рисунок 9 – ОСС подчинённой, разомкнутой, двухконтурной системы

Уравнение синтеза системы управления, в которой осуществлено управление без внешней обратной связи, получено в выражении 2.2.

$$W_p^c(p) \cong K_1 \cdot \frac{p + b_{1,0}}{p + a_{1,0}} \cdot \frac{K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot W_{oy}(p)}{1 + K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot W_{oy}(p)}. \quad (2.2)$$

2.2. Перевод уравнения синтеза в вещественную форму

Отмеченное в пункте 1.1 обстоятельство (уравнение синтеза нелинейно) составляет одно из препятствий при выполнении расчетов. Второе затруднение состоит в необходимости преобразования этого уравнения в систему уравнений. Ее размерность должна быть не меньше числа искомых коэффициентов. К сожалению, возможности преобразования ограничены. Первый и очевидный путь – использование частотного метода, когда комплексная переменная $p = \delta + j\omega$ заменяется мнимой $j\omega$ с последующим заданием множества $\omega_i, i = 1, 2, \dots, \eta$. Последнее приводит к замене уравнения синтеза (2.2) системой η уравнений. Этот прием позволяет достичь цели – сформировать систему уравнений для поиска единственного решения, но при этом проявляется негативная сторона – в уравнениях появляются не только вещественные, но и мнимые числа. Последнее приводит более чем к двукратному увеличению объема вычислений.

Второй путь – использовании вещественного интерполяционного метода [7]. Он основан на замене комплексной переменной $p = \delta + j\omega$ вещественной переменной δ , что не влечет за собой недостатков первого варианта.

Заменим в уравнении (2.2) комплексную переменную на вещественную и получим:

$$W_p^c(\delta) \cong K_1 \cdot \frac{\delta + b_{1,0}}{\delta + a_{1,0}} \cdot \frac{K_2 \cdot \frac{\delta^2 + b_{2,1}\delta + b_{2,0}}{\delta(\delta + a_{2,0})} \cdot W_{OY}(\delta)}{1 + K_2 \cdot \frac{\delta^2 + b_{2,1}\delta + b_{2,0}}{\delta(\delta + a_{2,0})} \cdot W_{OY}(\delta)}. \quad (2.3)$$

2.3. Формирование численной формы уравнения синтеза

Решение уравнения (2.3) сводится к определению значений шести неизвестных коэффициентов. Для их вычисления необходимо задать значения шести узлов интерполирования и вычислить шесть элементов численной характеристики $W_{зам}^{жел}(\delta_i)$. Первая часть этой задачи выполняется в соответствии с рекомендациями [7]. Вторая часть является обычной вычислительной процедурой. В результате будет найдена правая часть уравнения (4) и тем самым закончено формирование этого уравнения.

При этом выбор узлов интерполирования осуществляется в соответствии с правилом:

$$\delta_1 = \frac{-\ln(\Delta)}{t_{уст}},$$

где δ_1 - значение первого узла интерполирования, Δ - отклонение значения переходной характеристики в момент времени становления переходного процесса $t_{уст}$ от его установившегося значения.

Последний узел выбирается из соотношения

$$W(\delta_n) = (0,1 \div 0,2) \cdot W(\delta_1).$$

Значения промежуточных узлов выбираем из условия равномерного распределения.

Из полученного уравнения (2.3) видно, что неизвестные параметры входят в систему уравнения нелинейно. Это обстоятельство является наиболее важной особенностью синтеза многоконтурных систем. Но эта особенность влечет за собой основные трудности при поиске решения уравнения синтеза: в случае синтеза многоконтурных САУ приходится решать систему нелинейных уравнений, тогда как синтез одноконтурных систем остается в рамках линейных задач.

Для пояснения деталей подхода рассмотрим численный пример.

2.3.1. Расчет регуляторов двухконтурной системы управления электроприводом

На рисунке 10 представлена структурная схема двухконтурной системы управления электроприводом, рассмотренная в работе [12]. Схема содержит следующие обозначения:

$$W_{\Sigma\mathcal{U}}(p) = \frac{K_a}{(T_f p + 1) \cdot (T_a p + 1)} - \text{передаточная функция электрической}$$

части электропривода и транзисторного преобразователя;

$K_a = 11$ – коэффициент передачи электрической части привода,

$T_f = 10^{-3}$ с – постоянная времени преобразователя,

$T_a = 8,75 \cdot 10^{-3}$ с – постоянная времени якорной обмотки двигателя,

$C_m = 3$ Н·м/А – паспортный параметр электродвигателя.

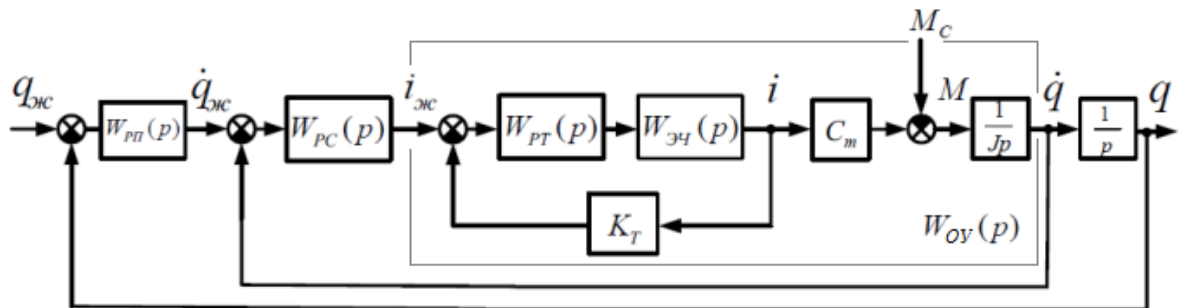


Рисунок 10 – Двухконтурная система управления электроприводом

В работе [12] приведены найденные там передаточные функции регуляторов:

$$W_{PT}(p) = \frac{6,453 \cdot 10^{-3} p + 0,866}{1,178 \cdot 10^{-4} p + 1}, W_{PC}(p) = \frac{40,78 p + 22,072}{p(9,449 \cdot 10^{-3} p + 1)}, W_{PI}(p) = \frac{15,861 p + 5,373}{2,978 p + 1}.$$

Известны также коэффициенты обратных связей каждого контура:
 $K_T = 0,895$, $K_C = K_{II} = 1$.

Задача заключается в определении коэффициентов регуляторов, которые будем считать неизвестными. Для снижения вычислительных и методических трудностей положим, что контур тока полностью известен, включая регулятор. При этом принципиальная особенность задачи – нелинейная связь искомых коэффициентов – остается неизменной. В такой постановке подлежат определению шесть коэффициентов регуляторов скорости и положения. Оценивание точности решения будем выполнять по тем параметрам регуляторов, которые приведены в работе [12]. Они же позволяют сформировать желаемую передаточную функцию системы управления $W_{зам}^{жел}(p)$. Этот шаг важен не только с позиций формирования уравнения синтеза. Этим, во-первых, формируется эталонная модель и, во-вторых, создается условие существования точного решения, что важно для оценивания точности получаемого решения.

Для выполнения расчетов по алгоритму, рассмотренному выше, составим уравнение синтеза $W_{раз}^{жел}(p) \cong W_{раз}^{синт}(p)$. Обе передаточные функции однозначно связаны с моделями замкнутых САУ и потому трудностей их получения не существует. Приведем развернутую форму уравнения:

$$W_{раз}^{жел}(p) \cong \frac{b_{1П}p + b_{0П}}{a_{1П}p + 1} \cdot \frac{\frac{b_{1С}p + b_{0С}}{p(a_{1С}p + 1)} \cdot \frac{0,213p + 28,578}{2,062 \cdot 10^{-9}p^4 + 19,798 \cdot 10^{-6}p^3 + 0,147p^2 + 19,052p}}{1 + \frac{b_{1С}p + b_{0С}}{p(a_{1С}p + 1)} \cdot \frac{0,213p + 28,578}{2,062 \cdot 10^{-9}p^4 + 19,798 \cdot 10^{-6}p^3 + 0,147p^2 + 19,052p}} \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) имеет шесть неизвестных коэффициентов. Два из них найдем из уравнения статики: $b_{0П} = 5,373$ и $b_{0С} = 22,072$. Остается четыре неизвестных параметра, следовательно, необходимо развернуть уравнение в

систему четырех уравнений. Сделаем это последовательно заменой комплексной переменной p на вещественную δ и дискретизацией непрерывных функций. Используя рекомендации [7], получим следующие дискретные значения переменной δ : $\delta_1 = 1 \cdot 10^{-6}$; $\delta_2 = 6 \cdot 10^{-4}$; $\delta_3 = 1,26 \cdot 10^{-3}$; $\delta_4 = 1,89 \cdot 10^{-3}$. Подставим эти значения в уравнение (2.6), получим систему четырех нелинейных уравнений. Для ее разрешения воспользуемся методом Ньютона. Решение получено в результате 8 итераций желательно привести в форме таблицы данные по итерациям: $b_{0\Pi} = 5,373$; $b_{0C} = 22,072$; $b_{1\Pi} = 15,861$; $a_{1\Pi} = 2,978$; $b_{1C} = 22,072$; $a_{1C} = 9,449 \cdot 10^{-3}$.

Параметры регуляторов синтезированной системы совпадают с эталонными значениями с точностью до учитываемых разрядов. Вывод нужен

Глава 3. Исследование возможности применения вещественного интерполяционного метода к расчету двухконтурных систем на примере прецизионного токарного станка

3.1. Система управления прецизионного токарного станка

Рассматривается задача создания сверхпрецизионного станка с алмазным резцом. Этот станок предназначен для придания с очень высокой точностью заданной формы поверхностям оптических деталей, таких, например, как зеркала. В данном случае мы рассмотрим задачу управления положением резца только по одной координате. В [6] экспериментально с помощью подачи синусоидального сигнала на вход исполнительного устройства была получена передаточная функция объекта управления

$$W_{ov}(p) = \frac{4500}{p + 60} . \quad (3.1)$$

Столь большой коэффициент усиления для системы не представляет опасности, так как входной эталонный сигнал $r(t)$ представляет собой последовательность ступенек очень малой амплитуды (доли микрона). Внешний контур системы образован за счёт обратной связи по положению, датчиком которого является лазерный интерферометр с точностью измерения 0,1 мкм. В системе также имеется внутренний контур, образованный за счёт обратной связи по скорости, как показано на рисунке 11.

