



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра Наземных транспортно-технологических машин

УТВЕРЖДАЮ
Начальник учебно-методического управления

«15» февраля 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Локальные системы управления

направление подготовки/специальность 15.04.06 Мехатроника и робототехника

направленность (профиль)/специализация образовательной программы Мехатронные и
робототехнические системы

Форма обучения очная

Санкт-Петербург, 2024

1. Цели и задачи освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование у студентов комплексных знаний и практических навыков в области проектирования, эксплуатации и администрирования локальных систем управления.

Задачи дисциплины:

- получение опыта творческой работы совместно с преподавателем;
- развитие профессионально-деловых качеств, любви к предмету и самостоятельного творческого мышления.
- получение точного понимания всех необходимых терминов и понятий.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине, обеспечивающие достижение планируемых результатов освоения ОПОП
ПК-1 Способен организовывать актуальные направления исследований в области мехатронных и робототехнических систем	ПК-1.1 Демонстрирует понимание актуальной нормативной документации, методов, средств и практики планирования, организации, проведения и внедрения научных исследований и опытно-конструкторских разработок в области профессиональной деятельности	знает - Методологию проведения научных исследований и опытно-конструкторских работ. - Методы работы с нормативной документацией, в области локальных систем управления. умеет - Организовать процесс разработки и внедрения новых технологий в сфере локальных систем управления. - Применять методы и техники научных исследований для решения задач. владеет - Навыками критического анализа научной литературы, выбора методик проведения исследований и опытно-конструкторских работ.

<p>ПК-1 Способен организовывать актуальные направления исследований в области мехатронных и робототехнических систем</p>	<p>ПК-1.2 Осуществляет обоснование перспектив проведения исследований в соответствующей области знаний</p>	<p>знает</p> <ul style="list-style-type: none"> - Актуальные проблемы и разработки в сфере мехатроники и робототехники, которые могут быть решены с помощью инноваций в области локальных систем управления. - Критерии оценивания потенциала научных исследований. <p>умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> - Оценить потенциал предложенных исследовательских проектов, направленных на разработку и оптимизацию локальных систем управления. - Формулировать цели и задачи для научных исследований, основываясь на данных анализа современных тенденций в мехатронике и робототехнике. <p>владеет</p> <ul style="list-style-type: none"> - Навыками прогнозирования развития технологий в области локальных систем управления на основе аналитического обзора научно-технических данных.
<p>ПК-1 Способен организовывать актуальные направления исследований в области мехатронных и робототехнических систем</p>	<p>ПК-1.3 Определяет перечень задач исследований в соответствии с новой научной проблематикой в профессиональной области знаний</p>	<p>знает</p> <ul style="list-style-type: none"> - Актуальные тенденции и направления в области мехатроники и робототехники, связанные с локальными системами управления. - Нормативную документацию, стандарты и протоколы, применяемые в локальных системах управления. <p>умеет</p> <ul style="list-style-type: none"> - Организовывать исследовательские проекты, направленные на разработку и совершенствование мехатронных и робототехнических систем. - Применять знания о современных технологиях и методах в области локальных систем управления для планирования и проведения научных исследований. <p>владеет</p> <ul style="list-style-type: none"> - Навыками анализа актуальных научных тенденций и определения перспективных направлений исследований в области мехатроники и робототехники.

ПК-3 Способен организовывать и выполнять работы по проектированию и конструированию мехатронных и робототехнических систем	ПК-3.1 Собирает и систематизирует информацию об опыте решений научно-технических (ой) задач(и) в сфере профессиональной деятельности	знает - Источники информации по достижениям в профессиональной области. - Методы анализа и синтеза полученной информации для применения в проектной деятельности. умеет - Искать, анализировать и применять информацию о последних достижениях в сфере профессиональной деятельности. владеет - Навыками критического мышления для оценки достоверности и актуальности информации, используемой при проектировании локальных систем управления.
--	--	--

3. Указание места дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Данная дисциплина (модуль) включена в Блок «Дисциплины, модули» Б1.В.ДВ.01.02 основной профессиональной образовательной программы 15.04.06 Мехатроника и робототехника и относится к части, формируемой участниками образовательных отношений учебного плана.

Дисциплина может базироваться на знаниях, ранее приобретенными при изучении следующих дисциплин: математика, информатика, электротехника, теория автоматического управления.

№ п/п	Последующие дисциплины	Код и наименование индикатора достижения компетенции
1	Информационное моделирование в профессиональной сфере (ТИМ)	ПК(Ц)-1.1, ПК(Ц)-1.2, ПК(Ц)-1.3, ПК(Ц)-1.4, ПК(Ц)-1.5
2	Нейронные сети и нейроконтроллеры	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-2.1, ПК-3.1

4. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся

Вид учебной работы	Всего часов	Из них часы на практическую подготовку	Семестр
			1
Контактная работа	64		64
Лекционные занятия (Лек)	32	0	32
Практические занятия (Пр)	32	0	32
Иная контактная работа, в том числе:	0,25		0,25
консультации по курсовой работе (проекту), контрольным работам (РГР)			
контактная работа на аттестацию (сдача зачета, зачета с оценкой; защита курсовой работы (проекта); сдача контрольных работ (РГР))			
контактная работа на аттестацию в сессию (консультация перед экзаменом и сдача	0,25		0,25
Часы на контроль	26,75		26,75
Самостоятельная работа (СР)	89		89
Общая трудоемкость дисциплины (модуля)			
часы:	180		180
зачетные единицы:	5		5

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по разделам (темам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

5.1. Тематический план дисциплины (модуля)

№	Разделы дисциплины	Семестр	Контактная работа (по учебным занятиям), час.						СР	Всего, час.	Код индикатора достижения компетенции
			лекции		ПЗ		ЛР				
			всего	из них на практическую подготовку	всего	из них на практическую подготовку	всего	из них на практическую подготовку			
1.	1 раздел. Раздел 1. Общие сведения о локальных системах управления										
1.1.	Основные понятия и определения	1	4		4				8	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
2.	2 раздел. Раздел 2. Архитектура локальных систем управления										
2.1.	Архитектура локальных систем управления	1	4		2				6	ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
3.	3 раздел. Раздел 3. Сенсорные системы в ЛСУ										
3.1.	Сенсорные системы в ЛСУ.	1	2		6				8	ПК-1.1, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-1.2	
4.	4 раздел. Раздел 4. Исполнительные механизмы в ЛСУ										
4.1.	Исполнительные механизмы в ЛСУ	1	6		4				10	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
5.	5 раздел. Раздел 5. Программное обеспечение для ЛСУ										
5.1.	Программное обеспечение для ЛСУ	1	4		6				10	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
6.	6 раздел. Раздел 6. Сети и коммуникации в ЛСУ										
6.1.	Сети и коммуникации в ЛСУ	1	4		4				8	ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-1.1, ПК-3.1	

7.	7 раздел. Раздел 7. Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике									
7.1.	Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике	1	4		4				8	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1
8.	8 раздел. Раздел 8. Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ									
8.1.	Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ	1	4		2				6	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1
9.	9 раздел. Проверка знаний									
9.1.	Самостоятельная работа студента	1						89	89	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1
9.2.	Защита практических работ	1							26,75	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1
9.3.	Экзамен	1							0,25	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1

5.1. Лекции

№ разд	Наименование раздела и темы лекций	Наименование и краткое содержание лекций								
1	Основные понятия и определения	Основные понятия и определения ЛСУ - История развития и современное состояние: обзор ключевых этапов развития ЛСУ, их роль и место в современной мехатронике и робототехнике. - Классификация локальных систем управления: разбор типов ЛСУ по различным критериям (по способу управления, по функциональному назначению и т.д.).								
2	Архитектура локальных систем управления	Структурное устройство ЛСУ Изучение основных компонентов системы, их функций и взаимодействия.								
2	Архитектура локальных систем управления	Технологии реализации ЛСУ Анализ современных технологий, используемых при создании локальных систем управления.								
3	Сенсорные системы в ЛСУ.	Типы и классификация датчиков Обзор основных типов датчиков, используемых в ЛСУ, их характеристики и области применения.								
4	Исполнительные механизмы в ЛСУ	Обзор типов исполнительных устройств Классификация и характеристики основных типов исполнительных механизмов.								
4	Исполнительные механизмы в ЛСУ	Управление исполнительными механизмами Методы и алгоритмы управления исполнительными устройствами в								

		составе ЛСУ.
5	Программное обеспечение для ЛСУ	Обзор программного обеспечения для разработки ЛСУ Сравнение популярных платформ и сред разработки.
5	Программное обеспечение для ЛСУ	Тестирование и отладка программного обеспечения Обзор методик тестирования и отладки программного обеспечения для локальных систем управления.
6	Сети и коммуникации в ЛСУ	Типы коммуникационных интерфейсов и протоколов Обзор основных стандартов и протоколов передачи данных в ЛСУ.
6	Сети и коммуникации в ЛСУ	Безопасность и надежность сетевых коммуникаций: аспекты обеспечения безопасности данных и надежности сетевого обмена в локальных системах управления. Обзор аспектов обеспечения безопасности данных и надежности сетевого обмена в локальных системах управления.
7	Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике	ЛСУ в промышленной автоматизации Примеры использования локальных систем управления на производстве.
7	Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике	Перспективные направления развития ЛСУ Обзор новейших тенденций и перспективных направлений развития локальных систем управления.
8	Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ	Организация эксплуатации ЛСУ Обзор методик и правил эксплуатации локальных систем управления.
8	Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ	Модернизация и обновление ЛСУ Подходы к модернизации существующих систем, обновление программного обеспечения и аппаратной части.

5.2. Практические занятия

№ разд	Наименование раздела и темы практических занятий	Наименование и содержание практических занятий
1	Основные понятия и определения	История развития ЛСУ и современное состояние Доклады по теме. Обзор ключевых этапов развития ЛСУ, их роль и место в современной мехатронике и робототехнике.
2	Архитектура локальных систем управления	Принципы построения ЛСУ: обзор методик проектирования архитектуры систем, примеры типовых решений. Построение ЛСУ: обзор методик проектирования архитектуры систем, примеры типовых решений.
3	Сенсорные системы в ЛСУ.	Интеграция сенсорных систем в ЛСУ Методы подключения и настройки датчиков в составе локальных систем управления.
3	Сенсорные системы в ЛСУ.	Обработка данных с датчиков Алгоритмы фильтрации, анализа и интерпретации данных с датчиков для принятия управленческих решений.
4	Исполнительные механизмы в ЛСУ	Примеры интеграции исполнительных механизмов: практические примеры использования исполнительных устройств в различных областях мехатроники и робототехники. Практические примеры использования исполнительных устройств в различных областях мехатроники и робототехники.
5	Программное обеспечение для ЛСУ	Программирование ЛСУ: основы программирования микроконтроллеров, ПЛК и других контроллеров для ЛСУ.

		Программирование микроконтроллеров, ПЛК и других контроллеров для ЛСУ.
6	Сети и коммуникации в ЛСУ	Организация сетевого взаимодействия: методы построения сетей для обмена данными между компонентами ЛСУ. Работа по построению сетей для обмена данными между компонентами ЛСУ.
7	Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике	ЛСУ в бытовой робототехнике Анализ примеров применения локальных систем управления в бытовых роботах.
8	Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ	Техническое обслуживание и ремонт ЛСУ Стандартные процедуры технического обслуживания, диагностика неисправностей и методы ремонта.

5.3. Самостоятельная работа обучающихся

№ разд	Наименование раздела дисциплины и темы	Содержание самостоятельной работы
9	Самостоятельная работа студента	Выполнение домашних заданий, подготовка в практическим и лекционным занятиям.

6. Методические материалы для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

7. Оценочные материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

7.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения дисциплины

№ п/п	Контролируемые разделы дисциплины (модуля)	Код и наименование индикатора контролируемой компетенции	Вид оценочного средства
1	Основные понятия и определения	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	Изучение базовых терминов, таких как локальные системы управления (ЛСУ), мехатронные системы, робототехника.
2	Архитектура локальных систем управления	ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
3	Сенсорные системы в ЛСУ.	ПК-1.1, ПК-1.3, ПК-3.1, ПК-1.2	
4	Исполнительные механизмы в ЛСУ	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
5	Программное обеспечение для ЛСУ	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
6	Сети и коммуникации в ЛСУ	ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-1.1, ПК-3.1	
7	Применение ЛСУ в мехатронике и робототехнике	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
8	Эксплуатация и техническое обслуживание ЛСУ	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
9	Самостоятельная работа студента	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
10	Защита практических работ	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	
11	Экзамен	ПК-1.1, ПК-1.2, ПК-1.3, ПК-3.1	

7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы текущего контроля успеваемости, необходимые для оценки знаний, умений и навыков и (или) опыта профессиональной деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения дисциплины

1. Испытания следящих систем в статике.
2. СС, работающие на переменном токе.
3. Испытание следящих систем в динамике.
4. Системы программного управления.
5. Релейные следящие системы.
6. Система программного управления с использованием импульсных синхронных двигателей.
7. Построение кривой переходного процесса в релейной системе.
8. Типовая структура систем ЧПУ.
9. Коррекция РСС за счет введения в закон управления сигнала пропорционального скорости вращения выходного вала.
10. Система автоматического контроля.
11. Коррекция РСС за счет введения в закон управления сигнала пропорционального производной от угла ошибки.
12. Системы сбегающего автоматического контроля.
13. Корректирующие устройства для сигналов переменного тока.
14. Централизованный автоматический контроль.
15. Система программного управления.
16. Испытания СС в динамике.
17. Система программного управления с использованием импульсных синхронных двигателей.
18. Испытание систем в статике.
19. Типовая структура систем ЧПУ.
20. Релейные следящие системы.
21. Система автоматического контроля.
22. Построение кривой переходного процесса в РСС.
23. Система обегавшего автоматического контроля.
24. Коррекция РСС за счет введения в закон управления сигнала, пропорционального скорости вращения выходного вала.
25. Централизованный автоматический контроль.
26. Коррекция РСС за счет введения в закон управления сигнала пропорционального производной от угла ошибки.
27. Система автоматического контроля.
28. Испытания СС в динамике.
29. Типовая структура систем ЧПУ.
30. Коррекция РСС.
31. Синтез САУ.
32. Корректирующие устройства для сигналов переменного тока.
33. Корректирующие устройства для сигналов переменного тока.
34. Структура и общая характеристика систем подчиненного регулирования.
35. Следящие системы на переменном токе.
36. Выбор и реализация регуляторов в системах подчиненного регулирования.

7.3. Система оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю) при проведении текущего контроля успеваемости

<p>Оценка «отлично» (зачтено)</p>	<p>знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - систематизированные, глубокие и полные знания по всем разделам дисциплины, а также по основным вопросам, выходящим за пределы учебной программы; - точное использование научной терминологии, систематически грамотное и логически правильное изложение ответа на вопросы; - полное и глубокое усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой по дисциплине (модулю) <p>умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - умеет ориентироваться в теориях, концепциях и направлениях дисциплины и давать им критическую оценку, используя научные достижения других дисциплин <p>навыки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - высокий уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций; - владеет навыками самостоятельно и творчески решать сложные проблемы и нестандартные ситуации; - применяет теоретические знания для выбора методики выполнения заданий; - грамотно обосновывает ход решения задач; - безусловно владеет инструментарием учебной дисциплины, умение его эффективно использовать в постановке научных и практических задач; - творческая самостоятельная работа на практических/семинарских/лабораторных занятиях, активно участвует в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий
<p>Оценка «хорошо» (зачтено)</p>	<p>знания:</p> <ul style="list-style-type: none"> - достаточно полные и систематизированные знания по дисциплине; - усвоение основной и дополнительной литературы, рекомендованной рабочей программой по дисциплине (модулю) <p>умения:</p> <ul style="list-style-type: none"> - умеет ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях дисциплины и давать им критическую оценку; - использует научную терминологию, лингвистически и логически правильно излагает ответы на вопросы, умеет делать обоснованные выводы; - владеет инструментарием по дисциплине, умение его использовать в постановке и решении научных и профессиональных задач <p>навыки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - самостоятельная работа на практических занятиях, участие в групповых обсуждениях, высокий уровень культуры исполнения заданий; - средний уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций; - без затруднений выбирает стандартную методику выполнения заданий; - обосновывает ход решения задач без затруднений

<p>Оценка «удовлетворительно» (зачтено)</p>	<p>знания: - достаточный минимальный объем знаний по дисциплине; - усвоение основной литературы, рекомендованной рабочей программой; - использование научной терминологии, стилистическое и логическое изложение ответа на вопросы, умение делать выводы без существенных ошибок умения: - умеет ориентироваться в основных теориях, концепциях и направлениях по дисциплине и давать им оценку; - владеет инструментарием учебной дисциплины, умение его использовать в решении типовых задач; - умеет под руководством преподавателя решать стандартные задачи навыки: - работа под руководством преподавателя на практических занятиях, допустимый уровень культуры исполнения заданий; - достаточный минимальный уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций; - испытывает затруднения при обосновании алгоритма выполнения заданий</p>
<p>Оценка «неудовлетворительно» (не зачтено)</p>	<p>знания: - фрагментарные знания по дисциплине; - отказ от ответа (выполнения письменной работы); - знание отдельных источников, рекомендованных рабочей программой по дисциплине; умения: - не умеет использовать научную терминологию; - наличие грубых ошибок навыки: - низкий уровень культуры исполнения заданий; - низкий уровень сформированности заявленных в рабочей программе компетенций; - отсутствие навыков самостоятельной работы; - не может обосновать алгоритм выполнения заданий</p>

7.4. Теоретические вопросы и практические задания для проведения промежуточной аттестации обучающихся, необходимые для оценки знаний, умений и навыков и (или) опыта профессиональной деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

7.4.1. Теоретические вопросы для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примерный перечень теоретических вопросов:

1. Приведите основные функциональные схемы систем управления с промышленными регуляторами.
2. Приведите типовые законы, реализуемые промышленными регуляторами.
3. Влияние типа регулятора на качество системы управления.
4. Перечислите основные элементы систем локального управления.
5. Приведите основные характеристики измерительных элементов.
6. Перечислите типы исполнительных устройств и механизмов.
7. Способы реализации регуляторов в локальной системе автоматического управления.
8. Перечислите типовые микропроцессорные средства контроля, регулирования и управления.
9. Приведите классификацию следящих систем.
10. Приведите методы повышения точности работы следящей системы.

7.4.2. Практические задания для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Практические задания для проведения промежуточной аттестации представлены в Приложении (См. приложение).

7.4.3. Примерные темы курсовой работы (проекта) (при наличии)

Курсовые работы (проекты) учебным планом не предусмотрены.

7.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта профессиональной деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций

Процедура проведения промежуточной аттестации и текущего контроля успеваемости регламентируется локальным нормативным актом, определяющим порядок организации и проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.

Процедура оценивания формирования компетенций при проведении текущего контроля приведена в п. 7.3.

Типовые контрольные задания или иные материалы текущего контроля приведены в п. 7.2.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена.

7.6. Критерии оценивания сформированности компетенций при проведении промежуточной аттестации

Критерии оценивания	Уровень освоения и оценка			
	Оценка «неудовлетворительно»	Оценка «удовлетворительно»	Оценка «хорошо»	Оценка «отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	Уровень освоения компетенции «недостаточный». Компетенции не сформированы. Знания отсутствуют, умения и навыки не сформированы	Уровень освоения компетенции «пороговый». Компетенции сформированы. Сформированы базовые структуры знаний. Умения фрагментарны и носят репродуктивный характер. Демонстрируется низкий уровень самостоятельности практического навыка.	Уровень освоения компетенции «продвинутый». Компетенции сформированы. Знания обширные, системные. Умения носят репродуктивный характер, применяются к решению типовых заданий. Демонстрируется достаточный уровень самостоятельности устойчивого практического навыка.	Уровень освоения компетенции «высокий». Компетенции сформированы. Знания аргументированные, всесторонние. Умения успешно применяются к решению как типовых, так и нестандартных творческих заданий. Демонстрируется высокий уровень самостоятельности, высокая адаптивность практического навыка

знания	<p>Обучающийся демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> -существенные пробелы в знаниях учебного материала; -допускаются принципиальные ошибки при ответе на основные вопросы билета, отсутствует знание и понимание основных понятий и категорий; -непонимание сущности дополнительных вопросов в рамках заданий билета. 	<p>Обучающийся демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> -знания теоретического материала; -неполные ответы на основные вопросы, ошибки в ответе, недостаточное понимание сущности излагаемых вопросов; -неуверенные и неточные ответы на дополнительные вопросы. 	<p>Обучающийся демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> -знание и понимание основных вопросов контролируемого объема программного материала; - знания теоретического материала -способность устанавливать и объяснять связь практики и теории, выявлять противоречия, проблемы и тенденции развития; -правильные и конкретные, без грубых ошибок, ответы на поставленные вопросы. 	<p>Обучающийся демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> -глубокие, всесторонние и аргументированные знания программного материала; -полное понимание сущности и взаимосвязи рассматриваемых процессов и явлений, точное знание основных понятий, в рамках обсуждаемых заданий; -способность устанавливать и объяснять связь практики и теории, -логически последовательные, содержательные, конкретные и исчерпывающие ответы на все задания билета, а также дополнительные вопросы экзаменатора.
умения	<p>При выполнении практического задания билета обучающийся продемонстрировал недостаточный уровень умений. Практические задания не выполнены. Обучающийся не отвечает на вопросы билета при дополнительных наводящих вопросах преподавателя.</p>	<p>Обучающийся выполнил практическое задание билета с существенными неточностями. Допускаются ошибки в содержании ответа и решении практических заданий. При ответах на дополнительные вопросы было допущено много неточностей.</p>	<p>Обучающийся выполнил практическое задание билета с небольшими неточностями. Показал хорошие умения в рамках освоенного учебного материала. Предложенные практические задания решены с небольшими неточностями. Ответил на большинство дополнительных вопросов.</p>	<p>Обучающийся правильно выполнил практическое задание билета. Показал отличные умения в рамках освоенного учебного материала. Решает предложенные практические задания без ошибок. Ответил на все дополнительные вопросы.</p>

владение навыками	Не может выбрать методику выполнения заданий. Допускает грубые ошибки при выполнении заданий, нарушающие логику решения задач. Делает некорректные выводы. Не может обосновать алгоритм выполнения заданий.	Испытывает затруднения по выбору методики выполнения заданий. Допускает ошибки при выполнении заданий, нарушения логики решения задач. Испытывает затруднения с формулированием корректных выводов. Испытывает затруднения при обосновании алгоритма выполнения заданий.	Без затруднений выбирает стандартную методику выполнения заданий. Допускает ошибки при выполнении заданий, не нарушающие логику решения задач. Делает корректные выводы по результатам решения задачи. Обосновывает ход решения задач без затруднений.	Применяет теоретические знания для выбора методики выполнения заданий. Не допускает ошибок при выполнении заданий. Самостоятельно анализирует результаты выполнения заданий. Грамотно обосновывает ход решения задач.
-------------------	--	---	---	--

Оценка по дисциплине зависит от уровня сформированности компетенций, закрепленных за дисциплиной, и представляет собой среднее арифметическое от выставленных оценок по отдельным результатам обучения (знания, умения, владение навыками).

Оценка «отлично»/«зачтено» выставляется, если среднее арифметическое находится в интервале от 4,5 до 5,0.

Оценка «хорошо»/«зачтено» выставляется, если среднее арифметическое находится в интервале от 3,5 до 4,4.

Оценка «удовлетворительно»/«зачтено» выставляется, если среднее арифметическое находится в интервале от 2,5 до 3,4.

Оценка «неудовлетворительно»/«не зачтено» выставляется, если среднее арифметическое находится в интервале от 0 до 2,4.

