



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЭиАС  
С.И. Лукьянов

26.02.2020 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

***ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ***

Направление подготовки (специальность)  
27.03.04 УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Направленность (профиль/специализация) программы  
Системы и средства автоматизации технологических процессов

Уровень высшего образования - бакалавриат  
Программа подготовки - академический бакалавриат

Форма обучения  
очная

Институт/ факультет	Институт энергетики и автоматизированных систем
Кафедра	Автоматизированных систем управления
Курс	3
Семестр	5, 6

Магнитогорск  
2020 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО по направлению подготовки 27.03.04 УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 20.10.2015 г. № 1171)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры Автоматизированных систем управления

12.02.2020, протокол № 6

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Андреев

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИЭиАС

26.02.2020 г. протокол № 5

Председатель \_\_\_\_\_ С.И. Лукьянов

Рабочая программа составлена:

доцент кафедры АСУ, канд. техн. наук \_\_\_\_\_ М.Ю. Рябчиков

Рецензент:

зам. директора ЗАО "КонсОМ СКС" , канд. техн. наук  
\_\_\_\_\_ Ю.Н. Волщук



## Лист актуализации рабочей программы

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2021 - 2022 учебном году на заседании кафедры Автоматизированных систем управления

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Андреев

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2022 - 2023 учебном году на заседании кафедры Автоматизированных систем управления

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Андреев

---

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2023 - 2024 учебном году на заседании кафедры Автоматизированных систем управления

Протокол от \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Андреев

### **1 Цели освоения дисциплины (модуля)**

развитие профессиональных компетенций в области расчета и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления, а также проведения вычислительных экспериментов с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления.

### **2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина Теория автоматического управления входит в вариативную часть учебного плана образовательной программы.

Для изучения дисциплины необходимы знания (умения, владения), сформированные в результате изучения дисциплин/ практик:

Математика

Информатика и информационные технологии

Программирование и основы алгоритмизации

Знания (умения, владения), полученные при изучении данной дисциплины будут необходимы для изучения дисциплин/практик:

Диагностика и надежность автоматизированных систем

Самонастраивающиеся системы

Методы оптимизации

Системы автоматизации и управления

Автоматизированное управление в технических системах

Комплексы технических средств в САУ

Автоматизация технологических процессов и производств

Оптимизация управления технологическими процессами металлургического производства

### **3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины (модуля) и планируемые результаты обучения**

В результате освоения дисциплины (модуля) «Теория автоматического управления» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения
	ПК-2 способностью проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления
Знать	- инженерные методы определения математической модели объекта управления с применением математических программных пакетов; - методы определения параметров математической модели объекта по экспериментальной переходной функции с применением математических программных пакетов; - методы определения параметров математической модели объекта при воздействии на объект случайного сигнала с применением математических программных пакетов;

Уметь	<ul style="list-style-type: none"> <li>- реализовать структуру и параметры математической модели объекта с применением математических программных пакетов;</li> <li>- реализовать математические модели возмущающих воздействий с применением математических программных пакетов;</li> <li>- анализировать модель системы управления с применением математических программных пакетов;</li> </ul>
Владеть	<ul style="list-style-type: none"> <li>- специализированными системами компьютерной математики для расчёта систем управления;</li> <li>- навыками настройки моделей с применением систем компьютерной математики.</li> </ul>
<p>ПК-6 способностью производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления в соответствии с техническим заданием</p>	
Знать	<ul style="list-style-type: none"> <li>- стандартные структуры систем управления и типовые законы управления технологическими параметрами объектов управления;</li> <li>- способы реализации типовых законов управления и способы коррекции систем с целью улучшения качества их работы;</li> <li>- методы нейросетевого управления и управления на основе нечеткой логики;</li> </ul>
Уметь	<ul style="list-style-type: none"> <li>- составлять структурные схемы систем управления; рассчитывать систему управления на устойчивость и определять качество её работы;</li> <li>- рассчитывать нелинейные и дискретные системы управления;</li> <li>- построить оптимальный алгоритм управления объектом и составить структурную схему для её технической реализации;</li> </ul>
Владеть	<ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками проектирования системы управления;</li> <li>- методологическими основами теории автоматического управления для математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования технических систем.</li> </ul>

#### 4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 9 зачетных единиц 324 акад. часов, в том числе:

- контактная работа – 184,1 акад. часов;
- аудиторная – 176 акад. часов;
- внеаудиторная – 8,1 акад. часов
- самостоятельная работа – 68,5 акад. часов;
- подготовка к экзамену – 71,4 акад. часа

Форма аттестации - экзамен

Раздел/ тема дисциплины	Семестр	Аудиторная контактная работа (в акад. часах)			Самостоятельная работа студента	Вид самостоятельной работы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	Код компетенции
		Лек.	лаб. зан.	практ. зан.				
1. Предмет изучения и методы теории управления								
1.1 Классификация систем управления. Общие принципы управления	5	4			1,2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-6
1.2 История развития теории и техники управления		2			1	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-6
Итого по разделу		6			2,2			
2. Теория линейных систем автоматического управления								
2.1 Определение линейной системы. Системы управления по рассогласованию	5	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6

2.2 Статика линейных систем	2	8/2И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №2. Статические характеристики элементов и систем автоматического управления. Выполнение индивидуального задания в контрольной работе	ПК-2, ПК-6
2.3 Обзор типовых динамических звеньев	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6
2.4 Понятие передаточной функции и структурные преобразования систем управления	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6
2.5 Моделирование работы систем управления с применением пакета Matlab	2		6/2И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №1. Применение системы компьютерной математики MATLAB для расчета линейных систем управления	ПК-2, ПК-6
2.6 Переходная и импульсная характеристика. Определение параметров модели по экспериментальным характеристикам	2	6/2И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №3. Переходные функции элементов систем автоматического управления. Выполнение индивидуального задания в контрольной работе	ПК-2, ПК-6
2.7 Показатели качества регулирования	2		2	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №4. Выбор типа регулятора и его ручная настройка в системе автоматического управления	ПК-2, ПК-6

2.8 Ручная настройка регулятора	2	4/2И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №4. Выбор типа регулятора и его ручная настройка в системе автоматического управления	ПК-2, ПК-6
2.9 Частотные характеристики	2	8/2И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №5. Частотные характеристики элементов систем автоматического управления	ПК-2, ПК-6
2.10 Настройка регулятора на технический оптимум	2	6/3И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе. Подготовка и выполнение индивидуального задания по контрольной работе	Устный опрос по работе №6. Настройка регулятора на технический оптимум. Опрос по выполненной самостоятельной работе «Определение математической модели объекта управления и разработка системы автоматического управления с использованием типовых законов управления». Выполнение индивидуального задания в контрольной работе	ПК-2, ПК-6
2.11 Настройка регулятора на симметричный оптимум	2	6/3И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №7. Настройка регулятора на симметричный оптимум	ПК-2, ПК-6



2.12 Точность систем автоматического управления. Астатические системы. Порядок астатизма	2	6/3И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №8. Статические и динамические ошибки управления	ПК-2, ПК-6
2.13 Настройка регулятора с применением эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта	2	6/3И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №9. Настройка регулятора с применением эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта	ПК-2, ПК-6
2.14 Устойчивость линейных систем. Критерии устойчивости	2	8/4И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №10. Частотные методы анализа устойчивости автоматических систем и построение переходных процессов	ПК-2, ПК-6
2.15 Модальное управление	2		6/2И	2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №11. Исследование разомкнутой линейной системы	ПК-2, ПК-6
Итого по разделу	30	54/22И	18/6И	30			
Итого за семестр	36	54/22И	18/6И	32,2		экзамен	
3. Статистическая динамика линейных автоматических систем							

3.1 Вероятностные характеристики случайных величин. Моделирование случайных воздействий	6	2		6/2И	3	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работам: №12. Случайные величины. №13. Моделирование многомерной случайной величины. №14. Разработка модели возмущений с учетом частотных особенностей изменения случайной величины Проверка графика выполнения курсовой работы	ПК-2, ПК-6	
3.2 Статистические характеристики случайных процессов и их свойства		2		6/2И	3	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работам: №12. Случайные величины. №13. Моделирование многомерной случайной величины. №14. Разработка модели возмущений с учетом частотных особенностей изменения случайной величины	ПК-2, ПК-6	
3.3 Связь между статистическими характеристиками случайных воздействий на входе и выходе системы		2	2			3	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №15. Спектральная плотность на входе и выходе системы	ПК-2, ПК-6
3.4 Расчет систем управления при случайных воздействиях. Синтез систем с минимальной средней квадратической ошибкой		4	2/2И			3	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №16. Синтез системы с минимумом среднего значения квадрата ошибки регулирования	ПК-2, ПК-6
Итого по разделу		10	4/2И	12/4И	12				
4. Нелинейные системы									

4.1 Сравнение свойств линейных и нелинейных систем	6	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос. Выполнение графика курсовой работы	ПК-2, ПК-6
4.2 Обзор типовых нелинейных элементов и их свойств		4		5/2И	2,3	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к практическим занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №17. Моделирование работы нелинейных систем автоматического управления. Выполнение графика курсовой работы	ПК-2, ПК-6
4.3 Метод исследования нелинейных систем на фазовой плоскости		2	2/2И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №18. Исследование релейной системы второго порядка на фазовой плоскости. Выполнение графика курсовой работы	ПК-2, ПК-6
4.4 Метод гармонического баланса		2	3/2И		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №19. Метод гармонического баланса. Выполнение графика курсовой работы	ПК-2, ПК-6
Итого по разделу		10	5/4И	5/2И	8,3			
5. Дискретные системы								
5.1 Классификация дискретных автоматических систем	6	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительной материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6
5.2 Импульсные системы		2	2		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №20. Переоборудование непрерывного регулятора	ПК-2, ПК-6

5.3 Устойчивость дискретных систем		2	2		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №21. Устойчивость импульсных систем	ПК-2, ПК-6
Итого по разделу		6	4		6			
6. Системы управления с применением искусственных нейронных сетей и нечеткой логики								
6.1 Основные понятия и операции нечеткой логики	6	2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительных материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6
6.2 Системы управления на основе нечеткой логики		2	2		2	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №23. Модели на базе нечеткой логики	ПК-2, ПК-6
6.3 Общие сведения об управлении с использованием искусственных нейронных сетей		2			2	Самостоятельное изучение учебной и научно литературы. Поиск дополнительных материалов по теме	Устный опрос	ПК-2, ПК-6
6.4 Способы интеграции нейросетей в контур управления		2	2		4	Самостоятельное изучение учебной литературы, подготовка к лабораторным занятиям, выполнение индивидуального задания по работе	Устный опрос по работе №22. Идентификация в задачах управления	ПК-2, ПК-6
Итого по разделу		8	4		10			
Итого за семестр		34	17/6И	17/6И	36,3		экзамен	
Итого по дисциплине		70	71/28И	35/12И	68,5		экзамен	ПК-6, ПК-2

## 5 Образовательные технологии

Для реализации предусмотренных видов учебной работы в качестве образовательных технологий в преподавании дисциплины «Теория автоматического управления» используются:

Традиционные образовательные технологии – информационная лекция (вводную лекцию, где дает первое представление о предмете и знакомство студентов с назначением и задачами курса); лекции – консультации, изложение нового материала сопровождается постановкой вопросов и дискуссией в поисках ответов на эти вопросы; лабораторные работы.

Технологии проблемного обучения – проблемные лекции является результатом усвоения полученной информации посредством постановки проблемного вопроса и поиска путей его решения; лабораторные работы с использованием проблемного обучения, которое заключается в стимулировании студентов к самостоятельной «добыче» знаний, необходимых для решения конкретной проблемы.

Информационно-коммуникационные образовательные технологии – в ходе проведения лекционных занятий предусматривается использование электронного демонстрационного материала (лекции-визуализации), использование Интернет ресурсов для промежуточных аттестаций и проверки остаточных знаний

Лекционный материал закрепляется в ходе лабораторных работ, на которых выполняются групповые или индивидуальные задания по пройденной теме.

Лабораторные и практические занятия проводятся в интерактивной форме с использованием следующих методов интерактивного обучения:

- актуализация познавательной деятельности учащихся путем побуждения к осмыслению логики и последовательности проведения научного исследования, к выделению в нем главных и наиболее существенных этапов; при этом определяется конечная цель исследования, а пути его проведения и формы представления результата обучающийся выбирает сам;

- отсутствие жестко регламентированного порядка выполнения работы по обработке исходных и экспериментальных данных, когда студент оперирует вспомогательной информацией о способах поиска необходимых программных средств, функций, протоколов передачи и обработки данных, что вырабатывает способность к познанию;

- при постановке и анализе результатов исследования для достижения поставленных целей обучающиеся должны делать сравнения, сопоставлять новые факты, приемы использованные другими участниками группы, обращать внимание на причины, вызывающие то или иное явление и быть способными продемонстрировать индивидуальность своего подхода к решению задачи;

- проведение занятий в форме поиска причин допущенных ошибок при проведении исследования, причин несовпадения результатов с полученными другими группами обучающихся, побуждение к стремлению находить и устранять чужие и свои ошибки.

Самостоятельная работа стимулирует студентов к самостоятельной проработке в процессе выполнения контрольных работ, а также в процессе подготовки к устному опросу, тестированию и итоговой аттестации.

В ходе проведения лекционных занятий предусматривается:

- использование электронного демонстрационного материала по современной измерительной технике;

- использование электронных учебников по отдельным темам занятий;

- активные и интерактивные формы обучения: вариативный опрос, дискуссии, устный опрос, тестовый опрос, индивидуальная «защита» лабораторных работ и т.д.

## **6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Представлено в приложении 1.

## **7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации**

Представлены в приложении 2.

## **8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)**

### **а) Основная литература:**

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления : учебник и практикум для вузов / Д. П. Ким. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 276 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-9916-9294-6. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/450559> (дата обращения: 20.09.2020).

2. Коломейцева, М. Б. Системы автоматического управления при случайных воздействиях : учебное пособие для вузов / М. Б. Коломейцева, В. М. Беседин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 104 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-11166-8. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/455298> (дата обращения: 20.09.2020).

### **б) Дополнительная литература:**

1. Ягодкина, Т. В. Теория автоматического управления : учебник и практикум для вузов / Т. В. Ягодкина, В. М. Беседин. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 470 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-06483-4. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/450572> (дата обращения: 20.09.2020).

2. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Задачник : учебное пособие для вузов / Д. П. Ким. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 331 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-01459-4. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/452303> (дата обращения: 20.09.2020).

### **в) Методические указания:**

1. Рябчиков, М. Ю. Статистическая динамика систем управления : учебное пособие / М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 110 с. : ил., табл., схемы, граф., гистогр. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3126.pdf&show=dcatalogues/1/1136001/3126.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - ISBN 978-5-9967-0868-0. - Имеется печатный аналог.

2. Ким, Д. П. Теория автоматического управления. Линейные системы. Задачник : учебное пособие для вузов / Д. П. Ким, Н. Д. Дмитриева. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 169 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-9916-8603-7. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/452301> (дата обращения: 20.09.2020).

3. Рябчиков, М. Ю. Планирование эксперимента и обработка результатов измерений : практикум / М. Ю. Рябчиков, Е. С. Рябчикова ; МГТУ. - Магнитогорск, 2013. - 141 с. : ил., гистогр., граф., схемы, табл. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=619.pdf&show=dcatalogues/1/1107849/619.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - ISBN 978-5-9967-0379-1. - Имеется печатный аналог.

4. Рябчиков, М. Ю. Алгоритмы и способы самонастройки средств регулирования в современных микропроцессорных контроллерах : практикум / М. Ю. Рябчиков, С. М. Андреев, Е. С. Рябчикова ; МГТУ. - Магнитогорск, 2012. - 136 с. : ил., схемы, табл. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=602.pdf&show=dcatalogues/1/1104154/602.pdf&view=true> (дата обращения: 14.05.2020). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Имеется печатный аналог.

5. Жмудь, В. А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim : учебное пособие / В. А. Жмудь. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 124 с. - ISBN 978-5-7782-2103-1. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/546586> (дата обращения: 20.09.2020). – Режим доступа: по подписке.

Методические указания к выполнению лабораторных и практических работ приведены также в приложении 3.

Методические указания к выполнению курсовой работы приведены в приложении 4.

**г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:**

**Программное обеспечение**

Наименование ПО	№ договора	Срок действия лицензии
MS Windows XP Professional(для классов)	Д-1227-18 от 08.10.2018	11.10.2021
MS Office 2003 Professional	№ 135 от 17.09.2007	бессрочно
7Zip	свободно распространяемое ПО	бессрочно
FAR Manager	свободно распространяемое ПО	бессрочно
Scilab Computation Engine	свободно распространяемое ПО	бессрочно
MathWorks MathLab v.2014 Classroom License	К-89-14 от 08.12.2014	бессрочно
MathCAD v.15 Education University Edition	Д-1662-13 от 22.11.2013	бессрочно

### Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

Название курса	Ссылка
Электронная база периодических изданий East View Information Services, ООО «ИВИС»	<a href="https://dlib.eastview.com/">https://dlib.eastview.com/</a>
Национальная информационно-аналитическая система – Российский индекс научного цитирования	URL: <a href="https://elibrary.ru/project_risc.asp">https://elibrary.ru/project_risc.asp</a>
Поисковая система Академия Google (Google Scholar)	URL: <a href="https://scholar.google.ru/">https://scholar.google.ru/</a>
Информационная система - Единое окно доступа к информационным ресурсам	URL: <a href="http://window.edu.ru/">http://window.edu.ru/</a>
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности»	URL: <a href="http://www1.fips.ru/">http://www1.fips.ru/</a>
Российская Государственная библиотека. Каталоги	<a href="https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/">https://www.rsl.ru/ru/4readers/catalogues/</a>
Электронные ресурсы библиотеки МГТУ им. Г.И. Носова	<a href="http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp">http://magtu.ru:8085/marcweb2/Default.asp</a>
Федеральный образовательный портал – Экономика. Социология. Менеджмент	<a href="http://ecsocman.hse.ru/">http://ecsocman.hse.ru/</a>
Университетская информационная система РОССИЯ	<a href="https://uisrussia.msu.ru">https://uisrussia.msu.ru</a>
Международная наукометрическая реферативная и полнотекстовая база данных научных изданий «Web of science»	<a href="http://webofscience.com">http://webofscience.com</a>
Международная реферативная и полнотекстовая справочная база данных	<a href="http://scopus.com">http://scopus.com</a>
Международная база полнотекстовых журналов Springer Journals	<a href="http://link.springer.com/">http://link.springer.com/</a>
Международная коллекция научных протоколов по различным отраслям знаний	<a href="http://www.springerprotocols.com/">http://www.springerprotocols.com/</a>



Международная база научных материалов в области физических наук и инжиниринга	<a href="http://materials.springer.com/">http://materials.springer.com/</a>
Международная база справочных изданий по всем отраслям знаний SpringerReference	<a href="http://www.springer.com/references">http://www.springer.com/references</a>
Международная реферативная база данных по чистой и прикладной математике zbMATH	<a href="http://zbmath.org/">http://zbmath.org/</a>
Международная реферативная и полнотекстовая справочная база данных научных изданий «Springer Nature»	<a href="https://www.nature.com/siteindex">https://www.nature.com/siteindex</a>
Архив научных журналов «Национальный электронно-информационный конкорциум» (НЭИКОН)	<a href="https://archive.neicon.ru/xmlui/">https://archive.neicon.ru/xmlui/</a>

## **9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа
- Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации
2. Учебная аудитория для проведения лабораторных работ и практических занятий:  
компьютерный класс  
Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета
3. Учебные аудитории для выполнения курсового проектирования, помещения для самостоятельной работы обучающихся  
Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета
4. Учебные аудитории для групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточных консультаций  
Доска, мультимедийный проектор, экран
5. Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования  
Стеллажи для хранения учебно-методической документации

**Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «Теория автоматического управления»**

По дисциплине «Теория автоматического управления» предусмотрена аудиторная и внеаудиторная самостоятельная работа обучающихся.