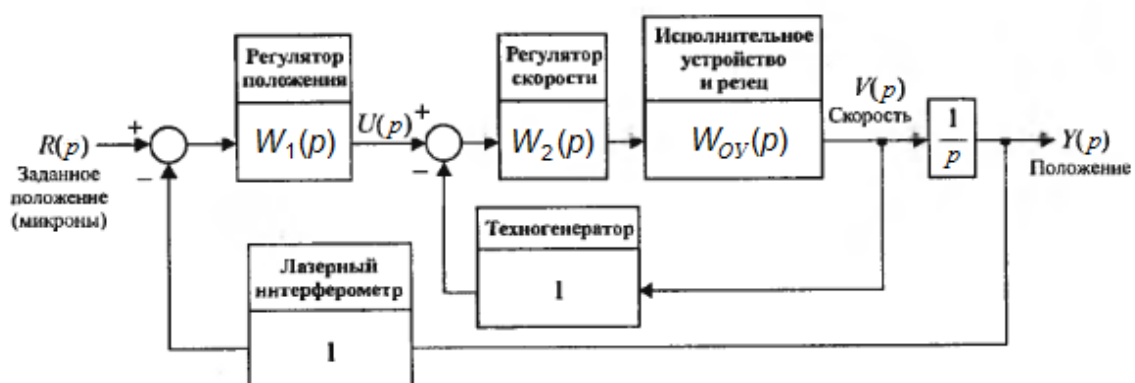


Рисунок 11 – Операторно-структурная схема системы управления

Регуляторы $W_1(p)$ и $W_2(p)$ выбираются так, чтобы система удовлетворяла требованиям: установившаяся ошибка должна быть равна нулю, время установления процесса $t_{уст} = 5 \cdot 10^{-7}$ секунд, перерегулирование $\sigma = 5\%$. Регуляторы имеют следующие структуры:

$$W_1(p) = K_1 \cdot \frac{p + b_{1,0}}{p + a_{1,0}}, \quad (3.2)$$

$$W_2(p) = K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})}. \quad (3.3)$$

Значение коэффициентов: $b_{1,0} = 54$, $a_{1,0} = 108$, $a_{2,0} = 1085$, $b_{2,0} = 69184$, $b_{2,1} = 556$, $K_1 = 1000$, $K_2 = 2$.

Эти коэффициенты регуляторов подобраны для данной системы управления методом корневого годографа для заданных качественных характеристик системы (рисунок 13). Операторно-структурная схема в пакете MATLAB представлена на рисунке 12.

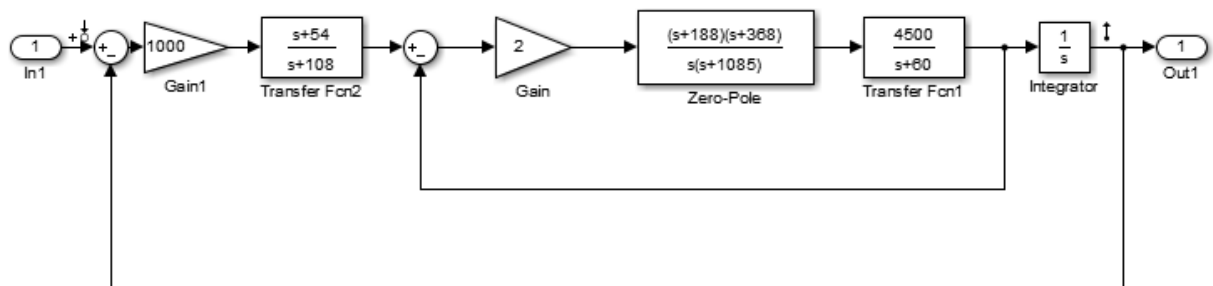


Рисунок 12 – Операторно-структурная схема системы управления токарным станком в MATLAB

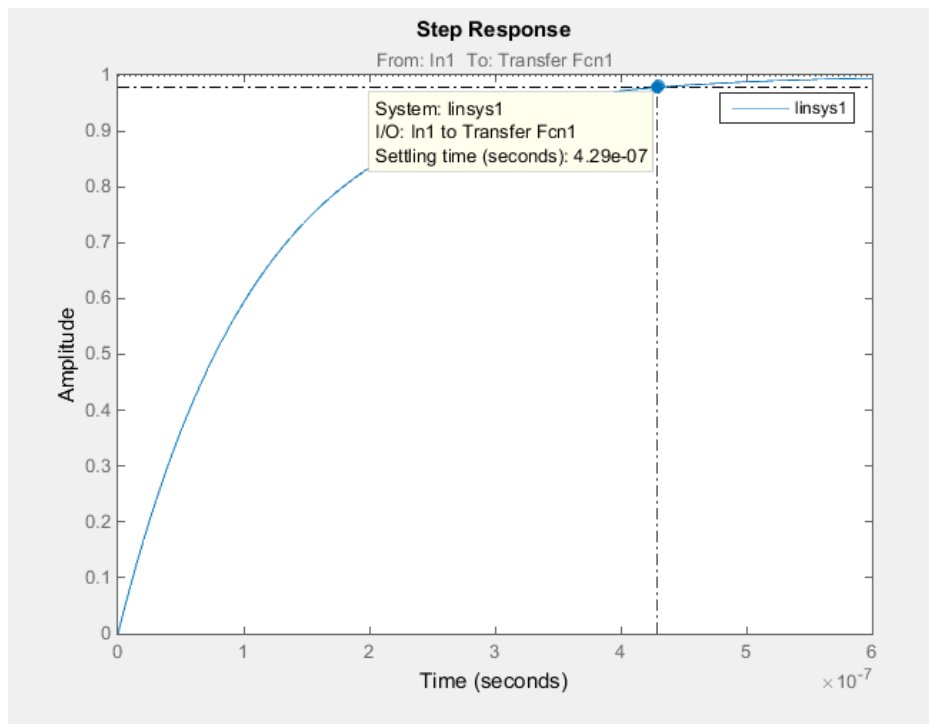


Рисунок 13 – Переходная характеристика САУ

В ходе исследования предстоит проверить возможность применения ВИМ для расчёта коэффициентов регуляторов скорости и положения в САУ токарным станком и сравнения с полученных результатов с известными. Работа строится по следующему алгоритму:

1 шаг. Запись уравнения синтеза системы;

2 шаг. Выбор метода решения нелинейных систем уравнений;

3 шаг. Решение системы нелинейных уравнений для двух неизвестных, которые будут приняты для начала исследования. В этом шаге применяется ВИМ для создания системы уравнений и с помощью выбранного метода решение системы нелинейных уравнений, вычисление числа обусловленности системы уравнений.

4 шаг. Решение системы нелинейных уравнений для трёх неизвестных. Действия - аналогичные предыдущему шагу.

Для решения задачи используем результаты, приведенные в предыдущих разделах.

3.2. Составление уравнения синтеза системы управления прецизионного токарного станка

По известным данным [6] перерегулирования и быстродействия найдем ПФ желаемой системы в разомкнутом состоянии:

$$W_p^{jc}(p) = \frac{9 \cdot 10^6 \cdot (p+188) \cdot (p+368) \cdot (p+54)}{(p+108) \cdot [p \cdot (p+1085) \cdot (p+60) + 9 \cdot 10^6 \cdot (p+188) \cdot (p+368)]}. \quad (3.4)$$

Запишем уравнение синтеза разомкнутой системы. Для этого, преобразуем данную на рисунке 11 операторную структурную схему к виду, показанному на рисунке 14.



Рисунок 14 – Операторно-структурная схема системы управления токарным станком с разомкнутым внешним контуром

Уравнение синтеза разомкнутой системы будет иметь следующий вид:

$$W_p^c(p) \cong W_1(p) \cdot \frac{W_2(p) \cdot W_{OY}(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_{OY}(p)}. \quad (3.5)$$

Подставим в (3.5) передаточные функции регуляторов (3.2) и (3.3), объекта управления (3.1) получим следующее уравнение:

$$W_p^c(p) \cong K_1 \cdot \frac{p + b_{1,0}}{p + a_{1,0}} \cdot \frac{K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot \frac{4500}{p + 60}}{1 + K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot \frac{4500}{p + 60}}. \quad (3.6)$$

В выражение (2.1) передаточные функции регуляторов (3.2) и (3.3), объекта управления (3.1) получим следующее уравнения в явной форме:

$$W_p^{жс}(p) \cong K_1 \cdot \frac{p + b_{1,0}}{p + a_{1,0}} \cdot \frac{K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot \frac{4500}{p + 60}}{1 + K_2 \cdot \frac{p^2 + b_{2,1}p + b_{2,0}}{p(p + a_{2,0})} \cdot \frac{4500}{p + 60}}. \quad (3.6)$$

Преобразовав выражение (3.6) получим уравнение синтеза в окончательной форме:

$$W_p^{жс}(p) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (p + 54) \cdot (p + 188)(p + 368) \cdot 4500}{p(p + 1085) \cdot (p + 60) \cdot (p + 108) + K_2 \cdot (p + 108) \cdot (p + 188)(p + 368) \cdot 4500}. \quad (3.7)$$

Получено уравнение синтеза, содержащее два неизвестных коэффициента. Для их определения нужно развернуть уравнение синтеза в систему двух уравнений с двумя неизвестными. Подчеркнем, что такая система уравнений останется нелинейной, что вызывает основные трудности ее решения.