8. Учебно-методическое и материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

№ п/п	Автор, название, место издания, издательство, год издания учебной и учебно-методической литературы	Количество экземпляров/электронный адрес ЭБС
<u>Основная литература</u>		
1	Кон Е. Л., Хижняков Ю. Н., Южаков А. А., Локальные системы управления параметрами объектов гражданского и промышленного строительства, Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012	http://www.iprbookshop.ru/105585.html
<u>Дополнительная литература</u>		
1	Герке А. Р., Лира А. В., Автоматические регуляторы и типовые законы регулирования, Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2016	http://www.iprbookshop.ru/62150.html
2	Барский А. Г., Оптико-электронные следящие системы, Москва: Логос, 2013	http://www.iprbookshop.ru/13002.html

3	Герке А. Р., Лира А. В., Автоматические регуляторы и типовые законы регулирования, Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2016	https://www.iprbookshop.ru/62150.html
4	Тверской Ю. С., Локальные системы управления. Введение в многофункциональные АСУТП электростанций, Санкт-Петербург: Лань, 2022	https://e.lanbook.com/book/238826

Обучающиеся из числа инвалидов и лиц с ОВЗ обеспечиваются печатными и (или) электронными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

8.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Наименование ресурса сети «Интернет»	Электронный адрес ресурса
Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU	https://www.elibrary.ru/

8.3. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем

Наименование	Электронный адрес ресурса
Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНИТИ)	www2.viniti.ru
Электронно-библиотечная система издательства "IPRsmart"	http://www.iprbookshop.ru/
Электронно-библиотечная система издательства "ЮРАЙТ"	https://www.biblio-online.ru/
Электронно-библиотечная система издательства "Лань"	https://e.lanbook.com/
Электронная библиотека Ирбис 64	http://ntb.spbgasu.ru/irbis64r_plus/
Система дистанционного обучения СПбГАСУ Moodle	https://moodle.spbgasu.ru/
Информационно-правовая система Консультант	https://student2.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=home;rnd=0.34403827862102354

8.4. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного и свободно распространяемого программного обеспечения

Наименование	Способ распространения (лицензионное или свободно распространяемое)
VirtualBox	Свободно распространяемое
КОМПАС-3D Машиностроение и строительства	Договор № АСЗ-23-00025 от 30.01.2023 г. Лицензия бессрочная
LibreOffice	Свободно распространяемое

8.5. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Сведения об оснащённости учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы

Наименование учебных аудиторий и помещений для самостоятельной работы	Оснащённость оборудованием и техническими средствами обучения
03. Компьютерный класс	Рабочие места с ПК (стол компьютерный, системный блок, монитор, клавиатура, мышь), стол рабочий, подключение к компьютерной сети СПбГАСУ, выход в Internet.

03. Учебные аудитории для проведения лекционных занятий	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа, комплект мультимедийного оборудования (персональный компьютер, мультимедийный проектор, экран, аудиосистема), доска, экран, комплект учебной мебели, подключение к компьютерной сети СПбГАСУ, выход в Интернет
---	---

Для инвалидов и лиц с ОВЗ обеспечиваются специальные условия для получения образования в соответствии с требованиями нормативно-правовых документов.

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО - магистратура по направлению подготовки 15.04.06 Мехатроника и робототехника (приказ Минобрнауки России от 14.08.2020 № 1023).

Программу составил:
ассистент НТТМ, Мейке У.Н.
доцент НТТМ, д.т.н. Куракина Е.В.

Программа обсуждена и рекомендована на заседании кафедры Наземных транспортно-технологических машин
30.01.2024, протокол № 10
Заведующий кафедрой д.т.н., доцент Куракина Е.В.

Программа одобрена на заседании учебно-методической комиссии факультета
06.02.2024, протокол № 4.

Председатель УМК к.т.н., доцент А.В. Зазыкин

1.1 Системы подчиненного регулирования

В настоящее время для управления электроприводами основных механизмов экскаваторов и подъемных машин наибольшее распространение получают системы, представляющие собой многоконтурную систему подчиненного регулирования с последовательной коррекцией. Обобщенная структурная схема такой системы представлена на рис. 1.1.

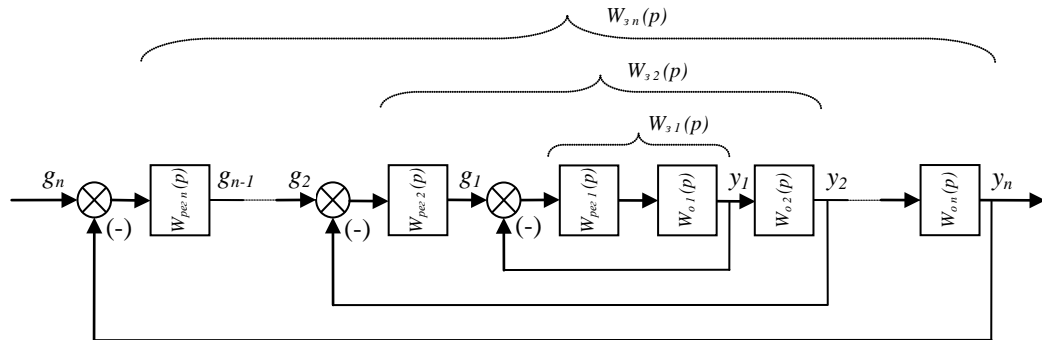


Рис. 1.1 – Структурная схема системы управления.

В таких системах применяется каскадное включение регуляторов, количество которых соответствует количеству регулируемых величин связанных друг с другом, например:

- ток и напряжение электродвигателя;
- ток – скорость – положение вала рабочего механизма *РМ*.

Каждый контур имеет отдельный регулятор, настраиваемый в соответствии с передаточной функцией ОУ. На входе регулятора сравниваются сигналы пропорциональные заданному и текущему значениям выходной величины данного контура, а выходной сигнал регулятора служит задающим сигналом для следующего контура.

В рассматриваемых системах контур регулирования каждой величины содержит, как правило, только одну большую постоянную времени, компенсируемую действием регулятора, что значительно облегчает синтез системы и позволяет применить однотипные регулирующие устройства.

Важным достоинством данной структуры является также возможность простыми средствами осуществить ограничение любой регулируемой величины системы. Например, для приводов экскаваторов необходимо ограничение токов якорной цепи двигателя в стопорных режимах. Для этого достаточно ограничить сигнал задания данной величины.

Расчет параметров системы подчиненного регулирования производится путем последовательной оптимизации отдельных контуров.

Объект внешнего контура имеет вид

$$W_{II}(p) = W_{OV2}(p)W_{31}(p),$$

$$\text{где } W_{31}(p) = \frac{W_{OV1}(p)W_{P1}(p)}{1 + W_{OV1}(p)W_{P1}(p)},$$

$$\text{тогда } W_{II}(p) = W_{OV2}(p) \frac{W_{OV1}(p)W_{P1}(p)}{1 + W_{OV1}(p)W_{P1}(p)}.$$

В общем случае W объекта управления i -ого контура имеет вид

$$W_i(p) = W_{OVi}(p)W_{3(i-1)}(p). \quad (1.1)$$

1.2 Функциональная и структурная схемы локальной системы управления

Проектирование ЛСУ производственных механизмов включает в себя разработку ее функциональной и структурной схем. Функциональная схема показывает, из каких элементов состоит система управления и связи между ним. На основе функциональной схемы ЛСУ производится анализ работы системы управления и обосновываются принципы ее технической реализации. Структурная схема ЛСУ разрабатывается на основе функциональной схемы с учетом передаточных функций всех ее элементов. Структурная схема используется при синтезе регуляторов системы управления.

В качестве примера системы подчиненного регулирования на рис. 1.2 представлена функциональная схема трехконтурной САР положения вала, скорости вращения и тока силовой цепи производственного механизма ПМ.

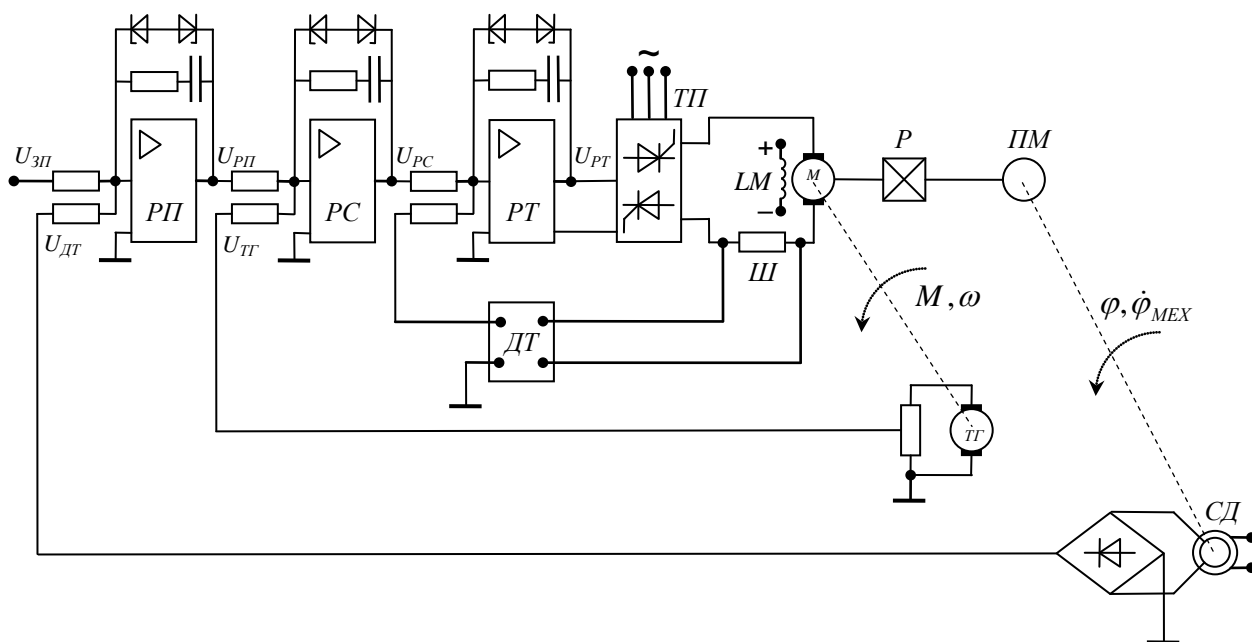


Рис. 1.2 – Функциональная схема трехконтурного САР

Первым (внутренним) контуром регулирования является контур регулирования тока двигателя, содержащий регулятор тока PT , систему импульсно-фазового управления (СИФУ), формирующей отпирающие импульсы для тиристорного преобразователя $ТП$, подключенного к якорной цепи двигателя M . Формирование отрицательной обратной связи по току якорной цепи осуществляется датчиком тока $ДТ$, который подключен к шунту $Ш$, включенному в якорную цепь двигателя. Выходной сигнал регулятора тока ограничен по величине значением, соответствующим допустимому ускорению двигателя.

Вторым контуром регулирования является контур регулирования скорости, состоящий из регулятора скорости PC и объекта регулирования, который включает в себя замкнутый контур регулирования тока и двигателя. Измерение угловой скорости вращения двигателя осуществляется тахогенератором $ТГ$, вал которого жестко связан с валом двигателя. Выходное напряжение тахогенератора поступает на вход регулятора скорости. Выходной сигнал регулятора скорости, являющийся задающим сигналом для контура регулирования тока, ограничен по величине значением, соответствующим стопорному току двигателя.

Для третьего (внешнего) контура регулирования положения, объектом регулирования являются замкнутый контур регулирования скорости двигателя и производственный механизм $ПМ$, связанный с двигателем через редуктор. Датчиком угла

1.3 Объект управления

Рассмотрим локальную систему управления положением рабочего органа экскаватора. Объектом управления проектируемой ЛСУ, функциональная схема которой представлена на рис. 1.4, является производственный механизм ПМ, проводимый в движение через редуктор электродвигателем постоянного тока, который получает питание от тиристорного преобразователя. Тиристорный преобразователь ТП преобразует напряжение сети переменного тока в выпрямленное напряжение $U_{\text{я}}$, приложенное к цепи якоря двигателя.

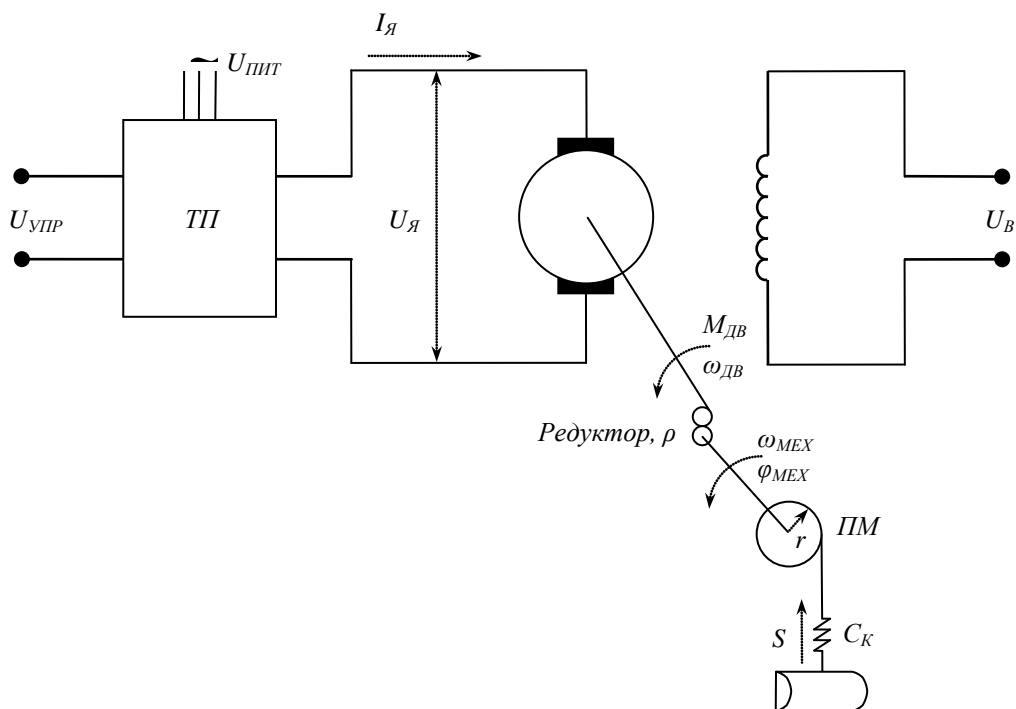


Рис. 1.4. – Функциональная схема объекта управления.

При непрерывном токе нагрузки внешняя характеристика тиристорного преобразователя близка к линейной и в этом режиме его можно представить как линейное динамическое звено с передаточной функцией:

$$W_{\text{ТП}}(p) = \frac{U_{\text{я}}(p)}{U_{\text{УПР}}(p)} = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1}, \quad (1.2)$$

где $K_{\text{ТП}}$ – передаточный коэффициент ТП;

$T_{\text{ТП}}$ – постоянная времени ТП.

В качестве выходной регулируемой величины может рассматриваться скорость вращения вала двигателя $\omega_{\text{ДВ}}$, либо угол поворота лебедки механизма φ , либо номинальный ток I , либо усилия в подъемных канатах S рабочего механизма.

Используя общепринятые допущения и производя линеаризацию характеристик электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, уравнение переходных процессов в двигателе можно записать в следующем виде:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + C_{\text{е}} \cdot \omega, \quad (1.3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{\text{м}} \cdot I_{\text{я}} - M_{\text{с}}, \quad (1.4)$$

где $R_{я}, L_{я}$ – сопротивление и индуктивность якорной цепи ЭД,
 J – момент инерции ЭД и лебедки, приведенной к валу двигателя,
 C_e, C_m – конструктивные постоянные ЭД,
 M_c – момент нагрузки (сопротивления), определяемый по формуле

$$M_c = \frac{S \cdot r}{\rho \cdot \eta}, \quad (1.5)$$

где ρ – передаточное число редуктора,
 r – радиус барабана лебедки,
 S – усиление натяжного подъемного каната,
 η – КПД редуктора.

Определим $W(p) = \frac{\omega(p)}{U_{я}(p)}$ – передаточную функцию ЭД по управляющему воздействию. Для этого выразим из уравнения (1.4) ток якорной цепи $I_{я}$:

$$I_{я} = \frac{J}{C_m} \cdot \frac{d\omega}{dt}.$$

Подставим $I_{я}$ в уравнение (1.3):

$$U_{я} = R_{я} \frac{J}{C_m} \cdot \frac{d\omega}{dt} + L_{я} \frac{J}{C_m} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{d\omega}{dt} \right) + C_e \omega,$$

$$U_{я} = \frac{L_{я} J}{C_m} \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{R_{я} J}{C_m} \cdot \frac{d\omega}{dt} + C_e \omega.$$

Поделим обе части уравнения на C_e :

$$\frac{1}{C_e} U_{я} = \frac{L_{я} J}{C_m C_e} \cdot \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{R_{я} \cdot J}{C_m \cdot C_e} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega.$$

Введем обозначения:

$$\frac{R_{я} J}{C_m C_e} = T_M, \quad \frac{L_{я} J}{R_{я}} = T_{\Omega} = T_{я}, \quad \frac{1}{C_e} = K_{\delta}, \quad (1.6)$$

где T_M – электромагнитная постоянная времени двигателя,
 T_{Ω} – электромеханическая постоянная времени двигателя,
 K_{δ} – передаточный коэффициент двигателя по управляющему воздействию.

Применяем прямое преобразование Лапласа

$$T_M T_{я} p^2 \omega + T_M p \omega + \omega = K_{\delta} U_{я},$$

$$\omega (T_M T_{я} p^2 + T_M p + 1) = K_{\delta} U_{я},$$

$$W(p) = \frac{\omega}{U_{я}} = \frac{K_{\delta}}{(T_M T_{я} p^2 + T_M p + 1)}. \quad (1.7)$$

Так как система управления электроприводом должна обеспечивать регулирование скорости вращения и тока якорной цепи. Для составления структурной схемы ОУ запишем систему уравнений (1.3) и (1.4) в виде:

$$U_{\text{я}}(p) = \frac{k_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1},$$

$$I = \frac{1}{R} \cdot \frac{U_{\text{я}} - C_e \omega}{T_{\text{э}}p + 1}, \quad (1.8)$$

$$T_M \frac{d\omega}{dt} = RI - \frac{R}{C_m} M_c$$

Структурная схема электропривода управляемого по схеме ТП-Д может быть изображена в виде, показанном на рис. 1.5.

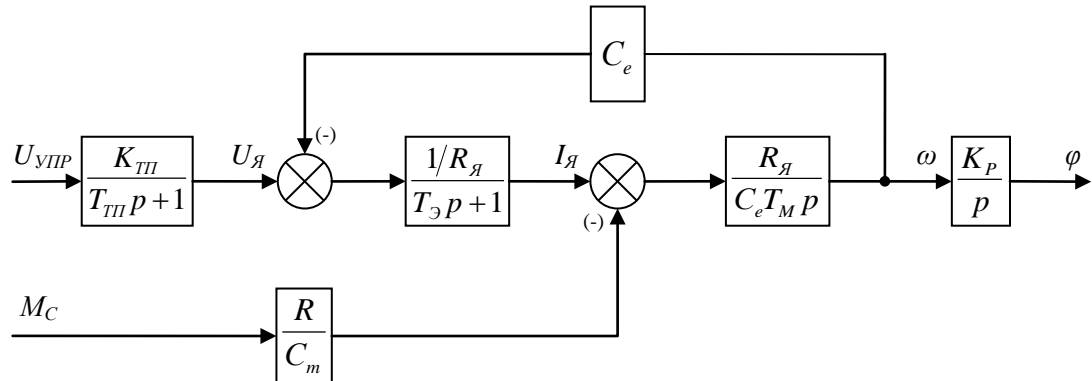


Рис. 1.5 – Структурная схема электропривода управляемого по схеме ТП-Д

Если в качестве регулируемой величины объекта управления принимается угол поворота лебедки производственного механизма, то к уравнениям (1.8) необходимо добавить уравнение

$$\varphi = K_p \int_0^t \omega dt, \quad (1.9)$$

где K_p – передаточный коэффициент редуктора, и определяется как

$$K_p = \frac{1}{\rho}.$$

Если в качестве регулируемой величины объекта управления рассматривается усилие натяжения подъемного каната, то к уравнениям (1.8) необходимо добавить уравнение

$$S = C_k r \varphi = C_k r K_p \int_0^t \omega dt = \frac{C_k r}{\rho} \int_0^t \omega dt \quad (1.10)$$

где C_k – жесткость подъемных канатов.

Модель ОУ составляют уравнения (1.8), (1.9) или (1.8), (1.10).

1.4 Синтез регуляторов в системе подчиненного регулирования

Так как в силовых электроприводах обычно $T_{\text{я}} \ll T_{\text{м}}$, то выражение передаточной функции двигателя можно записать:

$$W_{\text{ЭД}}(p) = \frac{K_{\delta}}{T_{\text{м}}T_{\text{Э}}p^2 + T_{\text{Э}}p + 1}, \quad (1.11)$$

где K_{δ} – передаточный коэффициент передачи двигателя по напряжению,

$$K_{\delta} = \frac{1}{C_e}.$$

Это позволяет упростить структуру, отбросив обратную связь по ЭДС ЭП.

Т.к. уравнение (1.11) линейное, то момент сопротивления на валу двигателя M_c как внешнее возмущающее воздействие при синтезе регуляторов не учитывается.

Внутренним контуром системы, с которого начинается оптимизация, является контур регулирования тока якорной цепи. Передаточная функция объекта управления первого контура имеет вид:

$$W_{\text{ОВ1}}(p) = W_{\text{ОТ}}(p) = \frac{K_T}{(T_{\text{ТП}}p + 1)(T_{\text{Э}}p + 1)}, \quad (1.12)$$

где K_T - коэффициент передачи по току, определяемый по формуле

$$K_T = K_{\text{ТП}}K_{\text{дт}}K_{\text{я}} = K_{\text{ТП}}K_{\text{дт}} \frac{1}{R_{\text{я}}}.$$

В основе оптимизации контуров регулирования, лежит компенсация регулятором больших постоянных времени объекта управления.

Регулятор тока выбирается пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{T_{\text{ИЗ1}}p + 1}{T_{\text{И1}}}, \quad (1.13)$$

где $T_{\text{ИЗ1}}$, $T_{\text{И1}}$ – постоянные времени регулятора.

Для компенсации большой постоянной времени операционных звеньев объекта управления выбираем

$$T_{\text{ИЗ1}} = T_{\text{Э}} = T_{\text{я}}.$$

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура регулирования тока имеет вид

$$W_T(p) = W_{\text{РТ}}(p) \cdot W_{\text{ОТ}}(p) = \frac{K_T}{T_{\text{И1}}p(T_{\text{ТП}}p + 1)} = \frac{K_T}{T_{\text{И1}}T_{\text{ТП}}p^2 + T_{\text{И1}}p}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования тока:

$$W_{3.T}(p) = \frac{W_{\text{РАЗ.T}}(p)}{1 + W_{\text{РАЗ.T}}(p)} = \frac{K_T}{T_{\text{ТП}}T_{\text{И1}}p^2 + T_{\text{И1}}p + K_T}.$$

Известно, что в системе второго порядка оптимальный вид переходного процесса с перерегулированием $\sigma \leq 4,3\%$ и минимальным временем регулирования $t_{\text{рег}} \leq 4,1 \cdot T_{\text{ТП}}$

соответствует степени затухания $\xi = \sqrt{2}/2$. Для обеспечения этой величины степени затухания оставшийся параметр регулятора следует определить из соотношения (условие модульного оптимума):

$$T_{И1} = 2K_{OT}T_{ТП}. \quad (1.14)$$

Тогда передаточная функция замкнутого контура регулирования имеет вид

$$W_{3.T}(p) = \frac{1}{2T_{ТП}^2 p^2 + 2T_{ТП} p + 1}. \quad (1.15)$$

Это колебательное звено с постоянной времени $\sqrt{2}T_{ТП}$.

Переходя к синтезу регулятора скорости второго контура, удобно упростить выражение передаточной функции замкнутого контура регулирования тока за счет отбрасывания малого коэффициента $2T_{ТП}^2$ в характеристическом полиноме:

$$W'_{3.T}(p) = \frac{I_{Я}(p)}{U_{3.T}(p)} = \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{ТП} p + 1}. \quad (1.16)$$

Согласно (1.1), объект управления контура регулирования скорости имеет передаточную функцию:

$$W_{Ov2}(p) = W'_{3.T}(p) \cdot W_{OC}(p) = \frac{K_C}{(2T_{ТП} p + 1)(T_M p + 1)}, \quad (1.17)$$

где K_C - коэффициент передачи по скорости, определяемый по формуле

$$K_C = \frac{1}{K_{ДТ}} K_o K_{ТГ}.$$

Регулятор скорости выбирается пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_{ИЗ2} p + 1}{T_{И2}},$$

где $T_{ИЗ2}, T_{И2}$ – постоянные времени регулятора второго контура.