Аудиторная самостоятельная работа студентов предполагает выполнение и защиту лабораторных и практических работ, решение индивидуальных задач.

<b>Перечень лабораторных и практических работ</b>	<b>Вопросы к защите</b>
<p>№1. Применение системы компьютерной математики MATLAB для расчета линейных систем управления</p>	<p>Как получить краткую справку по какой либо команде MATLAB?</p> <p>В чем разница между командами MATLAB who и whos, clear all и clc?</p> <p>Как скопировать график из окна MATLAB в другую программу?</p> <p>Какие возможности предоставляет модуль LTIViewer?</p> <p>Как ввести передаточную функцию в MATLAB?</p>
<p>№2. Статические характеристики элементов и систем автоматического управления</p>	<p>Что понимается под статической характеристикой элемента и как она определяется экспериментально?</p> <p>Что такое передаточный коэффициент линейного элемента?</p> <p>Какие Вы знаете статические характеристики у объекта управления и как их определить экспериментально?</p> <p>Дайте определение для передаточных коэффициентов <math>k_{OF}</math> и <math>k_{ou}</math> ?</p> <p>Из каких элементов состоит статическая система управления и как следует эти элементы соединить между собой?</p> <p>Из каких элементов состоит астатическая система управления и как следует эти элементы соединить между собой?</p>
<p>№3. Статические характеристики и переходные функции элементов систем автоматического управления</p>	<p>Что понимается под переходной функцией, типы переходных функций, их экспериментальное определение.</p> <p>Как определить параметра <math>k, T</math> передаточной функции инерционного звена по переходной функции?</p> <p>Как определить параметра <math>k, T, \xi</math> передаточной функции колебательного звена по переходной функции?</p> <p>Как определить параметра <math>k, T_1, T_2</math> передаточной функции</p>

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
	<p>инерционного звена второго порядка по переходной функции?</p> <p>Напишите передаточную функцию разомкнутой и замкнутой системы для заданной структуры системы.</p>
<p>№4. Выбор типа регулятора и его ручная настройка в системе автоматического управления (порядок выполнения представлен в [4] раздела методических указаний)</p>	<p>Чем следует руководствоваться при выборе вида регулятора и закона регулирования?</p> <p>Перечислите правила, по которым проводится подстройка параметров регулятора в окрестностях оптимального режима.</p> <p>Как вручную настроить регулятор, не имея никакой предварительной информации об области оптимальных значений параметров настройки регулятора?</p> <p>Перечислите основные особенности различного вида приводов.</p> <p>Укажите основные причины необходимости перенастройки средств регулирования.</p>
<p>№5. Частотные характеристики элементов систем автоматического управления</p>	<p>Как найти коэффициент усиления в установившемся режиме по АЧХ?</p> <p>Что такое частотная характеристика?</p> <p>Что такое частота среза системы?</p> <p>Приведите пример вида амплитудных частотных характеристик типовых звеньев САУ.</p> <p>Что такое резонансная частота системы?</p> <p>Как получить выражения частотных характеристик по передаточной функции?</p> <p>Как экспериментально получить частотные характеристики?</p>
<p>№6. Настройка регулятора на технический оптимум</p>	<p>В чем отличие приведения к единице передаточной функции системы и амплитудной характеристики системы?</p> <p>Как сформировать регулятор в системе с прямым разомкнутым управлением?</p> <p>Выведите выражение для расчета параметров интегрального регулятора, управляющего инерционным объектом путем приведения к единице амплитудной характеристики замкнутой системы. Какие допущения при этом следует сделать?</p>

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
	Запишите эталонное выражение разомкнутой системы, настроенной на технический оптимум.
№7. Настройка регулятора на симметричный оптимум	<p>Запишите эталонное выражение разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум.</p> <p>Приведите эталонный вид логарифмической амплитудной характеристики системы, настроенной на симметричный оптимум.</p> <p>Приведите пример объекта без самовыравнивания.</p> <p>Как обеспечить приведение передаточной функции системы к эталонному виду? Приведите пример.</p>
№8. Статические и динамические ошибки управления	<p>Как сформировать ступенчатое, линейное и параболическое входное воздействие?</p> <p>Как на модели реализовать систему с астатизмом нулевого порядка и как она обрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p> <p>Как на модели реализовать систему с астатизмом первого порядка и как она обрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p> <p>Как на модели реализовать систему с астатизмом второго порядка и как она обрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p> <p>Выпишите формулу для расчёта установившейся ошибки. Как она зависит от передаточного коэффициента разомкнутой системы.</p>
№9. Настройка регулятора с применением эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта	<p>Что такое характеристическое уравнение?</p> <p>Как расположены корни биномиального характеристического полинома?</p> <p>Как расположены корни характеристического полинома Баттерворта?</p> <p>Приведите примеры характеристических полиномов Ньютона и Баттерворта первого и второго порядков.</p> <p>Показатели качества систем с типовыми характеристическими полиномами.</p> <p>Как связаны нормированное и фактическое время переходного</p>

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
	<p>процесса?</p> <p>Что такое среднегеометрический корень характеристического полинома?</p>
<p>№10. Частотные методы анализа устойчивости автоматических систем и построение переходных процессов</p>	<p>Напишите передаточную функцию системы управления с отрицательной обратной связью, пропорциональным регулятором и моделью объекта из трех инерционных звеньев первого порядка.</p> <p>Выведите формулы для амплитудной и фазовой частотных характеристик разомкнутой системы с пропорциональным регулятором и инерционным объектом.</p> <p>Как по нормированной АФЧХ разомкнутой системы найти критический передаточный коэффициент.</p> <p>Сформулируйте частотный критерий устойчивости Найквиста и алгебраический критерий Гурвица.</p> <p>Как по передаточной функции разомкнутой системы найти характеристический многочлен замкнутой САУ?</p>
<p>№11. Исследование разомкнутой линейной системы</p>	<p>Что такое модель в пространстве состояний?</p> <p>Что такое нули и полюса передаточной функции?</p> <p>Может ли четверка матриц</p> $A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -1 & -3 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 2], D = 0$ <p>быть моделью системы в пространстве состояний? Почему? Какие соотношения между матрицами должны выполняться в общем случае?</p> <p>Как влияет изменение коэффициента прямой передачи (матрицы D в модели в пространстве состояний) на статический коэффициент усиления?</p>
<p>№12. Случайные величины. (порядок выполнения представлен в [3] раздела методических</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Перечислите этапы эксперимента.</li> <li>2. Отличия пассивного и активного эксперимента.</li> <li>3. укажите основные цели сэмпинга данных.</li> </ol>

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
указаний)	<p>4. Какие статистические оценки качества данных Вы знаете?</p> <p>5. Как оценить адекватность статистической модели?</p> <p>6. Как оценить воспроизводимость эксперимента?</p> <p>7. Укажите цели дисперсионного и корреляционного анализа.</p> <p>8. Перечислите принципы выбора типа статистической модели.</p> <p>9. Изобразите функции плотности распределения для основных законов распределения случайной величины.</p> <p>10. Приведите алгоритм генерации случайной величины по заданному закону распределения.</p>
<p>№13. Моделирование многомерной случайной величины  (порядок выполнения представлен в приложении)</p>	<p>1. Запишите формулу для коэффициента линейной корреляции Пирсона и поясните ее.</p> <p>2. Приведите примеры зависимостей между двумя параметрами с разными значениями коэффициента корреляции.</p> <p>3. Поясните отличие ковариации от корреляции.</p> <p>4. Поясните алгоритм моделирования <math>m</math>-мерного случайного вектора, распределенного по нормальному закону.</p> <p>5. Что такое ковариационная и корреляционная матрицы?</p>
<p>№14. Разработка модели возмущений с учетом частотных особенностей изменения случайной величины  (порядок выполнения представлен в приложении)</p>	<p>1. Понятие автокорреляционной и взаимной корреляционной функции.</p> <p>2. Как рассчитать автокорреляционную функцию в среде excel.</p> <p>3. Приведите примеры вида автокорреляционной функции для различных случайных процессов.</p> <p>4. Перечислите модели для трендовой составляющей ряда.</p> <p>5. Перечислите модели периодической составляющей ряда.</p> <p>6. Опишите модель авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего.</p> <p>7. Перечислите этапы создания частотной модели временного ряда.</p> <p>8. Как понизить дискретность данных в excel?</p> <p>9. Как реализовать модель авторегрессии в среде VisSim?</p>
№15. Спектральная	1. Что такое спектральная плотность случайного процесса? Связь

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
<p>плотность на входе и выходе системы</p> <p>(порядок выполнения представлен в приложении)</p>	<p>спектральной плотности с корреляционной функцией.</p> <p>2. Приведите примеры вида спектральной плотности для различных случайных процессов.</p> <p>3. Какими выражениями часто аппроксимируют спектральную плотность?</p> <p>4. Почему при аппроксимации спектральной плотности используют выражения, которые могут быть представлены как функции частоты или как функции комплексной переменной?</p> <p>5. Как связаны спектральная плотность на входе и выходе системы?</p>
<p>№16. Синтез системы с минимумом среднего значения квадрата ошибки регулирования</p> <p>(порядок выполнения представлен в приложении)</p>	<p>1. Какова связь спектральной плотности с критериями качества управления?</p> <p>2. Что такое взаимная спектральная плотность и как она используется при синтезе систем управления?</p> <p>3. Приведите и поясните различные варианты взаимного расположения амплитудной характеристики и спектральных плотностей полезного сигнала и помехи.</p> <p>4. Какие можно выделить этапы при синтезе системы с заданной структурой с минимумом средней квадратической ошибкой?</p> <p>5. Как получить аналитическое выражение для интеграла спектральной плотности случайного процесса?</p> <p>6. Приведите пример выражения для расчета интеграла от дробно-рациональной четной функции.</p>
<p>№17.</p> <p>Моделирование работы нелинейных систем автоматического управления</p>	<p>Изобразите характеристики нелинейных элементов типа люфт и упор.</p> <p>Изобразите характеристики релейных нелинейных элементов.</p> <p>Какие нелинейные элементы обычно используют при моделировании системы управления с интегрирующим исполнительным устройством постоянной скорости?</p> <p>Каково назначение зоны нечувствительности?</p> <p>Запишите формулы для расчета выхода двухпозиционного релейного элемента с гистерезисом.</p>

Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
	Каково назначение гистерезиса?
№18. Исследование релейной системы второго порядка на фазовой плоскости	<p>Дать определение фазовой плоскости и фазовой траектории.</p> <p>Какой вид имеют фазовые траектории релейной системы второго порядка с передаточной функцией линейной части <math>H_{лч}(p) = \frac{1}{p(p+1)}</math>?</p> <p>Какой вид имеют фазовые портреты САУ, имеющие в качестве нелинейного элемента: а) идеальное реле; б) реле с зоной нечувствительности; в) реле с гистерезисной статической характеристикой</p> <p>В чем преимущества и недостатки метода исследования релейной системы на фазовой плоскости по сравнению с численным моделированием во времени с использованием математических пакетов?</p>
№19. Метод гармонического баланса	<p>Дать определение статической характеристики релейного элемента и методики её определения.</p> <p>Дать определение эквивалентного комплексного передаточного коэффициента нелинейного элемента. Чему равна его амплитуда и фаза.</p> <p>Привести формулы для расчёта АФХ линейной части системы и амплитудной характеристики нелинейного элемента.</p> <p>Как графически решается уравнение гармонического баланса методом Гольдфарба?</p> <p>Как определить точку устойчивых периодических колебаний?</p>
№20. Переоборудование непрерывного регулятора	<p>Дайте определение D и Z преобразованиям.</p> <p>Что такое линейное разностное уравнение?</p> <p>Что такое оператор сдвига?</p> <p>Что такое дискретная передаточная функция?</p> <p>Правила замены при интегрировании по методам Эйлера и обратных разностей.</p>
№21. Устойчивость	Как определить передаточную функцию разомкнутой импульсной системы по известной передаточной функции приведённой



Перечень лабораторных и практических работ	Вопросы к защите
импульсных систем	<p>линейной части?</p> <p>Как определить передаточную функцию замкнутой импульсной системы?</p> <p>Как связаны передаточная функция и разностное уравнение?</p> <p>Эквивалентная схема амплитудно-импульсного элемента.</p>
<p>№22. Идентификация в задачах управления (порядок выполнения представлен в [4] раздела методических указаний)</p>	<p>Структурные схемы идентификации.</p> <p>Способы интеграции искусственной нейронной сети в контур управления.</p> <p>Проблемы применения искусственной нейронной сети при управлении.</p> <p>Понятие частичного и полного предиктора.</p> <p>Схема обобщенного инверсного обучения.</p> <p>Схема адаптивной системы управления с прямой и обратной инверсной моделями.</p> <p>Функциональная схема адаптивной системы управления с заградительным фильтром и моделью.</p>
<p>№23. Модели на базе нечеткой логики (порядок выполнения представлен в [3] раздела методических указаний)</p>	<p>Понятие функций принадлежности.</p> <p>Приведите пример правила для регулятора, решающего задачу стабилизации, на основе нечеткой логики и поясните его смысл.</p> <p>Что такое лингвистическая переменная?</p> <p>Какие правила нечеткого вывода вы знаете?</p> <p>Пример структуры регулятора на основе нечеткой логики для решения задачи стабилизации.</p>

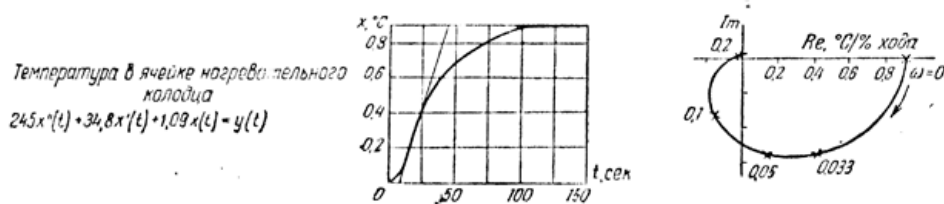
### Примеры вариантов заданий на самостоятельную работу

**Определение математической модели объекта управления и разработка системы автоматического управления с использованием типовых законов управления**

Вид математической модели и экспериментальные данные по переходной функции объекта выдаются преподавателем индивидуально каждому студенту. При выполнении работы рекомендуется придерживаться следующей последовательности его выполнения:

1. По заданной переходной функции объекта управления определить параметры математической модели первого и второго порядка.
2. Найти интегральное квадратичное отклонение переходных функций построенных по модели, от переходных функций объекта. Выбрать наилучшую модель.
3. По выбранной математической модели объекта построить его АФЧХ. Объект следует представить в виде последовательного соединения типовых звеньев.
4. Исходя из требования настройки на технический оптимум или симметричный оптимум, выбрать закон управления для каждого типа модели и рассчитать параметры настройки регулятора.
5. Выполнить моделирование переходных процессов при использовании регуляторов с найденными параметрами и сравнить качество переходных процессов с типовым.

### Образец задания на самостоятельную работу:



### Тема и содержание курсовой работы

Общая тема курсовой работы «Анализ и оптимизация системы автоматического регулирования частоты вращения вала двигателя постоянного тока». Конкретный вид функциональной схемы САР ЧВ ДПТ и параметры ее элементов задаются каждому студенту индивидуально. Курсовая работа подлежит публичной защите с представлением необходимой информации в виде пояснительной записки в объеме 35-40 страниц и графической информации на современных средствах отображения.

Работа представляется к защите в переплетенном виде и должна содержать: титульный лист; содержание; введение; теоретические сведения; основную часть, разбитую на разделы, параграфы и пункты; заключение; приложения.

Раздел «Теоретические сведения» должен содержать следующие пункты: частотные характеристики линейных звеньев и систем; определение и условие устойчивости САР; критерии устойчивости САР; оптимизация САР, настройка регуляторов; принцип работы САР в переходном и установившемся режимах; показатели качества САР в переходном и установившемся режимах.

Пояснительная записка работы должна быть краткой и содержательной.

Каждый раздел основной части записки (глава, параграф, пункт и т.д.) должен содержать цель и задачи, обоснование принимаемых решений и пояснения цели и последовательности проведения выкладок. Например, необходимо объяснить, почему для

оценки устойчивости используется тот или иной критерий. Кроме того, следует проводить анализ полученных результатов и кратко его излагать. В завершение в каждом разделе следует делать краткие выводы, из которых должна вытекать необходимость выполнения следующего раздела.

Приложение должно включать презентацию с изображением основных результатов работы: схемами, формулами, таблицами, графиками т.д.

Темы слайдов могут быть такими: исходные данные и исходная модель; оценка устойчивости и предварительная коррекция; оптимизация модели и оценка ее качества.

На слайдах следует изобразить окончательную схему оптимизированной САР и привести ее основные характеристики качества, в том числе переходную характеристику, на которой указать время регулирования и перерегулирование (здесь же для сравнения привести переходную характеристику объекта управления - ДПТ). Кроме того, привести и коэффициенты ошибок САР, характеризующие ее качество в переходном режиме.