для $\bar{x}$ удаётся найти хорошее приближение $x^{(0)}$. Известно, что такое приближение всегда мало и потому найти его сложно.

Второй этап – это вычисление решения с заданной точностью ε , при этом используют один из итерационных методов решения нелинейных систем. Проведём анализ этих методов [10].

3.3.2 Метод простой итерации

Предположим, что требуется найти решение $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m)^T$ системы (3.8) с заданной точностью $\varepsilon > 0$. Для этого преобразуем систему (3.8) к следующему эквивалентному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = \varphi_1(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ x_2 = \varphi_2(x_1, x_2, \dots, x_m), \\ \\ x_n = \varphi_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Если ввести вектор-функцию $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m)^T$, то система (3.9) запишется так:

$$x = \varphi(x). \quad (3.10)$$

Пусть начальное приближение $x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_m^{(0)})^T$ задано. Подставляя его в правую часть системы (3.10), получим $x^{(1)} = \varphi(x^{(0)})$. Подставляя $x^{(1)}$ в правую часть (3.10), найдём $x^{(2)} = \varphi(x^{(1)})$ и т.д. Продолжая вычислять по формулам

$$x^{(k+1)} = \varphi(x^{(k)}), k \geq 0, \quad (3.10)$$

получим последовательность $x^{(0)}, x^{(1)}, \dots, x^{(n)}, \dots$ приближений к решению $\bar{x}$.

Запись (3.10) означает, что очередное приближение $x^{(k+1)}$ вычисляется через предыдущее приближение $x^{(k)}$ следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= \varphi_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}), \\ x_2^{(k+1)} &= \varphi_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}), \\ &\dots\dots\dots \\ x_3^{(k+1)} &= \varphi_3(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}). \end{aligned}$$

3.3.3 Метод Ньютона

Предположим, что исходя из начального приближения к решению $\bar{x}$ построены приближения $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n)}$. Заменяем в системе (3.8) каждую из функций $f_i (i=1, 2, \dots, m)$ линейной частью её разложения по формуле Тейлора в точке $x^{(n)}$:

$$f_i(\mathbf{x}) \approx f_i(\mathbf{x}^{(n)}) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_i(\mathbf{x}^{(n)})}{\partial x_j} (x_j - x_j^{(n)}).$$

В результате приходим к системе линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} f_1(\mathbf{x}^{(n)}) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_1(\mathbf{x}^{(n)})}{\partial x_j} (x_j - x_j^{(n)}) &= 0, \\ f_2(\mathbf{x}^{(n)}) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_2(\mathbf{x}^{(n)})}{\partial x_j} (x_j - x_j^{(n)}) &= 0, \\ . &. \\ f_m(\mathbf{x}^{(n)}) + \sum_{j=1}^m \frac{\partial f_m(\mathbf{x}^{(n)})}{\partial x_j} (x_j - x_j^{(n)}) &= 0, \end{aligned}$$

имеющей в матричной форме записи следующий вид:

$$f(\mathbf{x}^{(n)}) + f'(\mathbf{x}^{(n)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(n)}) = 0. \quad (3.11)$$

Здесь f' - матрица Якоби.

Предположим, что матрица $f'(x^{(n)})$ невырожденная т.е. существует обратная матрица $(f'(x^{(n)}))^{-1}$. Тогда система (3.11) имеет единственное решение, которое и принимается за очередное приближение $x^{(n+1)}$ к решению $\bar{x}$. Таким образом, приближение $x^{(n+1)}$ удовлетворяет равенству:

$$f(x^{(n)}) + f'(x^{(n)})(x^{(n+1)} - x^{(n)}) = 0 \quad (3.12)$$

Выражая из него $x^{(n+1)}$, выводим итерационную формулу для метода Ньютона:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - (f'(x^{(n)}))^{-1} f(x^{(n)}) \quad (3.13)$$

Формула (3.13) предполагает использование трудоёмкой операции обращения матрицы, поэтому непосредственное её использование для вычисления $x^{(n+1)}$ в большинстве случаев нецелесообразно. Обычно вместо этого решают эквивалентную систему (3.10) линейных алгебраических уравнений

$$f'(x^{(n)}) \Delta x^{(n+1)} = -f(x^{(n)}) \quad (3.14)$$

относительно поправки $\Delta x^{(n+1)} = x^{(n+1)} - x^{(n)}$.

Затем полагают

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \Delta x^{(n+1)}. \quad (3.15)$$

Простота, логическая стройность и высокая скорость сходимости делают метод Ньютона чрезвычайно привлекательным. Однако для его практического применения нужно преодолеть две существенные трудности. Одна из них состоит в необходимости вычисления производной $f'(x)$. Часто бывает невозможно найти аналитическое выражение для $f'(x)$, а определить приближенное значение с высокой точностью очень трудно. Иногда вычисление $f'(x)$ - вполне реальная, но весьма дорогостоящая операция. В этих случаях приходится модифицировать метод, избегая непосредственного вычисления производной [10].

3.3.4 Модификация метода Ньютона

В расчётных формулах (3.14), (3.15) метода Ньютона заменим матрицу $f'(x^{(n)})$, зависящую от n , постоянной матрицей $A = f'(x^{(0)})$. В результате будут получены расчётные формулы упрощённого метода Ньютона:

$$A\Delta x^{(n+1)} = -f(x^{(n)}), \quad (3.16)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \Delta x^{(n+1)}. \quad (3.17)$$

Если начальное приближение $x^{(0)}$ выбрано достаточно точно близким к решению $\bar{x}$, то можно отметить, что метод сходится со скоростью геометрической прогрессии, причём знаменатель q прогрессии тем меньше, чем ближе $x^{(0)}$ к $\bar{x}$.

По сравнению с исходным методом Ньютона существенно возрастает число итераций, необходимое для достижения заданной точности. Несмотря на это, общие вычислительные затраты могут оказаться меньше. Причин несколько:

1. вычисление матрицы Якоби производится один раз;
2. при использовании упрощённого метода Ньютона раз за разом решается система линейных уравнений с различными правыми частями и фиксированной матрицей A . Это показывает, что при решении систем методом Гауса имеет смысл LU - разложение матрицы A , которое резко уменьшает число операций, необходимых для вычисления $\Delta x^{(n+1)}$.

Подчеркнем, что одной из наиболее трудных проблем, возникающих при решении систем нелинейных уравнений, является задача локализации решения. Так как мы имеем точное начальное приближение. Указанные методы можно применять и для вычисления решения с заданной точностью ε . Из рассмотренных методов наименьшее количество итераций и большую точность имеет метод Ньютона. По этой причине целесообразно использовать его [10].

3.4. Решение уравнения синтеза в случае двух неизвестных коэффициентов

Очевидно, что определение всех семи неизвестных коэффициентов уравнения (3.7) путем решения нелинейной системы уравнений невозможно. Поэтому упростим задачу для достижения цели – проверки возможности определения коэффициентов регуляторов, входящих нелинейно в уравнение синтеза, а также проверки обусловленности матрицы системы уравнений. Сделаем упрощение максимальным, сократив число неизвестных коэффициентов до двух. Выберем наиболее значимые параметры - коэффициенты пропорциональности K_1 и K_2 . ПФ регуляторов в этом случае имеют вид:

$$W_1(p) = K_1 \cdot \frac{p+54}{p+108}, \quad W_2(p) = K_2 \cdot \frac{(p+188)(p+368)}{p(p+1085)}.$$

Подобным образом ПФ регуляторов, обозначим, в пакете математического моделирования MathCad на рисунке 15.

$$\begin{array}{lll} W_{ou}(p) := \frac{4500}{p+60} & G1(p) := K1 \cdot \frac{(p+54)}{p+108} & G2(p) := K2 \cdot \frac{p+188}{p} \cdot \frac{p+368}{p+1085} \\ G11(p) := \frac{(p+54)}{p+108} & G21(p) := \frac{p+188}{p} \cdot \frac{p+368}{p+1085} \end{array}$$

Рисунок 15 – Передаточные функции регуляторов и объекта управления

Уравнение синтеза примет вид:

$$W_p^{жс}(p) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (p+54) \cdot (p+188)(p+368) \cdot 4500}{p(p+1085) \cdot (p+60) \cdot (p+108) + K_2 \cdot (p+108) \cdot (p+188)(p+368) \cdot 4500}.$$

Таким образом, уравнение синтеза имеет нелинейную форму и два неизвестных параметра. Следовательно, для решения задачи с помощью ВИМ необходимо выбрать два узла интерполирования, составить систему из двух уравнений.