Для компенсации большой постоянной времени объекта управления и обеспечения оптимальной величины степени затухания в контуре регулирования скорости параметры регулятора должны быть равны:

$$\begin{aligned} T_{ИЗ2} &= T_M, \text{ т.к. компенсируем наибольшую постоянную времени } T_M \\ T_{И2} &= 2K_{OC}T_{\Sigma} = 2K_{OC}(2T_{ТП}). \end{aligned} \quad (1.18)$$

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура регулирования скорости:

$$W_C(p) = \frac{U_{П}(p)}{U_{3.C}(p)} = \frac{1}{2(2T_{ТП})p \cdot (T_{ТП} p + 1)} = \frac{1}{8T_{ТП}^2 p^2 + 4T_{ТП} p}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости:

$$W_{3.C}(p) = \frac{1}{2(2T_{ТП})^2 p^2 + 2(2T_{ТП})p + 1} = \frac{1}{8T_{ТП}^2 p^2 + 4T_{ТП} p + 1},$$

или, считая выходной величиной угловую скорость:

$$W_{3.C}(p) = \frac{1/K_{\Gamma\Gamma}}{2(2T_{\Gamma\Gamma})^2 p^2 + 2(2T_{\Gamma\Gamma})p + 1} = \frac{1/K_{\Gamma\Gamma}}{8T_{\Gamma\Gamma}^2 p^2 + 4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}. \quad (1.19)$$

Переходя к синтезу регулятора положения внешнего третьего контура, упростим выражение передаточной функции замкнутого контура регулирования скорости:

$$W'_{3.C}(p) = \frac{1/K_{\Gamma\Gamma}}{4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}. \quad (1.20)$$

Передаточная функция объекта третьего контура:

$$W_{Oy3}(p) = W'_{3.C}(p) \cdot W_{Op}(p) = \frac{K_{\Pi}}{(4T_{\Gamma\Gamma} p + 1)p}, \quad (1.21)$$

где K_{Π} - коэффициент передачи контура положения PM , определяемый по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{1}{K_{\Gamma\Gamma}} K_P K_{ДП}.$$

Для настройки регулятора в этом контуре можно использовать 2 варианта.

Вариант 1 – регулятор положения выбирается пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{PI}(p) = \frac{T_{ИЗ3} p + 1}{T_{ИЗ}}, \quad (1.22)$$

где $T_{ИЗ3}, T_{ИЗ}$ – постоянные времени регулятора.

Настроечные параметры регулятора положения выбираем по условию симметричного оптимума, т.к. контур имеем второй порядок астатизма:

$$\begin{aligned} T_{ИЗ3} &= 4T_{\Gamma\Gamma}, \\ T_{ИЗ} &= 8T_{\Gamma\Gamma}^2 K_{Op}. \end{aligned} \quad (1.23)$$

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура регулирования положения имеет вид

$$W_{\Pi}(p) = \frac{U_{ДП}(p)}{U_{ЗП}(p)} = \frac{4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}{8T_{\Gamma\Gamma}^3 p^3 + 8T_{\Gamma\Gamma}^2 p^2}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения имеет вид

$$W_{3.П}(p) = \frac{4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}{8T_{\Gamma\Gamma}^3 p^3 + 8T_{\Gamma\Gamma}^2 p^2 + 4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}. \quad (1.24)$$

Для избежания большого значения перерегулирования $\sigma \cong 43\%$ и времени регулирования $t_{pez} \leq 16,5 \cdot (4T_{\Gamma\Gamma})$ включим на вход регулятора фильтр с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{1}{4T_{\Gamma\Gamma} p + 1}. \quad (1.25)$$

В замкнутом контуре регулирования положения будет обеспечен переходный процесс с перерегулированием не более $\sigma \leq 8\%$ и временем регулирования $t_{pez} \leq 7 \cdot (4T_{\Gamma\Gamma})$.

Вариант 2 – регулятор положения выбирается пропорциональным (П-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{PI}(p) = K, \quad (1.26)$$

где K – пропорциональный коэффициент регулятора.

В этом случае передаточная функция разомкнутого контура регулирования положения имеет вид

$$W_{\Pi}(p) = \frac{K_{оп} \cdot K}{(4T_{ТП} p + 1)p}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения имеет вид

$$W_{з.п}(p) = \frac{K_{оп} \cdot K}{4T_{ТП} p^2 + p + K_{оп} \cdot K}, \quad (1.27)$$

где $K = \frac{1}{8T_{ТП} K_{оп}}$ - по условию модульного оптимума.

В замкнутом контуре регулирования положения будет обеспечен переходный процесс с перерегулированием $\sigma \cong 4,3\%$ и временем регулирования $t_{рег} \cong 8,5 \cdot (4T_{ТП})$.

В соответствии с изложенными принципами построения систем подчиненного регулирования регуляторы скорости и положения должны иметь ограничение выходного сигнала. Уровень ограничения соответствует предельной заданной величине тока двигателя («токовой отсечке») и скорости. Ограниченно осуществляется включением нелинейных элементов параллельно цепи обратной связи регуляторов скорости и положения.

1.5 Пример выполнения практической работы

Дано:

$$\begin{array}{llll}
 T_{\text{ТП}} = 0,04 & T_M = 1,7 & K_{\delta} = 0,956 & K_{\text{ТГ}} = 1 \\
 K_{\text{ТП}} = 60 & T_{\text{Э}} = 0,28 & K'_{\delta} = 0,229 & K_{\text{ДП}} = 20 \\
 R_{\text{Я}} = 0,25 & \rho = 20 & K_{\text{ДГ}} = 0,002 & K_p = 1/\rho = 0,05
 \end{array}$$

Задание:

1. Осуществить синтез регуляторов для всех контуров ЛСУ. Во внешнем контуре можно использовать первый или второй вариант синтеза.
2. Подтвердить правильность расчетов моделирования в ППП Matlab. Контур настраивать, начиная с внутреннего (контур тока) наращивая структуру. Каждый раз определять показатели качества переходных процессов.
3. Метод моделирования выбрать с фиксированным шагом. Величина шага не должна превышать наименьшей постоянной времени системы.

Порядок выполнения работы:

Контур регулирования тока

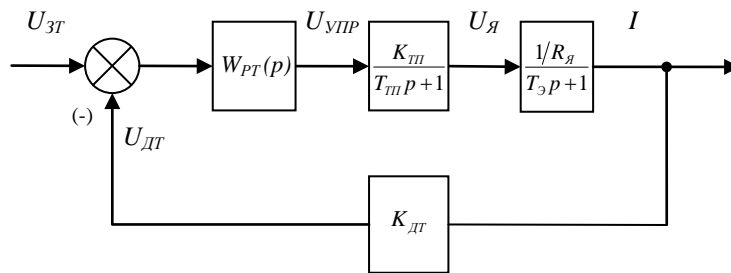


Рис. 1.6 – Схема моделирования контура регулирования тока.

Передаточная функция ОУ контура регулирования тока

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}p + 1} \cdot \frac{1/R_{\text{Я}}}{T_{\text{Э}}p + 1} \cdot K_{\text{ДГ}} = \frac{60 \cdot \frac{1}{0,25} \cdot 0,002}{(0,04p + 1) \cdot (0,28p + 1)} = \frac{0,48}{(0,04p + 1)(0,28p + 1)}$$

$$K_{\text{ОТ}} = 0,48; \quad T_{\Sigma} = 0,04; \quad T_{\text{МАХ}} = 0,28.$$

Регулятор тока выбирается пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{\text{РТ}}(p) = \frac{T_{\text{ИЗ1}}p + 1}{T_{\text{И1}}},$$

где $T_{\text{ИЗ1}}$, $T_{\text{И1}}$ – постоянные времени регулятора.

Для компенсации большой постоянной времени операционных звеньев объекта управления выбираем, согласно (1.14)

$$T_{\text{ИЗ1}} = T_{\text{МАХ}} = T_{\text{Э}} = 0,28 \text{ сек.}$$

$$T_{\text{И1}} = 2K_{\text{ОТ}}T_{\Sigma} = 2 \cdot 0,48 \cdot 0,04 = 0,0384 \text{ сек.}$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования имеет вид

$$W_{3.T}(p) = \frac{1}{2T_{III}^2 p^2 + 2T_{III} p + 1} = \frac{1}{0,0032 p^2 + 0,08 p + 1}$$

Переходя к синтезу регулятора скорости второго контура, удобно упростить выражение передаточной функции замкнутого контура регулирования тока за счет отбрасывания малого коэффициента $2T_{III}^2$ в характеристическом полиноме:

$$W'_{3.T}(p) = \frac{I_{Я}(p)}{U_{3T}(p)} = \frac{1/K_{ДТ}}{2T_{III} p + 1} = \frac{50}{0,08 p + 1}.$$

Переходная характеристика контура регулирования тока показана на рис. 1.7.

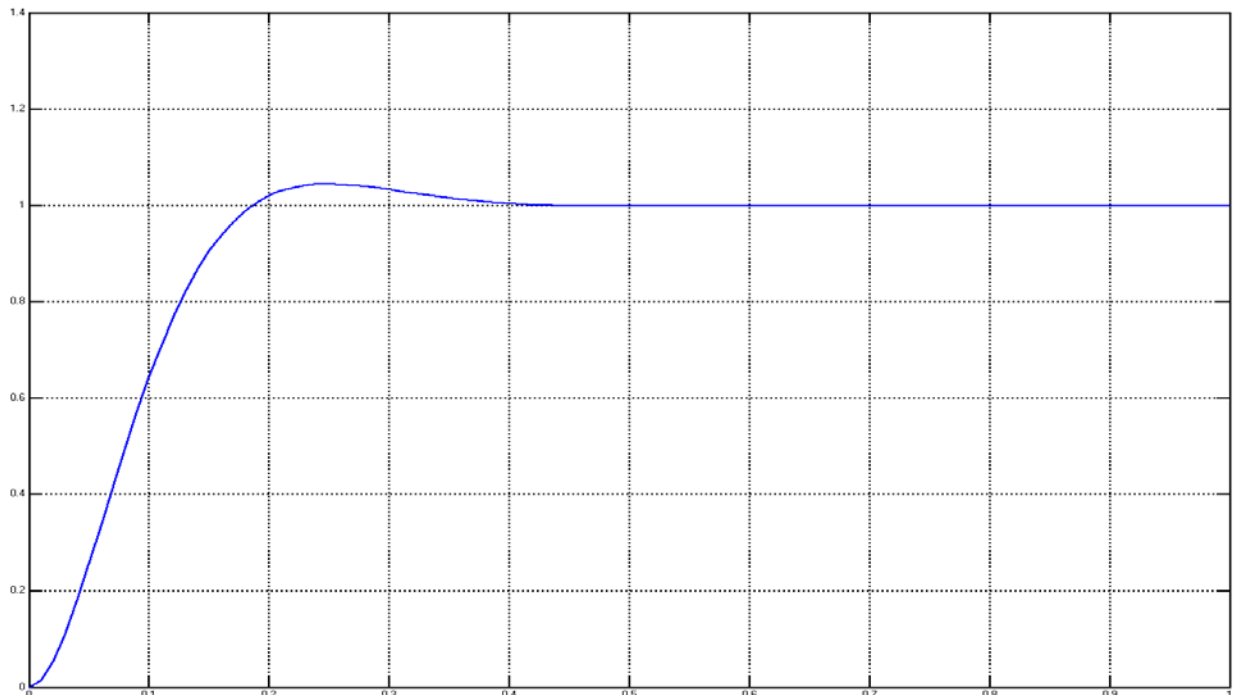


Рис. 1.7 – Переходная характеристика контура регулирования тока I .

Контур регулирования скорости

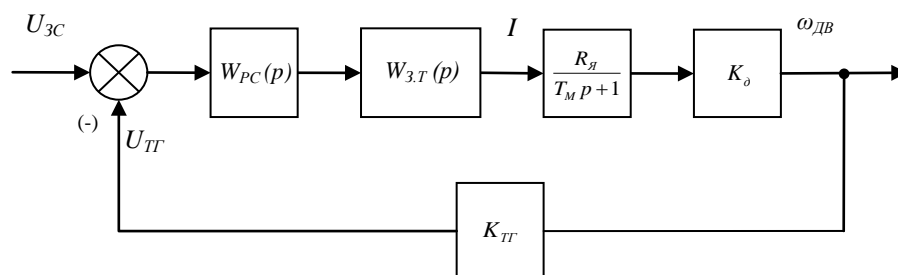


Рис. 1.8 – Схема моделирования контура регулирования скорости.

Передаточная функция ОУ контура регулирования скорости

$$W_{OУ2}(p) = W'_{3.T}(p) \cdot W_{OC}(p) = \frac{(1/K_{ДТ}) \cdot R_{Я} \cdot K_{о} \cdot K_{ТГ}}{(2T_{III} p + 1) \cdot (T_{М} p + 1)} = \frac{119,5}{(0,08 p + 1) \cdot (1,7 p + 1)}$$

$$K_{OC} = 119,5; \quad T_{\Sigma} = 0,08; \quad T_{MAX} = 1,7.$$

Регулятор скорости выбирается пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_{ИЗ2}p + 1}{T_{И2}}$$

Для компенсации большой постоянной времени объекта управления и обеспечения оптимальной величины степени затухания в контуре регулирования скорости, согласно (1.18), параметры регулятора должны быть равны:

$$T_{ИЗ2} = T_{МАХ} = T_M = 1,7 \text{ сек.}$$

$$T_{И2} = 2K_{OC}(2T_{ПП}) = 2 \cdot 119,5 \cdot 0,08 = 19,12 \text{ сек.}$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования скорости:

$$W_{3.C}(p) = \frac{1/K_{ТГ}}{2(2T_{ПП})^2 p^2 + 2(2T_{ПП})p + 1} = \frac{1/K_{ТГ}}{8T_{ПП}^2 p^2 + 4T_{ПП}p + 1} = \frac{1}{0,0128p^2 + 0,16p + 1}$$

Переходя к синтезу регулятора положения внешнего третьего контура, упростим выражение передаточной функции замкнутого контура регулирования скорости:

$$W'_{3.C}(p) = \frac{1/K_{ТГ}}{4T_{ПП}p + 1} = \frac{1}{0,16p + 1}$$

Переходная характеристика контура регулирования скорости показана на рис. 1.9.

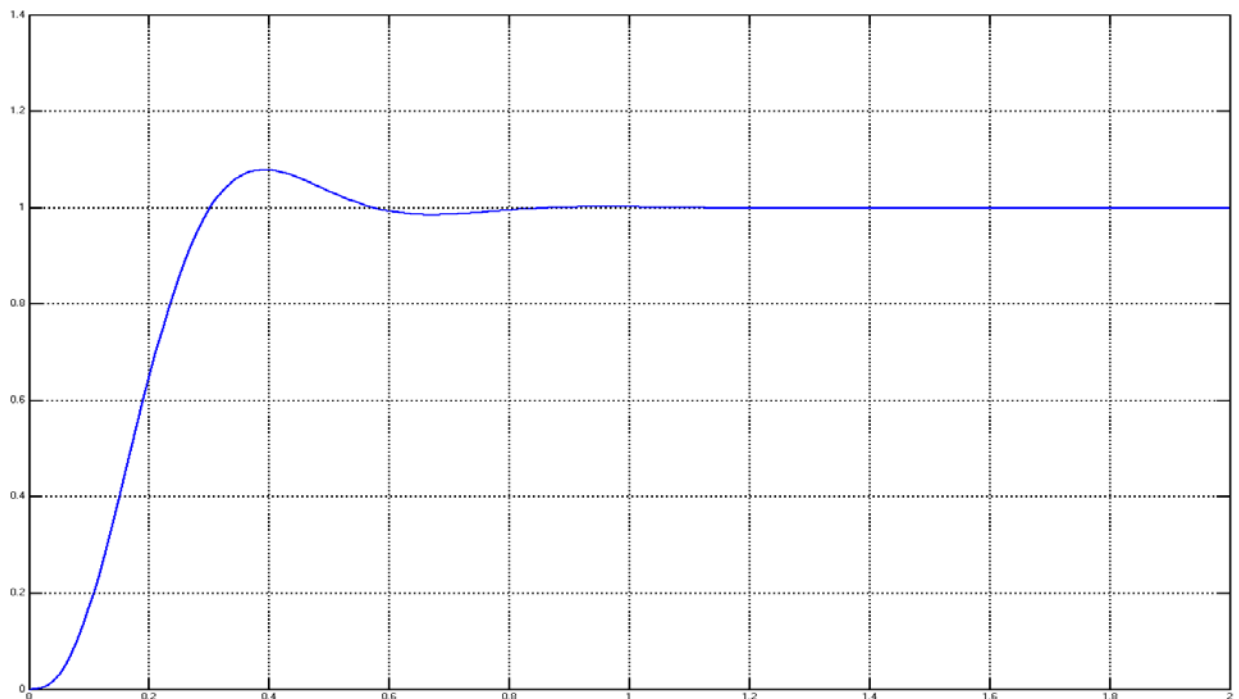


Рис. 1.9 – Переходная характеристика контура регулирования скорости ω .

Контур регулирования углового положения

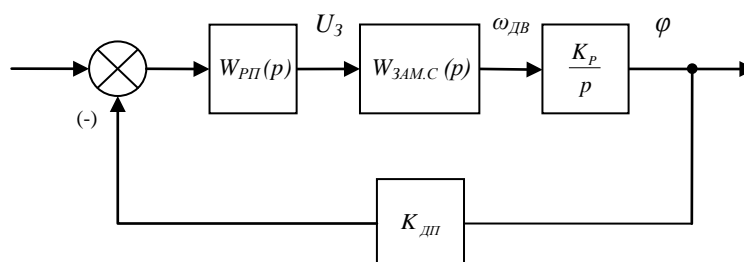


Рис. 1.10 – Схема моделирования контура регулирования положения.

Передаточная функция ОУ контура регулирования углового положения:

$$W_{OY3}(p) = W'_{3.C}(p) \cdot W_{OП}(p) = \frac{(1/K_{TГ})K_P K_{ДП}}{(4T_{TП}p + 1)p},$$

$$K_{OП} = 1, \quad T_{\Sigma} = 0,16$$

Регулятор положения выбирается пропорциональным (П-регулятор) с передаточной функцией:

$$W_{PП}(p) = K.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения имеет вид

$$W_{3.П}(p) = \frac{K_{OП} \cdot K}{4T_{TП}p^2 + p + K_{OП} \cdot K} = \frac{K}{0,16p^2 + p + K}.$$

Определим K , согласно (1.28):

$$K = \frac{1}{8T_{TП}K_{OП}} = \frac{1}{0,32} = 3,125.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования положения

$$W_{3.П}(p) = \frac{3,125}{0,16p^2 + p + 3,125}.$$

Переходная характеристика контура регулирования положения показана на рис. 1.11.

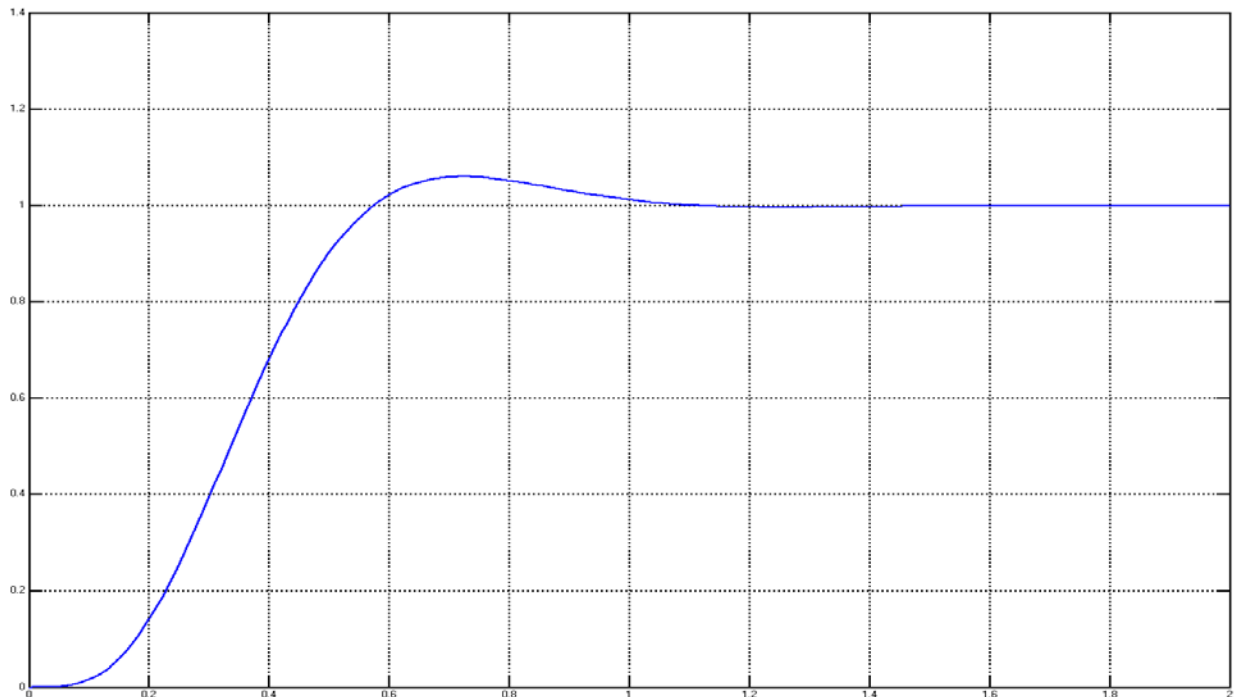


Рис. 1.11 – Переходная характеристика контура регулирования положения φ .

Схема моделирования системы управления электропривода основных механизмов экскаваторов в ППП MATLAB показана на рис. 1.12.

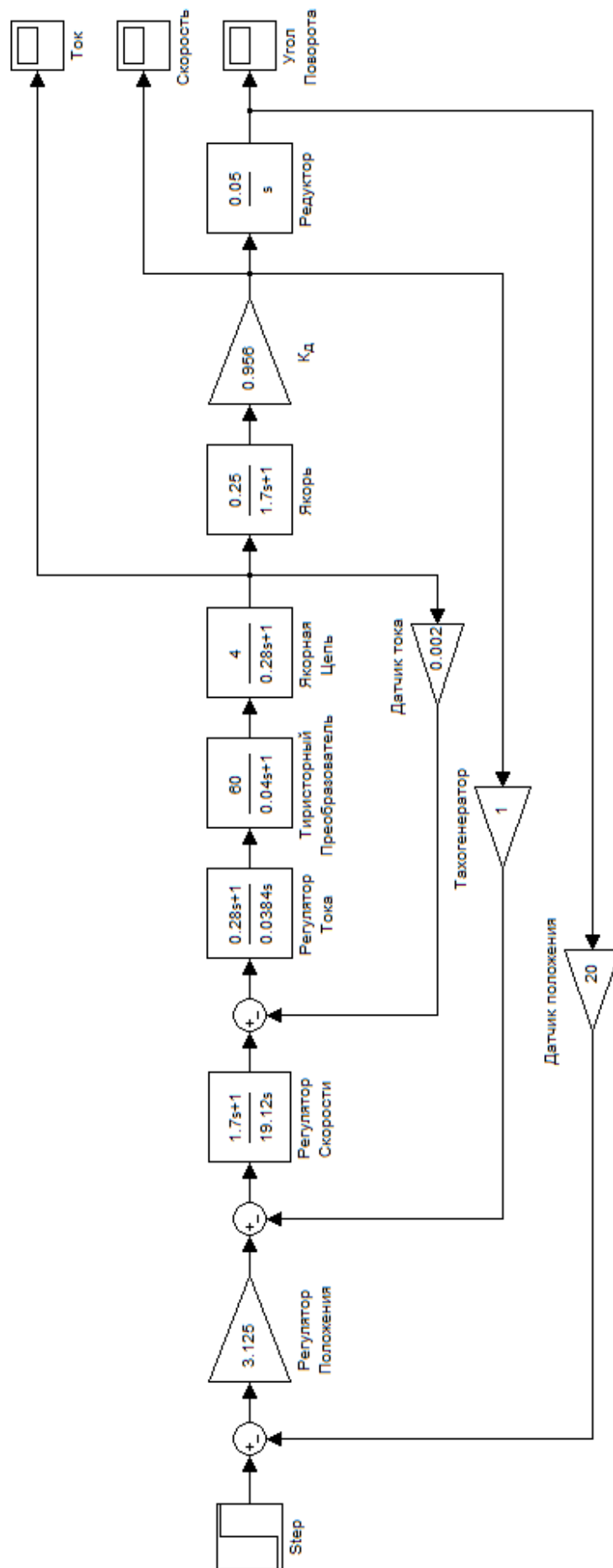


Рис. 1.12 – Схема моделирования.

Проведя моделирование, получим переходные процессы по току (рис. 1.13), по скорости (рис. 1.14) и по положению (рис 1.15).