### Пример варианта функциональной схемы САР ЧВ ДПТ

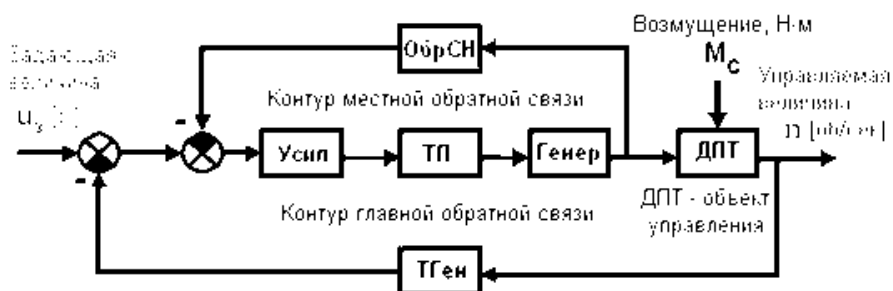


Рис. 1. Функциональная схема САР ЧВ ДПТ: У - усилитель; ТП - тиристорный преобразователь; Г - генератор; ДПТ - двигатель постоянного тока независимого возбуждения; ДПТ – объект управления, его выходная величина, частота вращения вала  $n$  должна соответствовать заданию;  $u_z$  - напряжение задания, в соответствии с которым должна изменяться частота  $n$  вращения вала ДПТ;  $M_c$  - возмущающий момент силы, приложенный к валу ДПТ от той машины, которую он приводит в действие

Приложение 2

**Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации по дисциплине «Теория автоматического управления»**

**а) Планируемые результаты обучения и оценочные средства для проведения промежуточной аттестации:**

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
<b>ПК-6 - способностью производить расчеты и проектирование отдельных блоков и устройств систем автоматизации и управления и выбирать стандартные средства автоматики, измерительной и вычислительной техники для проектирования систем автоматизации и управления в соответствии с техническим заданием</b>		
Знать	<ul style="list-style-type: none"> <li>– стандартные структуры систем управления и типовые законы управления технологическими параметрами объектов управления;</li> <li>– способы реализации типовых законов управления и способы коррекции систем с целью улучшения качества их работы;</li> <li>– методы нейросетевого управления и управления на основе нечеткой логики</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Что понимается под статической характеристикой элемента и как она определяется экспериментально?</li> <li>2. Что такое передаточный коэффициент линейного элемента?</li> <li>3. Какие Вы знаете статические характеристики у объекта управления и как их определить экспериментально?</li> <li>4. Дайте определение для передаточных коэффициентов <math>k_{oF}</math> и <math>k_{ou}</math>?</li> <li>5. Из каких элементов состоит статическая система управления и как следует эти элементы соединить между собой?</li> <li>6. Из каких элементов состоит астатическая система управления и как следует эти элементы соединить между собой?</li> <li>7. Чем следует руководствоваться при выборе вида регулятора и закона регулирования?</li> <li>8. Перечислите правила, по которым проводится подстройка параметров регулятора в окрестностях оптимального режима.</li> <li>9. Как вручную настроить регулятор, не имея никакой предварительной информации об области оптимальных значений параметров настройки регулятора?</li> <li>10. Перечислите основные особенности различного вида приводов.</li> <li>11. Укажите основные причины необходимости перенастройки средств регулирования.</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>12. Как найти коэффициент усиления в установившемся режиме по АЧХ?</p> <p>13. Что такое частотная характеристика?</p> <p>14. Что такое частота среза системы?</p> <p>15. Приведите пример вида амплитудных частотных характеристик типовых звеньев САУ.</p> <p>16. Что такое резонансная частота системы?</p> <p>17. Как получить выражения частотных характеристик по передаточной функции?</p> <p>18. Как экспериментально получить частотные характеристики?</p> <p>19. В чем отличие приведения к единице передаточной функции системы и амплитудной характеристики системы?</p> <p>20. Как сформировать регулятор в системе с прямым разомкнутым управлением?</p> <p>21. Выведите выражение для расчета параметров интегрального регулятора, управляющего инерционным объектом путем приведения к единице амплитудной характеристики замкнутой системы. Какие допущения при этом следует сделать?</p> <p>22. Запишите эталонное выражение разомкнутой системы, настроенной на технический оптимум.</p> <p>23. Запишите эталонное выражение разомкнутой системы, настроенной на симметричный оптимум.</p> <p>24. Приведите эталонный вид логарифмической амплитудной характеристики системы, настроенной на симметричный оптимум.</p> <p>25. Приведите пример объекта без самовыравнивания.</p> <p>26. Как обеспечить приведение передаточной функции системы к эталонному виду? Приведите пример.</p> <p>27. Как сформировать ступенчатое, линейное и параболическое входное воздействие?</p> <p>28. Как на модели реализовать систему с астатизмом нулевого порядка и как она обрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>29. Как на модели реализовать систему с астатизмом первого порядка и как она отрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p> <p>30. Как на модели реализовать систему с астатизмом второго порядка и как она отрабатывает ступенчатое, линейное и квадратичное входное воздействие?</p> <p>31. Выпишите формулу для расчёта установившейся ошибки. Как она зависит от передаточного коэффициента разомкнутой системы.</p> <p>32. Что такое характеристическое уравнение?</p> <p>33. Как расположены корни биномиального характеристического полинома?</p> <p>34. Как расположены корни характеристического полинома Баттерворта?</p> <p>35. Приведите примеры характеристических полиномов Ньютона и Баттерворта первого и второго порядков.</p> <p>36. Показатели качества систем с типовыми характеристическими полиномами.</p> <p>37. Как связаны нормированное и фактическое время переходного процесса?</p> <p>38. Что такое среднегеометрический корень характеристического полинома?</p> <p>39. Напишите передаточную функцию системы управления с отрицательной обратной связью, пропорциональным регулятором и моделью объекта из трех инерционных звеньев первого порядка.</p> <p>40. Выведите формулы для амплитудной и фазовой частотных характеристик разомкнутой системы с пропорциональным регулятором и инерционным объектом.</p> <p>41. Как по нормированной АФЧХ разомкнутой системы найти критический передаточный коэффициент.</p> <p>42. Сформулируйте частотный критерий устойчивости Найквиста и алгебраический критерий Гурвица.</p> <p>43. Как по передаточной функции разомкнутой системы найти характеристический многочлен замкнутой САУ?</p> <p>44. Что такое модель в пространстве состояний?</p> <p>45. Что такое нули и полюса передаточной функции?</p> <p>46. Перечислите этапы эксперимента.</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>47. Отличия пассивного и активного эксперимента.</p> <p>48. Укажите основные цели сэмпинга данных.</p> <p>49. Какие статистические оценки качества данных Вы знаете?</p> <p>50. Как оценить адекватность статистической модели?</p> <p>51. Как оценить воспроизводимость эксперимента?</p> <p>52. Укажите цели дисперсионного и корреляционного анализа.</p> <p>53. Перечислите принципы выбора типа статистической модели.</p> <p>54. Изобразите функции плотности распределения для основных законов распределения случайной величины.</p> <p>55. Приведите алгоритм генерации случайной величины по заданному закону распределения.</p> <p>56. Что такое спектральная плотность случайного процесса? Связь спектральной плотности с корреляционной функцией.</p> <p>57. Приведите примеры вида спектральной плотности для различных случайных процессов.</p> <p>58. Какими выражениями часто аппроксимируют спектральную плотность?</p> <p>59. Почему при аппроксимации спектральной плотности используют выражения, которые могут быть представлены как функции частоты или как функции комплексной переменной?</p> <p>60. Как связаны спектральная плотность на входе и выходе системы?</p> <p>61. Какова связь спектральной плотности с критериями качества управления?</p> <p>62. Что такое взаимная спектральная плотность и как она используется при синтезе систем управления?</p> <p>63. Приведите и поясните различные варианты взаимного расположения амплитудной характеристики и спектральных плотностей полезного сигнала и помехи.</p> <p>64. Какие можно выделить этапы при синтезе системы с заданной структурой с минимумом средней квадратической ошибкой?</p> <p>65. Как получить аналитическое выражение для интеграла спектральной</p>

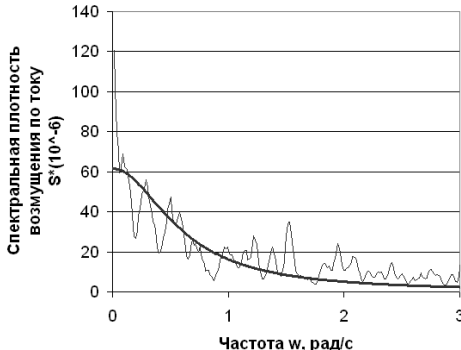
Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>плотности случайного процесса?</p> <p>66. Приведите пример выражения для расчета интеграла от дробно-рациональной четной функции.</p> <p>67. Изобразите характеристики нелинейных элементов типа люфт и упор.</p> <p>68. Изобразите характеристики релейных нелинейных элементов.</p> <p>69. Какие нелинейные элементы обычно используют при моделировании системы управления с интегрирующим исполнительным устройством постоянной скорости?</p> <p>70. Каково назначение зоны нечувствительности?</p> <p>71. Запишите формулы для расчета выхода двухпозиционного релейного элемента с гистерезисом.</p> <p>72. Каково назначение гистерезиса?</p> <p>73. Дать определение фазовой плоскости и фазовой траектории.</p> <p>74. Какой вид имеют фазовые траектории релейной системы второго порядка с передаточной функцией линейной части <math>H_{лч}(p) = \frac{1}{p(p+1)}</math>?</p> <p>75. Какой вид имеют фазовые портреты САУ, имеющие в качестве нелинейного элемента: а) идеальное реле; б) реле с зоной нечувствительности; в) реле с гистерезисной статической характеристикой</p> <p>76. В чем преимущества и недостатки метода исследования релейной системы на фазовой плоскости по сравнению с численным моделированием во времени с использованием математических пакетов?</p> <p>77. Дать определение статической характеристики релейного элемента и методики её определения.</p> <p>78. Дать определение эквивалентного комплексного передаточного коэффициента нелинейного элемента. Чему равна его амплитуда и фаза.</p> <p>79. Привести формулы для расчёта АФХ линейной части системы и амплитудной характеристики нелинейного элемента.</p> <p>80. Как графически решается уравнение гармонического баланса методом</p>

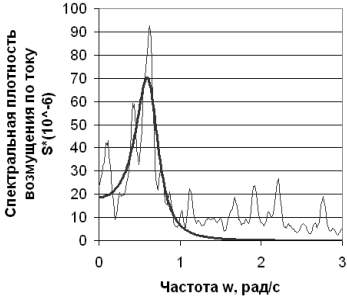
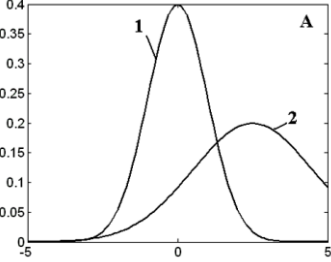


Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<p>Гольдфарба?</p> <p>81. Как определить точку устойчивых периодических колебаний?</p> <p>82. Дайте определение D и Z преобразованиям.</p> <p>83. Что такое линейное разностное уравнение?</p> <p>84. Что такое оператор сдвига?</p> <p>85. Что такое дискретная передаточная функция?</p> <p>86. Правила замены при интегрировании по методам Эйлера и обратных разностей.</p> <p>87. Как определить передаточную функцию разомкнутой импульсной системы по известной передаточной функции приведённой линейной части?</p> <p>88. Как определить передаточную функцию замкнутой импульсной системы?</p> <p>89. Как связаны передаточная функция и разностное уравнение?</p> <p>90. Эквивалентная схема амплитудно-импульсного элемента.</p> <p>91. Структурные схемы идентификации.</p> <p>92. Способы интеграции искусственной нейронной сети в контур управления.</p> <p>93. Проблемы применения искусственной нейронной сети при управлении.</p> <p>94. Понятие частичного и полного предиктора.</p> <p>95. Схема обобщенного инверсного обучения.</p> <p>96. Схема адаптивной системы управления с прямой и обратной инверсной моделями.</p> <p>97. Функциональная схема адаптивной системы управления с заградительным фильтром и моделью.</p> <p>98. Понятие функций принадлежности.</p> <p>99. Приведите пример правила для регулятора, решающего задачу стабилизации, на основе нечеткой логики и поясните его смысл.</p> <p>100. Что такое лингвистическая переменная?</p> <p>101. Какие правила нечеткого вывода вы знаете?</p> <p>102. Пример структуры регулятора на основе нечеткой логики для решения задачи стабилизации.</p>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
Уметь	<ul style="list-style-type: none"> <li>– составлять структурные схемы систем управления; рассчитывать систему управления на устойчивость и определять качество её работы;</li> <li>– рассчитывать нелинейные и дискретные системы управления;</li> <li>– построить оптимальный алгоритм управления объектом и составить структурную схему для её технической реализации;</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Каково минимальное значение общего коэффициента усиления системы, чтобы относительное значение ошибки регулирования относительно задания не превышало 5%?</li> <li>2. На входе системы с астатизмом первого порядка и добротностью по скорости <math>K = 2</math> действует линейно-нарастающее воздействие <math>g(t) = bt</math>. Определить величину установившейся ошибки.</li> <li>3. Устойчива ли система с характеристическим уравнением <math>4s^2 + 8s - 1</math>?</li> <li>4. Какой вид будет иметь результирующая передаточная функция при последовательном соединении двух звеньев с передаточными функциями <math>H_1(s) = 1/(2s+1)</math> и <math>H_2(s) = s+1</math>?</li> <li>5. Передаточная функция разомкнутой системы <math>W_p = s^2</math>. Найдите передаточную функцию по ошибке для замкнутой системы с отрицательной обратной связью.</li> <li>6. Составьте структурную схему модели системы управления инерционным объектом с использованием ПИ-регулятора и исполнительного механизма постоянной скорости.</li> <li>7. Рассчитайте параметры переходного режима на фазовой плоскости при управлении объектом с передаточной функцией <math>1/(p*(p+1))</math> с использованием идеального реле. Параметры реле и начальное состояние процесса принять произвольно.</li> <li>8. Оцените устойчивость дискретной системы с характеристическим полиномом <math>z^2+2z+1</math>.</li> <li>9. Для объекта с передаточной функцией <math>1/((2p+1)*(5p+1))</math> выберите оптимальный регулятор с позиции настройки на технический оптимум и составьте структурную схему для реализации регулятора в математическом редакторе.</li> <li>10. На входе интегрального регулятора с передаточной функцией <math>1 / (T_i s)</math> действует постоянный сигнал <math>g = 1</math>. Выход регулятора в начальный момент времени равен нулю. <math>T_i = 2</math>. Определить значение выхода регулятора через две</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		секунды.
Владеть	<ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками проектирования системы управления;</li> <li>– методологическими основами теории автоматического управления для математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования технических систем;</li> </ul>	Отчеты по лабораторным и практическим работам №1-23.
<b>ПК-2 - способностью проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных средств с целью получения математических моделей процессов и объектов автоматизации и управления</b>		
Знать	<ul style="list-style-type: none"> <li>– инженерные методы определения математической модели объекта управления с применением математических программных пакетов;</li> <li>– методы определения параметров математической модели объекта по экспериментальной переходной функции с применением математических программных пакетов;</li> <li>– методы определения параметров математической модели объекта при воздействии на объект случайного сигнала с применением математических программных</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Как получить краткую справку по какой либо команде MATLAB?</li> <li>2. В чем разница между командами MATLAB who и whos, clear all и clc?</li> <li>3. Как скопировать график из окна MATLAB в другую программу?</li> <li>4. Какие возможности предоставляет модуль LTIViewer?</li> <li>5. Как ввести передаточную функцию в MATLAB?</li> <li>6. Что понимается под переходной функцией, типы переходных функций, их экспериментальное определение и построение с применением математических программных пакетов.</li> <li>7. Как определить параметра k,T передаточной функции инерционного звена по переходной функции в среде VisSim?</li> <li>8. Какие блоки VisSim и Matlab обычно используются при моделировании разомкнутой и замкнутой системы для заданной структуры системы?</li> <li>9. Как понизить дискретность данных в excel?</li> <li>10. Как реализовать модель авторегрессии в среде VisSim?</li> <li>11. Как реализовать модель системы управления в среде VisSim?</li> <li>12. Как настроить параметры передаточной функции элемента в среде VisSim?</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
	пакетов;	13. Как реализовать дифференцирующее звено в среде VisSim? 14. Как структурировать модель системы управления в среде VisSim?
Уметь	<ul style="list-style-type: none"> <li>– реализовать структуру и параметры математической модели объекта с применением математических программных пакетов;</li> <li>– реализовать математические модели возмущающих воздействий с применением математических программных пакетов;</li> <li>– анализировать модель системы управления с применением математических программных пакетов;</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Реализуйте дифференцирующее звено в VisSim.</li> <li>2. В среде VisSim реализуйте систему управления с двумя степенями свободы.</li> <li>3. Аппроксимируйте заданную экспериментальную спектральную плотность зависимостью <math>S(\omega) = \frac{2DT}{1 + \omega^2 T^2}</math> в среде excel.</li> </ol> <div style="text-align: center;">  </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. С использованием среды VisSim оцените влияние параметров настройки регулятора на среднее значение квадрата ошибки регулирования в заданном контуре управления.</li> <li>5. Постройте амплитудную характеристику инерционного звена первого порядка в среде Matlab.</li> <li>6. Найдите корни заданного характеристического уравнения в среде Matlab.</li> <li>7. Для системы с отрицательной обратной связью, интегральным регулятором и инерционным объектом выведите общую передаточную функцию системы. Реализуйте обе структуры моделей системы в Matlab и сравните их переходные характеристики.</li> </ol>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		8. Реализуйте модель исполнительного механизма постоянной скорости в среде Matlab с применением типовых динамических и нелинейных звеньев.
Владеть	<ul style="list-style-type: none"> <li>– специализированными системами компьютерной математики для расчёта систем управления;</li> <li>– навыками настройки моделей с применением систем компьютерной математики.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Реализовать модель авторегрессии в среде Excel с заданными параметрами <math>AR1 = 0,9</math>; <math>AR2 = 0,5</math>.</li> <li>2. Выполните моделирование работы системы управления с интегральным регулятором и передаточной функцией объекта <math>H(s)=1/(2s+1)</math> при действии возмущений в форме белого шума по каналу управления в среде VisSim.</li> <li>3. Аппроксимируйте заданную экспериментальную спектральную плотность наиболее подходящей зависимостью в среде excel.</li> </ol> <div style="text-align: center;">  </div> <ol style="list-style-type: none"> <li>4. Выполните моделирование реализации случайной величины с заданным законом распределения в среде excel.</li> </ol> <div style="text-align: center;">  </div>

Структурный элемент компетенции	Планируемые результаты обучения	Оценочные средства
		<ol style="list-style-type: none"><li data-bbox="972 395 2007 539">5. В среде VisSim выполните ручную настройку ПИД регулятора одним из типовых методов. Объектом является последовательное соединение инерционного звена с постоянной времени 5с и звена запаздывания с постоянной времени 2с.</li><li data-bbox="972 544 2040 612">6. С применением VisSim настройте модель объекта по заданной переходной характеристике.</li></ol>

### **б) Порядок проведения промежуточной аттестации, показатели и критерии оценивания:**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория автоматического управления» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме экзамена и в форме выполнения и защиты курсовой работы.