Систему уравнений для двух неизвестных в численной форме выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} W_p^{\mathcal{H}}(\delta_1) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_1 + 54) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}{\delta_1 (\delta_1 + 1085) \cdot (\delta_1 + 60) \cdot (\delta_1 + 108) + K_2 \cdot (\delta_1 + 108) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}; \\ W_p^{\mathcal{H}}(\delta_2) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_2 + 54) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}{\delta_2 (\delta_2 + 1085) \cdot (\delta_2 + 60) \cdot (\delta_2 + 108) + K_2 \cdot (\delta_2 + 108) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Для определения области изменения δ и выбора узлов интерполирования, построен график (рисунок 16) выражения (3.19), коэффициенты K_1 и K_2 принять известными.

$$W_p^{\mathcal{H}}(\delta) - \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta + 54) \cdot (\delta + 188) \cdot (\delta + 368) \cdot 4500}{\delta (\delta + 1085) \cdot (\delta + 60) \cdot (\delta + 108) + K_2 \cdot (\delta + 108) \cdot (\delta + 188) \cdot (\delta + 368) \cdot 4500} = 0; \quad (3.19)$$

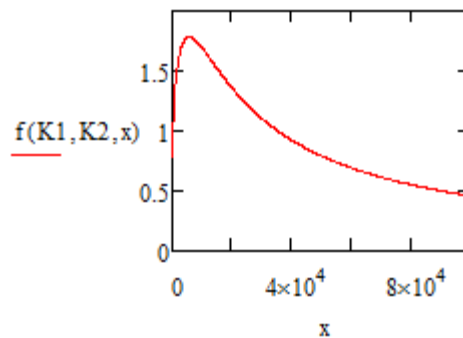


Рисунок 16 – График изменения величины δ

Выбор узлов интерполирования осуществляем по-прежнему по методике [7]. Получаем: $\delta_1=6000$, $\delta_2=12000$. Это позволяет от уравнения синтеза (3.7) перейти к системе из двух нелинейных уравнений, имеющих два неизвестных коэффициента K_1 и K_2 :

$$\begin{cases} W_p^{\mathcal{H}}(\delta_1) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_1 + 54) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}{\delta_1 (\delta_1 + 1085) \cdot (\delta_1 + 60) \cdot (\delta_1 + 108) + K_2 \cdot (\delta_1 + 108) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}; \\ W_p^{\mathcal{H}}(\delta_2) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_2 + 54) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}{\delta_2 (\delta_2 + 1085) \cdot (\delta_2 + 60) \cdot (\delta_2 + 108) + K_2 \cdot (\delta_2 + 108) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}. \end{cases} \quad (3.18)$$

Перенесем член $W_p^{жс}(\delta_i)$ в каждом уравнении системы из левой части в правую для упрощения системы и получим выражение

$$\begin{cases} W_p^{жс}(\delta_1) - \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_1 + 54) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}{\delta_1 (\delta_1 + 1085) \cdot (\delta_1 + 60) \cdot (\delta_1 + 108) + K_2 \cdot (\delta_1 + 108) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500} = 0; \\ W_p^{жс}(\delta_2) - \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_2 + 54) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}{\delta_2 (\delta_2 + 1085) \cdot (\delta_2 + 60) \cdot (\delta_2 + 108) + K_2 \cdot (\delta_2 + 108) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500} = 0. \end{cases} \quad (3.19)$$

В систему уравнений (3.19) подставим выражение (3.4), предварительно преобразовав выражение его в численную форму. Полученная система в пакете MathCad, представлена на рисунке 17. Причём $W_p^{жс}(\delta_1)$ соответствует $W_{эп}(\delta_1)$, а $W_p^{жс}(\delta_2)$ соответствует $W_{эп}(\delta_2)$.

$$\begin{aligned} f1(K1, K2) &:= K1 \cdot \frac{(\delta_1 + 54)}{\delta_1 + 108} \cdot \frac{\left(K2 \cdot \frac{\delta_1 + 188}{\delta_1} \cdot \frac{\delta_1 + 368}{\delta_1 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta_1 + 60}}{1 + \left(K2 \cdot \frac{\delta_1 + 188}{\delta_1} \cdot \frac{\delta_1 + 368}{\delta_1 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta_1 + 60}} - W_{эп}(\delta_1) \\ f2(K1, K2) &:= K1 \cdot \frac{(\delta_2 + 54)}{\delta_2 + 108} \cdot \frac{\left(K2 \cdot \frac{\delta_2 + 188}{\delta_2} \cdot \frac{\delta_2 + 368}{\delta_2 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta_2 + 60}}{1 + \left(K2 \cdot \frac{\delta_2 + 188}{\delta_2} \cdot \frac{\delta_2 + 368}{\delta_2 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta_2 + 60}} - W_{эп}(\delta_2) \\ F(K1, K2) &:= \begin{pmatrix} f1(K1, K2) \\ f2(K1, K2) \end{pmatrix} \text{float}, 3 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{9.56e7 \cdot K1 \cdot K2}{9.64e7 \cdot K2 + 1.4e8} - 574.0 \\ \frac{4.73e9 \cdot K1 \cdot K2}{4.75e9 \cdot K2 + 1.33e10} - 416.0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Рисунок 17 – Система уравнений для двух узлов интерполирования в пакете MathCad

Для решения системы воспользуемся методом Ньютона, который был ранее выбран как наиболее подходящий для рассматриваемых задач. Начальное приближение коэффициентов $K1$ и $K2$, примем, опираясь на известное «точное» решение, приведенное в пункте 3.1.

Следующий шаг - запись матрицы Якоби, расчёт её значений, определение её определителя и запись обратной матрицы, отражен на рисунке 18.

$$R(K1, K2) := \begin{pmatrix} \frac{d}{dK1} f1(K1, K2) & \frac{d}{dK2} f1(K1, K2) \\ \frac{d}{dK1} f2(K1, K2) & \frac{d}{dK2} f2(K1, K2) \end{pmatrix}$$

$$R(K1, K2) \text{ float}, 3 \rightarrow \begin{pmatrix} 0.574 & 121.0 \\ 0.416 & 121.0 \end{pmatrix}$$

$$|R(K1, K2)| \text{ float}, 3 \rightarrow 19.3$$

$$R(K1, K2)^{-1} \text{ float}, 3 \rightarrow \begin{pmatrix} 6.27 & -6.26 \\ -0.0215 & 0.0297 \end{pmatrix}$$

Рисунок 18 – Расчёты, связанные с матрицей Якоби

```

k := 0      K1 := 0      K2 := 0
resultat(k, K1, K2) :=
  K1 ← 1010
  K2 ← 2.02
  e ← 1
  k ← 0
  while |e| > 10-3
    k ← k + 1
    Δ(K1, K2) ← -(R(K1, K2)-1 · F(K1, K2))
    e1 ← Δ(K1, K2)0
    e2 ← Δ(K1, K2)1
    a ← K1 + e1
    b ← K2 + e2
    e11 ← |e1|
    e21 ← |e2|
    e ← max(e11, e21)
    K1 ← a
    K2 ← b
  ( K1
   K2
   k )
resultat(k, K1, K2) float, 4 → ( 990.1
                                2.044
                                3.0 )

```

Рисунок 19 – Алгоритм решения системы уравнений методом Ньютона

Для получения начального приближения X_0 к значениям коэффициентов X_T , которые будем считать точным, добавим малые отклонения Δ : $X_T = \begin{bmatrix} 1000 \\ 2 \end{bmatrix}$, $\Delta = \begin{bmatrix} 10 \\ 0,02 \end{bmatrix}$, $X_0 = \begin{bmatrix} 1000 \\ 2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0,02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1010 \\ 2,02 \end{bmatrix}$. Значение начального приближения с отклонением необходимы для работы алгоритма расчёта системы нелинейных уравнений методом Ньютона. Этот алгоритм приведён на рисунке 19. Результатом работы алгоритма будет матрица столбец, где элемент первой строки - это коэффициент K_1 , элемент второй строки – это коэффициент K_2 , и третий элемент k – это количество итераций работы алгоритма.

Для оценки сходимости алгоритма рассмотрим модуль наибольшего элемента матрицы невязок (Таблица 1).

Таблица 1

Номер итерации	$K_1^{(i)}$	$K_2^{(i)}$	e_1	e_2	$e_{\max}$
0	1010	2,02	-14,774	$-1,442 \cdot 10^{-3}$	14,774
1	990,101	2,019	0,027	$-5,421 \cdot 10^{-4}$	0,027
2	990,101	2,018	$-2,17 \cdot 10^{-4}$	$4,584 \cdot 10^{-4}$	$2,17 \cdot 10^{-4}$
3	990,101	2,018	Выход из алгоритма		

Из таблицы 1 видно, что значения всех параметров сходятся к их точным значениям, значение модуля наибольшего элемента матрицы невязок уменьшается, пока не достигнет «значения-останова» $e = 10^{-3}$, следовательно, алгоритм сходится.

Промоделируем систему с рассчитанными методом Ньютона показателями в MATLAB:

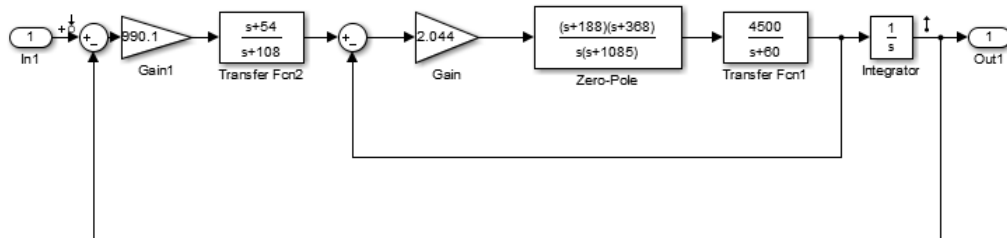


Рисунок 20 - Операторно-структурная схема системы управления токарным станком в MATLAB

Время переходного процесса составляет $4.24 \cdot 10^{-7}$ секунды, это продемонстрировано на рисунке 21:

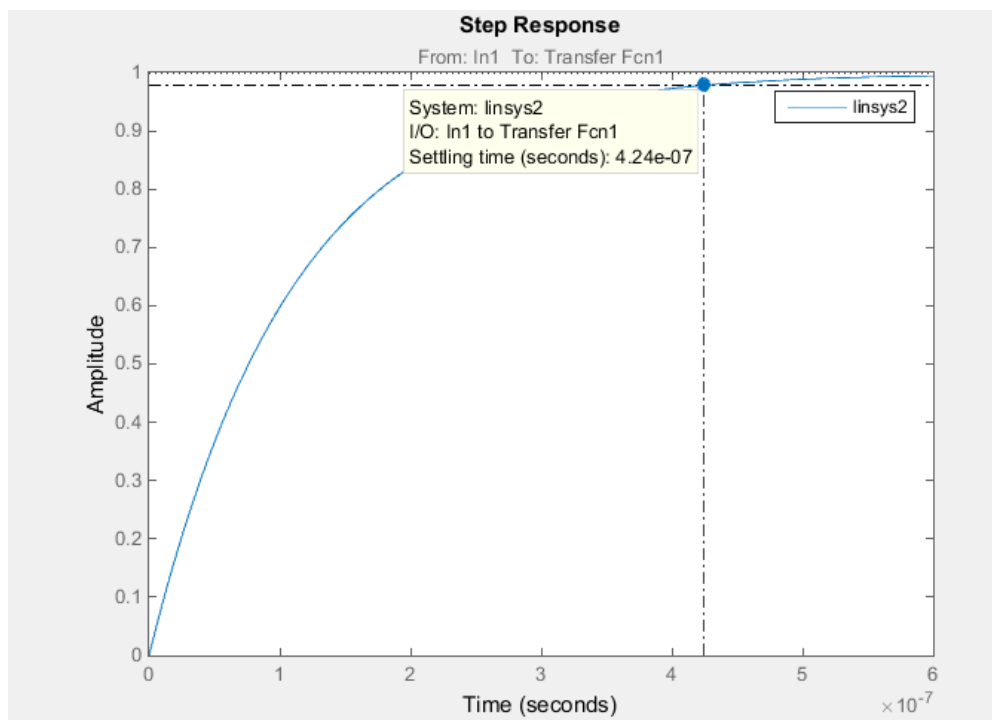


Рисунок 21 – Переходная характеристика САУ

Время переходного процесса для данного эталонного решения в пункте 3.1 составляет $4.29 \cdot 10^{-7}$ секунды. Для САУ с двумя неизвестными коэффициентами было получено время переходного процесса равное $4.24 \cdot 10^{-7}$, что является отличным результатом.