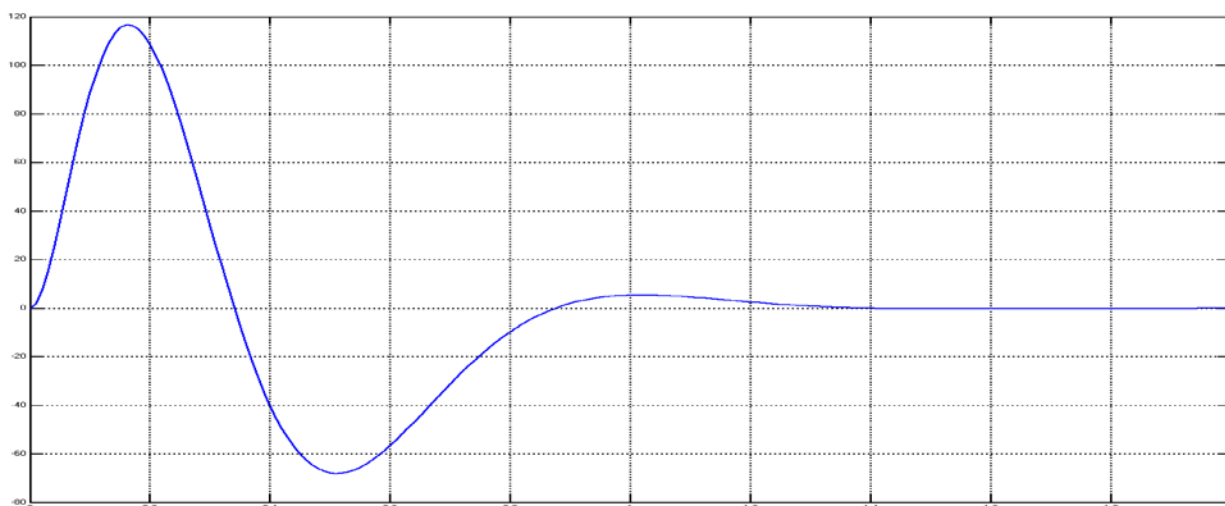


Рис. 1.13 – Переходная характеристика контура регулирования тока I .

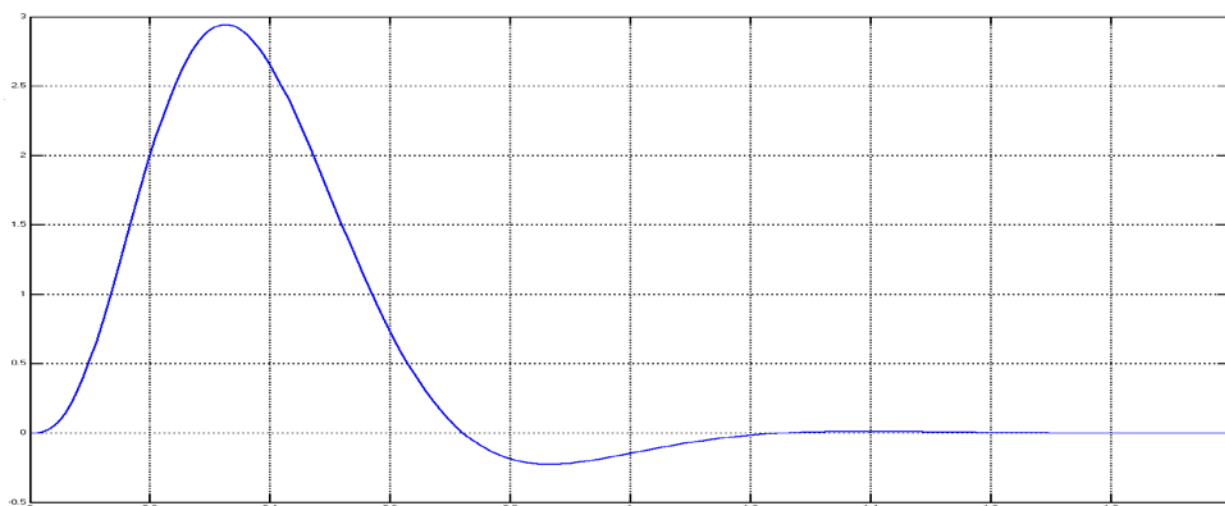


Рис. 1.14 – Переходная характеристика контура регулирования скорости ω .

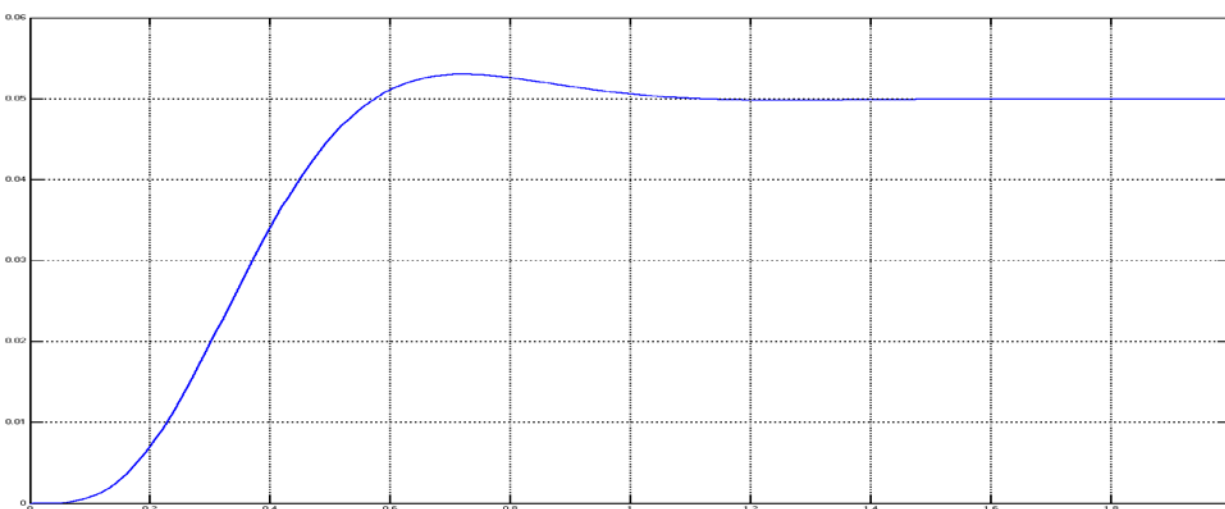


Рис. 1.15 – Переходная характеристика контура регулирования положения φ .

Введем в систему ограничение и проведем моделирование. Переходные процессы по току, по скорости и по положению показаны на рис 1.16, рис. 1.17 и рис. 1.18, соответственно.

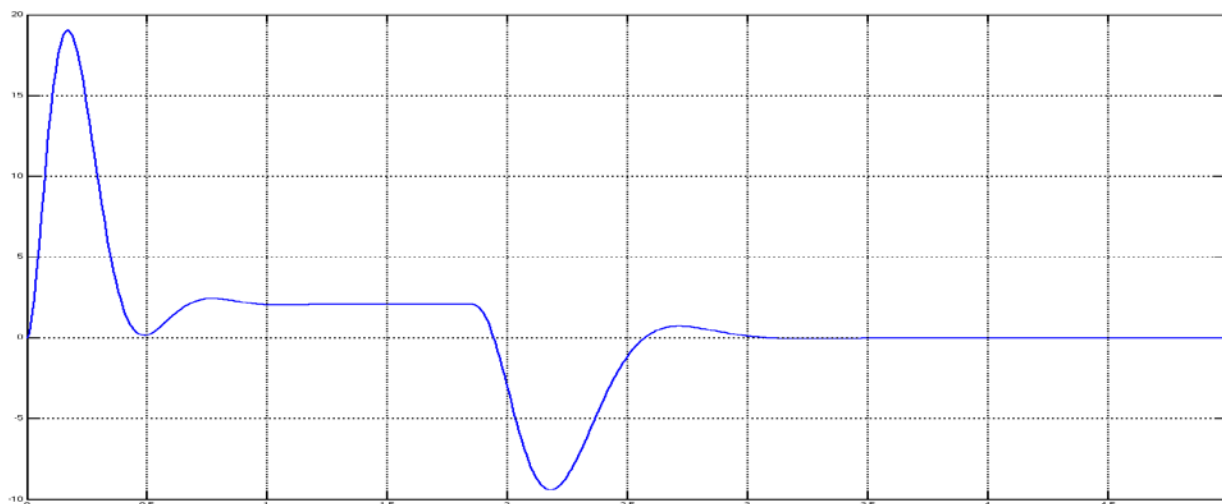


Рис. 1.16 – Переходная характеристика контура регулирования тока I с ограничением.

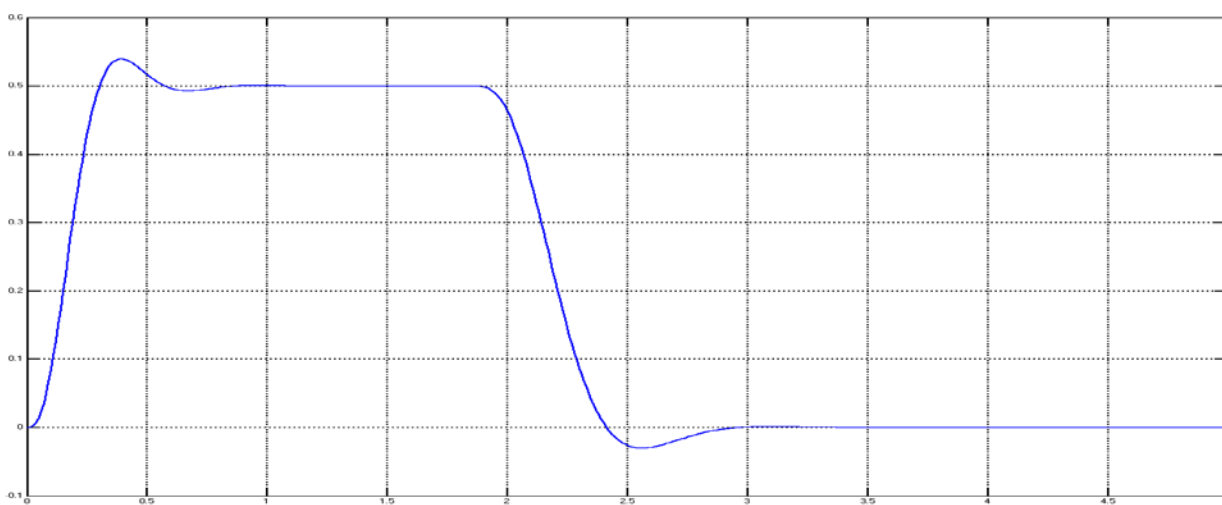


Рис. 1.17 – Переходная характеристика контура регулирования скорости ω с ограничением.

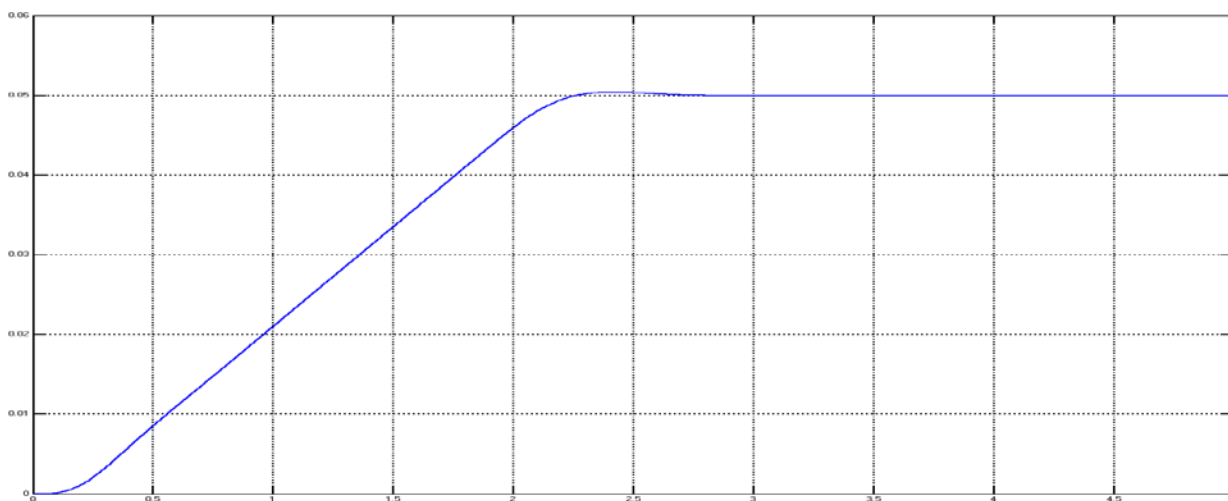


Рис. 1.18 – Переходная характеристика контура регулирования положения φ с ограничением.

Требования к оформлению отчета

Отчет о практической работе должен содержать электронную, функциональную и структурную схемы системы управления ЭП, расчет параметров регуляторов для трех контуров управления, экспериментальные графики переходных процессов с определенными показателями качества.

1.6 Контрольные вопросы

1. Что такое «система подчиненного регулирования»?
2. Какие достоинства систем подчиненного регулирования?
3. Что является объектом управления проектируемой ЛСУ?
4. В каком порядке настраиваются контуры в системе подчиненного регулирования?
5. Как можно ограничить регулируемую величину в системе подчиненного регулирования?
6. Чему равна передаточная функция объекта внешнего контура?
7. Что рассматривается в качестве выходной регулируемой величины в системе подчиненного регулирования?
8. Уравнения математической модели двигателя постоянного тока, управляемого по схеме тиристорный преобразователь – двигатель.
9. Какова передаточная функция ЭД по управляющему воздействию U_d ?
10. Для чего нужны функциональная и структурная схемы?
11. Какова модель контура регулирования тока?
12. Какова модель контура регулирования скорости?
13. Какова модель контура регулирования положения?
14. Как осуществляется выбор и настройка регулятора в контуре тока?
15. Как осуществляется выбор и настройка регулятора в контуре скорости?
16. Как осуществляется выбор и настройка регулятора в контуре положения?

1.7 Варианты задания на практическую работу

N_2	$K_{ТП}$	$T_{ТП}$	$R_я$	T_M	$T_Э$	ρ	K_δ	K'_δ
1	50	0,060	0,25	2,58	0,290	4	0,680	0,110
2	25	0,030	0,15	0,61	0,120	20	1,370	0,280
3	35	0,040	0,15	0,95	0,100	4	0,468	0,033
4	60	0,040	0,25	1,69	0,280	20	0,956	0,230
5	25	0,020	0,45	2,29	0,044	20	5,260	1,250
6	35	0,090	0,45	2,40	0,440	20	5,350	1,300
7	20	0,040	0,15	2,09	0,540	3	0,460	0,031
8	60	0,040	0,45	0,93	0,044	20	5,300	1,300
9	60	0,040	0,25	1,69	0,280	20	0,950	0,230
10	50	0,050	0,35	2,40	0,550	10	1,250	0,150
11	25	0,025	0,20	1,15	0,220	5	1,370	0,280
12	40	0,070	0,15	1,08	0,250	10	4,680	0,330
13	60	0,030	0,25	0,87	0,120	20	0,950	0,130
14	25	0,060	0,25	2,04	0,440	4	1,430	0,350
15	35	0,020	0,45	2,40	0,570	10	3,350	0,860
16	20	0,025	0,15	1,18	0,450	5	4,600	0,310
17	50	0,030	0,25	1,69	0,440	20	3,300	1,300
18	55	0,050	0,45	0,93	0,280	10	3,270	0,680
19	30	0,070	0,50	1,38	0,190	5	4,200	0,670
20	25	0,030	0,15	1,61	0,320	20	1,680	0,430

2.1 Приближенные модели динамики инерционных объектов управления

При автоматизации технологических процессов наиболее часто приходится встречаться с инерционными статическими объектами, переходные характеристики которых имеют специфическую S-образную форму (рис. 2.1). Наклон, кривизна характеристики, установившее значение зависят от динамических свойств конкретного объекта.

Для практических расчетов регуляторов в систем управления такими объектами каждую S-образную кривую переходного процесса, снятую экспериментально, нужно охарактеризовать следующими параметрами, определяемыми по графику: передаточным коэффициентом k_o , постоянной времени T_o и полным запаздыванием τ_o , которое складывается из так называемого чистого или транспортного запаздывания $\tau_{ч}$ и переходного запаздывания $\tau_{п}$: $\tau_o = \tau_{ч} + \tau_{п}$.

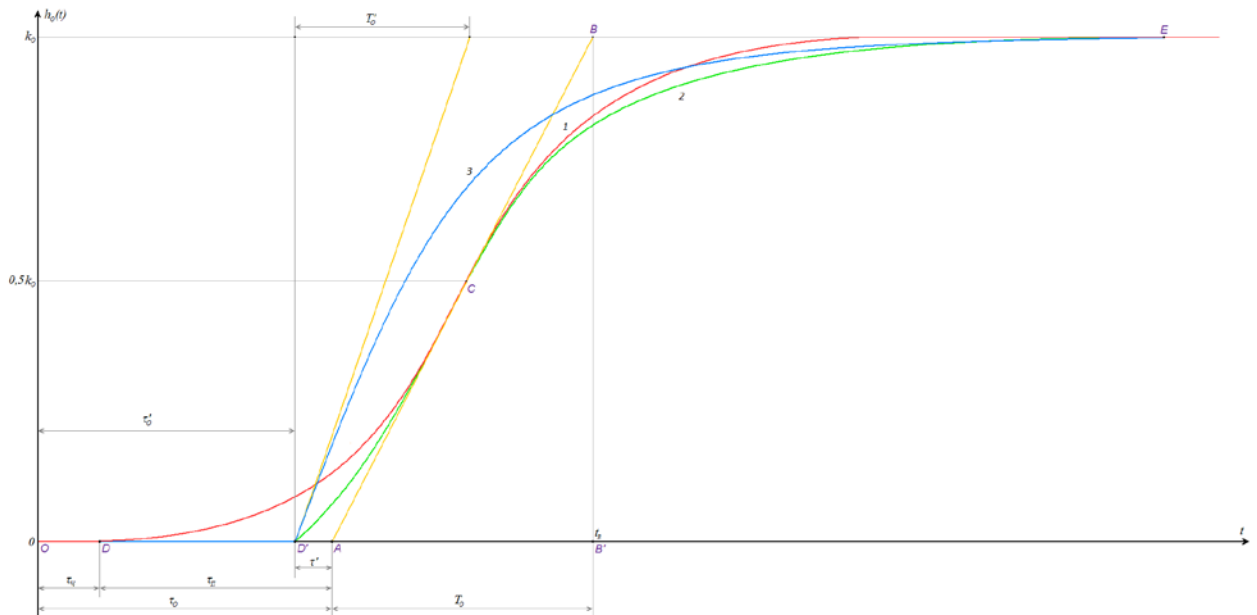


Рис. 2.1 – Переходные характеристики реального объекта (1) и его приближенных моделей второго (2) и первого (3) порядка с запаздыванием

Параметры T_o и τ_o определяются достаточно легко: проведем касательную AB к наиболее крутому участку переходной характеристики. Выделение горизонтального участка OD , соответствующего запаздыванию $\tau_{ч}$, связано обычно с некоторыми трудностями (из-за помех, при снятии переходной характеристики), и поэтому параметр $\tau_{ч}$ можно установить лишь с определенной погрешностью.

При расчете настроечных параметров систем управления объектами с S-образными переходными характеристиками ориентируются либо непосредственно на параметры k_o , T_o , τ_o , $\tau_{ч}$ и $\tau_{п}$, которые обобщенно (но не полно!) характеризуют статику и динамику реального объекта, либо используют упрощенные модели объекта, коэффициенты которых однозначно выражаются через указанные экспериментальные параметры.

Модели n -го порядка. Если заведомо известно, что описываемый сложный объект состоит из нескольких одинаковых объектов первого порядка, соединенных последовательно, то наиболее точное приближение к S-образной характеристике обеспечивает передаточная функция

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{oi}p + 1)^n} \cdot e^{-\tau_q p}. \quad (2.1)$$

Наилучшей моделью динамики объекта является последовательное соединение n инерционных звеньев первого порядка с одинаковыми постоянными времени T_{oi} и звена запаздывания с τ_q .

Модель (2.1) целесообразно использовать при исследовании систем управления на аналоговых или цифровых вычислительных машинах. Постоянную времени T_{oi} и порядок n этой модели можно вычислить по экспериментально найденным параметрам T_o и τ_{II} (или τ_o) с помощью соотношений, приведенных в табл. 2.1.

Таблица 2.1
Связь между параметрами S-образной переходной характеристики (рис. 2.1) и параметрами аппроксимирующей модели (2.1)

n	τ_{II}/T_o	T_o/T_{oi}	τ_{II}/T_{oi}	n	τ_{II}/T_o	T_o/T_{oi}	τ_{II}/T_{oi}
1	0,000	1,00	0,00	13	1,005	8,74	8,77
2	0,107	2,72	0,29	14	1,053	9,12	9,62
3	0,222	3,69	0,82	15	1,115	9,41	10,50
4	0,323	4,46	1,44	16	1,180	9,69	11,42
5	0,420	5,12	2,15	17	1,220	10,09	12,27
6	0,518	5,69	2,95	18	1,265	10,40	13,16
7	0,595	6,22	3,70	19	1,295	10,70	13,90
8	0,673	6,71	4,52	20	1,320	11,10	14,90
9	0,745	7,16	5,34	25	1,500	12,00	19,50
10	0,816	7,59	6,20	30	1,660	12,60	24,30
11	0,871	7,99	7,04	35	1,800	13,30	29,20
12	0,942	8,38	7,90	40	1,950	13,60	34,20

Преимуществом модели (2.1) является возможность воспроизведения с ее помощью относительно большого полного запаздывания τ_o , состоящего только из переходного запаздывания τ_{II} . В практических задачах анализа и синтеза систем управления замена чистого запаздывания τ_q переходным τ_{II} обычно допустима.

Полное запаздывание τ_o состоит только из переходного τ_{II} , т. е. $\tau_o = \tau_{II}$, и всю переходную кривую *ODCE*, характеризуемую отношением τ_o/T_o , моделируют лишь дробно-рациональной частью с параметрами n и T_{oi} , а чистое запаздывание в модели (2.1) считается равным нулю (для кривой на рис. 2.1 $\tau_o/T_o \approx 1,25$; $n=18$ и $T_{oi} = \frac{T_o}{10,4}$). Но

переходная характеристика с большим n приближается к трапецевидной форме — ломаной *OABE* и может, следовательно, существенно расходиться с исходной аппроксимируемой кривой.

В классе **моделей второго порядка** достаточно хорошее приближение к S-образным переходным кривым дает передаточная функция с одинаковыми постоянными времени и запаздыванием:

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{oi}p + 1)^2} e^{-\tau_o p}; \quad (2.2)$$

где $T_{oi} = \frac{T_o}{2,72}$;

$$\tau'_o = \tau_o - \tau'_n = \tau_o - 0,107T_o;$$

τ'_n – переходное запаздывание модели (2.1) для $n = 2$.

Передаточной функции (2.2) соответствует кривая 2, которая начинается в точке D' (см. рис. 2.1). Очевидно, что при данном способе аппроксимации почти весь интервал τ_o должен быть смоделирован как чистое запаздывание, т.е. $\tau_n = \tau'_o$.

Модель (2.2) является наиболее рациональной для рассматриваемых объектов, так как, с одной стороны, она обеспечивает достаточно хорошую аппроксимацию, а с другой, ее параметры легко определяются по переходной характеристике.

Если на графике переходной функции объекта $h_o(t)$ не просматривается характерный для S-образных кривых прямолинейный участок, а сама переходная кривая приближается к установившемуся значению $h_o(\infty) = k_o$, сравнительно медленно, пересекая вертикаль из точки B ниже значения $h_o = 0,80 \cdot k_o$, то более точную, чем модель (2.2), аппроксимацию может обеспечить передаточная функция с запаздыванием τ_q и различными постоянными времени:

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T_{o1}p + 1)(T_{o2}p + 1)} e^{-\tau_q p}. \quad (2.3)$$

В большинстве случаев модель (2.3) обеспечивает достаточную для практических расчетов точность, если принять $\frac{T_{o1}}{T_{o2}} = 0,5$. При этом постоянные времени T_{o1} и T_{o2} определяют следующим образом: по ординате $h(t_2) = 0,63 \cdot k_o$ экспериментальной переходной характеристики находят момент времени t_2 , отсчитываемый от точки D (т. е. без учета чистого запаздывания τ_q), а затем вычисляют $T_{o2} = 0,64 \cdot t_2$ и $T_{o1} = 0,5 \cdot T_{o2}$. Такая аппроксимация целесообразна, когда $h(0,5 \cdot t_2) \geq 0,3 \cdot k_o$.

В классе *моделей первого порядка*

$$W_o(p) = \frac{k_o}{T'_o \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau'_o p} \quad (2.4)$$

параметры T'_o и τ'_o передаточной функции выбирают таким образом, чтобы переходная характеристика модели $h_M(t)$ пересекала аппроксимируемую кривую в двух точках и проходила в среднем наиболее близко к ней.

Такое математически нестрогое требование может быть выполнено при разных сочетаниях параметров T'_o и τ'_o . Распространенным способом определения параметров модели заключается в следующем. Полагают, что $h_M(t)$ начинается в той же точке, что и характеристика модели с двумя одинаковыми постоянными времени (точка D'), т. е. $\tau'_o \cong \tau_o - \tau'$, где $\tau' = 0,11 \cdot T_o$, а постоянную времени принимают равной $T'_o \cong 0,64 \cdot T_o$.