Экзамен по данной дисциплине проводится в устной форме по экзаменационным билетам, каждый из которых включает 2 теоретических вопроса и практические задания.

#### **Показатели и критерии оценивания экзамена:**

– на оценку **«отлично»** (5 баллов) – обучающийся демонстрирует высокий уровень сформированности компетенций, всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, свободно выполняет практические задания, свободно оперирует знаниями, умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.

– на оценку **«хорошо»** (4 балла) – обучающийся демонстрирует средний уровень сформированности компетенций: основные знания, умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.

– на оценку **«удовлетворительно»** (3 балла) – обучающийся демонстрирует пороговый уровень сформированности компетенций: в ходе контрольных мероприятий допускаются ошибки, проявляется отсутствие отдельных знаний, умений, навыков, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (2 балла) – обучающийся демонстрирует знания не более 20% теоретического материала, допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (1 балл) – обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

#### **Показатели и критерии оценивания курсовой работы:**

– на оценку **«отлично»** (5 баллов) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает высокий уровень знаний не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и интеллектуальные навыки решения проблем и задач, нахождения уникальных ответов к проблемам, оценки и вынесения критических суждений;

– на оценку **«хорошо»** (4 балла) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает знания не только на уровне воспроизведения и объяснения информации, но и интеллектуальные навыки решения проблем и задач, нахождения уникальных ответов к проблемам;

– на оценку **«удовлетворительно»** (3 балла) – работа выполнена в соответствии с заданием, обучающийся показывает знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, интеллектуальные навыки решения простых задач;

– на оценку **«неудовлетворительно»** (2 балла) – задание преподавателя выполнено частично, в процессе защиты работы обучающийся допускает существенные ошибки, не может показать интеллектуальные навыки решения поставленной задачи.

– на оценку **«неудовлетворительно»** (1 балл) – задание преподавателя выполнено частично, обучающийся не может воспроизвести и объяснить содержание, не может показать интеллектуальные навыки решения поставленной задачи.



## Приложение 3

### Методические указания к выполнению лабораторных и практических работ

#### Работа №1. Применение системы компьютерной математики MATLAB для расчета линейных систем управления


**Порядок выполнения:** необходимо реализовать примеры, приведенные ниже.

##### 1. Введение

Simulink является приложением к пакету MATLAB и предназначен для моделирования линейных и нелинейных, дискретных и непрерывных систем которые могут работать как в режиме вычисления так и в режиме реального времени. В Simulink реализован принцип визуального программирования в соответствии с которым вся модель строится из стандартных библиотечных блоков и блоков модернизированных или разработанных пользователем. Каждый блок реализует свою математическую функцию. Блоки имеют входы и выходы и соединяются в модели линиями связи по которым аргументы поступают на вход функций.

Кроме секций с типовыми блоками библиотека Simulink имеет дополнительные разделы с блоками для разных областей применения, например, для моделирования электро-механических устройств, каналов передачи данных, и т.д.

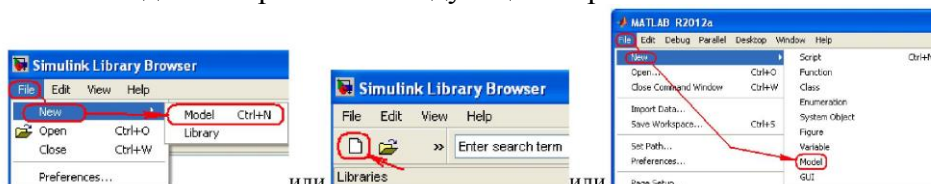
Многие функции (команды m-файлов) и инструменты MATLAB могут использоваться в среде Simulink.

Для запуска Simulink необходимо предварительно запустить MATLAB, а затем нажать на кнопку  или ввести в командной строке Simulink.

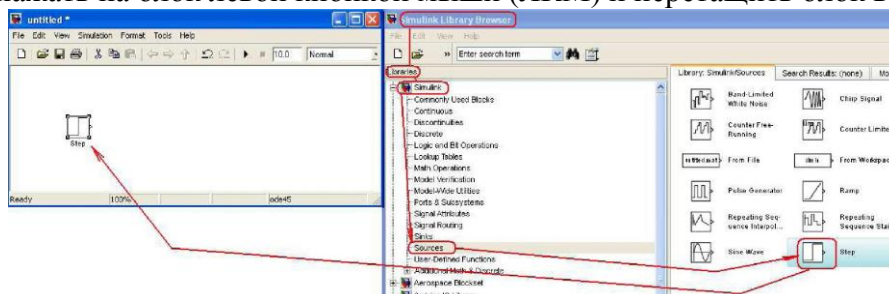
Для создания новой модели необходимо:

- открыть окно модели;
- перенести в окно необходимые блоки из Simulink библиотеки;
- соединить блоки линиями связи.

Окно новой модели открывается следующим образом:

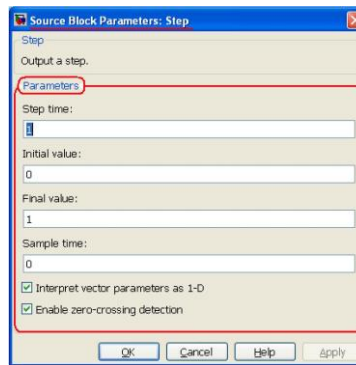


Для переноса в окно модели необходимого блока необходимо найти блок в библиотеке нажать на блок левой кнопкой мыши (ЛКМ) и перетащить блок в окно модели:



Чтобы скопировать блок (или выделенные блоки) надо перетащить его при нажатой правой кнопке мыши (ПКМ).

Для изменения параметров блока надо дважды щелкнуть на блоке и в открывшемся диалоговом окне изменить соответствующие параметры, например, параметры блока Step:



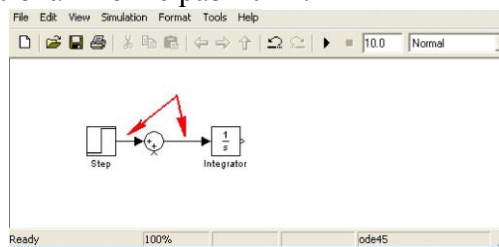
С выделенными блоками можно выполнять следующие действия:

- изменить положение и размеры блока,
- изменить цвет контура и самого блока,
- изменить ориентацию блока,
- выровнять положение блоков,
- создать из нескольких блоков подгруппу (subsystem) которая отображается одним блоком.

*Примечание: Команды для работы с блоками находятся в разделе меню > Format окна модели*

Для соединения блоков можно протянуть мышкой линию связи между нужными выходом (входом) и входом (выходом) или щелкнуть ЛКМ по блоку с нужным выходом, затем нажать на клавишу клавиатуры **Ctrl** и щелкнуть ЛКМ по блоку с нужным входом.

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Для создания второй линии, следует нажать ПКМ на точку предполагаемой развилки и протащить линию ко второму блоку или ЛКМ протянуть линию от входа нужного блока к точке развилки.



Для выделения объекта модели (блока или соединительной линии) надо щелкнуть по нему ЛКМ. Для удаления объекта или группы необходимо сначала их выделить щелчком или оконтуриванием, а затем удалить командой **Delete** - связанной с объектом или группой объектов.

Пользователь может подобрать оптимальные для конкретной модели численные методы и шаг интегрирования:

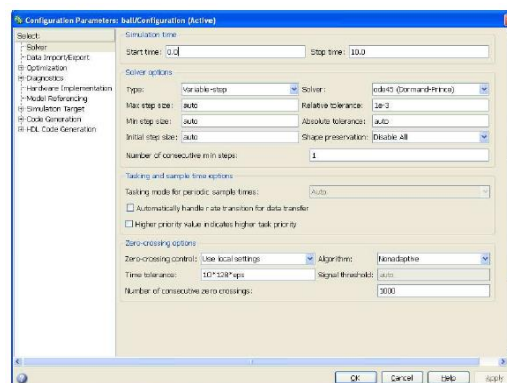


Рис. 1. Окно выбора параметров моделирования: шага интегрирования, метода моделирования, допусков и т.д. Путь: меню модели > Simulation > Configuration Parameters (Ctrl+E) > Solver.

Входные сигналы (раздел библиотеки Sources) и переменные состояния модели можно наблюдать в процессе моделирования при помощи блоков раздела (Sinks). Например, блок Scope в зависимости от его настроек показывает графики изменения входных сигналов как в одном окне, так и в нескольких, отображая заданное число точек. Масштабы графиков можно изменять, а их данные - сохранять в рабочей области MATLAB (workspace).

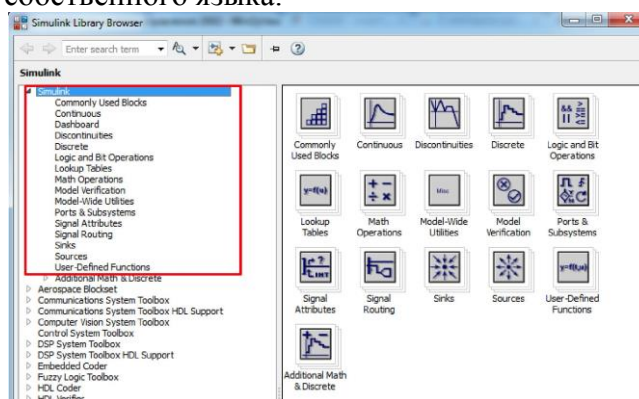
Время моделирования задается в окне



Для установки бесконечного времени моделирования в соответствующее окно необходимо ввести значение `inf`.

Для запуска моделирования необходимо щелкнуть по кнопке **Start simulation** на панели инструментов окна модели.

Интересующая нас библиотека – библиотека элементов Simulink, рис.2. Она включает в себя все необходимые для исследования систем средства. Многие дополнительные надстройки к Simulink построены на основе этой библиотеки и встроенного в MATLAB собственного языка.



Библиотека Simulink состоит из следующих разделов:

*Common User Blocks* – включает наиболее часто используемые блоки

*Continuous* – содержит блоки, используемые для аналоговых преобразований над сигналами: производная, интеграл, передаточная функция и другие.

*Dashboard* – может отсутствовать в ранних версиях, содержит блоки приборных панелей.

*Discontinuities* – различные нелинейные блоки, позволяющие моделировать зоны нечувствительности, петли гистерезиса, блоки насыщения и другие.

*Discrete* – содержит аналогичный разделу Continuous набор блоков, но в отличие от первого, служит для описания дискретных систем. Содержит полезный блок «Memory», позволяющий задерживать дискретный сигнал на один такт.

*Logic and Bit Operation* – набор логических операторов и отношений.

*Lookup Table* – блоки, позволяющие задать функцию в виде n-мерной таблицы.

*Math Operations* – разнообразные математические функции.

*Model Verifications* – блоки для проверки параметров модели: проверка на то, что сигнал не ноль, определение динамического диапазона сигнала, на соответствие частотным и временным областям и другие.

*Model-Wide Utilities* – библиотека дополнительных утилит: описание модели, информация о типе данных, используемых блоками и т.п.

*Ports and Subsystems* – блоки подсистем и портов, служащие для объединения некоторого количества блоков в подсистему.

*Signal Attributes* – работа с атрибутами сигналов, преобразование сигналов, вывод из совокупности сигналов вектора и т.п.

*Signal Routing* – управление движением сигнала: объединение группы сигналов в шину, слияние, определение пути прохождения сигналов и прочие.

*Sinks* – блоки вывода данных. Позволяют вывести численное значение сигнала на

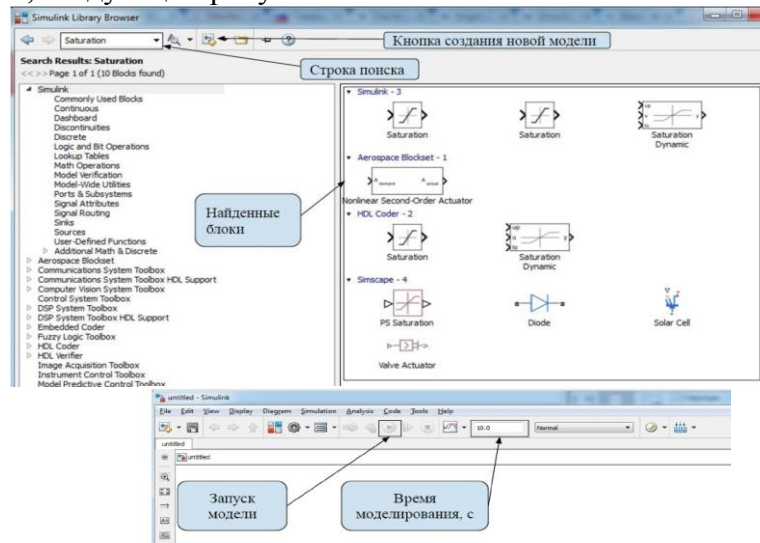
экран, в рабочую область (Workspace), файл, а также визуализировать изменение сигнала в виде графика от времени и двумерного графика.

*Sources* – источники сигналов: шаговый сигнал, константный, линейный, секундомер, случайное число, белый шум и прочее.

*User-Defined Functions* – функции, определяемые пользователем. С помощью этого раздела, к примеру, можно создать пользовательские функции, написанные на С-подобном языке.

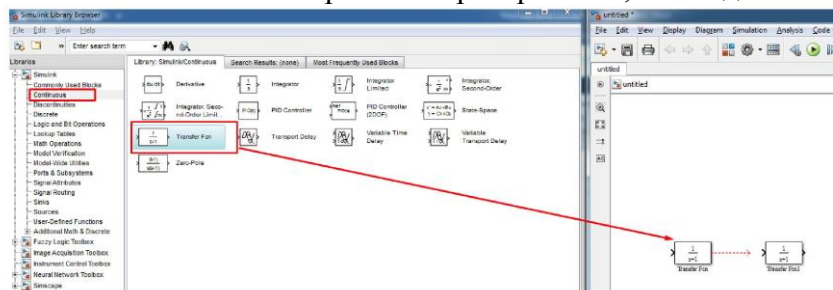
Какие-то из блоков или разделов могут отсутствовать в ранних версиях MATLAB Simulink, некоторые блоки могут находиться в других, близких по смыслу разделах.

Найти любой блок можно, используя строку поиска, рисунок ниже. На этом же рисунке указана кнопка, нажатие которой приводит к созданию нового рабочего листа MATLAB Simulink, следующий рисунок.

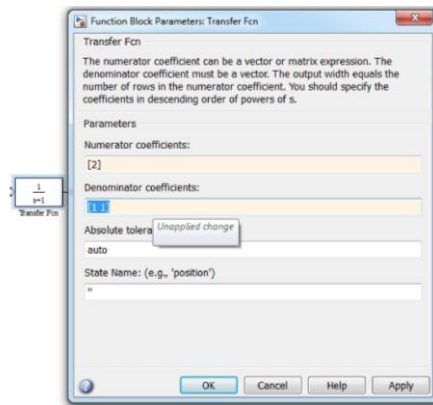


Рабочая область имеет стандартное для ОС Windows выпадающее меню и интуитивно понятный набор основных кнопок. Ранние версии MATLAB Simulink отличаются от представленной здесь в сторону уменьшения функциональных кнопок рабочей области, но основные элементы управления присутствуют в любой версии. Необходимо помнить, что разделителем целой и дробной части числа в MATLAB является точка.

В системе MATLAB Simulink для составления моделей систем, используется операторная форма записи. Наиболее часто используемый блок – передаточная функция (Transfer function), находящаяся в разделе Continuous. С помощью мыши перетащите два блока Transfer Fcn из библиотеки в рабочее пространство, не соединяя их.



Для того, чтобы настроить блок, дважды щёлкните по нему левой кнопкой мыши.



Поле Numerator coefficients содержит коэффициенты числителя, Denominator coefficients - знаменателя. В MATLAB принята такая система записи коэффициентов:

- степень полинома равна количеству коэффициентов минус один, т.е. для полинома первой степени один коэффициент, второй степени - два и так далее;
- коэффициенты записываются через пробел;
- дробная часть коэффициента записывается после точки (**0.1**, к примеру).

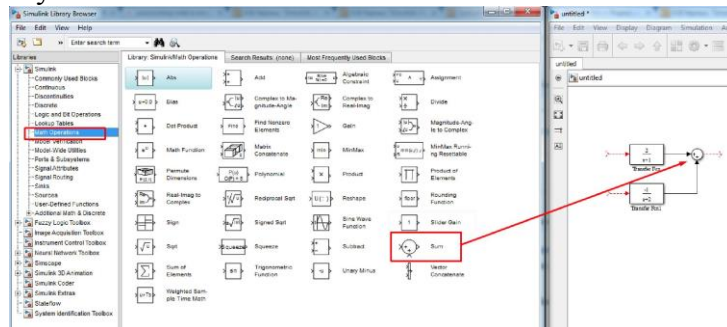
Последний пункт применим ко всей системе MATLAB - дробная часть отделяется от целой части точкой.

Absolute tolerance - абсолютная погрешность. Здесь и далее оставляем это значение без изменений, как и другие настройки, если не указано иное.