Выясним, как влияют на решение системы нелинейных уравнений ее возмущение, т. е. небольшие изменения в правых частях и в коэффициентах матрицы. Если решение при этом меняется также незначительно, можно считать, что и погрешности округления повлияют на окончательное решение не значительно. Для выяснения найдём число обусловленности Якобиана системы нелинейных уравнений, показанных на рисунке 17. Мери обусловленности будем определять выражением $k = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$, где $\|A\|$ – вторая норма матрицы A , $\|A\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N |x_i|^2}$.

$$A := \begin{pmatrix} 0.574 & 121.0 \\ 0.416 & 121.0 \end{pmatrix}$$

$$\text{cond2}(A) = 1.532 \times 10^3$$

Рисунок 22 – Расчёт меры обусловленности

Из расчётов числа обусловленности видно, что $\text{cond2}(A) = 1532$. Чем больше величина $\text{cond2}(A)$, тем хуже обусловлена матрица; значения порядка десятков или даже сотен (в крайнем случае) считаются неплохими. Вычисленный показатель на рисунке 22 показывает, что матрица A плохо обусловлена, т.е. близка к вырожденности. Это означает, что САУ, синтезированная таким способом, будет плохой с позиций робастности. С помощью экспериментальных вычислений мы обнаружили плохую обусловленность матрицы A .

Для проверки сделанных выводов и результатов усложним задачу до трех неизвестных параметров регуляторов.

3.5. Решение уравнения синтеза в случае трёх неизвестных коэффициентов

Рассмотрим задачу с тремя неизвестными коэффициентами. Для этого выберем наиболее значимые параметры – коэффициенты K_1, K_2 и $b_{1,0}$. ПФ регуляторов в этом случае имеют вид:

$$W_1(p) = K_1 \cdot \frac{p + b_{1,0}}{p + 108}, \quad W_2(p) = K_2 \cdot \frac{(p + 188)(p + 368)}{p(p + 1085)}.$$

Тогда уравнение синтеза выглядит:

$$W_p^{жс}(p) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (p + b_{1,0}) \cdot (p + 188)(p + 368) \cdot 4500}{p(p + 1085) \cdot (p + 60) \cdot (p + 108) + K_2 \cdot (p + 108) \cdot (p + 188)(p + 368) \cdot 4500}. \quad (3.20)$$

Таким образом, уравнение синтеза имеет нелинейную форму, содержит три неизвестных параметра. Следовательно, для решения задачи с помощью ВИМ необходимо выбрать три узла интерполирования, составить систему из трёх уравнений.

Выбор узлов интерполирования осуществляем по-прежнему по методике [7]. Получаем: $\delta_1=1000$, $\delta_2=6000$, $\delta_3=16000$. Это позволяет от уравнения синтеза (3.20) перейти к системе из трех нелинейных уравнений, имеющих три неизвестных коэффициента K_1 , K_2 и $b_{1,0}$:

$$\begin{cases} W_p^{жс}(\delta_1) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_1 + b_{1,0}) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}{\delta_1(\delta_1 + 1085) \cdot (\delta_1 + 60) \cdot (\delta_1 + 108) + K_2 \cdot (\delta_1 + 108) \cdot (\delta_1 + 188) \cdot (\delta_1 + 368) \cdot 4500}; \\ W_p^{жс}(\delta_2) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_2 + b_{1,0}) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}{\delta_2(\delta_2 + 1085) \cdot (\delta_2 + 60) \cdot (\delta_2 + 108) + K_2 \cdot (\delta_2 + 108) \cdot (\delta_2 + 188) \cdot (\delta_2 + 368) \cdot 4500}; \\ W_p^{жс}(\delta_3) \cong \frac{K_1 \cdot K_2 (\delta_3 + b_{1,0}) \cdot (\delta_3 + 188) \cdot (\delta_3 + 368) \cdot 4500}{\delta_3(\delta_3 + 1085) \cdot (\delta_3 + 60) \cdot (\delta_3 + 108) + K_2 \cdot (\delta_3 + 108) \cdot (\delta_3 + 188) \cdot (\delta_3 + 368) \cdot 4500}. \end{cases}$$

Полученная система в пакете MathCad, представлена на рисунке 23.

$$\begin{aligned}
 f1(K1, K2, b10) &:= K1 \cdot \frac{(\delta1 + b10)}{\delta1 + 108} \cdot \frac{\left(K2 \cdot \frac{\delta1 + 188}{\delta1} \cdot \frac{\delta1 + 368}{\delta1 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta1 + 60}}{1 + \left(K2 \cdot \frac{\delta1 + 188}{\delta1} \cdot \frac{\delta1 + 368}{\delta1 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta1 + 60}} - W_{\text{ЭП}}(\delta1) \\
 f2(K1, K2, b10) &:= K1 \cdot \frac{(\delta2 + b10)}{\delta2 + 108} \cdot \frac{\left(K2 \cdot \frac{\delta2 + 188}{\delta2} \cdot \frac{\delta2 + 368}{\delta2 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta2 + 60}}{1 + \left(K2 \cdot \frac{\delta2 + 188}{\delta2} \cdot \frac{\delta2 + 368}{\delta2 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta2 + 60}} - W_{\text{ЭП}}(\delta2) \\
 f3(K1, K2, b10) &:= K1 \cdot \frac{(\delta3 + b10)}{\delta3 + 108} \cdot \frac{\left(K2 \cdot \frac{\delta3 + 188}{\delta3} \cdot \frac{\delta3 + 368}{\delta3 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta3 + 60}}{1 + \left(K2 \cdot \frac{\delta3 + 188}{\delta3} \cdot \frac{\delta3 + 368}{\delta3 + 1085} \right) \cdot \frac{4500}{\delta3 + 60}} - W_{\text{ЭП}}(\delta3) \\
 F(K1, K2, b10) &:= \begin{pmatrix} f1(K1, K2, b10) \\ f2(K1, K2, b10) \\ f3(K1, K2, b10) \end{pmatrix} \text{float}, 3 \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{609444.0 \cdot K1 \cdot K2 \cdot (0.000903 \cdot b10 + 0.903)}{609444.0 \cdot K2 + 184175.0} - 826.0 \\ \frac{189448.0 \cdot K1 \cdot K2 \cdot (0.000164 \cdot b10 + 0.982)}{189448.0 \cdot K2 + 275225.0} - 574.0 \\ \frac{1.13e6 \cdot K1 \cdot K2 \cdot (0.0000621 \cdot b10 + 0.993)}{1.13e6 \cdot K2 + 4.16e6} - 351.0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок 23 – Переходная характеристика САУ

Чтобы решать систему выбранным методом необходимо записать матрицу Якоби аналитически, определить её численное значение, вычислить определитель и найти обратную матрицу:

$$\begin{aligned}
R(K1, K2, b10) &:= \begin{pmatrix} \frac{d}{dK1} f1(K1, K2, b10) & \frac{d}{dK2} f1(K1, K2, b10) & \frac{d}{db10} f1(K1, K2, b10) \\ \frac{d}{dK1} f2(K1, K2, b10) & \frac{d}{dK2} f2(K1, K2, b10) & \frac{d}{db10} f2(K1, K2, b10) \\ \frac{d}{dK1} f3(K1, K2, b10) & \frac{d}{dK2} f3(K1, K2, b10) & \frac{d}{db10} f3(K1, K2, b10) \end{pmatrix} \\
R(K1, K2, b10) \text{ float, 3} &\rightarrow \begin{pmatrix} 0.826 & 54.2 & 0.784 \\ 0.574 & 121.0 & 0.0948 \\ 0.351 & 114.0 & 0.0219 \end{pmatrix} \\
R(K1, K2, b10)^{-1} \text{ float, 3} &\rightarrow \begin{pmatrix} -0.66 & 7.13 & -7.26 \\ 0.00168 & -0.0208 & 0.0301 \\ 1.85 & -6.07 & 5.56 \end{pmatrix} \\
|R(K1, K2, b10)| \text{ float, 3} &\rightarrow 12.3 \quad + \quad F(K1, K2, b10) = \begin{pmatrix} 0.828 \\ -0.052 \\ -0.259 \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Рисунок 24 – Расчёты, связанные с матрицей Якоби

Для решения также воспользуемся методом Ньютона. Так как, решение системы уравнений известно, примем начальное приближение X_0 следующим

$$\text{образом: } X_T = \begin{bmatrix} 1000 \\ 2 \\ 54 \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} 10 \\ 0,02 \\ 0.1 \end{bmatrix}, X_0 = \begin{bmatrix} 1000 \\ 2 \\ 54 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 10 \\ 0,02 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1010 \\ 2,02 \\ 55 \end{bmatrix}.$$

Результат решения $K_1 = 999$ методом $b_{10} = 53.59$ Ньютона отражен на рисунке 25, где $K_1 = 999$, $K_2 = 2.005$, $b_{10} = 53.59$, $k = 3$ (количество итераций).

$$\text{resultat}(k, K1, K2, b10) \text{ float, 4} \rightarrow \begin{pmatrix} 999.0 \\ 2.005 \\ 53.59 \\ 3.0 \end{pmatrix}$$

Рисунок 25 – Результат решения методом Ньютона

Для ответа на вопрос сходится ли алгоритм, рассмотрим модуль большего элемента матрицы невязок (таблица 2).