Отметим, что модель первого порядка с параметрами $T'_o = T_o$ и $\tau'_o = \tau_o$ дает слишком грубое приближение к реальному объекту.

2.2 Пример выполнения практической работы

Дано:

Переходная характеристика объекта 4-ого порядка, заданна в виде

$$W_o(p) = \frac{b_0}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}.$$

Задание:

Найти модель первого порядка $W_M(p)$, наилучшим образом аппроксимирующую объект.

Порядок выполнения работы:

В классе моделей первого порядка S-образную характеристику можно приближенно заменить инерционным звеном с запаздыванием. Параметры T'_o и τ'_o передаточной функции

$$W_M(p) = \frac{k_o}{T'_o p + 1} e^{-\tau'_o p}$$

выбирают таким образом, чтобы экспонента пересекала аппроксимируемую кривую в двух точках и проходила в среднем наиболее близко к ней. Параметр k_o определяется по величине установившегося значения $h_o(t)$.

Воспользуемся одним из способов определения параметров модели, рассмотренным ранее и найдем $\tau'_o \cong \tau_o - \tau'$, где $\tau' = 0,11 \cdot T_o$, а постоянную времени принимают равной $T'_o \cong 0,64 \cdot T_o$, это первое приближение параметров модели.

В качестве меры близости переходных характеристик объекта и модели воспользуемся функцией невязки, вычисляемой по формуле:

$$Q = \int_0^{\infty} (y_o(t) - y_M(t))^2 dt.$$

Схема моделирования представлена на рис. 2.2:

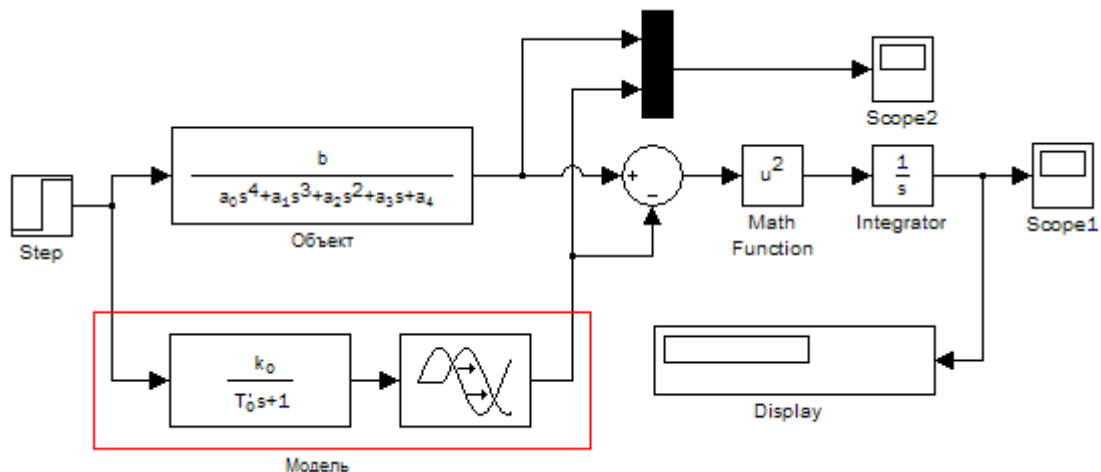


Рис.2.2 – Схема моделирования.

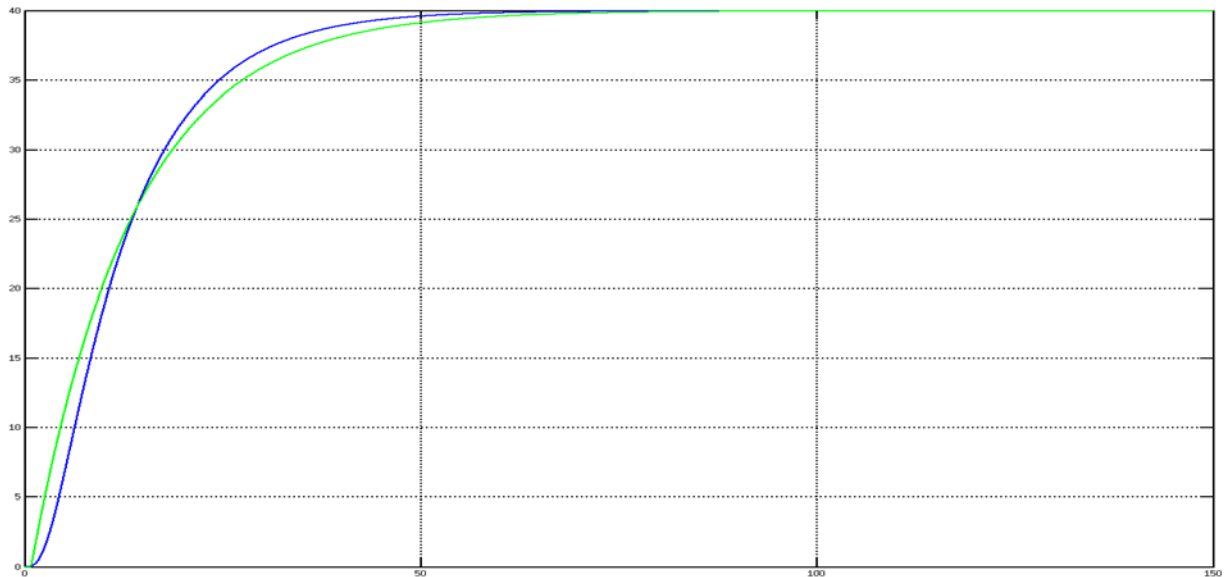


Рис.2.5 – Переходная характеристика объекта управления и приближенной модели.

Требования к оформлению отчета

Отчет о практической работе должен содержать схему моделирования, значения исходных параметров модели, заполненную таблицу 2.2, график зависимости $Q(T_o')$, переходные характеристики $h(t)$ и $h(t)_d$ на одном графике, переходную характеристику функции невязки, выводы.

2.3 Контрольные вопросы

1. Почему объект, имеющий S-образную характеристику, является статическим?
2. Как определить коэффициент передачи модели?
3. Как достаточно охарактеризовать ОУ для расчета системы управления.
4. Какое соотношение постоянных времени дает хорошее приближение в классе моделей 2-ого порядка?
5. В чем достоинства и недостатки модели без звена запаздывания?
6. Что такое «функция невязки»?
7. Как определить по графику переходных процессов объекта и модели величину невязки?
8. Что такое структура модели?
9. Каков оптимальный порядок модели для статических инерционных объектов?
10. В каком случае у модели второго порядка задают одинаковые постоянные времени?

2.4 Варианты задания на практическую работу

№	Передаточная функция ОУ
1	$W(p) = \frac{5}{p^4 + 3,5p^3 + 3,59p^2 + 1,225p + 0,09}$
2	$W(p) = \frac{4}{p^4 + 3,6p^3 + 3,85p^2 + 1,35p + 0,1}$
3	$W(p) = \frac{0,125}{p^4 + 1,71p^3 + 0,817p^2 + 0,108p + 0,001}$
4	$W(p) = \frac{1,4}{p^4 + 3,15p^3 + 2,455p^2 + 0,315p + 0,01}$
5	$W(p) = \frac{2}{p^4 + 6,2p^3 + 9,95p^2 + 4,75p + 0,6}$
6	$W(p) = \frac{1,5}{p^4 + 2,15p^3 + 1,485p^2 + 0,344p + 0,014}$
7	$W(p) = \frac{1}{p^4 + 2,2p^3 + 1,41p^2 + 0,22p + 0,01}$
8	$W(p) = \frac{8}{p^4 + 6,6p^3 + 8,68p^2 + 3,48p + 0,4}$
9	$W(p) = \frac{3}{p^4 + 3,1p^3 + 2,54p^2 + 0,704p + 0,048}$
10	$W(p) = \frac{0,5}{p^4 + 2,55p^3 + 2,125p^2 + 0,6p + 0,025}$
11	$W(p) = \frac{6}{p^4 + 5,85p^3 + 4,45p^2 + 1,0125p + 0,0625}$

3.1 Идеальная структура системы

Для решения задачи синтеза системы управления должны быть известны передаточная функция $W_o(p)$ объекта управления, возмущения X_B , действующие на выходе объекта, а также помехи X_{II} , возникающие в каналах задания и измерения.

В простейшем случае, когда возмущающие воздействия на объект отсутствуют, управление можно осуществлять по разомкнутой схеме (рис. 3.1, а). Если при этом передаточную функцию $W_y(p)$ управляющего устройства принять равной

$$W_y(p) = \frac{1}{W_o(p)}, \quad (3.1)$$

то обеспечится полная (структурная) компенсация инерционности объекта, и система управления будет практически мгновенно воспроизводить на выходе объекта задающее воздействие X_3 . Если в системе действует помеха X_{II} , то следует использовать специальный фильтр с передаточной функцией $\Phi_{опт}(p)$, которая выбирается так, чтобы фильтр как можно лучше пропускал все составляющие сигнала X_3 и подавлял помеху X_{II} .

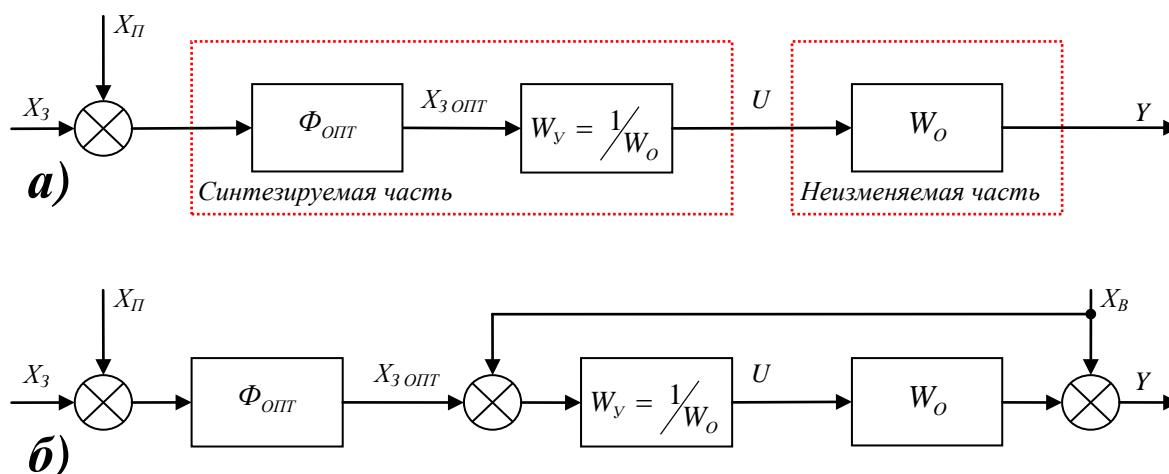


Рис. 3.1 – Алгоритмические структуры идеальной разомкнутой системы

Если на объект действует возмущение X_B , которое поддается измерению, то теоретически можно синтезировать идеальную разомкнутую систему управления с полной компенсацией возмущения (рис. 3.1, б). Причем, передаточная функция (3.1), обеспечивающая полную компенсацию инерционности объекта, оказывается наилучшей и для компенсации («парирования») возмущения X_B . Действительно, при выполнении условия (3.1) всегда $W_y(p) \cdot W_o(p) = 1$, поэтому полезная составляющая на выходе объекта будет полностью уравновешивать возмущение X_B .

Но возмущение X_B , как правило, не удастся измерить, и систему управления приходится строить по замкнутой схеме или принципу обратной связи. Для отыскания структуры идеальной замкнутой системы можно использовать идею косвенного измерения возмущения X_B с помощью модели объекта $W_{oM}(p)$ (рис. 3.2, а). Очевидно, что при $W_{oM}(p) = W_o(p)$ вычисляемый на выходе модели (см. штриховые стрелки) сигнал

$$X_{BM} = X - X_{yM} = (X_y + X_B) - X_{yM} = X_B \quad (3.2)$$

является косвенно измеренным возмущением X_B и его можно, как и в предыдущей схеме (см. рис. 3.1, б), ввести в управляющее устройство с передаточной функцией $1/W_o(p)$ и, таким образом, снова получить идеальную разомкнутую структуру. В ней в соответствии с правилами структурных преобразований сигнал X_{yM} можно перенести на вход управляющего устройства и приложить к сумматору 2. Тогда управляющее устройство $1/W_o(p)$ окажется охваченным внутренней положительной обратной связью, а сигнал после сумматора 1 будет соответствовать сигналу ошибки $\varepsilon = X_3 - X$. Последнее означает, что система стала замкнутой и работает по принципу отрицательной обратной связи с регулятором (см. рис. 3.2, а, штриховой прямоугольник).

$$W_p(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = \frac{1/W_o(p)}{1 - W_{oM}(p)/W_o(p)}. \quad (3.3)$$

При точном совпадении модели и объекта регулятор (3.3) будет работать как пропорциональный с $k_p = \infty$, что соответствует нулевым ошибкам по каналам задания и возмущения.

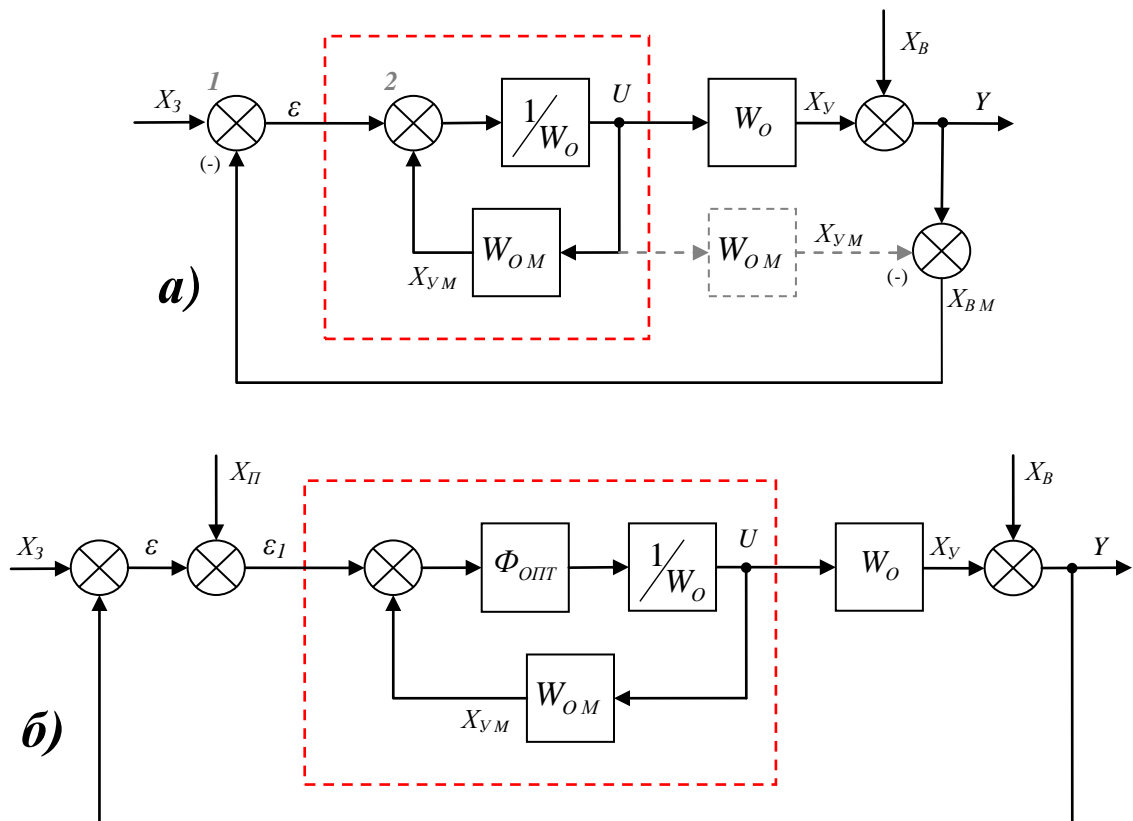


Рис. 3.2 – Структуры идеальной замкнутой системы

В общем случае, когда $X_B \neq 0$ и $X_n \neq 0$, алгоритмическая структура идеальной замкнутой системы (рис. 3.2, б) сочетает в себе признаки обеих структур. В этой идеальной структуре регулятор содержит внутреннюю положительную обратную связь, звенья $1/W_o$, W_{oM} , и кроме того, — оптимальный фильтр $\Phi_{опт}$. Замкнутая система с таким регулятором теоретически эквивалентна идеальной разомкнутой системе управления по возмущению X_B (см. рис. 3.1, б), которая практически мгновенно воспроизводит задание X_3 и полностью компенсирует возмущение X_B . Передаточная функция регулятора идеальной системы (см. рис. 3.2, б, штриховой прямоугольник)

$$W_p(p) = \frac{Y(p)}{E_1(p)} = \frac{\Phi_{\text{опт}}(p)}{1 - \Phi_{\text{опт}}(p)} \cdot \frac{1}{W_o(p)}. \quad (3.4)$$

Звено $\Phi_{\text{опт}}(p)$, входящее в прямую цепь регулятора, осуществляет оптимальную фильтрацию внешних воздействий и вырабатывает оптимальное задание $X_{3\text{опт}}$.

Обратная модель объекта $1/W_o(p)$ компенсирует его инерционность, передаточная функция модели объекта W_{oM} прогнозирует влияние управляющего воздействия Y на управляемую переменную X (вычисляет составляющую X_y на выходе объекта). Так как сигнал X_{yM} с выхода прогнозирующего звена поступает на вход регулятора с положительным знаком, то вся система после очередного изменения управляющего воздействия оказывается как бы разомкнутой. Вследствие этого реальная замкнутая система теоретически эквивалентна разомкнутой системе управления по возмущению X_B .

Используемое в идеальной системе управляющее устройство в виде $W_o^{-1}(p)$ принципиальной основой структурного и параметрического синтеза систем управления, а сам прием называется *методом компенсации инерционности объекта*.

В практических задачах синтеза чаще всего применяется *частичная (параметрическая) компенсация* — устранение влияния одной-двух (обычно самых больших) постоянных времени объекта. Для этого последовательно с инерционным объектом

$$W_o(p) = \frac{k_o}{\prod_{i=1}^N (T_{oi}p + 1)}, \quad (3.5)$$

где $T_{o1} > T_{o2} > T_{o3} > \dots > T_{oN}$, включают форсирующее звено первого-второго порядка с передаточной функцией

$$W_k(p) = k_k (T_{k1}p + 1)(T_{k2}p + 1), \quad (3.6)$$

для которого постоянные времени должны быть равны компенсируемым постоянным времени объекта: $T_{k1} = T_{o1}$, $T_{k2} = T_{o2}$ и передаточный коэффициент $k_k = 1/k_o$.

Следует заметить, что практическая реализация систем с идеальной структурой (см. рис. 3.1, б) и применение метода компенсации инерционности объекта связаны с определенными техническими ограничениями и трудностями. Как правило, невозможно точно реализовать обратную передаточную функцию объекта (3.1); форсирующие звенья, используемые для частичной компенсации инерционности объекта, реально имеют свою инерционность; регулятор с внутренней положительной обратной связью обычно структурно неустойчив или имеет большой передаточный коэффициент, который вызывает нереализуемые управляющие воздействия. Тем не менее, несмотря на невозможность практической реализации системы с идеальной структурой, она является теоретическим пределом, к которому необходимо стремиться при синтезировании высококачественных систем управления. В соответствии с идеальной структурой (см. рис. 3.1, б) можно сформулировать фундаментальный *принцип структурно-параметрической оптимизации систем управления с обратной связью: управляющее устройство должно содержать динамическое звено с передаточной функцией, равной или близкой обратной передаточной функции объекта*.

3.2 Идеальный регулятор для объектов управления с запаздыванием

Определим структуру и передаточную функцию идеального регулятора для инерционных объектов с запаздыванием (2.1) – (2.4), которые можно описать обобщенной передаточной функцией

$$W_o(p) = W_o'(p) \cdot e^{-\tau_o \cdot p}, \quad (3.7)$$

где $W_o'(p)$ — дробно-рациональная функция, характеризующая инерционную часть объекта;

τ_o — чистое запаздывание объекта.

При подстановке передаточной функции $W_o(p)$ в формулу (3.4) в передаточной функции регулятора должен появиться сомножитель $e^{+\tau_o p}$, который соответствует идеальному упредителю и точная реализация которого технически невозможна. Поэтому с целью упрощения искомой структуры регулятора и облегчения его технической реализации допустит, чтобы для объектов, содержащих чистое запаздывание τ_o , идеальная система воспроизводила задающее воздействие с запаздыванием τ_o :

$$y(t) = g(t - \tau). \quad (3.8)$$

Тогда передаточная функция замкнутой системы должна быть $W_3(p) = 1 \cdot e^{-\tau_o p}$, что достигается при

$$W_p(p) = \frac{1}{1 - e^{-p\tau}} \cdot \frac{1}{W_o'(p)}, \quad (3.9)$$

который называется **регулятором Ресвика**. Если на объект управления действует помеха, то в управляющее устройство следует включить оптимальный фильтр $\Phi_{опт}(p)$.

Выражению (3.9) соответствует структура, представленная на рис. 2.4 (а). Внутренняя обратная связь регулятора Ресвика, содержащая звено чистого запаздывания, прогнозирует, какой сигнал должен появиться на выходе объекта после очередного изменения управляющего воздействия U . Так как эта связь положительная, то прогнозируемый сигнал постоянно компенсирует равный ему реальный выходной сигнал объекта. Благодаря дополнительной обратной связи, моделирующей динамику объекта, из основного контура как бы исключается чистое запаздывание τ_o , которое всегда ухудшает устойчивость системы и затрудняет решение задачи синтеза.

Как и в общем случае, практическая реализация идеальной системы управления объектом с запаздыванием связана с определенными техническими трудностями. Существенным недостатком системы с регулятором (3.9) является ее критичность или сильная чувствительность к малым вариациям запаздывания объекта: система устойчива только при точном равенстве запаздывания объекта τ_o и запаздывания $\tau_{мод}$, модели объекта:

$$\tau_o = \tau_{мод}.$$

При невыполнении условия запаздываний система может стать неустойчивой.

Для повышения запаса устойчивости систем с регулятором (3.9) в их контур вводят дополнительные корректирующие звенья или ограничиваются неполной компенсацией инерционной части объекта. Естественно, что динамическая точность управления при этом ухудшается.

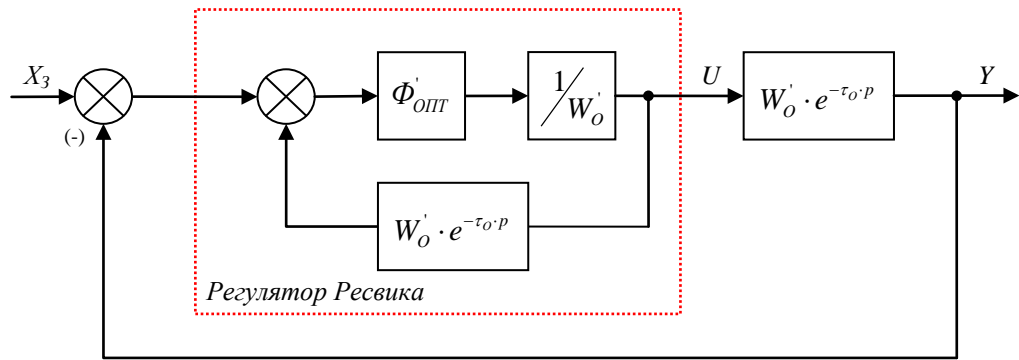


Рис.3.3 – Структурная схема системы управления с регулятором Ресвика.

Идея нейтрализации запаздывания объекта реализуется также с помощью **упредителя Смита**:

$$W_{УПР}(p) = W'_o(p)(1 - e^{-p\tau}), \quad (3.10)$$

которым охватывают типовые регуляторы (см. рис. 3.4). Нетрудно убедиться, что при большом передаточном коэффициенте ($k_p \rightarrow \infty$) регулятор с упредителем Смита эквивалентен регулятору Ресвика.