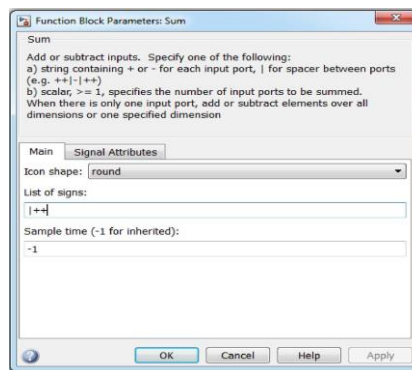
Кнопка «ОК» применяет изменения и закрывает окно настройки. Настройте самостоятельно второй блок. Согласно примеру, должны получиться передаточные функции вида:

$$\frac{2}{s+1} \text{ и } \frac{1}{s+2}$$

Как мы помним из курса ТАУ, блоки могут либо соединяться последовательно, либо параллельно. В первом случае речь идёт об умножении передаточных функций, во втором - об их сложении. Для сложения необходимо использовать сумматор (Math Operations -> Sum). Пример на рисунке ниже.



Двойной щелчок на блоке сумматора в рабочем пространстве открывает его диалоговое окно настройки.

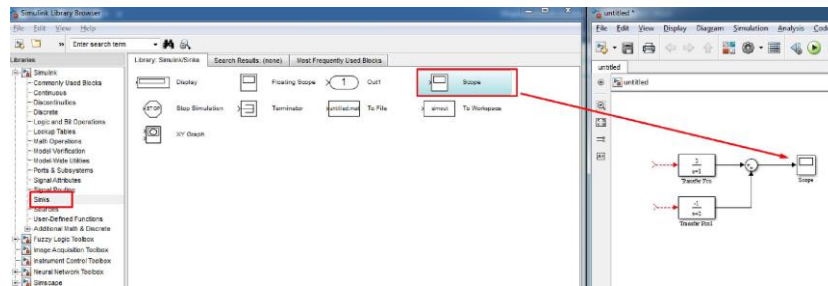


В List of signs после символа прямой черты («|») могут быть записаны знаки «+» и «-». Количество этих знаков соответствует количеству входов сумматора, знак - типу входа:

суммирующий или вычитающий.

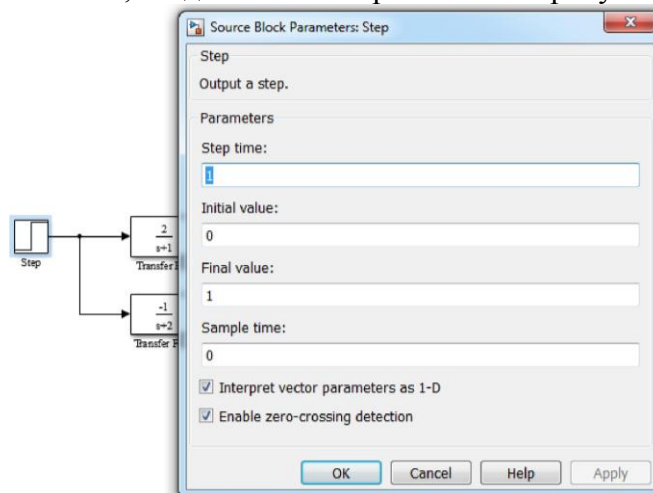
Настройте блок таким образом, чтобы он был суммирующим.

Для снятия характеристик, протекающих во времени, отлично подходит блок Scope из раздела Sinks.



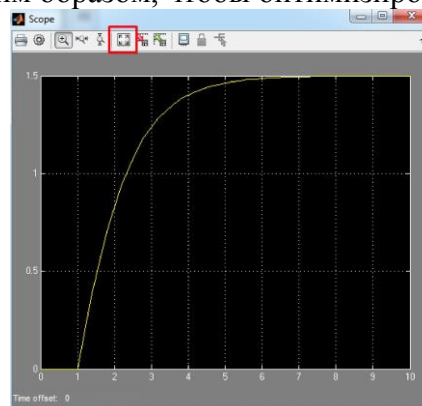
Поставленный на выход сумматора он будет считывать значения сигнала и рисовать график от времени. Двойной клик на этот блок откроет график.

Для того, чтобы снять переходную характеристику, необходимо на вход подать ступенчатое воздействие. Для этого служит блок Step в разделе Sources. Перенесите его из библиотеки в рабочую область, соедините и настройте как на рисунке.

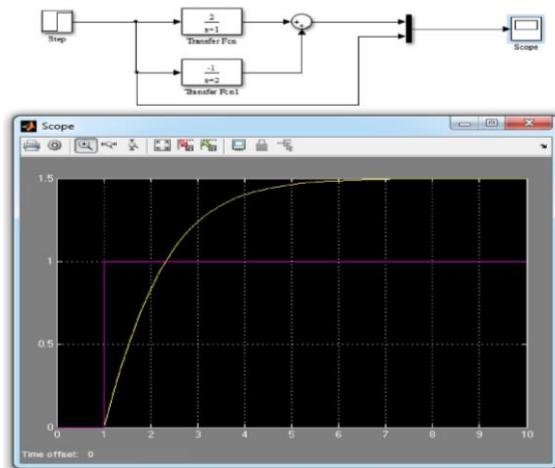


Параметр Step time показывает время начала шага в секундах. Initial value и Final value – начальные и конечные значения.

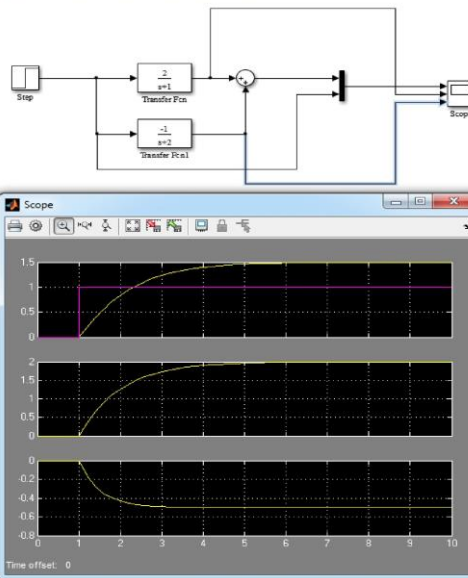
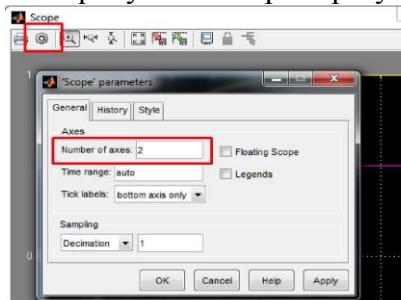
Запустите модель кнопкой запуска модели, после чего дважды нажмите на блок Scope, чтобы увидеть переходную характеристику. Пиктограмма растягивания (рисунок) автоматически подгонит оси таким образом, чтобы оптимизировать отображение графика.



Будет полезным отобразить на графике так же показания других блоков. Для этого можно использовать один из двух способов. Первый способ следует использовать, если планируется выводить несколько данных на один и тот же график. Сигналы объединяются с помощью смесителя (Signal Routing -> Mux). Окно настройки этого элемента содержит количество входных сигналов. По умолчанию оно равно двум. Соедините, как показано на рисунке и посмотрите результат в Scope.

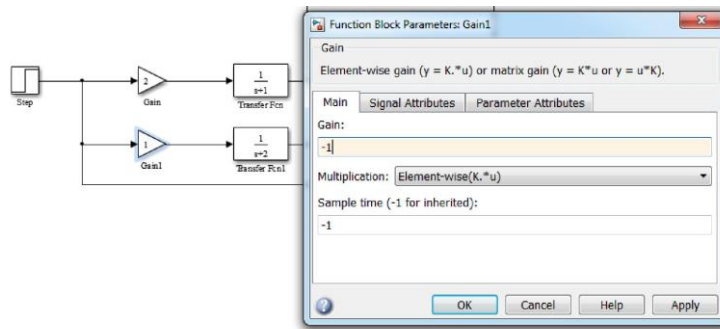


Второй метод применим, когда необходимо в один блок Scope вывести значения на разных графиках. Применяется, если отображаемые сигналы имеют сильно различающиеся значения. Нажатие шестерёнки в окне Scope приведёт к открытию окна параметров. Во вкладке General необходимо задать желаемый Number of axes. Впишите число 3 и примените изменения. После применения блок Scope будет содержать три входа. Подключите, как показано на рисунке и сверьте результат.

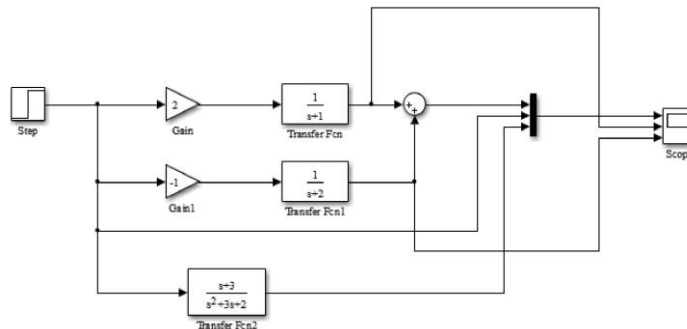


В параметрах во вкладке History можно задать максимальное количество точек, которые будут «запомнены» блоком, а также направить вывод результатов в рабочее пространство MATLAB в переменную, из которой, к примеру, можно передать значения в Excel или текстовый файл.

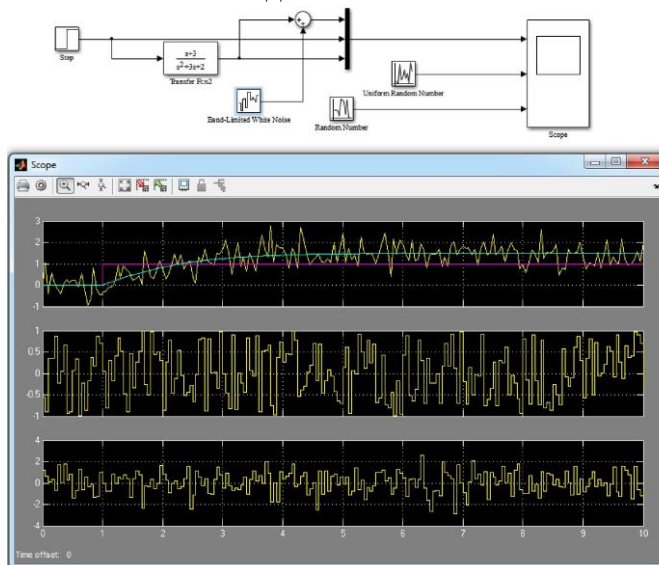
В MATLAB существует блок, моделирующий множитель (Math Operations -> Gain). Преобразуйте схему так, чтобы числитель задавался с помощью блока Gain (это возможно, т.к. числитель – число), а числители передаточной функции были равны нулю. Проверьте, что на результат моделирование это не повлияло.



Блок Transfer Fcn позволяет задавать передаточную функцию различных порядков. Поместите в рабочее пространство третью передаточную функцию и настройте её, как показано на рисунке ниже.

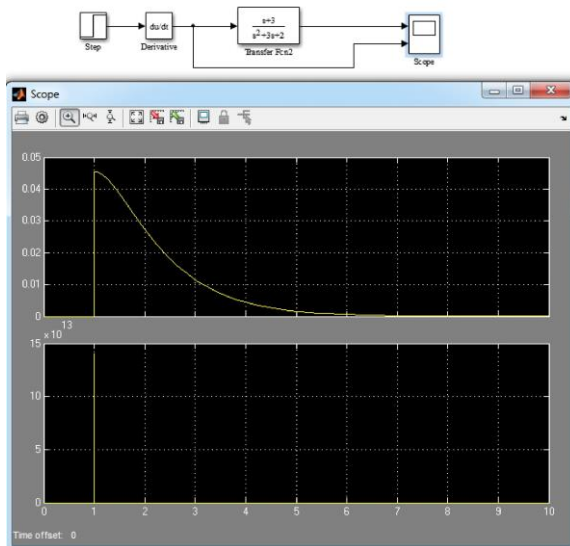


Часто для проверки модели или устойчивости системы управления к случайным возмущениям в систему вводят белый шум (блок Band-Limited White Noise находится в Sources) или случайные сигналы, распределённые равномерно или по нормальному закону (Uniform Random Number и Random Number соответственно). Параметры блока белого шума содержат значения мощности шума (Noise power), времени моделирования (Sample Time) и числа, необходимого для генерации белого шума (Seed). Блок равномерного распределения содержит такие настройки, как максимальный и минимальный уровень сигнала и начальное значение. Блок нормального распределения содержит настройки среднего значения (Mean), дисперсии (Variance) и начального значения (Initial seed). В качестве самостоятельной внеаудиторной работы рекомендуется изучить особенности настроек этих блоков и их влияние на выходной сигнал.



Снятие весовой функции происходит при подаче на вход импульсного сигнала «нулево» длительности (функция Дирака или дельта-функция). Реализовать её проще всего, поставив между выходом шаговой функции и входом передаточной функции блока дифференцирования (Continuous > Derivative).



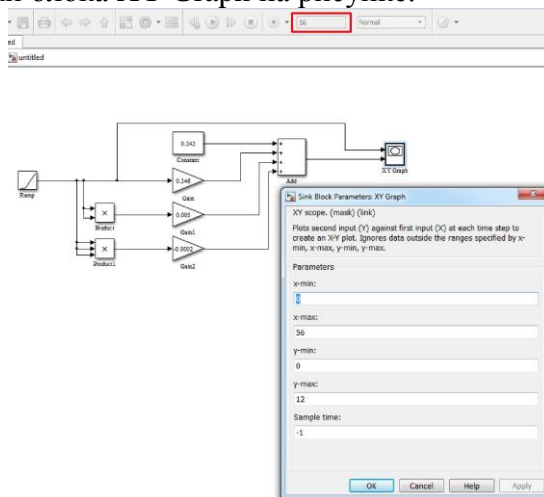


Раздел Math Operations может быть полезен при составлении статических характеристик объекта управления. В качестве примера рассмотрим моделирование статических характеристик энергетического режима дугового сталеплавильного агрегата. Пусть на определённой ступени напряжения печного трансформатора полиномиальная функция статической характеристики выглядит следующим образом:

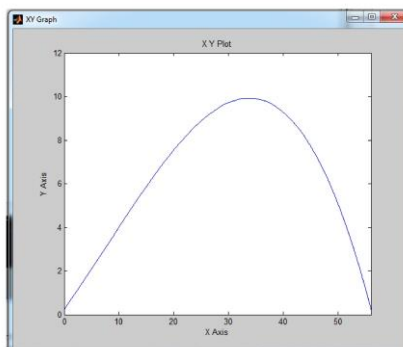
$$Y(x) = 0,242 + 0,346x + 0,005x^2 - 0,0002x^3$$

Используя в качестве источника входного сигнала Ramp с настройками по умолчанию составим схему на основе алгебраического уравнения, время моделирования указываем равным 56 секундам.

График будем использовать от двух переменных с помощью блока XY Graph. По оси абсцисс – выход Ramp (ток, кА), по оси ординат – значение функции (активная мощность, МВт). Вид схемы и настройки блока XY Graph на рисунке.

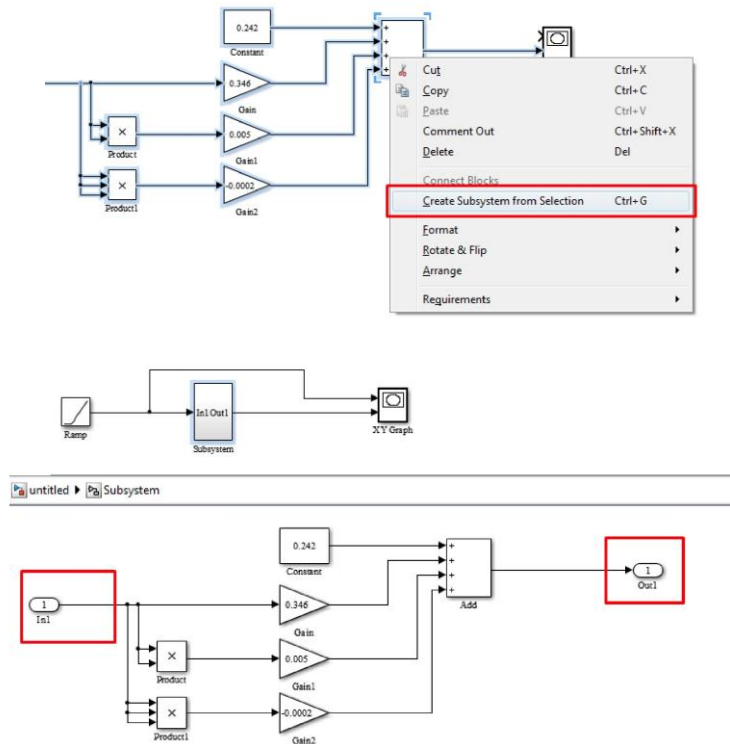


В итоге должен получиться следующий график:

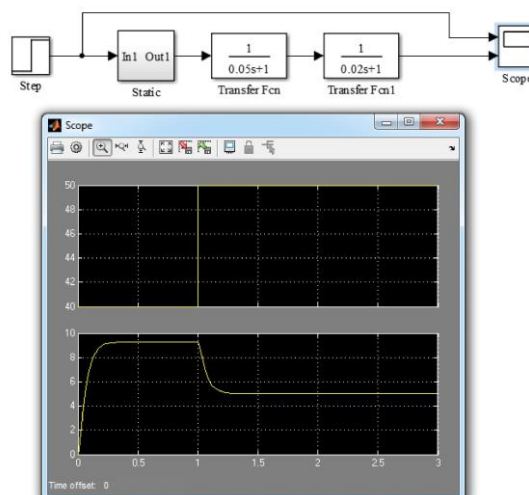


Для удобства чтения моделей Simulink полезно объединять часть блоков в подсистемы. Для этого необходимое количество блоков выделяют, вызывают контекстное меню и выбирают Create Subsystem from Selection.

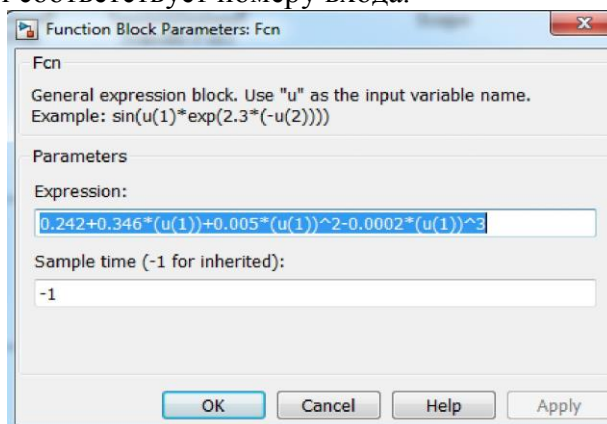
Для того, чтобы посмотреть содержимое подсистемы, необходимо дважды кликнуть на неё мышью. Внутри подсистемы появляются порты входа и выхода по количеству входных и выходных сигналов.