Таблица 2

Номер итерации	$K_1^{(i)}$	$K_2^{(i)}$	$b_{1.0}^{(i)}$	e_1	e_2	e_3	$e_{\max}$
0	1010	2.02	55	-14.774	$1442 \cdot 10^{-3}$	$1.562 \cdot 10^{-3}$	14.774
1	995.226	2.019	54.132	0.027	$-5.421 \cdot 10^{-3}$	$1.748 \cdot 10^{-3}$	0.027
2	995.253	2.018	54.132	0.203	$1.182 \cdot 10^{-3}$	-0.089	0.203
3	995.253	2.018	54.132	Выход из алгоритма			

Из таблицы 2 видно, что значения всех параметров сходятся к их точным значениям, значение модуля наибольшего элемента матрицы невязок уменьшается, пока не достигнет «значения-останова» $e = 10^{-3}$, следовательно, алгоритм сходится.

Промоделируем систему с рассчитанными методом Ньютона показателями в MATLAB и получим переходную характеристику, изображённую на рисунке 26. Полученное время ПП (переходного процесса) для системы с тремя неизвестными коэффициентами системы составило $4.29 \cdot 10^{-7}$ а, время ПП для данного эталонного решения также составляет $4.29 \cdot 10^{-7}$ секунды. Результат совпадает с эталонным. Разница времени ПП системы с двумя неизвестными и системы с тремя переменными составляет $0.04 \cdot 10^{-7}$ секунды, что не существенно в рамках рассматриваемой задачи.

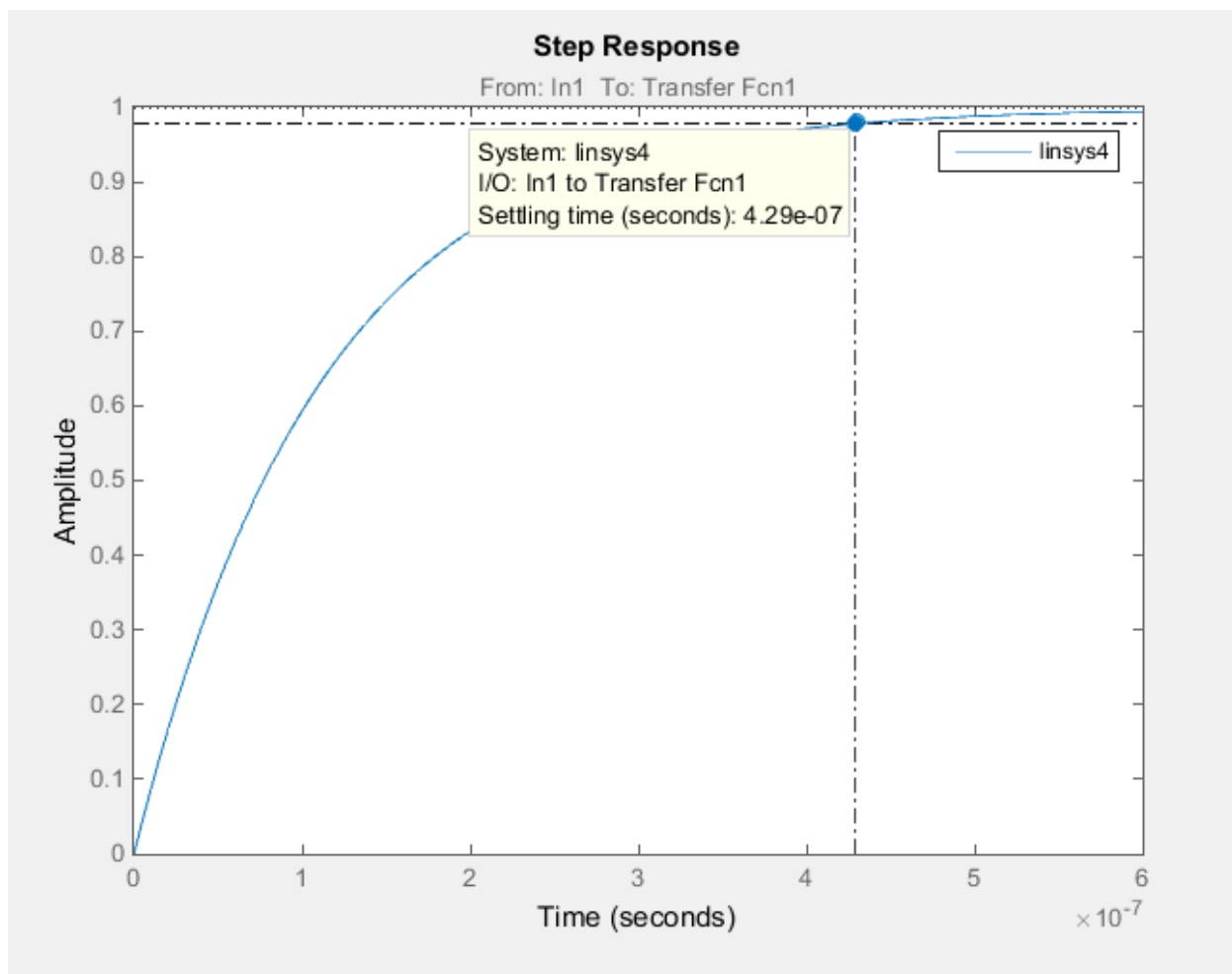


Рисунок 26 – Переходная характеристика САУ

Для выяснения свойств системы уравнений с тремя коэффициентами найдем ее обусловленность. Для этого матрица Якоби системы нелинейных уравнений подставим в функцию $\text{cond2}(A)$ пакета MathCad, где A – матрица Якоби.

$$A := \begin{pmatrix} 0.505 & 0.0266 & 9.17 \\ 0.766 & 82.0 & 0.373 \\ 0.365 & 116.0 & 0.0242 \end{pmatrix}$$

$$\text{cond2}(A) = 356.96$$

Рисунок 26 – Расчёт меры обусловленности

Значения чисел обусловленности порядка десятков или даже сотен считаются неплохими. Отсюда следует, что матрица не вырождена и неплохо обусловлена. Сравнение с предыдущим случаем?

Число обусловленности для системы с двумя неизвестными коэффициентами составляет 1532 – плохая обусловленность матрицы, а для системы с тремя неизвестными коэффициентами равно 357 – неплохая обусловленность матрицы. Следует отметить, что такая САУ не устойчива к возмущениям и неработоспособна в реальных условиях.

3.6 Оценивание трудностей численного решения уравнений синтеза

Метод Ньютона является точным настолько, насколько точно выполняются входящие в него арифметические операции. Однако в любой программной системе арифметические операции в большинстве случаев выполняются неточно, поэтому решение систем уравнений на самом деле является приближённым.

Оценить погрешность этого приближения, основываясь на погрешностях выполнения отдельных арифметических операций, весьма трудно из-за большого их числа.

Поэтому проще было выяснить, как влияют на решение систем уравнений различные возмущения в виде погрешностей. Это было сделано в пунктах 3.4 и 3.5. Для системы с двумя переменными число обусловленности равно 1532, а для системы с тремя неизвестными: 357.

Плохая обусловленность системы с двумя переменными и изначальные данные, полученные с некоторой погрешностью, говорят о том, что решать плохо обусловленные системы не имеет смысла, поскольку малые ошибки в моделях системы приводят к большим ошибкам решения системы. Обладающие такими свойствами задачи называются некорректными. Поиск решений некорректных задач должен вестись по алгоритмам, которые отличаются от обычных. С этой целью используются методы регуляризации.

В иных случаях задача решается неудовлетворительно: формально решение может быть получено, но оно не может быть использовано для практических целей, так как оно оказывается неустойчивым. При итерационном поиске результатов процесс может оказаться расходящимся. В любом случае синтезированная таким образом САУ будет неработоспособна - неробастной.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Организация и планирование научно-исследовательских работ

4.1.1 Структура работ в рамках научного исследования

Для выполнения научного исследования формируется рабочая группа, в состав которой входят студент-дипломник и один руководитель. Порядок этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ Раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель, студент
Выбор направления Исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Студент
	3	Проведение патентных исследований	Студент
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Студент
Обобщение и оценка результатов	6	Оценка эффективности полученных результатов и определение целесообразности проведения ОКР	Руководитель, студент
<i>Проведение ОКР</i>			
Разработка технической документации и проектирование	7	Разработка блок-схемы, принципиальной и функциональной схемы	Студент
	8	Выбор и расчет конструкции	Студент
	9	Проверка правильности оформления технической документации	Руководитель
Изготовление и испытание макета (опытного образца)	10	Сборка опытного образца системы телеуправления	Студент
	11	Лабораторные испытания системы телеуправления	Студент
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Студент
	13	Проверка работы	Руководитель

4.1.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Для расчета ожидаемого значения продолжительности работ $t_{ож}$ применяется две оценки: t_{min} и t_{max} (метод двух оценок).

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

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

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

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

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни.