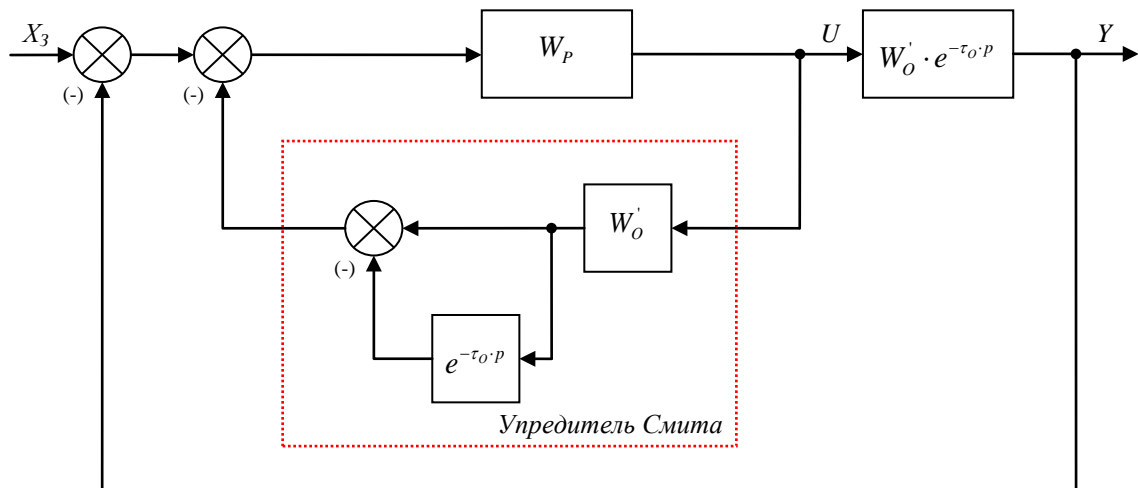


Рис.3.4 – Структурная схема системы управления с упредителем Смита.

Систему с упредителем Смита технически реализовать легче, так как не требуется моделировать обратную передаточную функцию объекта.

Хотя регулятор Ресвика (3.9) практически осуществить никогда не удастся, анализ его свойств позволяет оценить предельные возможности управления объектами с запаздыванием.

Наиболее трудно управляемыми являются объекты, содержащие только чистое запаздывание:

$$W_o(p) = k_o \cdot e^{-\tau_o \cdot p} \quad (3.11)$$

и для них лучше всего применять именно регулятор Ресвика или упредитель Смита, обеспечивающие структурную компенсацию запаздывания. Регулятор (3.9) для объекта (3.11) принимает вид

$$W_p(p) = \frac{Y(p)}{E(p)} = \frac{1}{k_o(1 - e^{-\tau_o \cdot p})}. \quad (3.12)$$

При медленных внешних воздействиях, для которых допустима приближенная замена $e^{-\tau_o \cdot p} \cong 1 - \tau_o \cdot p$, идеальный регулятор (3.12) эквивалентен И-регулятору:

$$W_p(p) \cong \frac{k_{II}}{p},$$

где $k_{II} = \frac{1}{k_o \tau_o}$.

Отсюда можно сформулировать *общее правило настройки регуляторов для объектов с запаздыванием: передаточный коэффициент регулятора должен быть обратно пропорционален передаточному коэффициенту объекта и времени запаздывания.*

При высокочастотных воздействиях регулятор (3.12) действует как дискретный: после каждого очередного изменения управляющего воздействия Y выжидает в течение интервала τ_o и тем самым повышает устойчивость системы.

3.3 Определение настроечных параметров типовых регуляторов объектов с запаздыванием

Используем общие принципы построения идеальной системы для выбора структуры и параметров регулятора, гарантирующих получение заданных показателей качества в системе управления с одним из следующих инерционных объектов первого и второго порядка с запаздыванием:

$$W_o(p) = \frac{k_o}{T'_o p + 1} e^{-\tau'_o p}; \quad (3.13)$$

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T'_{o1} p + 1)(T'_{o2} p + 1)} e^{-\tau'_o p}; \quad (3.14)$$

$$W_o(p) = \frac{k_o}{(T'_{oi} p + 1)^2} e^{-\tau'_o p}; \quad (3.15)$$

где $\tau'_o = \tau_o - 0,11 \cdot T_o$, $T'_o = 0,64 \cdot T_o$, $T'_{oi} = 0,37 \cdot T_o$, а параметры T_o и τ_o определяются экспериментально.

Подставив передаточную функцию объекта (3.13) в передаточную функцию регулятора (3.9), идеальную для объектов с запаздыванием (при $X_{II} = 0$ и $\Phi'_{опт}(p) = 1$), и произведя приближенную замену $e^{-\tau'_o p} \cong 1 - \tau'_o p$, допустимую в области низких частот, т. е. при медленных воздействиях, получим

$$W_p(p) = \frac{T'_o p + 1}{k_o \tau'_o p} = \frac{T'_o}{k_o \tau'_o} \left(1 + \frac{1}{T'_o p} \right). \quad (3.16)$$

Очевидно, что для объекта с инерционной частью первого порядка (3.13) регулятор Ресвика вырождается в ПИ-регулятор с настроечными параметрами:

$$k_p = \frac{T'_o}{k_o \tau'_o}; \quad T_H = T'_o.$$

Для объекта (3.14), имеющего инерционную часть второго порядка, наилучшим будет ПИД-регулятор. Действительно, если подставить передаточную функцию (3.14) в общую формулу идеального регулятора (3.9) и учесть замену $e^{-\tau'_o p} \cong 1 - \tau'_o \cdot p$, то получим

$$W_p(p) = \frac{T_{o1} + T_{o2}}{k_o \tau'_o} \left(1 + \frac{1}{(T_{o1} + T_{o2})} \cdot \frac{1}{p} + \frac{T_{o1} T_{o2}}{(T_{o1} + T_{o2})} \cdot p \right). \quad (3.17)$$

Очевидно, что настроечные параметры полученного ПИД-регулятора будут следующими:

$$k_p = \frac{T_{o1} + T_{o2}}{k_o \tau'_o}; \quad T_H = T_{o1} + T_{o2}; \quad T_D = \frac{T_{o1} T_{o2}}{(T_{o1} + T_{o2})}.$$

Для наиболее рациональной аппроксимации объектов с S-образной переходной характеристикой — модели (3.15) с двумя одинаковыми постоянными времени $T_{o1} = T_{o2} = T_{oi} = 0,37 T_o$ параметры ПИД-регулятора должны быть равны:

$$k_p = \frac{0,74 T_o}{k_o \tau'_o}; \quad T_H = 0,74 T_o; \quad T_D = 0,18 T_o.$$

На основании полученных общих соотношений между параметрами объекта и регулятора можно сформулировать рекомендации по выбору законов регулирования и их настроечных параметров:

- Для объектов с запаздыванием, инерционная часть которых действительно близка звену первого порядка (а не просто аппроксимирована таким звеном!), целесообразно применять ПИ-регулятор.
- Для объектов с запаздыванием, у которых инерционная часть имеет порядок $n \geq 2$, наилучшим регулятором является ПИД-регулятор.
- Значения настроечных параметров ПИ- и ПИД-регуляторов связаны с параметрами объекта: передаточный коэффициент регулятора k_p обратно пропорционален коэффициенту объекта k_o и прямо пропорционален отношению T'_o/τ'_o ; постоянная времени интегрирования T_{II} и постоянная времени дифференцирования T_d пропорциональны постоянной времени объекта T_o . Коэффициенты пропорциональности между параметрами регулятора и объекта зависят от точки приложения и характера входных воздействий и требований, предъявляемых к переходному процессу в системе регулирования.

Заметим, что введение дифференциальной составляющей в ПИ-закон регулирования, как правило, улучшает переходный процесс — уменьшает первый выброс и длительность. Но при больших отношениях τ_o/T_o или при действии в контуре системы случайных помех ПИД-регулятор следует применять с определенной осторожностью, после дополнительных исследований системы.

*Таблица 3.1
Формулы для расчета настроечных параметров типовых регуляторов статических инерционных объектов с S-образной переходной характеристикой*

Закон регулирования	Обобщенный параметр контура	По каналу задания		По каналу возмущения	
		$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$	$\sigma = 0$	$\sigma = 20\%$
П	$k_p k_o \tau_o / T_o$	0,30	0,70	0,30	0,85
ПИ	$k_p k_o \tau_o / T_o$	0,35	0,60	0,60	0,75
	T_{II} / T_o	1,20	1,00	4,00	2,65
ПИД	$k_p k_o \tau_o / T_o$	0,60	0,95	0,95	1,20
	T_{II} / T_o	1,00	1,35	2,40	2,00
	T_d / τ_o	0,50	0,47	0,42	0,42

Эмпирические формулы (табл. 3.1) обобщают результаты экспериментальных исследований по определению настроечных параметров типовых регуляторов для объектов с запаздыванием.

Формулы для канала задания получены без учета ограничения на величину управляющего воздействия, необходимого для обеспечения заданного показателя σ . Если такое ограничение наложено, то приходится уменьшать коэффициенты регулятора (без изменения параметра T_{II}).

3.4 Пример выполнения практической работы

Дано

Переходная характеристика объекта 4-ого порядка, заданна в виде

$$W_o(p) = \frac{b_0}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}.$$

Передаточная функция приближенной модели имеет вид:

$$W_M(p) = \frac{k}{T_o' p + 1} \cdot e^{-\tau_o' p}.$$

Задание

1. Рассчитать параметры регулятора Ресвика для объектов управления с запаздыванием. Подтвердить правильность расчетов моделирования в ППП Matlab.
2. Рассчитать параметры ПИ-, И-регулятора с упредителем Смита для объектов управления с запаздыванием. Подтвердить правильность расчетов моделирования в ППП Matlab.

Порядок выполнения работы:

Регулятор Ресвика для объектов управления с запаздыванием.

Передаточная функция регулятора Ресвика:

$$W_p(p) = \frac{1}{1 - e^{-\tau_o' p}} \cdot \frac{1}{W_o'(p)}.$$

Это регулирующее устройство обладает собственной инерционностью. Пусть его постоянная времени $T_{ИН} = 0,1T_o'$.

Схема моделирования представлена на рис. 3.5:

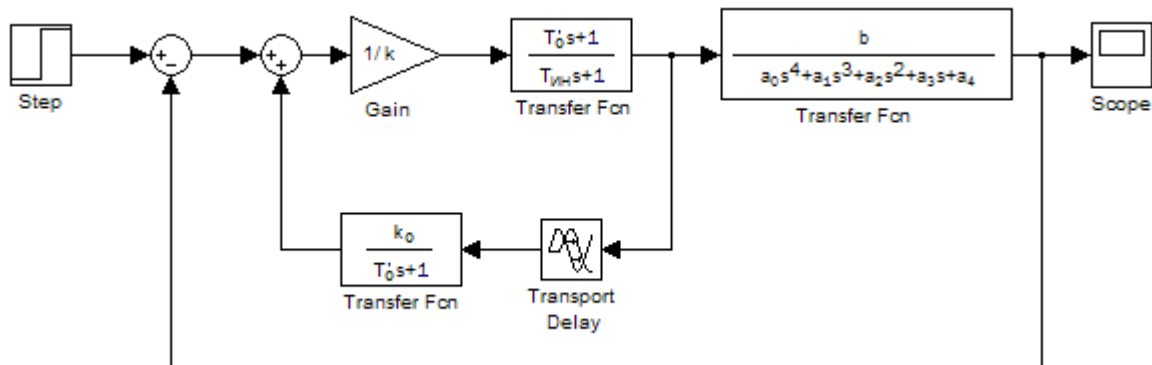


Рис. 3.5 – Структурная схема модели замкнутой системы объекта с регулятором Ресвика

Регулятор Ресвика является очень чувствительным к изменению параметров. Зададим в модели ОУ различные значения τ_o' . Из полученных графиков видно, что даже незначительно отклонение времени запаздывания в модели и в ОУ вызывает ухудшение переходных процессов (сравн. рис. 3.6 и 3.7).

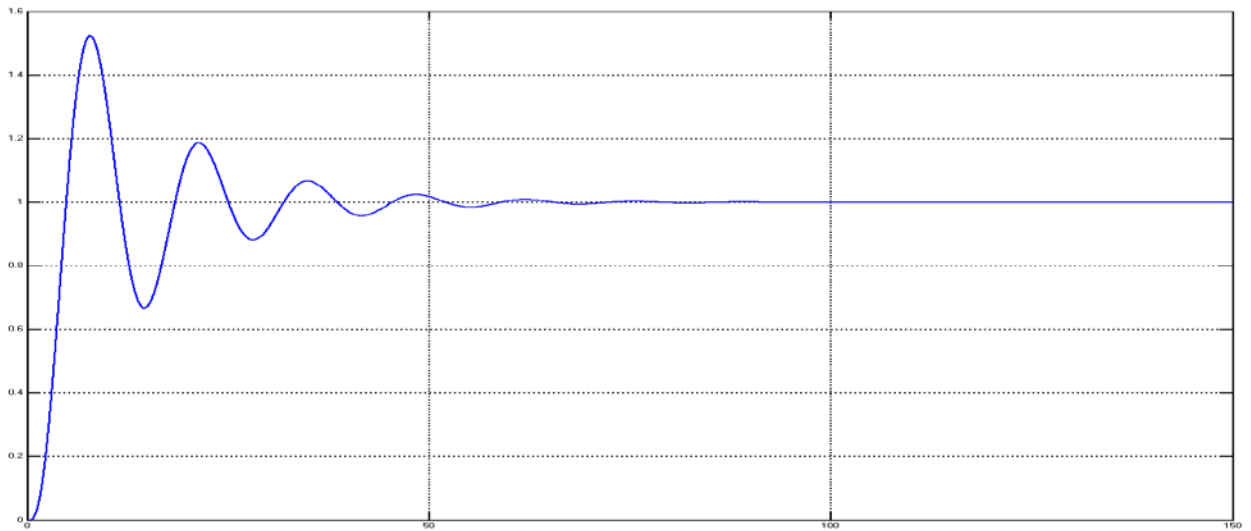


Рис. 3.6 – Переходная характеристика с запаздыванием τ

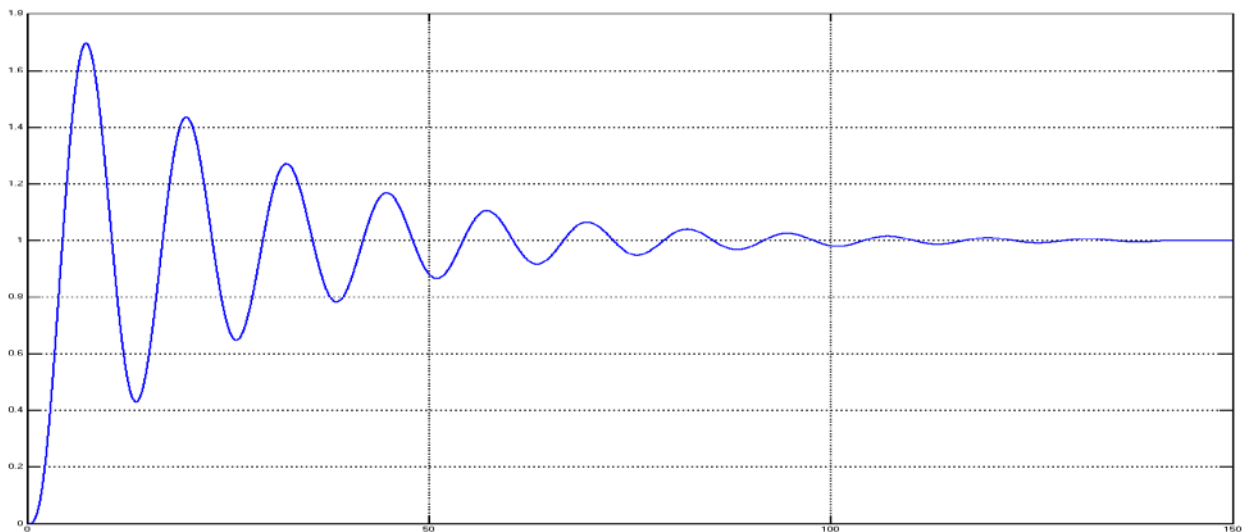


Рис. 3.7 – Переходная характеристика с запаздыванием $\tau^* = \tau + 0,2\text{с}$.

Снизим чувствительность регулятора Ресвика заменив $\frac{1}{W_o'(p)}$ на $\frac{1}{k}$.

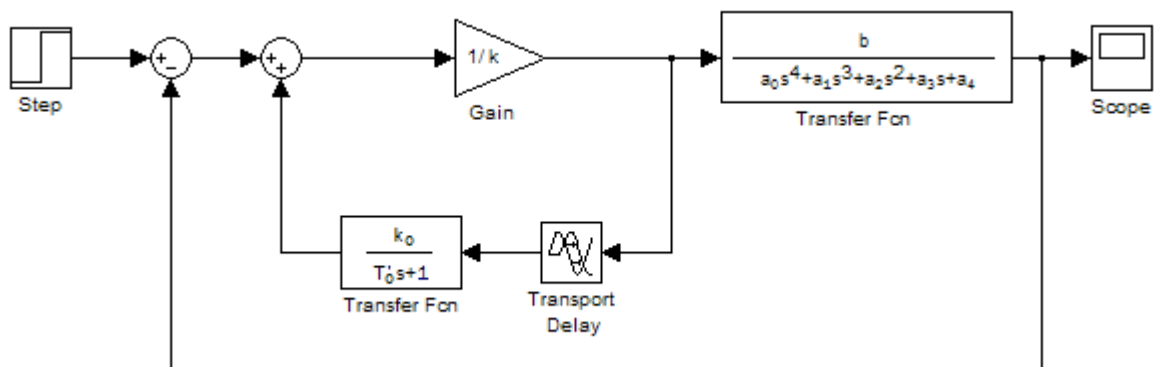


Рис. 3.8 – Структурная схема модели замкнутой системы объекта с регулятором Ресвика

Изменяя чувствительность τ'_o в передаточной функции модели объекта убедимся, что качество переходных процессов не меняется (сравн. рис. 3.9 и 3.10).

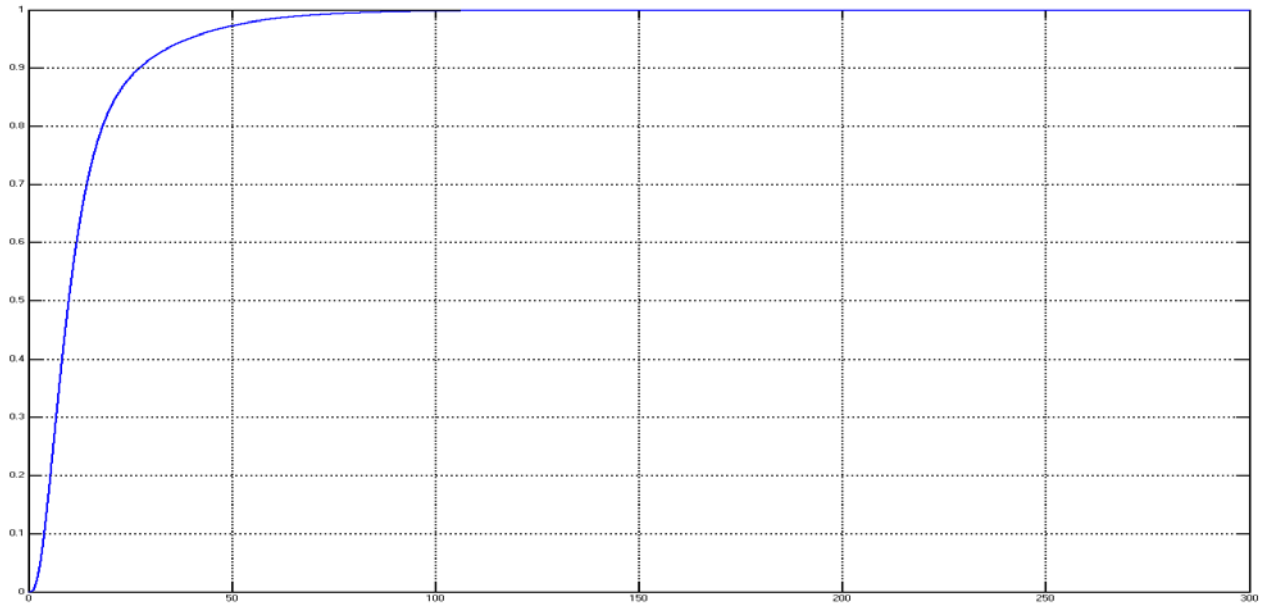


Рис.3.9 – Переходная характеристика с запаздыванием τ

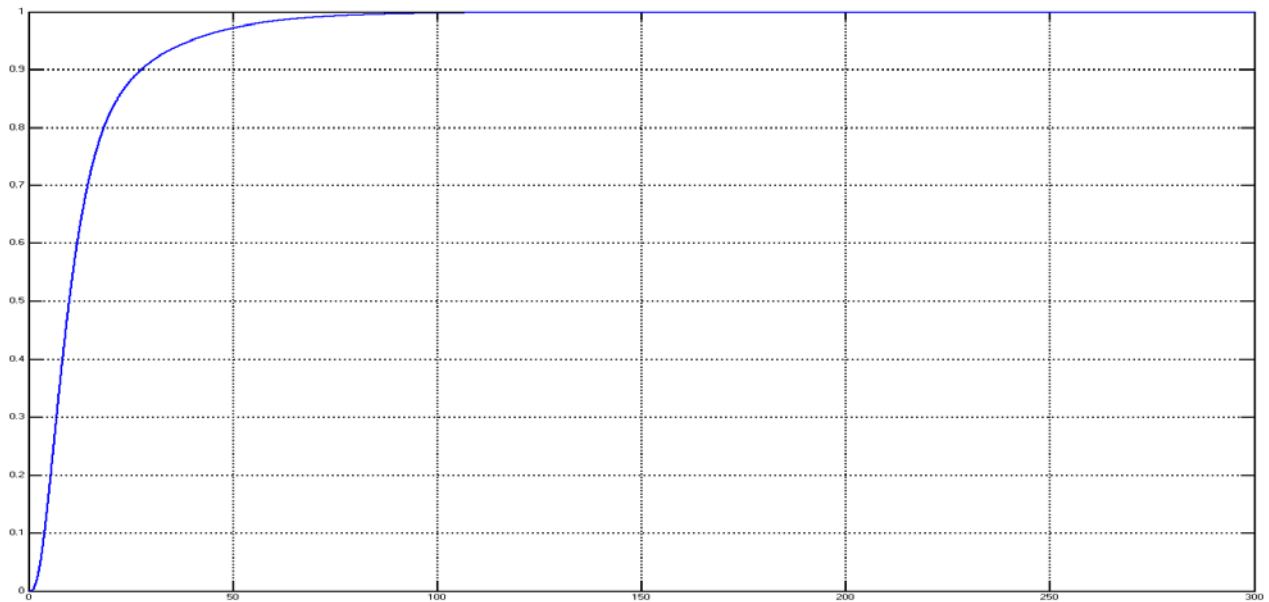


Рис.3.10 – Переходная характеристика с запаздыванием $\tau^* = \tau + 0,2c$.

Упредитель Смита для объектов управления с запаздыванием.

Передаточная функция упредителя Смита:

$$W_{\text{УПР}}(p) = W_o'(p)(1 - e^{-p\tau}),$$

Схема моделирования представлена на рис. 3.11:

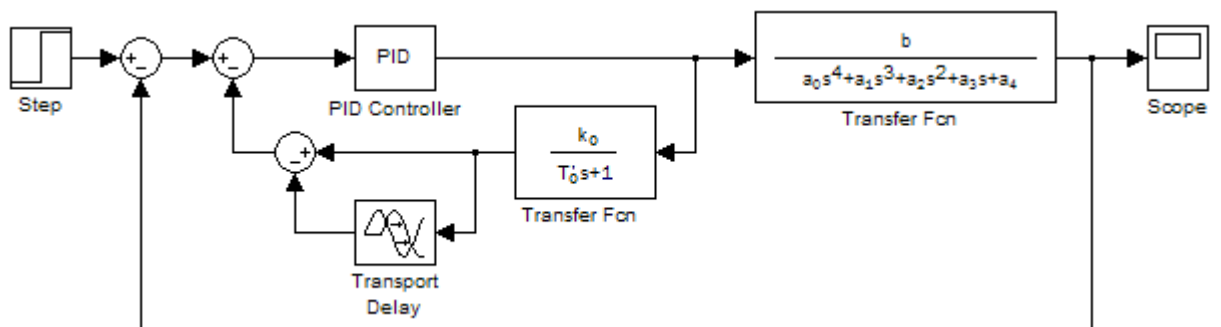


Рис. 3.11 – Структурная схема модели замкнутой системы объекта с упредителем Смита.