Теперь, имея представление о моделировании динамических и статических характеристиках моделей систем управления, создадим модель объекта управления, обладающую этими свойствами. Для этого на вход созданного блока подадим шаговый сигнал, а в качестве выхода поставим два инерционных звена, эмулируемых передаточными функциями. Таким образом получим инерционное звено второго порядка. Настройки передаточных функций на рисунке, настройки шагового сигнала: начальное значение – 40, конечное значение – 50, время шага – 1.



Вместо использования математических операторов для моделирования статической характеристики может быть целесообразнее использовать блок Fcn из раздела User-Defined Function. В нём записывается правая часть функции. В качестве входных переменных используются  $u(i)$ , где  $i$  соответствует номеру входа.



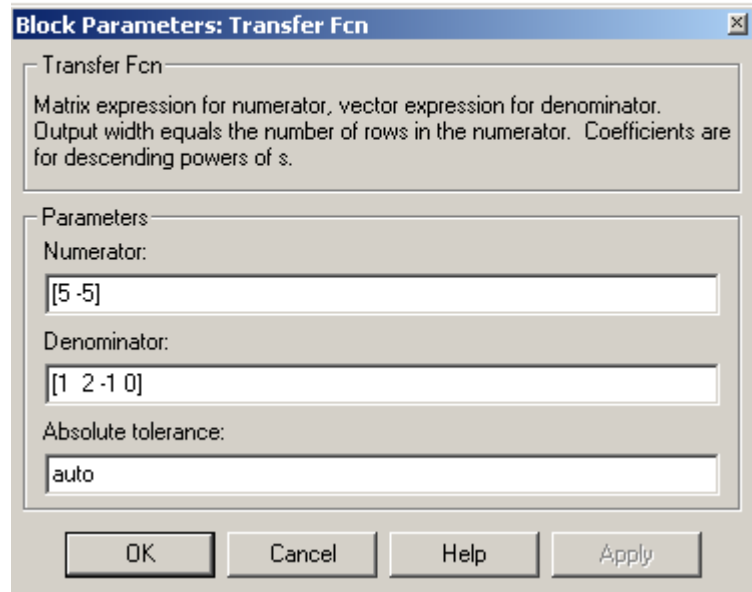
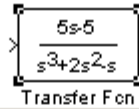
### Библиотека модулей

Для выполнения работ по курсу ТАУ не нужно знать все динамические блоки, которые имеются в библиотеки. Необходимые для работы блоки приведены в табл.

Таблица

Сборный перечень блоков, используемых в лабораторном практикуме

Название элемента	Раздел библиотеки	Настраиваемые параметры
Step - генератор ступенчатого сигнала	Sources	Step time – время появления скачка, Final value – конечное значение воздействия
Ground - заземление	Sources	-
Ramp – источник линейно нарастающего воздействия	Sources	Slope – угловой коэффициент, Initial value – начальный уровень воздействия
Constant – источник постоянного воздействия	Sources	Constant value - постоянный сигнал
Scope – виртуальный осциллограф	Sinks	Указаны отдельно
Display – дисплей	Sinks	-
XYGraph - графопостроитель	Sinks	x-min, x-max, y-min, y-max
Gain – усилитель	Math	Gain – передаточный коэффициент
Math Function – набор элементарных функций	Math	Выбор конкретной функции
Sum – суммирующий элемент	Math	+++--- предписание на суммирование или вычитание соответствующего входного сигнала
Transfer Fcn – Элемент с заданной передаточной функцией	Continuous	Numerator - коэффициенты числителя, Denominator - коэффициенты знаменателя передаточной функции
Integrator - интегратор	Continuous	-



Задание параметров блока Transfer Fcn

Блок линейного динамического звена *Transfer Fcn* позволяет создать элемент с передаточной функцией  $H(s)=y(s)/u(s)$  в виде отношения полиномов заданной степени. Вид блока после задания его параметров представлен на рис. 13. Блок имеет два параметра – вектор коэффициентов полинома числителя Numerator и знаменателя Denominator. Они задают вид выражения  $H(s)$ , которое и появляется внутри блока.

## Работа №2. Статические характеристики элементов и систем автоматического управления

**Исходные данные:** структура системы автоматического управления согласно варианту.

### Варианты структурных схем системы управления

№	Схема	Параметры объекта
1		$T = 10$
2		$T = 15$
3		$T = 25$

4		$T_1 = 10$ $T_2 = 15$
5		$T = 10$
6		$T_1 = 20$ $T_2 = 15$
7		$T_1 = 10$ $T_2 = 20$
8		$T = 30$
9		$T = 15$
10		$T_1 = 5$ $T_2 = 15$
11		$T = 40$
12		$T_1 = 10$ $T_2 = 25$
13		$T_1 = 20$ $T_2 = 5$

14		$T = 30$
15		$T_1 = 5$ $T_2 = 15$
16		$T_1 = 30$ $T_2 = 15$

### Порядок выполнения работы

1. Вывести выражение для передаточной функции  $W_{FY}$ , связывающей возмущение  $F$  и регулируемую переменную  $Y$ .
2. Построить статическую характеристику, как зависимость  $Y=f(F)$  по  $W_{FY}$ .
3. Получить статическую характеристику  $Y=f(F)$  экспериментально по реализации модели в среде VisSim / Matlab / Scilab.
4. Сравнить полученные статические характеристики.

### Работа №3. Статические характеристики и переходные функции элементов систем автоматического управления

#### Цель работы:

1. Изучить статические характеристики отдельных элементов системы, их экспериментальное определение.
2. Ознакомиться с классификацией переходных функций элементов.
3. Освоить методику определения параметров передаточной функции элемента по экспериментальной переходной функции.

#### Теоретическое введение

Статика САУ изучает равновесные установившиеся состояния системы, которые возникают в ней при постоянных внешних воздействиях. Самой простой системой является отдельное звено, состояние которого определяется одной входной переменной  $x_{вх}$  и одной выходной переменной  $x_{вых}$ .

Можно указать два основных типа простых звеньев с одним входом и одним выходом. К первому типу относятся такие звенья, которые имеют жёсткую функциональную связь между установившимися значениями входного и выходного сигналов, т. е.

$$x_{\text{вых}} = \varphi(x_{\text{вх}}).$$

Для второго звена установившаяся скорость изменения выходного сигнала, зависит от входного сигнала

$$\frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = \varphi(x_{\text{вх}}).$$

Звенья первого типа называются статическими, а второго – астатическими. Звенья второго типа произвольное положение равновесия, когда входная переменная равна нулю и совсем не имеют положения равновесия при наличии входного сигнала.

Статическая характеристика называется аналитической, если функция  $\varphi$  непрерывна и имеет во всех точках непрерывную производную. Аналитические статические характеристики представляют собой гладкие кривые. Частным случаем аналитических статических характеристик являются статические характеристики линейных звеньев, которые имеют зависимость вход – выход в виде прямой линии. Уравнение для таких характеристик

$$x_{\text{а\text{в}o}} = a + k \cdot x_{\text{a\text{в}i}}$$

Величина  $k$  называется передаточным коэффициентом звена. Неаналитические статические характеристики имеют разрывы непрерывности, либо самой выходной координаты, либо её производной. На рис. показаны соответственно схема и характеристика поляризованного трёхпозиционного реле с коэффициентом возврата меньше единицы.

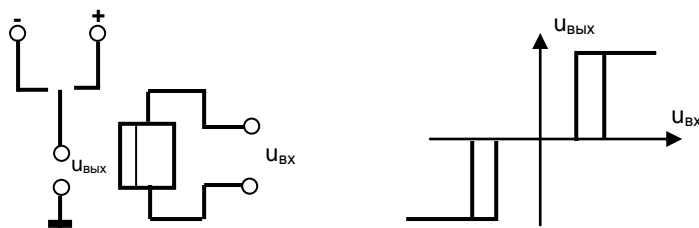


Рис. Статические характеристики нелинейного элемент

Уравнения линейных статических характеристик записываются обычно так, чтобы в них входили не абсолютные значения координат, а их отклонения от некоторых значений, которые приняты за начальные. Уравнения статики линейного

элемента в приращениях имеет вид

$$\Delta x_{\text{а\text{в}o}} = k \cdot \Delta x_{\text{а\text{в}i}}$$

где  $\Delta x_{\text{а\text{в}o}} = x_{\text{а\text{в}o1}} - x_{\text{а\text{в}o2}}$ ,  $\Delta x_{\text{а\text{в}i}} = x_{\text{а\text{в}i1}} - x_{\text{а\text{в}i2}}$ , причём начальные и конечные значения удовлетворяют исходному уравнению элемента  $x_{\text{а\text{в}o1}} = a + k \cdot x_{\text{а\text{в}i1}}$ . Из уравнения для приращений следует

$$k = \frac{\Delta x_{\text{а\text{в}o}}}{\Delta x_{\text{а\text{в}i}}}$$

т.е. передаточный коэффициент равен отношению приращения выходной величины к приращению входной величины.

Функция, которая скачком в момент  $t=0$  достигает некоторого постоянного значения  $A=const$ , называется ступенчатой или толчкообразной. Если это постоянное значение функции  $A$  принять равным единице, то такую функцию называют единичной и обозначают  $I(t)$ .

Переходной функцией элемента (рис. 14) называется изменение выходной переменной  $x_{\text{вых}}(t)$  при подаче на вход элемента единичного ступенчатого сигнала, т.е. переходная функция – реакция элемента на единичный входной сигнал. Переходная функция элемента имеет стандартное обозначение  $h(t)$ .

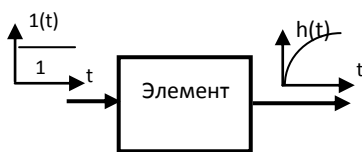


Рис. 14 Переходная функция элемента

Переходные функции крайне разнообразны. Их можно разбить на три основных вида. Монотонные, у которых первая производная не меняет знака (рис. 15, кривая 1). Колебательные, у которых производная меняет знак теоретически бесконечное число раз (рис. 15, кривая 2). Аперiodические, у которых нет периодической смены знака производной. Аперiodические переходные функции имеют ограниченное число экстремумов (рис. 15, кривая 3).

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомится с теоретическим введением инструкции.

2. Снять статические характеристики с трёх звеньев. Для чего загрузить из окна *Simulink Library Browser (File – Open)* файл *c:\Matlabp1\work\LabTAU\object2*. Строится окно модели **Object2** и в нём появляется модель, состоящая из трёх отдельных элементов (см. рис.).

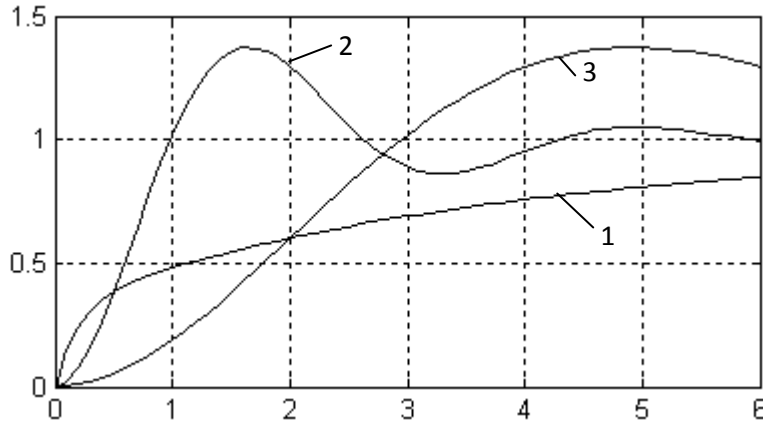


Рис. 15. Классификация переходных функций: 1 – монотонная, 2 – колебательная, 3 - аperiodическая

Для снятия статических характеристик с элемента следует добавить два цифровых вольтметра *Display*, один источник постоянного сигнала *Constant*, один усилитель *Gain* и соединить элементы согласно рис. Установите общее время моделирования равным 6. Далее, последовательно установите передаточные коэффициенты усилителя *Gain* равными 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.

Для каждого нового входного сигнала кнопкой  $\nabla$  запустите режим моделирования. Запишите показания цифровых вольтметров, фиксирующих значения входного и выходного сигналов.

Переключите выход элемента *Gain* к входу второго элемента, а также переключите цифровые вольтметры: один на вход второго элемента, а другой – на его выход. Снимите статическую характеристику со второго элемента, а затем и с третьего.

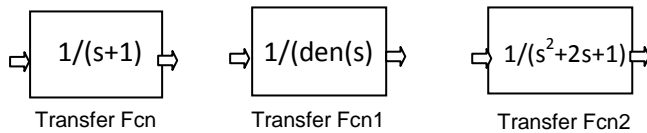


Рис. Модели динамических элементов

3. Снять переходные функции с каждого из трёх динамических элементов.

Для этого нужно добавить в модель два дополнительных элемента: источник ступенчатого сигнала *Step* и виртуальный осциллограф *Scope* и удалить ранее добавленные элементы – *constant*, *Gain* и цифровые вольтметры *Display*.

У элемента *Step* установить параметры *Step time=0*, *Final value=1*. Блок-диаграмма модели для определения переходной функции элемента приведена на рис. 18. Такую блок-диаграмму нужно строить для каждого из трёх элементов. Кнопкой  $\nabla$  запустите режим моделирования. Виртуальный осциллограф *Scope* зафиксирует переходный процесс на выходе элемента. Рисунок с переходной функцией

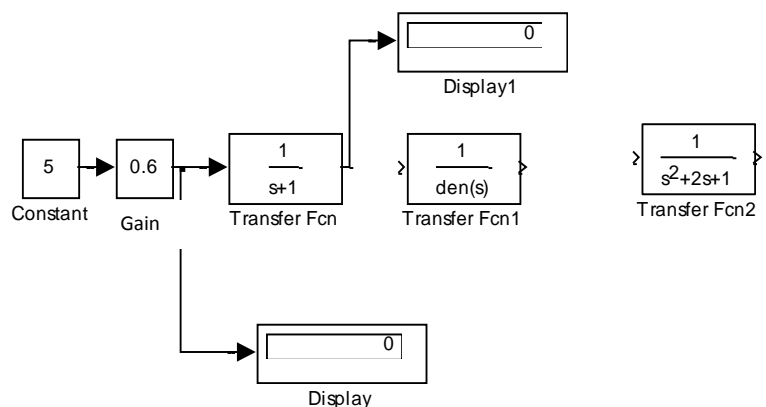


Рис. 17. Блок-диаграмма модели для определения статических характеристик элемента

Кнопкой  $\nabla$  запустите режим моделирования. Виртуальный осциллограф *Scope* зафиксирует переходный процесс на выходе элемента. Рисунок с переходной функцией



необходим для дальнейшей обработки. Поэтому, его следует записать в отдельный файл.

Это можно сделать следующим образом: скопировать экран (клавишей *Print Screen*) в промежуточный буфер. Запустить приложение *Paint*. Командой *Paste* скопировать содержимое буфера в окно редактора *Paint*.

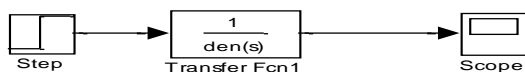


Рис. Блок-диаграмма модели для определения переходной функции элемента

Редактором *Paint* в окне выделить фрагмент, который содержит переходную функцию с осями координат. Выделенный фрагмент окна скопировать в промежуточный буфер и создать в редакторе *Paint* новое окно, куда скопировать содержимое промежуточного буфера. В результате этих действий в окне редактора *Paint* получим рисунок,

содержащий график переходной функции. Теперь содержимое окна графического редактора следует записать в файл на гибкий диск или флэш-память. Дома файл следует загрузить в графический редактор *Paint* и распечатать на лазерном принтере.

### Содержание отчёта

Краткий конспект теоретического введения.

Рисунки с схемами динамических элементов и схемами определения статических характеристик.

Статические характеристики, полученные экспериментально и передаточные коэффициенты элементов.

Схему для снятия переходных функций элементов, переходные функции всех динамических элементов.

Передаточные функции для первого, второго и третьего элементов  $H_1(p)$ ,  $H_2(p)$ ,  $H_3(p)$ , определённые по переходным функциям. Методика определения передаточной функции по переходной изложена в приложении.

Краткие выводы.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

Для проведения расчёта САУ необходимо располагать исходными данными, т.е. динамическими характеристиками отдельных звеньев, входящих в систему. В ряде случаев получить математическое описание элементов из теоретических соображений затруднительно, что заставляет получать математические модели элементов на основании экспериментальных данных. Обычно экспериментально снимают частотные или переходные функции. Для анализа САУ удобно использовать передаточные функции, поэтому необходимо определить параметры передаточной функции элемента по экспериментальной переходной функции.

Звено первого порядка.

Если кривая переходного процесса по внешнему виду близка к экспоненте (рис. 19, кривая 1), то следует искать передаточную функцию для этого элемента в виде

$$H(p) = \frac{k}{Tp + 1}.$$

Коэффициент  $k$  определяется по статической характеристике. Постоянная времени  $T$  равна времени нарастания выходной переменной от нуля до  $x_{\text{вых}}=0.63 \cdot x_y$ , где  $x_y$  – установившееся значение выходного сигнала.

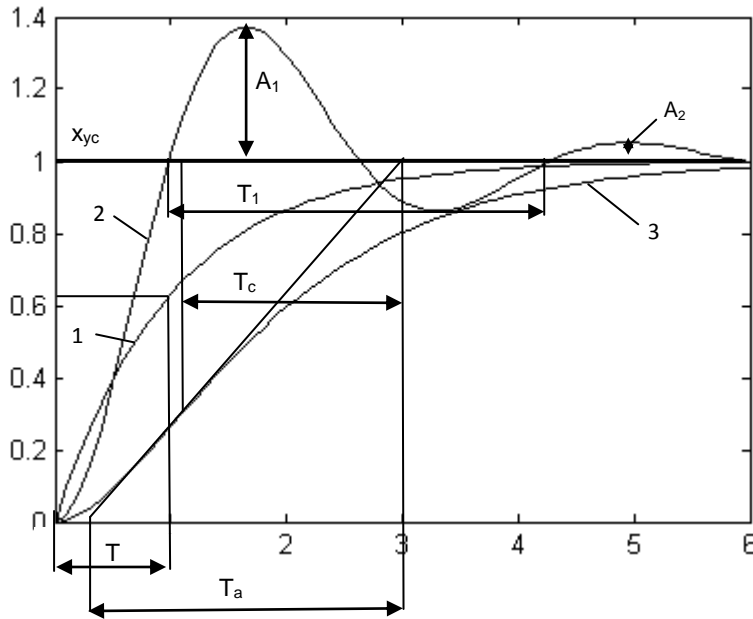


Рис. Определение параметров передаточных функций звеньев по экспериментальным переходным функциям

Колебательное звено.