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

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

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Для выполнения перечисленных в таблице 10 работ требуются специалисты: студент, научный руководитель. Результаты расчетов представлены в таблице 11.

4.1.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для построения ленточного графика работ определим максимальное по длительности исполнение. Это исполнение номер 2, и время его исполнения составит 117 дней. Календарный план-график представлен в таблице 12.

Где  - руководитель,  - студент

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

№ Работы	Трудоёмкость работ									Исполнители			Длительность работ в рабочих днях T_p			Длительность работ в календарных днях T_k		
	$t_{\min}$, чел-дни			$t_{\max}$, чел-дни			$t_{ож}$, чел-дни											
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	3	3	3	5	5	5	3.8	3.8	3.8	Р, С	Р, С	Р, С	1.9	1.9	1.9	3	3	3
2	3	7	5	5	9	7	3.8	7.8	5.8	С	С	С	3.8	7.8	5.8	6	12	9
3	2	2	2	4	4	4	2.8	2.8	2.8	С	С	С	2.8	2.8	2.8	4	4	4
4	1	1	1	2	2	2	1.4	1.4	1.4	Р	Р	Р	1.4	1.4	1.4	2	2	2
5	3	7	5	5	9	7	3.8	7.8	5.8	С	С	С	3.8	7.8	5.8	6	12	9
6	1	1	1	2	2	2	1.4	1.4	1.4	Р, С	Р, С	Р, С	0.7	0.7	0.7	1	1	1
7	3	7	7	7	14	14	4.6	9.8	9.8	С	С	С	4.6	9.8	9.8	7	14	14
8	2	7	5	5	9	8	3.2	7.8	6.2	С	С	С	3.2	7.8	6.2	5	12	9
9	1	1	1	2	2	2	1.4	1.4	1.4	Р	Р	Р	1.4	1.4	1.4	2	2	2
10	8	20	10	10	22	12	8.8	20.8	10.8	С	С	С	8.8	20.8	10.8	13	31	16
11	5	5	5	7	7	7	5.8	5.8	5.8	С	С	С	5.8	5.8	5.8	9	9	9
12	3	5	4	5	7	6	3.8	5.8	4.8	С	С	С	3.8	5.8	4.8	6	9	7
13	3	3	3	5	5	5	3.8	3.8	3.8	Р	Р	Р	3.8	3.8	3.8	6	6	6
Итого																70	117	91

Таблица 12 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работы	Вид работы	T_{ki}	Исполнители	Февраль			Март			Апрель			Май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	3	Р, С	■											
2	Подбор и изучение материалов по теме	12	С	■	■										
3	Проведение патентных исследований	4	С			■									
4	Календарное планирование работ по теме	2	Р			■									
5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	12	С			■	■								
6	Оценка эффективности полученных результатов и определение целесообразности проведения ОКР	1	Р, С				■								
7	Разработка блок-схемы, принципиальной и функциональной схемы	14	С				■	■							
8	Выбор и расчет конструкции	12	С						■	■					
9	Проверка правильности оформления технической документации	2	Р							■					
10	Сборка опытного образца системы телеуправления	31	С							■	■	■	■		
11	Лабораторные испытания системы управления двигателями	9	С										■	■	
12	Составление пояснительной записки	9	С											■	■
13	Проверка работы	6	Р												■

4.1.4 Бюджет научно-технического исследования

4.1.4.1 Расчет материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{\text{расх}i} ,$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, примем равным 15%.

Расчеты представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество			Цена за ед., руб.			Затраты на материалы, руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Двигатель постоянного тока	Шт.	1	1	1	600 00	600 00	600 00	69000	69000	69000
Пульт управления (джойстик)	Шт.	0	0	1	0	0	550 0	0	0	6325
Отладочные платы Pinboard 2	Шт.	1	0	0	250 0	0	0	2875	0	0
Wi-fi роутер	Шт.	0	1	0	0	900	0	0	1035	0
Механические датчики: энкодеры	Шт.	0	18	0	0	400 0	0	0	82800	0
Алюминиевый лист 1105AT 2 x 1200 x 3000	Шт.	0	1	0	0	440 0	0	0	5060	0
Микрокомпьютер ARM	Шт.	0	1	0	0	300 0	0	0	3450	0

Продолжение таблицы 13

ZigBee-модуль	Шт.	1	1	1	100 0	100 0	100 0	1150	1150	1150
Крепежные элементы	Шт.	0	1	0	0	500	0	0	575	0
Аккумулятор 6V	Шт.	1	2	0	500	500	0	575	1035	0
Итого								73600	164795	76475

4.1.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Все расчеты по приобретению спецоборудования и оборудования, имеющегося в организации, но используемого для каждого исполнения конкретной темы, сводятся в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/ п	Наименование оборудования	Кол-во единиц оборудования			Цена единицы оборудования, тыс. руб.			Общая стоимость оборудования, тыс. руб.		
		Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1.	Паяльная станция	0	1	0	0	5000	0	0	5750	0
2.	Осциллограф	0	1	0	0	10000	0	0	11500	0
3.	Персональный компьютер	1	1	1	20000	20000	20000	23000	23000	23000
4.	Мультиметр	1	1	1	1000	1000	1000	1150	1150	1150
5.	Зарядное устройство для аккумуляторов	1	1	0	800	800	0	920	920	0
Итого:								25070	42320	24150

4.1.4.3 Заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника, руб.;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 11);

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 15).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	24	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Оклад студента принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику. При отсутствии такового берется оклад инженера собственной кафедры (лаборатории).

Таблица – Оклады участников проекта

Студент	Руководитель
7 864,11	33162,87

Таблица 16 – Расчёт основной заработной платы

Исп.	Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
1	Руководитель	33162,87	1335,59	14	1,699	31768,34
	Студент	7864,11	316,718	57	1,62	29245,74
	Итого					61014,08
2	Руководитель	33162,87	1335,59	14	1,699	31768,34
	Студент	7864,11	316,718	104	1,62	53360,64
	Итого					85128,98
3	Руководитель	33162,87	1335,59	14	1,699	31768,34
	Студент	7864,11	316,718	78	1,62	40020,48
	Итого					71788,82

4.1.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

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

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

Результаты расчета приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Полная заработная плата, руб.			
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
Руководитель проекта	31768,34	31768,34	31768,34	
Студент	30672,11	55962,00	41972,10	
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,27			
Итого				
Исполнение 1	16473.80			
Исполнение 2	22984.82			
Исполнение 3	19382.98			

4.1.4.5 Расчёт амортизационных расчётов

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

Используется формула

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{pf} * n}{F_d},$$

где: N_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

C_{OB} – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

F_d – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} . Например, для ПК в 2015 г. (298 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $F_d = 298 * 8 = 2384$ часа;

t_{pf} – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются

Таблица 19. Расчет амортизации

Оборудование	Коэффициент	Цена	t	n	Fd	C
Принтер	0.5	10000	40	1	500	400
Компьютер	0.4	50000	3200	1	2384	26845.64
Сумма:						27245.64

4.1.4.6 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле: $S_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot ЦЭ$

$$S_{эл.об.} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot ЦЭ$$

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

$ЦЭ$ – тариф на 1 кВт·час;

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

Для ТПУ $ЦЭ = 5,782$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 5.2 для инженера (ТРД) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{об} = ТРД \cdot K_t,$$

где K_t – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к ТРД, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} \cdot K_C \quad (5.9)$$

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

$КС = 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $КС = 1$.

Расчет затраты на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 20.

Таблица 20. Расчет затрат на электроэнергетику

Наименование оборудования	Время работы оборудования тоб, час	Потребляемая мощность Роб, кВт	Затраты Эоб руб.
Персональный компьютер	3200	0.1	1850.24
Лазерный принтер	40	0.1	23.128
Испытательный стенд	384	0.056	124.33
			1997.70

4.1.4.7 Расчет затрат на научные и производственные командировки

Для продвижения товара был выполнен ряд командировок, в частности в Москву, Санкт-Петербург, Магнитогорск, Железногорск и другие города в которых имеется возможность представить и продать разработку. Для того чтобы выполнить по одной поездке в заявленные города, было потрачено порядка 80 тысяч рублей.

4.1.4.8 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, почтовые и размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Исполнение 1 =

$$(73600+25070+61014,08+18882,13+80000+1997.70+27245.64) \cdot 0,16 = 46049.51$$

Исполнение 2 =

$$(164795+42320+85128,98+25529,53+80000+1997.70+27245.64) \cdot 0,16 = 68322.69$$

Исполнение 3 =

$$(76475+24150+71788,82+22299,14+80000+1997.70+27245.64) \cdot 0,16 = 48633.00$$

4.1.4.9 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет бюджета затрат научно-технического исследования

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Исп.1	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	73600	164795	76475	Пункт 4.1.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	25070	42320	24150	Пункт 4.1.4.2
3. Затраты по заработной плате исполнителей темы	61014	85128.98	71788.82	Пункт 4.1.4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	16473.80	22984.82	19382.98	Пункт 4.1.4.4
5. Затраты на амортизационные расходов	27245	27245	27245	Пункт 4.1.4.5
6. Затрат на электроэнергию	1998	1998	1998	Пункт 4.1.4.6
7. Затраты на научные и производственные командировки	80000	80000	80000	Пункт 4.1.4.7
8. Накладные расходы	46049.51	68322.69	48633.00	16 % от суммы ст. 1-7
9. Бюджет затрат НТИ	331450,31	492794,49	349672,8	Сумма ст. 1- 8

4.1.4.10 Оценка экономической эффективности проекта

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, т.е. соотношение обусловленного ей экономического результата (эффекта) и затрат на разработку проекта. Так как последние являются единовременными, то мы имеем дело с частным случаем задачи оценки экономической эффективности инвестиций, т.е. вложением денежных средств в предприятие, организацию, отраслевую, региональную социально-экономическую систему и т.п. (т.н. объекты инвестиций) с целью получения определенного результата в будущем.