1) ПИ-регулятор с упредителем

Параметры ПИ-регулятора определяем по формулам:

$$k_{II} = \frac{T_{ПР}}{k_{ПР} \cdot \tau_{ПР}} \quad k_{II} = \frac{1}{k_{ПР} \cdot \tau_{ПР}} \quad k_{Д} = 0$$

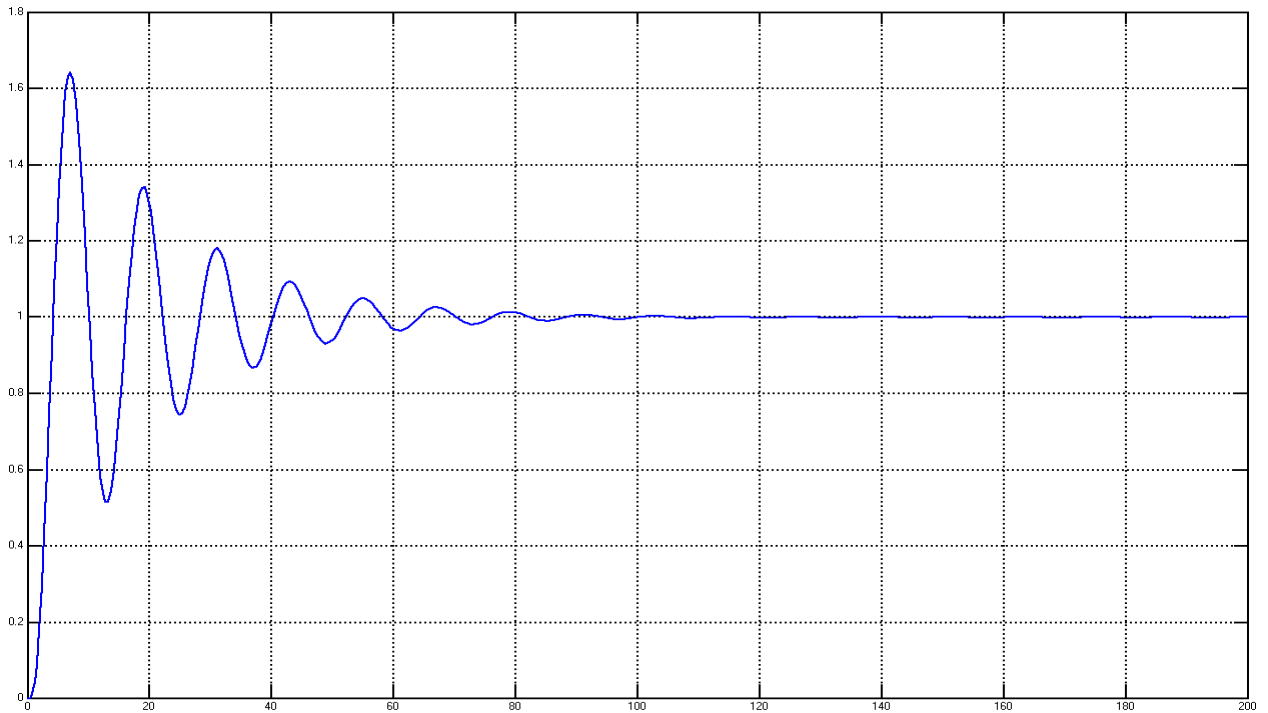


Рис. 3.12 – График переходного процесса в системе управления с упредителем Смита.

2) ПИ-регулятор без упредителя

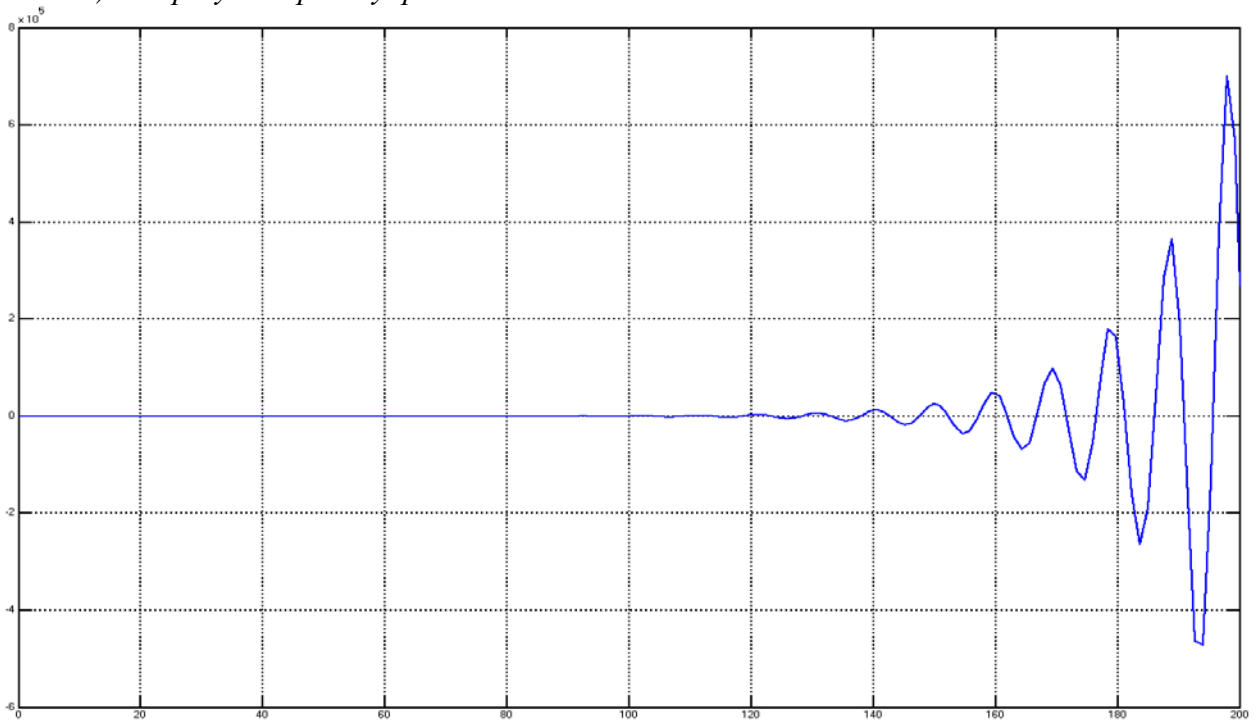


Рис. 3.13 – График переходного процесса в системе управления без упредителем Смита.

3) И-регулятор с упредителем

Параметры И-регулятора определяем по формулам:

$$k_{II} = 0 \quad k_{II} = \frac{1}{2 \cdot k_{IP} \cdot T_{IP}} \quad k_D = 0$$

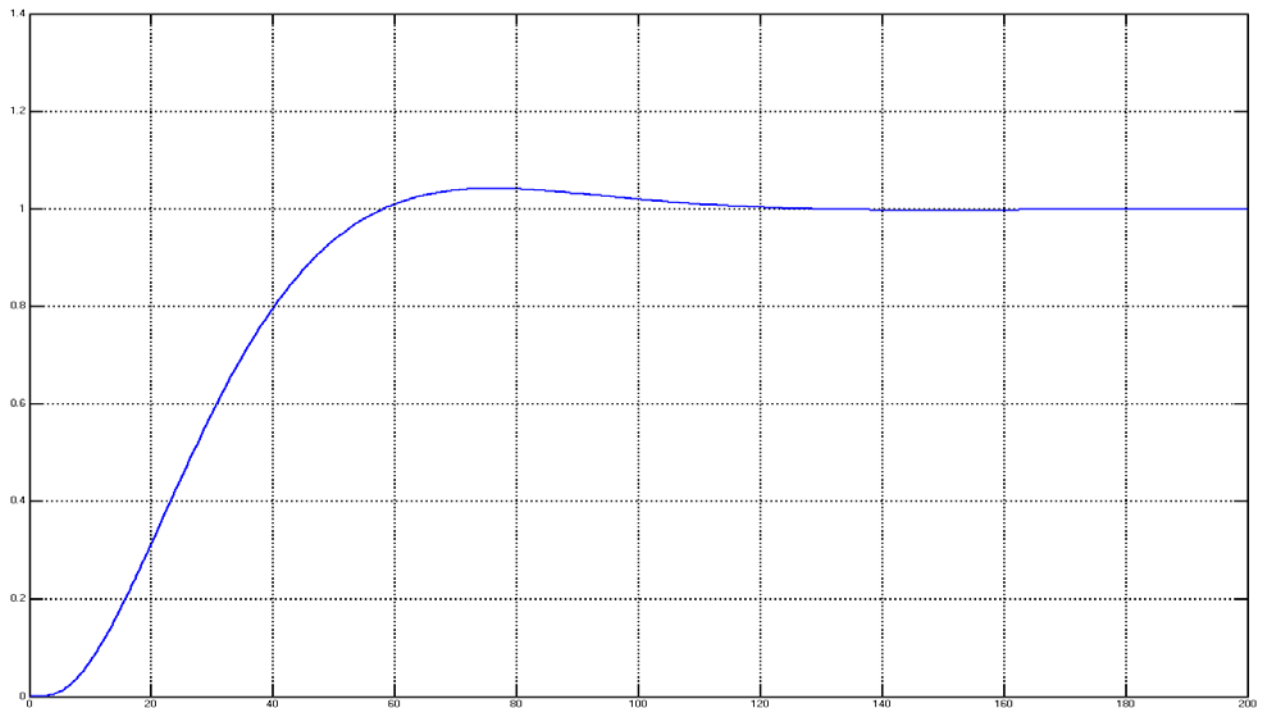


Рис. 3.14 – График переходного процесса в системе управления с упредителем Смита.

Требования к оформлению отчета

Отчет о практической работе должен содержать расчет параметров регулятора Ресвика для объектов управления с запаздыванием, расчет параметров ПИ-, И-регулятора с упредителем Смита для объектов управления с запаздыванием, экспериментальные графики переходных процессов с определенными показателями качества.

3.5 Контрольные вопросы

1. Как в простейшем случае, когда возмущающие воздействия на объект отсутствуют, можно осуществлять управление?
2. Какая система теоретически эквивалентна идеальной разомкнутой системе управления по возмущению X_B .
3. Что осуществляет оптимальную фильтрацию внешних воздействий и выработывает оптимальное задание $X_{3\text{опт}}$.
4. Что является принципиальной основой структурного и параметрического синтеза систем управления?
5. Какая компенсация чаще всего применяется в практических задачах синтеза?
6. В чем заключается принцип структурно-параметрической оптимизации систем управления с обратной связью?
7. Какова передаточная функция регулятора Ресвика?
8. Достоинства и недостатки регулятора Ресвика.
9. Как реализуется идея нейтрализации запаздывания объекта?
10. В чем заключается общее правило настройки регуляторов для объектов с запаздыванием?
11. Сформулировать рекомендации по выбору законов регулирования и их настроечных параметров.

3.6 Варианты задания на практическую работу

№	Передаточная функция ОУ
1	$W(p) = \frac{5}{p^4 + 3,5p^3 + 3,59p^2 + 1,225p + 0,09}$
2	$W(p) = \frac{4}{p^4 + 3,6p^3 + 3,85p^2 + 1,35p + 0,1}$
3	$W(p) = \frac{0,125}{p^4 + 1,71p^3 + 0,817p^2 + 0,108p + 0,001}$
4	$W(p) = \frac{1,4}{p^4 + 3,15p^3 + 2,455p^2 + 0,315p + 0,01}$
5	$W(p) = \frac{2}{p^4 + 6,2p^3 + 9,95p^2 + 4,75p + 0,6}$
6	$W(p) = \frac{1,5}{p^4 + 2,15p^3 + 1,485p^2 + 0,344p + 0,014}$
7	$W(p) = \frac{1}{p^4 + 2,2p^3 + 1,41p^2 + 0,22p + 0,01}$
8	$W(p) = \frac{8}{p^4 + 6,6p^3 + 8,68p^2 + 3,48p + 0,4}$
9	$W(p) = \frac{3}{p^4 + 3,1p^3 + 2,54p^2 + 0,704p + 0,048}$
10	$W(p) = \frac{0,5}{p^4 + 2,55p^3 + 2,125p^2 + 0,6p + 0,025}$
11	$W(p) = \frac{6}{p^4 + 5,85p^3 + 4,45p^2 + 1,0125p + 0,0625}$

4.1 Синтез цифровой системы с последовательно включенным регулятором

Структура цифровой системы управления включает аналоговый или цифровой регулятор в прямой цепи или цепи обратной связи. Для решения задачи синтеза используют два альтернативных подхода: по первому выполняют аналоговую аппроксимацию цифровой части системы, а затем для полностью непрерывной системы решают задачу непрерывного синтеза. По второму получают дискретную модель аналоговой части и затем для полностью цифровой системы используют специальные дискретные методы синтеза.

Аналоговая аппроксимация цифровой части системы — импульсного прерывателя и фиксатора нулевого порядка — представляется при достаточно малом периоде квантования звеном чистого запаздывания с $\tau = 0,5h$, где h - шаг квантования, тогда передаточная функция прямого тракта эквивалентной непрерывной системы принимает вид

$$W(p) = W_p(p) \cdot W_o(p) \cdot e^{-0,5hp}. \quad (4.1)$$

Дискретная аппроксимация непрерывной части системы может быть выполнена с использованием z -преобразования или алгебраической дискретизации с помощью конечно-разностных алгоритмов:

$$\text{алгоритма Эйлера } p \cong \frac{z-1}{n},$$

$$\text{алгоритма обратной разности } p \cong \frac{z-1}{zh},$$

$$\text{алгоритма Тустена } p \cong \frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1}.$$

Задача синтеза дискретной системы сводится к определению параметров регулятора или формированию алгоритма вычисления управляющего сигнала, который обеспечивает заданные показатели качества замкнутой системы.

Синтез дискретного регулятора можно осуществить с использованием частотных методов синтеза непрерывного регулятора.

Алгоритм этого метода таков:

- выполнить конформное преобразование, переводящее z -комплексную плоскость в μ -комплексную плоскость так, что единичная окружность $|z|=1$ отображается в мнимую ось $j\mu$;
- преобразовать передаточную функцию разомкнутой цепи $W(z)$ в рациональную функцию $W(\mu)$;
- рассматривая $W(\mu)$ как передаточную функцию разомкнутой части преобразованной системы, осуществить частотными методами синтез регулятора с $W_p(\mu)$;
- выполнить обратное преобразование в z -плоскость, чтобы получить $W_p(z)$.

Для настройки дискретного ПИД-регулятора используют два эвристических правила Циглера—Никольса.

Первое правило настройки:

$$\begin{aligned}k_p &= \frac{1}{\tau V} \quad \text{для П - регулятора;} \\k_p &= \frac{0,9}{\tau V}, \quad T_{II} = 3,3\tau \quad \text{для ПИ - регулятора;} \\k_p &= \frac{1,2}{\tau V}, \quad T_{II} = 2\tau, \quad T_D = 0,5\tau \quad \text{для ПИД - регулятора;}\end{aligned} \tag{4.2}$$

где *время запаздывания* τ и *темп нарастания* V переходной характеристики сняты экспериментально.

Второе правило настройки:

$$\begin{aligned}k_p &= 0,5k^* \quad \text{для П - регулятора;} \\k_p &= 0,45k^*, \quad T_{II} = 0,83T^* \quad \text{для ПИ - регулятора;} \\k_p &= 0,6k^*, \quad T_{II} = 0,5T^*, \quad T_D = 0,125T^* \quad \text{для ПИД - регулятора;}\end{aligned} \tag{4.3}$$

где k^* – предельный коэффициент усиления, при котором система выходит на границу устойчивости и совершает незатухающие колебания с периодом $T^* = 2\pi/\omega$ с.

Настройки ПИД-регулятора по двум методам отличаются в среднем на 10 %.

4.2 Инженерные методики настройки ПИ и ПИД-регуляторов

Достоинством цифровых ПИ и ПИД-регуляторов является то, что их поведение и свойства при малом периоде квантования подобны соответствующим непрерывным регуляторам. Поэтому при использовании цифровых регуляторов стандартных структур (ПИ и ПИД) проблем с выбором настроечных параметров не возникает. Основным отличием настроек цифровых регуляторов является необходимость определения периода квантования и в некоторых случаях необходимость учета этой величины.

Типовые инженерные методики подразумевают использование математического описания управляемого процесса в виде передаточной функции или какой-либо временной характеристики. Временные характеристики могут быть получены экспериментально на реальном объекте, что значительно упрощает процесс реализации системы управления. При этом синтез структуры управляющего устройства не производится, т.к. считается, что в большинстве случаев для получения приемлемого качества переходных процессов достаточно использовать систему управления по отклонению с ПИД-регулятором в прямой цепи. Параметрический синтез системы управления производится на основе инженерных методик, заключающихся в применении готовых зависимостей, которые подразумевают проведение некоторых опытов на объекте управления.

Основу классических экспериментальных методов составляют метод "критического усиления", заключающийся в приведении объекта управления на границу устойчивости, и метод "разгонной характеристики", использующий реакцию объекта управления на типовое входное воздействие, которое обычно является ступенчатым. Оба эти метода ориентированы на объекты управления, которые могут быть приближенно описаны передаточной функцией вида

$$W_o(p) = \frac{k_o}{T_o p + 1} e^{-\tau_o p} \quad (4.4)$$

k_o – коэффициент усиления объекта управления,

T_o – постоянная времени объекта управления,

τ_o – постоянная времени транспортного запаздывания.

➤ **Метод “критического усиления”**

Алгоритм метода «критического усиления» следующий:

- 1) необходимо исключить действие или уменьшить до предела влияние интегральной и дифференциальной составляющих настраиваемого ПИД-регулятора;
- 2) далее постепенно увеличивать коэффициент передачи регулятора до появления в замкнутой системе установившихся колебаний;
- 3) определить критический коэффициент усиления K_{KP} и период установившихся колебаний T_{KP} ;
- 4) на основании K_{KP} и T_{KP} вычислить параметры регулятора по формулам в таблице 4.1;
- 5) период квантования рекомендуется вычислить по формуле $h = 0,1 \cdot T_{KP}$

Таблица 4.1
Формулы метода «критического усиления»

Параметр	Автор	Тип регулятора	$K_{П}$	$T_{И}$	$T_{Д}$
Декремент затухания 0,25	Ziegler, Nichols	П	$0,5K_{KP}$	-	-
		ПИ	$0,45K_{KP}$	$\frac{T_{KP}}{1,2}$	-
		ПИД	$0,6K_{KP}$	$\frac{T_{KP}}{2}$	$\frac{T_{KP}}{8}$
Минимальная квадратичная ошибка	F. G. Shinsky	П	$0,5K_{KP}$	-	-
		ПИ	$0,5K_{KP}$	$\frac{T_{KP}}{2,3}$	-
		ПИД	$0,25K_{KP}$	$\frac{T_{KP}}{2}$	$\frac{T_{KP}}{8}$

Примечание. Формула Ziegler, Nichols применяется только при условии $2 < K_0 K_{KP} < 20$, где K_0 – коэффициент передачи объекта управления.

Основным недостатком метода «критического усиления» является потенциальная опасность его использования на реальном объекте, который путем увеличения коэффициента передачи регулятора выводится на границу устойчивости. Рассмотренный далее метод «разгонной характеристики» лишен этих недостатков.

➤ **Метод «разгонной характеристики»**

Эти методы применяются только для объектов вида (4.4). Наиболее простой вариант методики «разгонной характеристики» подразумевал выполнение следующих операций:

- 1) получить на реальном объекте разгонную характеристику (рис. 4.1);

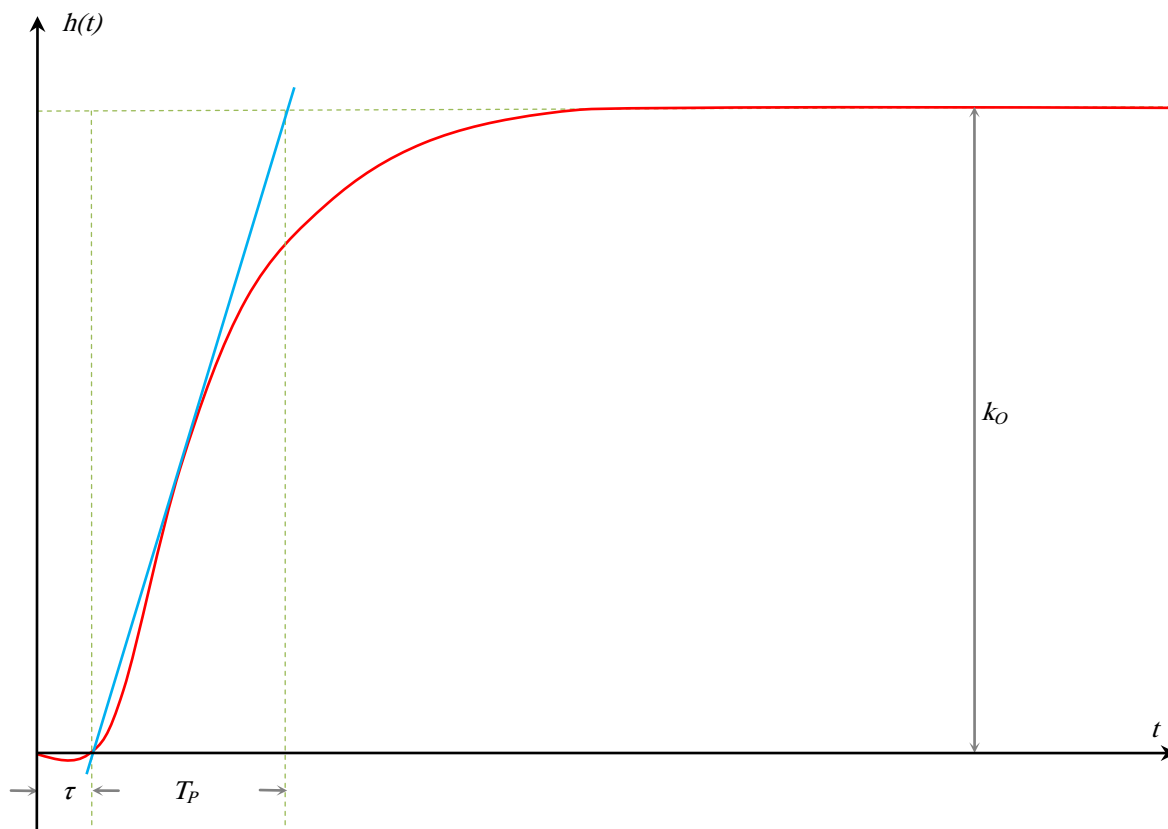


Рис. 4.1 - Разгонная характеристика.

- 2) по полученной разгонной характеристике определить время запаздывания τ , время разгона T_p и коэффициент передачи объекта управления k_0 , при условии, что $x(t) = 1(t)$;
- 3) настроечные параметры регуляторов определить по формулам таблицы 4.2

Таблица 4.2
Формулы метода «разгонной характеристики»

Канал	Параметр	Автор	$T_{ин}$ регулятора	$K_{П}$	$T_{И}$	$T_{Д}$
По заданию и по возмущению	Декремент затухания 0,25	Ziegler, Nichols	П	$\frac{T_p}{k_0 \tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{0,9T_p}{k_0 \tau}$	3,33 τ	-
			ПИД	$\frac{1,2T_p}{k_0 \tau}$	2,0 τ	0,5 τ

По заданию	Минимальная квадратичная ошибка	Cohen, Kuhn	П	$\frac{3T_p + \tau}{3k_o\tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{10,8T_p + \tau}{12k_o\tau}$	$\frac{\tau(30T_p + 3\tau)}{9T_p + 20\tau}$	-
			ПИД	$\frac{16T_p + 3\tau}{12k_o\tau}$	$\frac{\tau(32T_p + 6\tau)}{13T_p + 8\tau}$	$\frac{4T_p\tau}{11T_p + 2\tau}$
По заданию	Максимальное быстродействие без перерегулирования	Chien, Hrones, Reswik	П	$\frac{0,3T_p}{k_o\tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{0,35T_p}{k_o\tau}$	$1,2\tau$	-
			ПИД	$\frac{0,6T_p}{k_o\tau}$	τ	$0,5\tau$
По заданию	Максимальное быстродействие с 20% перерегулированием	Chien	П	$\frac{0,7T_p}{k_o\tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{0,6T_p}{k_o\tau}$	τ	-
			ПИД	$\frac{0,95T_p}{k_o\tau}$	$1,35\tau$	$0,47\tau$
По возмущению	Максимальное быстродействие без перерегулирования	Chien	П	$\frac{0,3T_p}{k_o\tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{0,35T_p}{k_o\tau}$	4τ	-
			ПИД	$\frac{0,95T_p}{k_o\tau}$	$2,4\tau$	$0,4\tau$
По возмущению	Максимальное быстродействие с 20% перерегулированием	Chien	П	$\frac{0,7T_p}{k_o\tau}$	-	-
			ПИ	$\frac{0,7T_p}{k_o\tau}$	$2,3\tau$	-
			ПИД	$\frac{1,2T_p}{k_o\tau}$	2τ	$0,42\tau$

Примечание. Формула Ziegler, Nichols применяется только при условии $0,1 < \tau/T_o < 0,6$.