Если кривая переходного процесса близка по виду кривой 2 на рис. 19, то можно предположить, что изучаемое устройство является звеном второго порядка и, в частности, колебательным звеном. Его передаточную функцию следует записать в виде

$$H(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

Коэффициент  $k$  определяется по статической характеристике,  $T$  и  $\xi$  по формулам:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1}; \beta = \frac{1}{T_1} \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right); \frac{1}{T} = \sqrt{\omega_1^2 + \beta^2}; \xi = \beta \cdot T.$$

Величины  $T_1, A_1, A_2$  находятся из экспериментально определённой переходной функции так, как показано на рис.

Инерционное звено второго порядка.

Если переходная функция не имеет перерегулирования, но имеет точку перегиба (кривая 3 рис.19), то следует предположить, что это звено является инерционным звеном второго порядка и имеет передаточную функцию

$$H(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 + 1)}$$

Передаточный коэффициент  $k$  найти по статической характеристике элемента, а постоянные времени  $T_1, T_2$  по результатам обработки экспериментальных данных. На переходной функции найти точку перегиба (см. рис. 19) и определить значения величин  $T_c, T_a$ , потом их отношение  $(T_c/T_a)$ . Затем обратится к номограмме Сарториуса (рис. 20). По величине  $0.73 \leq (T_c/T_a)$

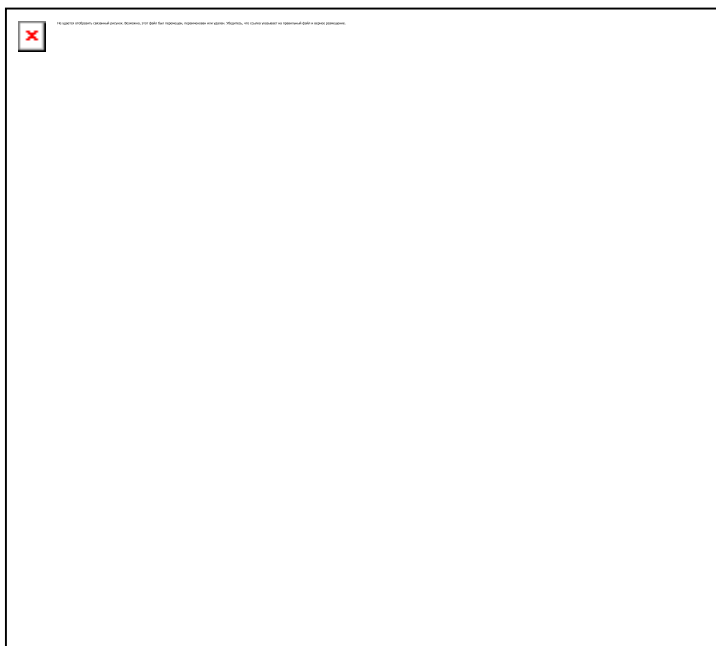


Рис. 20. Номограмма для нахождения постоянных  $T_1, T_2$  по

≤I выбирать прямую пунктирную линию и точки пересечения выбранной прямой со сплошной линией номограммы. Спроектировать точки пересечения на оси координат. Найдём отношения  $(T_1/T_a), (T_2/T_a)$  и по ним величины  $T_1=(T_1/T_a)*T_a$   $T_2=(T_2/T_a)*T_a$ .

#### Работа №4. Выбор типа регулятора и его ручная настройка в системе автоматического управления

Порядок выполнения представлен в [1] раздела методических указаний.

#### Работа №5. Частотные характеристики элементов систем автоматического управления

В ходе выполнения работы определяются частотные характеристики типовых звеньев экспериментально и аналитически. Работа выполняется для следующих типовых звеньев:

Пропорциональное  $W(p) = K$ .

Интегральное  $W(p) = \frac{1}{Tp}$ .

Дифференциальное  $W(p) = Tp$ .

Инерционное звено первого порядка  $W(p) = \frac{1}{Tp+1}$ .

Исходные данные: параметр К и Т принимается согласно варианту:

Вариант	Т	К
1	5	2
2	10	3
3	15	4
4	2	5
5	7	6
6	12	7
7	20	8
8	40	9
9	30	10
10	45	11
11	18	2
12	27	3
13	9	4
14	16	5
15	8	6
16	11	7
17	3	8
18	37	9
19	32	10
20	26	11

#### Порядок выполнения

1. Необходимо получить семейство графиков, отражающее реакцию каждого звена на синусоидальное воздействие различной частоты. Принять минимум пять разных частот. При каждой частоте, для каждого звена определить параметры амплитудной и фазовой характеристик.

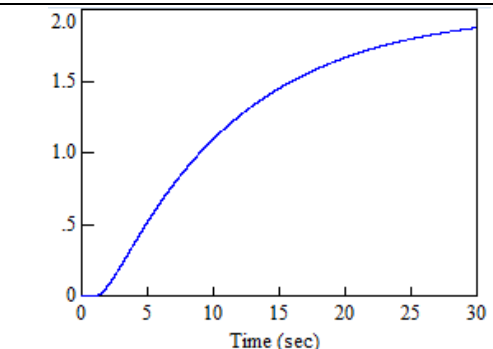
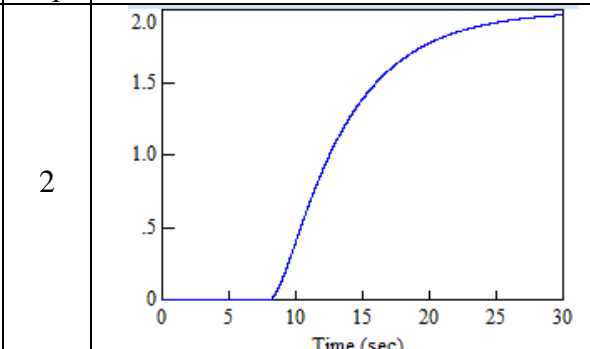
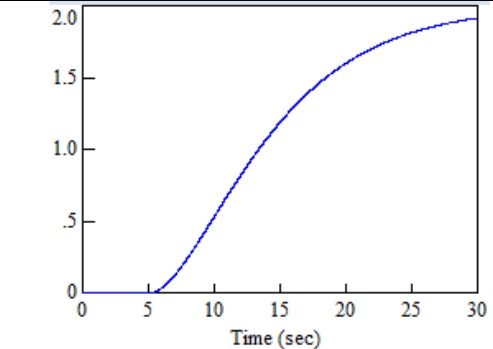
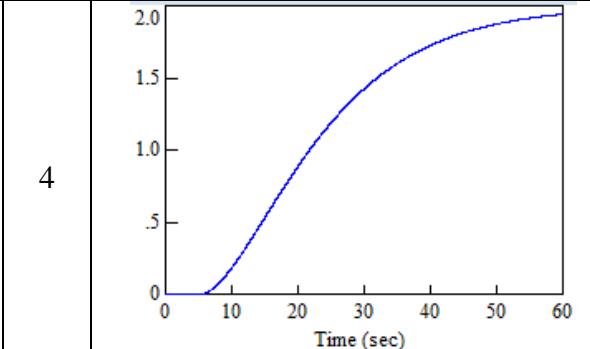
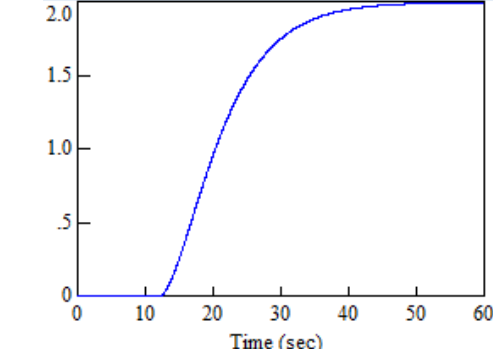
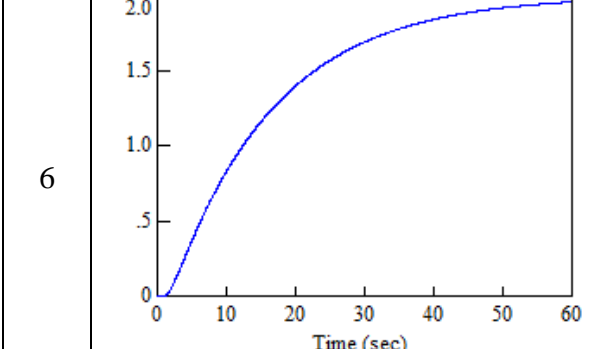
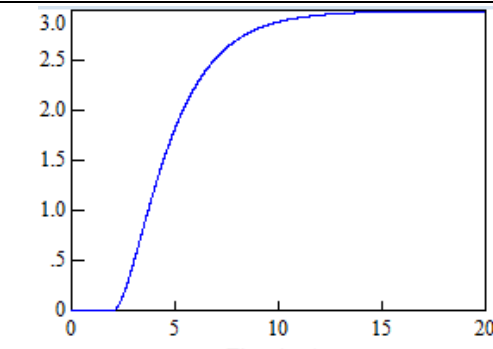
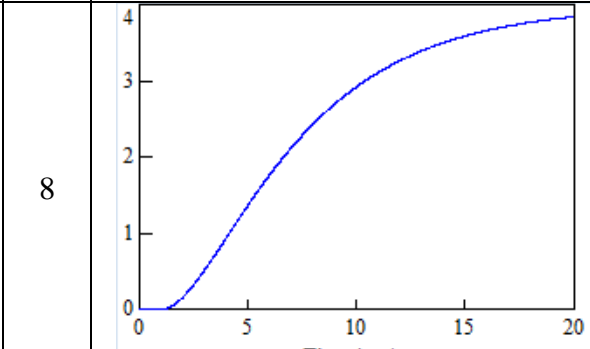
2. Построить графики: амплитудно-частотной, фазо-частотной и амплитудно-фазо-частотной характеристик.

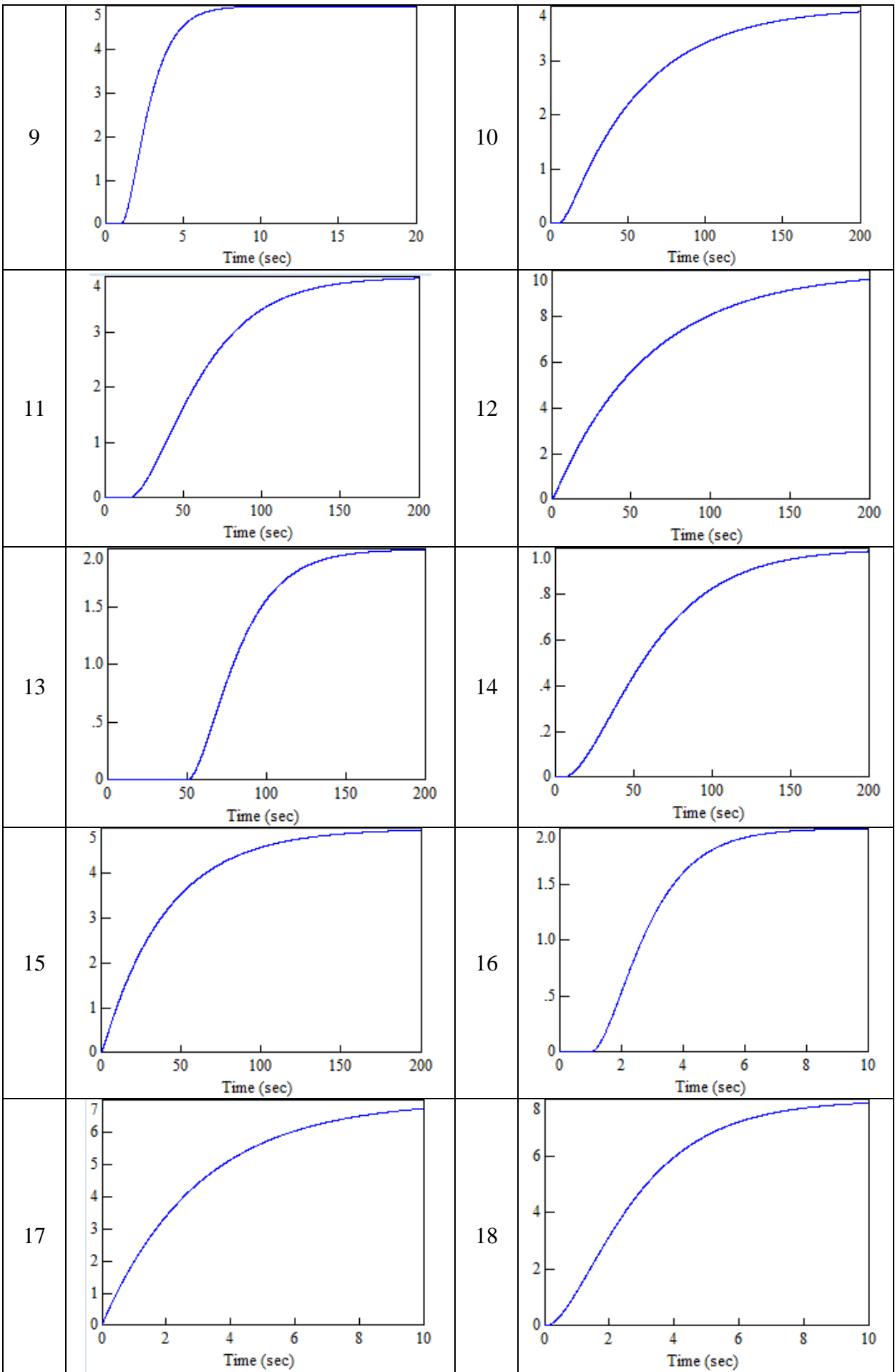
3. По передаточной функции каждого звена аналитически получить выражение для амплитудной характеристики. По выражениям построить графики и сравнить с экспериментальными. Аналитически получить выражения фазовых характеристик сравнить с экспериментальными характеристиками.

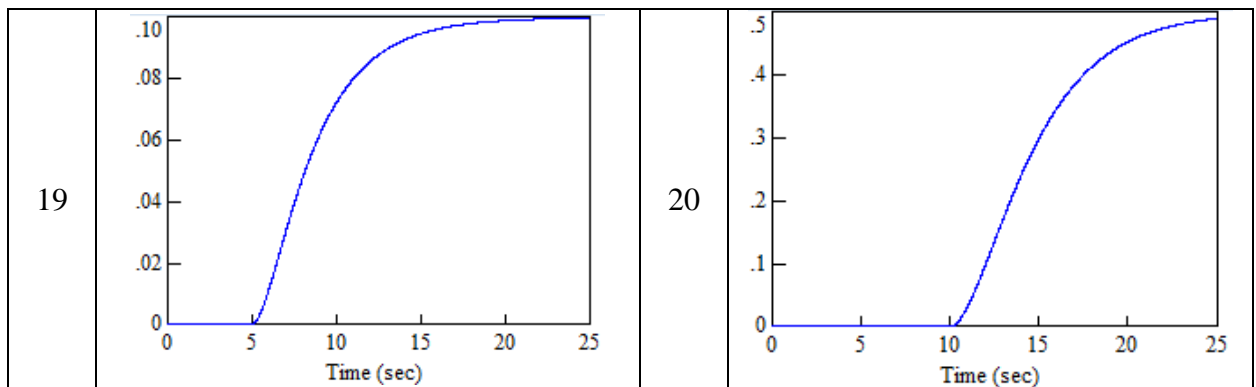
### Работа №6. Настройка регулятора на технический оптимум

**Исходные данные:** переходные характеристики объекта управления по варианту.

Варианты переходных характеристик

Вар.		Вар.	
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	





### ***Порядок выполнения работы***

1. Представить динамику объекта управления более простой моделью, не содержащей звено транспортного запаздывания.
2. Выбрать тип регулятора и значения параметров его настройки на основе приведения передаточной функции разомкнутой системы с применением модели объекта управления к эталонному виду системы, настроенной на технический оптимум.
3. Оценить качество переходного процесса при использовании упрощенной модели, а также модели, содержащей звено транспортного запаздывания. Для этого выполнить моделирование переходных процессов с применением VisSim / Matlab / Scilab.

### **Работа №7. Настройка регулятора на симметричный оптимум**

**Исходные данные:** параметры упрощенной модели объекта управления по варианту, найденные в работе №6. В качестве объекта управления используется упрощенная модель, дополненная интегрирующим звеном.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Выбрать тип регулятора и значения параметров его настройки на основе приведения передаточной функции разомкнутой системы с применением модели объекта управления к эталонному виду системы, настроенной на симметричный оптимум.
2. Оценить качество переходного процесса. Для этого выполнить моделирование переходных процессов с применением VisSim / Matlab / Scilab.
3. С применением математического пакета получить логарифмические характеристики настроенной системы и сравнить с характеристиками эталонной системы.

### **Работа №8. Статические и динамические ошибки управления**

**Исходные данные:** параметр  $T$  инерционного звена согласно варианту работы №5. В качестве объекта управления принимаем последовательное соединение инерционного звена, пропорционального звена, а также  $K$  интеграторов. Работа выполняется для вариантов систем при  $K = 0, 1, 2$ .

### ***Порядок выполнения работы***

Выполнить исследование систем для трех типов входных сигналов:

$$x(\tau) = A; \quad x(\tau) = V(\tau); \quad x(\tau) = \frac{a * \tau^2}{2}$$

Параметры входных воздействий, а также пропорционального звена выбрать произвольно. Сравнить установившуюся ошибку в результате моделирования в среде VisSim / Matlab / Scilab с аналитическим расчетом.

### **Работа №9. Настройка регулятора с применением эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта**

**Исходные данные:** параметры упрощенной модели объекта управления по варианту, найденные в работе №6. Структура замкнутой системы регулирования включает модель объекта управления и П/ И / ПИ / ПИД - регулятор.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Выбрать тип регулятора, который допускает приведение передаточной функции замкнутой системы к эталонному виду характеристических полиномов эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта.
2. Выполнить расчет параметров настройки регулятора для приведение передаточной функции замкнутой системы к эталонному виду характеристических полиномов эталонных полиномов Ньютона и Баттерворта.
3. Определить величину среднегеометрического корня. Сопоставить переходные процессы с эталонными процессами.