Речь идет о вложениях в нематериальные активы в форме НИР и ОКР поэтому:

1. результат может быть получен в течение ряда последующих лет, в общем случае – на протяжении жизненного цикла создаваемой системы;
2. результаты инвестиций содержат элементы риска и неопределенности.

Для данного проекта экономический эффект может быть получен при внедрении результата проекта в работу компаний, которые занимаются проектировкой систем управления для автоматизированных, роботизированных систем управления различными исполнительными элементами. Примером могут быть такие компании как «Томск НИПИ Нефть», «МехатроникаПРО», АО «Элеси» и многие другие.

Оценка экономической разработки как отдельного объекта капиталовложений не может быть осуществлена в рамках работы:

1. Она не может функционировать вне данной системы;
2. Не может рассматриваться как самостоятельный элемент разработки.

Из эффекта проекта вытекают следующие преимущества: при проектировании систем более гибкий и точный процесс синтеза систем, относительно других методов, реализация численных методов обеспечивает возможность более тривиального расчёта, отсюда возрастает скорость вычислений. Также стоит отметить, что для синтеза сложных многоконтурных систем это один из немногих методов который может обеспечить необходимые показатели качества или результат, который наиболее приближен к необходимому.

Результат исследования позволит сократить цикл разработки системы управления, что позволит получить: снижение затрат на разработку, также сократит время на проектирование, риски ошибок и прочие затраты на проектирование.

5 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [1].

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководящими, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [1], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. В таблице 1 приведены основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы.

Таблица 1 — Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ, Кафедра СУМ НИ ТПУ	—	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы»
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность

При работе на ПЭВМ на студента воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки.

5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

5.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, работающие на ПЭВМ, не должны иметь медицинских противопоказаний. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

5.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, в качестве примера рисунок 1 иллюстрирует зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости.

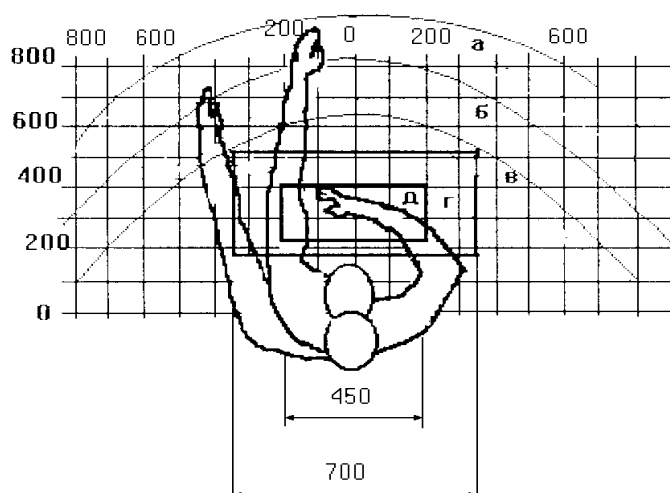


Рисунок 27 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а – зона максимальной досягаемости рук;

б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в – зона легкой досягаемости ладони;

г – оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для

ног высотой не менее 600 мм, шириной — не менее 500 мм, глубиной на уровне колен — не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног — не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420–550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500–600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100–300 мм от края.

5.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [20] и приведены в таблице 2.

Таблица 21 — Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Категория работ	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	I а	22–24	40–60	0,1
Тёплый	I а	23–25	40	0,1

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность — 40%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с, температура летом — 20–25 °С, зимой — 13–15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется

через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеосигнального кабеля. Согласно [17] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц — 25 В/м;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц — 250 нТл;
- в диапазоне частот от 2 до 400 кГц — 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 0,496 мкЗ/час. По нормам [17] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 1 мкЗ/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

5.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Электрический ток, проходя через организм человека, оказывает биологическое, электролитическое, теплое и механическое воздействие.

Биологическое действие тока проявляется в раздражении и возбуждении тканей и органов. Вследствие этого наблюдается судороги скелетных мышц, которые могут привести к остановке дыхания, отрывным переломам и вывихам конечностей, спазму голосовых связок.

Электрическое действие тока проявляется в электролизе (разложении) жидкостей, в том числе и крови, а так же существенно изменяет функциональное состояние клеток.

Тепловое действие электрического тока приводит к ожогам кожного покрова, а так же гибели подкожной тканей, вплоть до обугливания. Механическое действие тока проявляется в расслоении тканей и даже отрывах частей тела.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [18].

5.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [19], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения — предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководителю;
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры в соответствии с инструкцией.

Заключение

В ходе выполнения выпускной магистерской диссертации, целью которой являлось исследование возможности синтеза регуляторов многоконтурной, подчинённой, автоматической системы управления прецизионного токарного станка вещественным интерполяционным методом, проделана следующая работа:

1. В первой главе рассмотрены основные пути решения уравнений синтеза многоконтурных систем. Это методы с использованием модального и симметричного оптимума. Определены прямые показатели качества, робастности, которые могут обеспечить принципы МО и СО. Сделан вывод о том, что вышеуказанные методы не могут обеспечить необходимых показателей качества.

2. Во второй главе приведён алгоритм решения уравнения синтеза двухконтурных систем вещественным интерполяционным методом в общем случае. В третьей главе описана система управления прецизионным токарным станком, обозначена её операторно-структурную схему и значения коэффициентов всех передаточных функций, которые обеспечивают необходимое качество переходного процесса и являются эталонами, составление уравнения синтеза САУ прецизионного токарного станка.

3. Далее выбор метода решения системы нелинейных уравнений. Рассмотрены трудности решения с помощью методов: простой итерации, Ньютона и модифицированный метод Ньютона. Выбран метод Ньютона.

4. Сократив число неизвестных коэффициентов до двух уравнения синтеза исследуемой САУ, определили значение этих коэффициентов. Смоделировав систему, получили прямые показатели качества системы, которые не значительно отличаются от эталонных. Было вычислено, что

система уравнений неплохо обусловлена. Обладающие такими свойствами задачи называются некорректными

5. Сократив число неизвестных коэффициентов до трёх уравнения синтеза исследуемой САУ, определили значение этих коэффициентов. Смоделировав систему, получили прямые показатели качества системы, которые совпадают с эталонными значениями. Было вычислено, что система уравнений плохо обусловлена. Задача некорректна.

6. Результат исследования следующий: было выяснено, что рассматриваемый в работе численный метод синтеза САУ позволяет достичь заданных, эталонных показателей качества, но не может обеспечить адекватного решения проблемы создания грубой системы управления. В дальнейшем необходимо искать другие методы синтеза САУ, которые позволят синтезировать робастную систему.

7. В последующем, предлагается рассмотрение методов регуляризации. Применение данных методик позволит повысить меры обусловленности задачи, что возможно приведет к созданию робастной и работоспособной системе.

Проведённый анализ методов показал, что исследование, описанное в диссертации, целесообразно. Определена стоимость ресурсов научного исследования: материально – технических, энергетических и человеческих. Рассчитаны ставки НДС и социального налога исследования. Распланирован и сформирован бюджет научных исследований.

Список литературы:

1. Малышенко А.М. Математические основы теории систем [Электронный ресурс]. URL: http://portal.tpu.ru/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab1/methematic_osnov_theori_sistem_zac.pdf. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 15.05.17.
2. Оптимизация контуров регулирования систем электропривода по типовым методикам [Электронный ресурс]. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-konturov-regulirovaniya-sistem-elektroprivoda-po-tipovym-metodikam>, – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 16.05.17.
3. Модальный оптимум настройки контуров регулирования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2264111/page:5/>, – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 16.05.17.
4. Симметричный оптимум настройки контуров регулирования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2264111/page:6/>, – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 19.05.17.
5. Порядок синтеза контуров электропривода с подчинённым регулированием [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/2264111/page:7/>, – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 27.05.17.
6. Р. Дорф и Р. Бишоп. Современные системы управления. Перв. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

7. Goncharov V., Antropov A., Rudnitski V., Udod A.. Use of transient processes on the basis of the real interpolation method. Proceedings of 15-th International Conference on Systems Science. September 7 - 10, 2004. Wroclaw, Poland. Vol. 1, pp.360- 366.
8. Bakshi U. , Bakshi M. Modern control theory. - Technical Publications Pune, India. - 2008. - 386p.
9. Barkovsky A., Blinova N., Goncharov V., Datsko O.. Multi-loop Linear Control Systems Design. System Science, Vol. 28, № 4, 2002.
10. Henry B. Fine. On Newton's Method of Approximation. Proc Natl Acad Sci U S A. Sep 1916; 2(9): 546–552.
11. Ламаш Б.Е. Лекции по биомеханике [Электронный ресурс]. URL: www.dvgu.ru/meteo/book/BioMechan.htm, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 16.06.14.
12. А.С. Алексеев, С.В. Замятин, Д.А. Плотников. Определение момента инерции электропривода по временным характеристикам. // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 5. –С. 65–69.
13. Протокол Dynamixel [Электронный ресурс] // Техническая поддержка Robotis.URL:<http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/communication>

on/dxl_packet.htm, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения 16.06.14.

14. Системы управления [Электронный ресурс] // Википедия. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения 16.06.17.
15. СанПиН 2.22.542-96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996. – 55с.
16. ГОСТ 12.1.028-80 Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в помещении. Технический метод, 1980.
17. ГОСТ 12.1.003-83 Шум Общие требования безопасности, 1983.
18. СНиП 23-05-2010 Естественное и искусственное освещение, 2010.
19. ГОСТ 12.1.019–85 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты, 1985.
20. ГОСТ 12.1.004-91 Пожарная безопасность, 1991.
21. Статья 8.1. КоАП РФ. Несоблюдение экологических требований при осуществлении градостроительной деятельности и эксплуатации предприятий, сооружений или иных объектов.

22. Постановление от 30 декабря 2003 г. N 794 О Единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_159106/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. Дата обращения 16.06.17.