Отметим, что приведение выше методики не обеспечивают высокого качества переходных процессов для $\tau/T_o > 1$.

4.3 Аналитический синтез цифровой системы управления

Задачей аналитического синтеза является определение структуры и параметров регулятора для системы

$$\sum^{(n)} : \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{M}\mathbf{x}(k) + \mathbf{N}\mathbf{u}(k), \mathbf{x}(0), h, \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k), \quad (4.5)$$

чтобы независимо от начального состояния $\mathbf{x}(0)$ стабилизировать систему в начале координат с заданным качеством переходных процессов.

Задача синтеза разрешается с использованием линейной обратной связи по состоянию системы $\mathbf{u}(k) = -\mathbf{S}\mathbf{x}(k)$. Характеристический многочлен замкнутой системы имеет вид

$$\varphi(\lambda, S) = \det(\lambda\mathbf{E} - (\mathbf{M} - \mathbf{N}\mathbf{S})). \quad (4.6)$$

Качество переходных процессов определяет соответствующее расположение полюсов замкнутой системы и, следовательно, «желаемый» вид характеристического многочлена $\varphi^*(\lambda)$. Условием разрешения задачи синтеза является равенство

$$\varphi(\lambda, S) = \varphi^*(\lambda).$$

Для системы со скалярным входом и выходом задачу синтеза можно разрешить, используя *формулу Аккермана*

$$\mathbf{S} = (0 \dots 0 \ 1) \mathbf{Q}^{-1} \varphi^*(\mathbf{M}),$$

в которой $\mathbf{Q} = (\mathbf{N} : \mathbf{M}\mathbf{N} : \dots : \mathbf{M}^{n-1}\mathbf{N})$ — $n \times (n \times m)$ матрица управляемости разомкнутой системы, $\varphi^*(\mathbf{M}) = \varphi^*(\lambda) \Big|_{\lambda=\mathbf{M}}$ — матричный характеристический многочлен замкнутой системы.

Для реализации алгоритмов синтеза необходимы данные о состоянии системы. Некоторые из этих состояний можно измерить, остальные следует вычислять, используя, например, процедуру синтеза асимптотического наблюдателя.

Динамическая система

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = (\mathbf{M} - \mathbf{F}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{F}\mathbf{y}(k) + \mathbf{N}\mathbf{u}(k) \quad (4.7)$$

называется *асимптотическим наблюдателем полного порядка* для системы (4.5), если $\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}(k)$ для любого начального состояния $\mathbf{x}(0)$ и для всех $\mathbf{u}(k), k = 0, 1, 2, \dots$.

Переменная $\hat{\mathbf{x}}(k+1)$ обозначает восстановленную оценку вектора состояния $\mathbf{x}(k+1)$. Структура наблюдателя полного порядка системы $\langle \mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{C} \rangle$ определяется матрицей \mathbf{F} , которая может быть найдена из *условия синтеза наблюдателя*

$$\psi(\lambda; \mathbf{F}) = \det(\lambda\mathbf{E} - (\mathbf{M} - \mathbf{F}\mathbf{C})) = \psi^*(\lambda) \quad (4.8)$$

в котором $\psi^*(\lambda)$ — «желаемый» характеристический многочлен наблюдателя. Полюсы наблюдателя выбираются внутри единичного круга комплексной плоскости с учетом местоположения полюсов управляемой системы так, чтобы процесс восстановления протекал на порядок быстрее, чем переходные процессы в системе, такой выбор возможен, когда система $\langle \mathbf{M}, \mathbf{N}, \mathbf{C} \rangle$ вполне наблюдаема.

Матрица \mathbf{F} , удовлетворяющая условию синтеза, может быть найдена по формуле Аккермана

$$\mathbf{F} = \psi^*(\mathbf{M})\mathbf{R}^{-1}(0 \dots 0 \ 1)^T \quad (4.9)$$

в которой $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CM} \\ \dots \\ \mathbf{CM}^{n-1} \end{pmatrix}$ — квадратная $n \times n$ матрица наблюдаемости системы; $\psi^*(\mathbf{M}) = \psi^*(\lambda)|_{\lambda=\mathbf{M}}$ — матричный характеристический многочлен наблюдателя полного порядка.

Для системы $\langle \mathbf{M}_{n \times n}, \mathbf{N}_{n \times m}, \mathbf{C}_{r \times n} \rangle$ наблюдатели Люинбергера, которые восстанавливают только неизменяемые координаты состояния, имеют структуру

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = (\mathbf{E} - \mathbf{FC})(\mathbf{M}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{Nu}(k)) + \mathbf{Fy}(k). \quad (4.10)$$

4.4 Пример выполнения практической работы

Дано:

Переходная характеристика объекта 4-ого порядка, заданна в виде

$$W_o(p) = \frac{b_0}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}.$$

Его можно аппроксимировать моделью первого порядка со звеном запаздывания:

$$W_M(p) = \frac{k}{T_o' p + 1} \cdot e^{-\tau_o p}.$$

Задание:

Найти дискретную передаточную функцию ПИД-регулятора

$$W(p) = k_{II} + \frac{1}{T_{II} p} + T_D p.$$

Порядок выполнения работы:

Используя метод прямых разностей для аппроксимации интегральной, а метод обратных разностей для дифференциальной составляющих, получим

$$W(p) = k_{II} + \frac{h}{T_{II}(z-1)} + T_D \frac{z-1}{zh},$$

где $k_{II} = \frac{h}{T_{II}},$

$$k_D = \frac{T_D}{h}.$$

Схема моделирования представлена на рис. 4.2

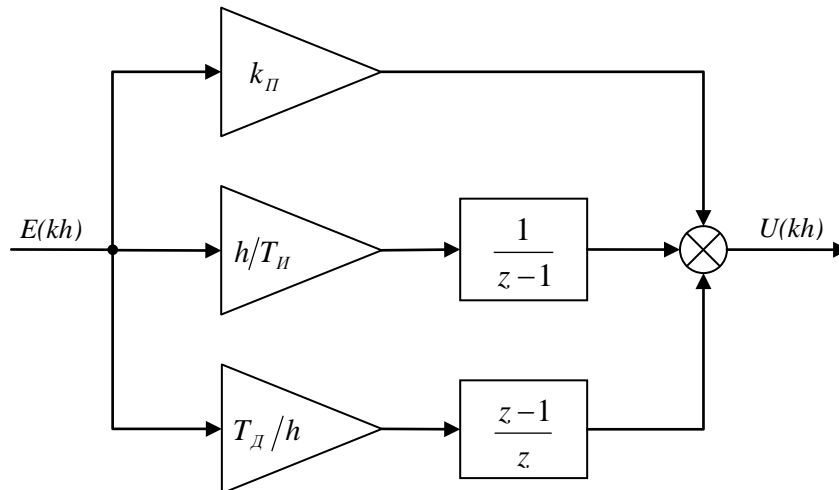


Рис. 4.2 – Схема моделирования.

Используя алгоритм Тастина для дискретизации интегральной, а алгоритм обратной разности для дифференциальной составляющих, получим

$$W(p) = k_{II} + \frac{h}{2T_{II}(z-1)} + T_D \frac{z-1}{zh},$$

где $k_{II} = \frac{h}{2T_{II}}$,
 $k_D = \frac{T_D}{h}$.

Схема моделирования представлена на рис. 4.3

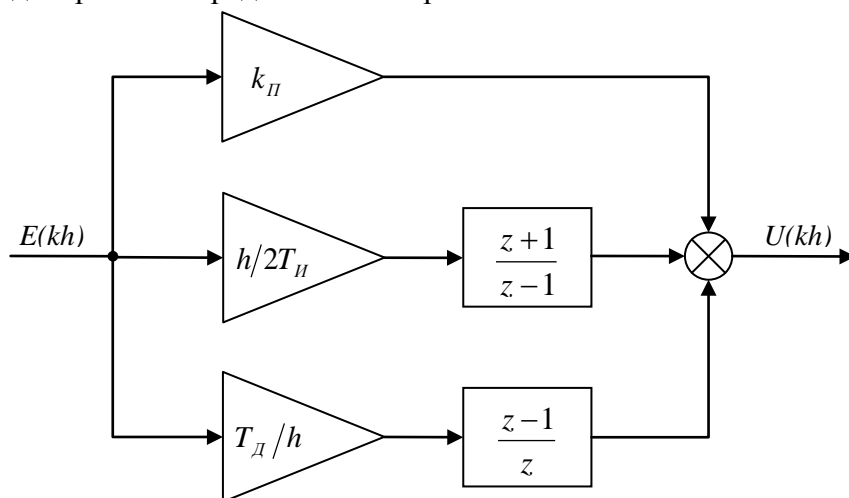


Рис. 4.3 – Схема моделирования.

Соберем схему для выполнения практической работы.

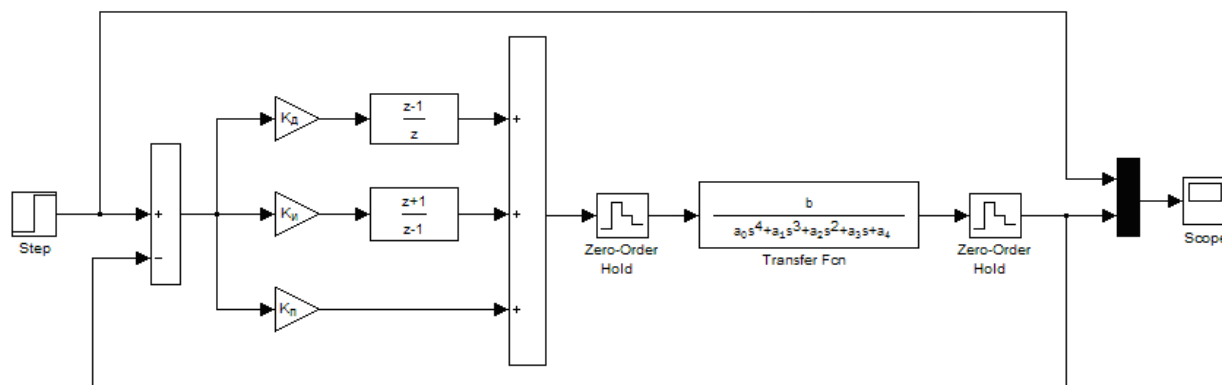


Рис. 4.4. – Структурная схема модели замкнутой системы объекта управления с цифровым ПИД-регулятором

В схему включены экстраполяторы нулевого порядка (ЭПО) для согласования работы дискретной (регулятор) и непрерывной (объект) частей системы. Восстановление должно осуществляться с шагом h .

Изучим метод «критического усиления». Зададим $k_{II} = k_D = 0$. Подберем k_P таким, чтобы в системе установились незатухающие колебания, и определим период колебаний $T_{кр}$. Шаг квантования примем $h = 0,1$ с.

Воспользуемся настройками для переходного процесса с декрементом затухания $\alpha = 0,25$ (метод Ziegler-Nichols см. табл. 4.1) и настроим П-, ПИ-, ПИД-регуляторы.

Проведем моделирование, получим переходные процессы и определим показатели качества. На основании показателей качества выберем наиболее подходящий для изучения регулятор.

Изучим метод разгонной характеристики. Аппроксимация объекта имеет вид

$$W_M(p) = \frac{k}{T'_O p + 1} \cdot e^{-\tau'_O p}$$

Параметрами этой модели воспользуемся для вычисления настроек регулятора. Регулятор будем настраивать по каналу задания для максимального быстродействия без перерегулирования (метод Chien-Hrones-Reswick см. табл. 4.2) и для максимально быстродействия с перерегулированием 20% (метод Chien см. табл. 4.2).

Проведя моделирование, получим переходные процессы, и определим их показатели качества и выберем наилучший регулятор.

Замечание

Определив то таблицам параметры T_H и T_D для моделирования необходимо рассчитать

$$k_H = \frac{h}{T_H} \text{ или } k_H = \frac{h}{2T_H},$$

$$k_D = \frac{T_D}{h}.$$

При выполнении работы время моделирования самостоятельно, ориентируясь на длительность переходных процессов. Метод моделирования выбрать с фиксированным шагом. Величина шага моделирования (*fixed step size*) должна быть равна шагу квантования h .

Пример

Рассчитаем параметры регуляторов для максимального быстродействия без перерегулирования.

П-регулятор

$$k_H = \frac{0,3T_P}{k_O \tau}$$

$$k_H = 0$$

$$k_D = 0$$

ПИ-регулятор

$$k_H = \frac{0,35T_P}{k_O \tau}$$

$$k_H = \frac{h}{2T_H} = \frac{h}{2 \cdot 1,2\tau}$$

$$k_D = 0$$

ПИД-регулятор

$$k_H = \frac{0,6T_P}{k_O \tau}$$

$$k_H = \frac{h}{2T_H} = \frac{h}{2\tau}$$

$$k_D = \frac{T_D}{h} = \frac{0,5\tau}{h}$$

Проведя моделирование, получим переходные процессы, и определим их показатели качества.

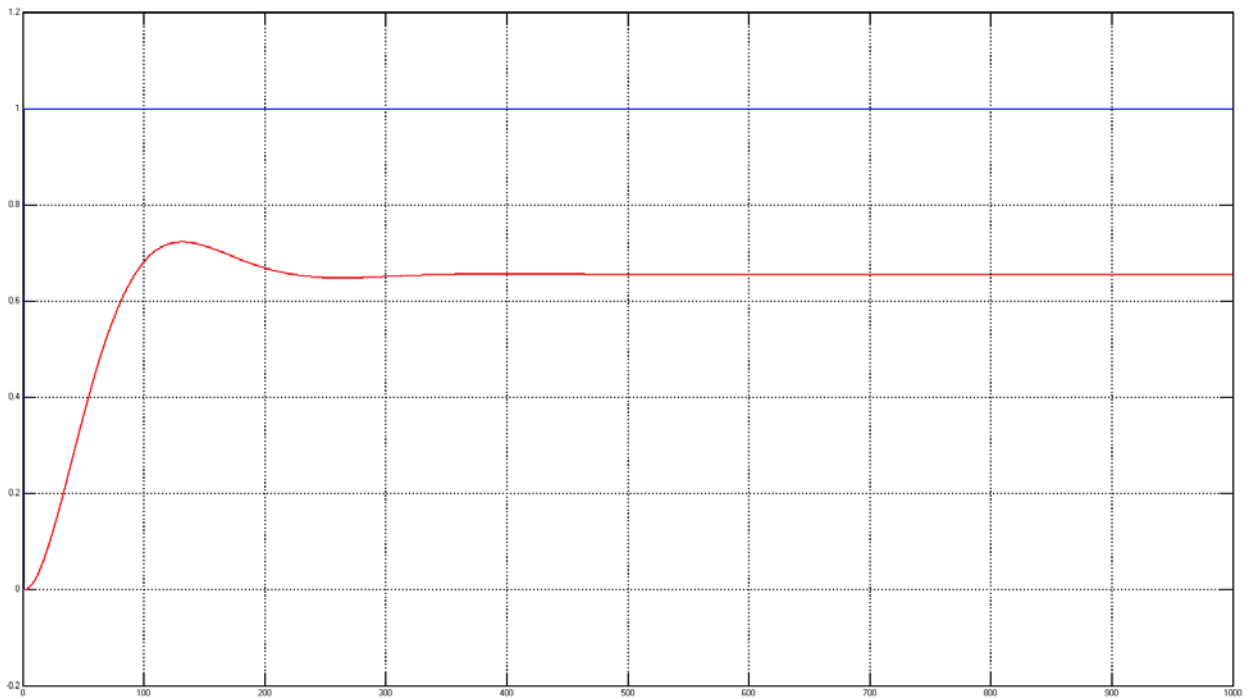


Рис. 4.5 - График переходного процесса с цифровым П-регулятором

Из графика переходного процесса (рис. 4.5) видно, что настройка цифрового П - регулятора данным методом нас не устраивает, т. к. сигнал задания обрабатывается с ошибкой.

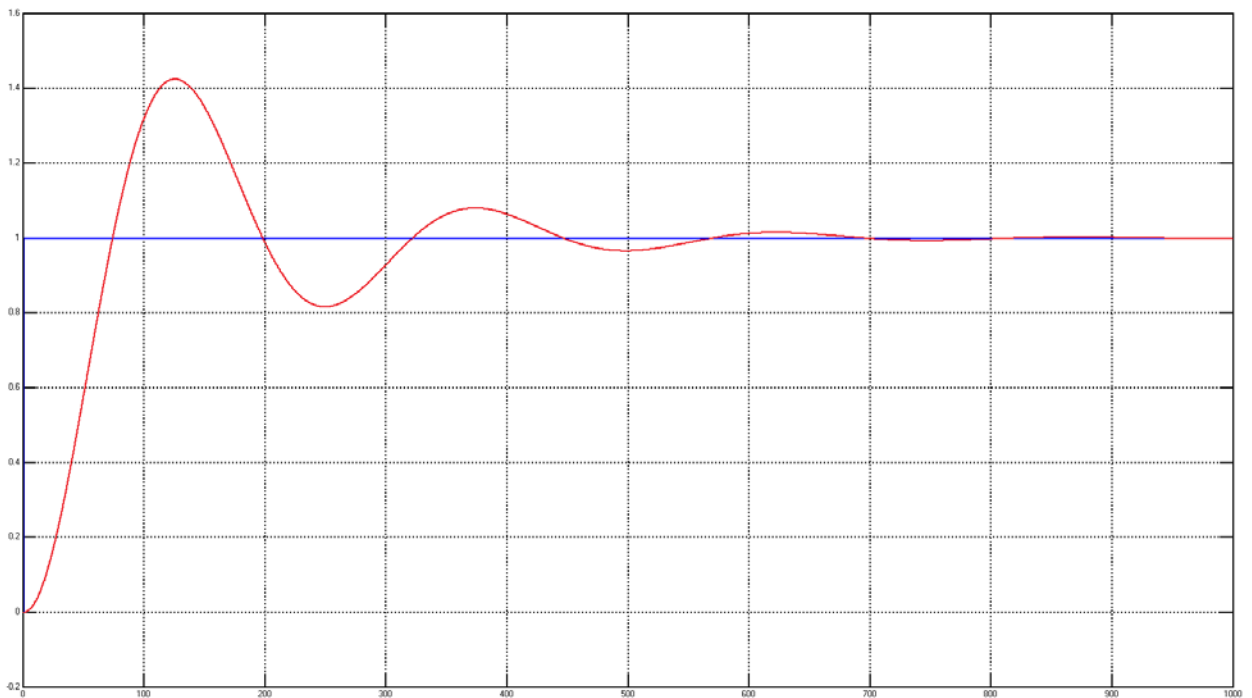


Рис. 4.6 - График переходного процесса с цифровым ПИ-регулятором

Из графика переходного процесса (рис. 4.6) видно:

- Время достижения первого максимума: 125сек.;
- Максимальное значение: 1,424;
- Время регулирования: 657 сек.;
- Время установившегося значения: 935 сек.
- Величина перерегулирования составляет 42,5%.

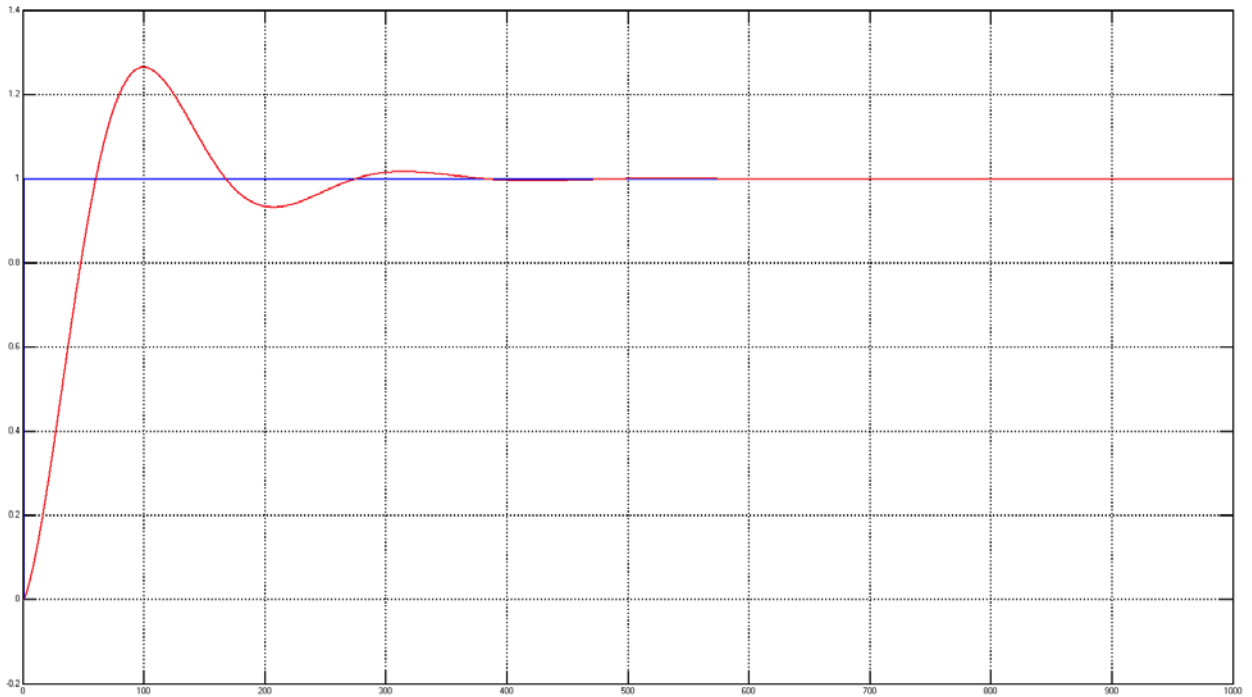


Рис. 4.7 - График переходного процесса с цифровым ПИД-регулятором

Из графика переходного процесса (рис. 4.7) видно:

- Время достижения первого максимума: 100сек.;
- Максимальное значение: 1,265;
- Время регулирования: 365 сек.;
- Время установившегося значения: 473 сек.
- Величина перерегулирования составляет 26,5%.

Исходя от полученных переходных процессов и показателей качества выбираем цифровой ПИД-регулятор.

Требования к оформлению отчета

Отчет о практической работе должен содержать структурную схемы системы управления, расчет параметров регуляторов методами «критического усиления» и «разгонной характеристики», экспериментальные графики переходных процессов с определенными показателями качества.

4.5 Контрольные вопросы

1. Какие элементы включает в себя структура цифровой системы управления?
2. Какие существуют подходы для решения задачи синтеза цифровой системы управления?
3. Какими методами может быть выполнена дискретная аппроксимация непрерывной системы?
4. Как можно осуществить синтез дискретного регулятора?
5. Как можно получить передаточную функцию дискретного регулятора.
6. Достоинства и недостатки цифровых ПИД-регуляторов.
7. В чем заключается основное отличие настроек цифровых регуляторов от аналоговых?
8. Какие существуют методы настройки цифровых регуляторов?
9. Методика настройки цифрового регулятора методом «критического усиления».
10. Достоинства и недостатки метода «критического усиления».
11. Методика настройки цифрового регулятора методом «разгонной характеристики».
12. Достоинства и недостатки метода «разгонной характеристики».
13. Использование формулы Аккермана для синтеза линейного регулятора.
14. Использование формулы Аккермана для синтеза наблюдателя координат состояния.
15. Ограничения в использовании цифровых регуляторов.

4.6 Варианты задания на практическую работу

№	Передаточная функция ОУ
1	$W(p) = \frac{5}{p^4 + 3,5p^3 + 3,59p^2 + 1,225p + 0,09}$
2	$W(p) = \frac{4}{p^4 + 3,6p^3 + 3,85p^2 + 1,35p + 0,1}$
3	$W(p) = \frac{0,125}{p^4 + 1,71p^3 + 0,817p^2 + 0,108p + 0,001}$
4	$W(p) = \frac{1,4}{p^4 + 3,15p^3 + 2,455p^2 + 0,315p + 0,01}$
5	$W(p) = \frac{2}{p^4 + 6,2p^3 + 9,95p^2 + 4,75p + 0,6}$
6	$W(p) = \frac{1,5}{p^4 + 2,15p^3 + 1,485p^2 + 0,344p + 0,014}$
7	$W(p) = \frac{1}{p^4 + 2,2p^3 + 1,41p^2 + 0,22p + 0,01}$
8	$W(p) = \frac{8}{p^4 + 6,6p^3 + 8,68p^2 + 3,48p + 0,4}$
9	$W(p) = \frac{3}{p^4 + 3,1p^3 + 2,54p^2 + 0,704p + 0,048}$
10	$W(p) = \frac{0,5}{p^4 + 2,55p^3 + 2,125p^2 + 0,6p + 0,025}$
11	$W(p) = \frac{6}{p^4 + 5,85p^3 + 4,45p^2 + 1,0125p + 0,0625}$