### **Работа №10. Частотные методы анализа устойчивости автоматических систем и построение переходных процессов**

**Исходные данные:** параметры упрощенной модели объекта управления по варианту, найденные в работе №6. Структура замкнутой системы регулирования включает модель объекта управления и П - регулятор.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Подобрать значения коэффициента усиления П-регулятора, при которых система: устойчива; неустойчива; находится на границе устойчивости.
2. Построить АФЧХ разомкнутой системы при найденных значениях коэффициента усиления П-регулятора.
3. Для случая устойчивой системы получить выражение для передаточной функции замкнутой системы. Оценить устойчивость методом определителей Грувица.

### **Работа №11. Исследование разомкнутой линейной системы**

**Исходные данные:** параметры объекта управления К, Т принимаются согласно вариантам в работе №5. Параметры объекта

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),$$

$$y(t) = Cx(t),$$

заданы матрицами А, В, С:

$$A = \begin{bmatrix} K & T \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0]$$

#### ***Порядок выполнения работы***

Требуется найти матрицу стационарных обратных связей  $K$  при использовании пропорционального регулятора состояния, обеспечивающую следующие показатели качества:  $tp = 1с$ ,  $\sigma \leq 1\%$ . В отчете по работе привести все необходимые вычисления.

### **Работа №13. Моделирование многомерной случайной величины**

**Исходные данные:** временные ряды по 2-3 технологическим параметрам.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Построить графики по исходным данным.
2. Выбрать интервалы времени, на которых дисперсии технологических параметров по возможности не изменяются.
3. Удалить трендовые составляющие рядов данных.
4. Рассчитать корреляционную и ковариационную матрицы.
5. Рассчитать матрицу  $C$  (см. [1] методических указаний).
6. Получить новую реализацию многомерной случайной величины.
7. По полученной реализации рассчитать корреляционную матрицу и сравнить ее с корреляционной матрицей исходных данных.

С примером выполнения заданий работы можно ознакомиться в [1] методических указаний.

### **Работа №14. Разработка модели возмущений с учетом частотных особенностей изменения случайной величины**

**Исходные данные:** временной ряды по одному технологическому параметру.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Построить график по исходным данным.
2. Выбрать интервалы времени, на которых дисперсия и частотные особенности изменения технологического параметра по возможности не изменяются.
3. Удалить трендовую составляющую ряда данных.
4. Рассчитать автокорреляционную функцию.
5. Определить число коэффициентов авторегрессионной модели.
6. При необходимости понизить дискретность данных.
7. Настроить авторегрессионную модель временного ряда.
8. Получить новую реализацию случайного процесса.
9. По новой реализации случайного процесса рассчитать автокорреляционную функцию и сравнить ее с автокорреляционной функцией исходных данных.

С примером выполнения заданий работы можно ознакомиться в [1] методических указаний.

### **Работа №15. Спектральная плотность на входе и выходе системы**



### ***Порядок выполнения работы***

Исходные данные: параметры авторегрессионной модели, полученные в работе №14.

#### ***Часть 1. Численное моделирование действия возмущений на систему.***

1. Реализовать разработанную ранее авторегрессионную модель возмущений по одному параметру в среде VisSim.
2. В среде VisSim получить реализацию возмущений  $X$  протяженностью 500 секунд и вывести случайную величину на график. Экспортировать данные графика в текстовый файл 1.
3. Подать возмущения  $X$  на вход инерционного звена первого порядка с постоянной времени согласно варианту работы №1. Рассчитать среднее значение квадрата сигнала  $Y$  на выходе звена.

#### ***Часть 2. Аналитический расчет действия возмущений на систему.***

4. Получить спектральную плотность случайной величины  $X$  в файле 1 и экспортировать ее в текстовый файл.
5. Импортировать файл спектральной плотности в excel и выполнить аппроксимацию спектральной плотности одним из двух, рассмотренных в [1] методических указаний выражений (тем, которое больше подходит).
6. В среде VisSim получить амплитудную частотную характеристику инерционного звена и экспортировать ее в файл. Либо воспользоваться аналитическим способом нахождения амплитудной характеристики.
7. Используя информацию об амплитудной характеристике системы (инерционного звена) и спектральной плотности сигнала  $X$ , рассчитать спектральную плотность сигнала  $Y$  на выходе системы.
8. Рассчитать среднее значение квадрата  $Y$  и сравнить его со значением, полученным в ходе численного моделирования.

С примером выполнения заданий работы можно ознакомиться в [1] методических указаний.

### **Работа №16. Синтез системы с минимумом среднего значения квадрата ошибки регулирования**

Исходные данные: структура системы управления, параметры модели возмущений согласно работе №14.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Вывести аналитическое выражение связывающее среднее значение квадрата ошибки регулирования с параметрами модели объекта управления, регулятора и возмущений.
2. При трех различных вариантах значений параметров регулятора рассчитать по полученному выражению среднее значение квадрата ошибки регулирования.
3. Проверить результаты расчетов, выполнив моделирование работы системы в среде VisSim.

С примером выполнения заданий работы можно ознакомиться в [1] методических указаний.

### **Работа №17. Моделирование работы нелинейных систем автоматического управления**

**Исходные данные:** параметры упрощенной модели объекта управления по варианту, найденные в работе №6.

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Реализовать модель системы релейного управления объектом по варианту в среде VisSim / Matlab / Scilab. Использовать идеальное реле и реле с гистерезисом. Получить переходные процессы при разных значениях задания и разной величине зоны гистерезиса. По результатам построить зависимости параметров колебаний регулируемого параметра от частоты переключений реле.

2. Реализовать модель системы управления объектом по варианту с применением ПИД-регулятора и исполнительного механизма постоянной скорости. Использовать зону нечувствительности по сигналу рассогласования и управляющему воздействию. Изучить влияние скорости исполнительного механизма, а также величин зон нечувствительности на качество переходного процесса.

3. Добавить отрицательную обратную связь по положению вала исполнительного механизма. Оценить качество переходного процесса при наличии такой связи.

### **Работа №18. Исследование релейной системы второго порядка на фазовой плоскости**

**Исходные данные:** параметр  $T$  принять в соответствие с вариантом задания работы № 5. В качестве объекта управления используется инерционное звено с постоянной времени  $T$ .

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Реализовать модель системы управления объектом в среде VisSim / Matlab / Scilab с применением идеального реле, реле с гистерезисом, реле с зоной нечувствительности. Получить фазовые портреты в координатах регулируемая переменная - производная регулируемой переменной.

2. Для систем, исследованных в VisSim / Matlab / Scilab выполнить построение фазовой траектории в среде Excel. Расчет частей траекторий показать до получения установившихся колебаний (не более 5 частей).

### **Работа №19. Метод гармонического баланса**

**Исходные данные:** параметр  $T$  принять в соответствие с вариантом задания работы № 5. В качестве объекта управления используется два инерционных звена с равными постоянными времени  $T$ .

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Для идеального реле и реле с зоной нечувствительности, параметры которых выбрать самостоятельно, получить графики переходных процессов и оценить параметры установившихся колебаний в среде VisSim / Matlab / Scilab.

2. Получить уравнения гармонического баланса и решить их методом Гольдфарба. По результату решения оценить параметры установившихся колебаний и сравнить их с полученными ранее при моделировании в среде VisSim / Matlab / Scilab.

### **Работа №20. Переоборудование непрерывного регулятора**

**Исходные данные:** параметр  $T$  принять в соответствие с вариантом задания работы № 5. В качестве объекта управления используется инерционное звено с постоянной времени  $T$ .

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Выполнить моделирование управление объектом с применением пропорционального регулятора в дискретной системе при трех различных постоянных времени дискретизации в среде VisSim / Matlab / Scilab.

2. На основе  $Z$  преобразования получить передаточную функцию дискретной системы и выполнить моделирование переходного процесса в среде Excel. Сравнить переходные процессы с процессами, полученными в среде VisSim / Matlab / Scilab.

### **Работа №21. Устойчивость импульсных систем**

**Исходные данные:** параметр  $T$  принять в соответствие с вариантом задания работы № 5. В качестве объекта управления используется инерционное звено с постоянной времени  $T$ .

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Выполнить моделирование управление объектом с применением пропорционального регулятора в дискретной системе в среде VisSim / Matlab / Scilab.

2. Подобрать в среде VisSim / Matlab / Scilab время дискретизации, при котором система находится на границе устойчивости.

3. Используя передаточную функцию дискретной системы определить время дискретизации, при котором система находится на границе устойчивости. Сравнить найденное время с экспериментально полученным.

## Приложение 4

### Методические указания к выполнению курсовой работы

#### Цель и задачи курсовой работы

**Цель работы:** оптимизация типичной линейной системы автоматического регулирования (САР) с использованием программного пакета моделирования систем VisSim / Matlab / Scilab.

**Задачи работы:**

- анализ задания и исходных данных;
- описание принципа действия САР;
- построение структурно-аналитической модели САР;
- оценка устойчивости и стабилизация САР;
- оптимизация модели;
- экспериментальное определение запасов устойчивости САР;
- экспериментальное определение частотных характеристик САР;
- оценка качества модели;

По мере выполнения работы задачи и способы их решения могут и должны обоснованно уточняться и конкретизироваться. Например, стабилизация разомкнутого контура может потребовать изменения не одного, а нескольких параметров, оптимизация модели - не только изменения параметров, но и структуры модели.

#### 2. Задание и исходные данные

**Тема курсовой работы:** "Анализ и оптимизация САР частоты вращения вала двигателя постоянного тока".

**Задание:**

- построить модель САР, исследовать ее, оптимизировать и оценить качество полученной САР;

**Исходные данные:**

- функциональная схема САР;
- параметры элементов САР.

Функциональная схема САР приведена на рис.1.

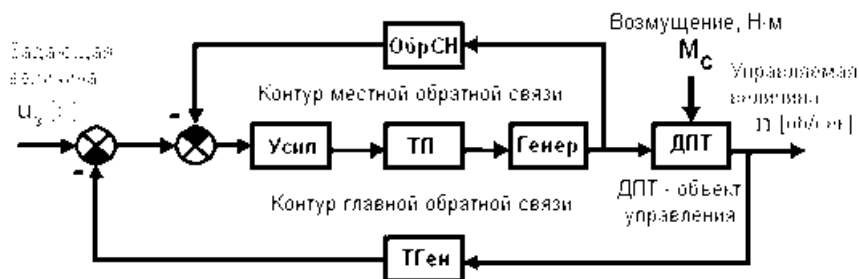


Рис. 1. Функциональная схема САР: У - усилитель; ТП - тиристорный преобразователь; Г - генератор; ДПТ - двигатель постоянного тока; ТГ - тахогенератор; ОСН - гибкая обратная связь по напряжению. ДПТ – двигатель постоянного тока независимого возбуждения; ДПТ – объект управления, его выходная величина, частота вращения вала  $n$  должна соответствовать заданию;  $u_z$  - напряжение задания, в соответствии с которым должна изменяться частота  $n$  вращения вала ДПТ;  $M_c$  - возмущающий момент силы, приложенный к валу ДПТ от той машины, которую он приводит в действие

### Параметры элементов:

(N - номер варианта задания)

У - усилитель моделируется аperiodическим звеном с передаточной функцией:

$$W_y(p) = \frac{k_y}{pT_y + 1}$$

с параметрами:  $k_y = (20 + N)$ ;  $T_y = (0.06 + 0.001N)$ , с

ТП - тиристорный преобразователь моделируется аperiodическим звеном с передаточной функцией:

$$W_{ТП}(p) = \frac{k_{ТП}}{pT_{ТП} + 1}$$

с параметрами:  $k_{ТП} = (15 + 2N)$ ;  $T_{ТП} = (0.05 + 0.001N)$ , с

ОСН - гибкая обратная связь по напряжению, инерционно-дифференцирующее звено:

$$W_{осн}(p) = \frac{k_{осн}pT_{осн}}{pT_{осн} + 1}$$

с параметрами:  $k_{осн} = 0.1(1.5 + 0.1N)$ ;  $T_{осн} = 0.01(5 + N)$ , с

ТГ - тахогенератор, усилительное (пропорциональное) звено:

$$W_{ТГ}(p) = k_{ТГ}$$

где:  $k_{ТГ} = 0.01(2 + 0.3N)$ , [В·сек/об].

Г - генератор, аperiodическое звено:

$$W_{Г}(p) = \frac{k_{Г}}{pT_{Г} + 1}$$

с параметрами:  $k_{Г} = 0.1(13 + 0.1N)$ ;  $T_{Г} = 0.01(8 + N)$ , с

ДПТ- двигатель постоянного тока, колебательное звено. Его передаточная функция по каналу управления:

$$W_{ДПТ}(p) = \frac{k_{ДПТ}}{T_{я}T_{м}p^2 + T_{м}p + 1}$$

а по каналу возмущения:

$$W_{ДПТ}(p) = \frac{-k_{ДПТ}(pT_{я} + 1)}{T_{я}T_{м}p^2 + T_{м}p + 1}$$

где:

$k_{ДПТ} = 0.1(12 + N)$ , [об/(сек·В)];  $k_{ДПТ} = 0.05(15 + N)$ , [об/(сек·Н·м)];

$T_{я} = 0.01(6 + 0.32N)$ , с;  $T_{м} = 0.1(5 + 0.5N)$ , с.

### Методические указания к оформлению работы

Работа представляется к защите в переплетенном виде и должна содержать:

- титульный лист;
- содержание;
- введение;
- теоретические сведения;
- основную часть, разбитую на разделы, параграфы и пункты;
- заключение;
- приложения.

Раздел «Теоретические сведения» должен содержать следующие пункты:

- частотные характеристики линейных звеньев и систем;
- определение и условие устойчивости САР;
- критерии устойчивости САР;
- оптимизация САР, настройка регуляторов;
- принцип работы САР в переходном и установившемся режимах;
- показатели качества САР в переходном и установившемся режимах.

Пояснительная записка работы должна быть краткой и содержательной.

Каждый раздел основной части записки (глава, параграф, пункт и т.д.) должен содержать цель и задачи, обоснование принимаемых решений и пояснения цели и последовательности проведения выкладок. Например, необходимо объяснить, почему для оценки устойчивости используется тот или иной критерий. Кроме того, следует проводить анализ полученных результатов и кратко его излагать. В завершение в каждом разделе следует делать краткие выводы, из которых должна вытекать необходимость выполнения следующего раздела. Точно и правильно поставленная цель раздела позволяет по достижении ее легко сделать выводы по разделу.

Требования к оформлению пояснительной записки:

- шрифт основного текста TimesNewRoman, размер 12 pt;
- междустрочный интервал – полуторный;
- выравнивание основного текста – по ширине;
- выравнивание формул – по центру;
- заголовки разделов выполнять полужирным шрифтом размера 14 pt, выравнивать по центру, после заголовка выполнять отступ 12pt перед основным текстом;
- заголовки подразделов выполнять полужирным курсивным шрифтом размера 14 pt, выравнивать по центру, после заголовка выполнять отступ 12pt перед основным текстом;
- рисунки обязательно нумеровать с указанием ссылок на них в тексте;
- подрисуночная подпись с указанием номера рисунка должна быть под рисунком;
- рисунок и подрисуночную подпись выравнивать по центру;
- таблицы должны иметь заголовки и номер, выравнивание по центру;
- страницы пояснительной записки пронумеровать, выравнивание по центру.

Ниже предлагается примерная методика выполнения работы с использованием прикладного программного пакета моделирования VisSim / Matlab / Scilab.

## **Примерная методика выполнения работы**

### *Анализ исходных данных*

Выполняется с целью установления достаточности исходных данных для реализации модели и их непротиворечивости.

**Примечание:** анализ проводится в процессе выполнения всей работы и вносится в пояснительную записку после ее окончания. Если выясняется, что каких-то данных недостаточно, студент должен обоснованно ввести их. В случае противоречивости исходных данных, необходимо найти компромиссное решение и обосновать его.

### *Описание принципа действия САР*

Принцип действия САР кратко описывается по функциональной схеме.

Цель описания принципа действия САР состоит в пояснении читателю назначения и состава САР, а также в качественной иллюстрации ее работоспособности. Следует показать, что рассматриваемая САР осуществляет слежение за величиной сигнала, подаваемого на ее устройство сравнения. Кроме того, необходимо отметить, что САР компенсирует возникающие возмущения, т.е. решает и задачу стабилизации.

Решение задач слежения и стабилизации рассматриваемой системой возможно вследствие наличия в ней контура главной обратной связи, реализующего принцип управления по отклонению.

Описание состоит из двух подразделов. В первом рассматривается работа САР в статике. Следует показать, что САР обеспечивает слежение: соответствие (пропорциональность) частоты вращения вала ДПТ задающей величине при постоянных задающем и возмущающем воздействиях.

Во втором подразделе следует показать, что слежение обеспечивается и в динамике: при изменении задания и (или) возмущения, САР стремится поддерживать значение частоты вращения вала, соответствующим заданию. Назначение раздела - показать качественно (т.е. не количественно, словами) преимущество управления двигателем с использованием САР по сравнению с непосредственным управлением. Использование САР позволяет повысить быстродействие управления посредством маломощных сигналов задания и точность поддержания частоты вращения.

### ***Построение структурной и аналитической моделей САР***

Моделирование может выполняться с использованием программного пакета VisSim / Matlab / Scilab.

Цель моделирования: обеспечить возможность анализа, а по его результатам и оптимизации САР.

### ***Построение структурной схемы САР***

Вынести на рабочее пространство VisSim / Matlab / Scilab блоки, соответствующие функциональной схеме. Двигатель моделируется тремя звеньями (рис.2). При анализе устойчивости достаточно представлять двигатель одним звеном с передаточной функцией  $W_y(p)$ , т.к. звенья вне контура не влияют на устойчивость системы.

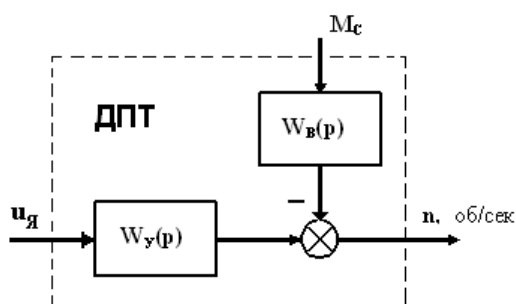


Рис. 2. Структурная схема (модель) двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.  $u_я$  - напряжение якоря двигателя,  $M_c$  - момент сопротивления на валу,  $n$  - частота вращения вала

Построить разомкнутый контур САР. На вход подать ступенчатое напряжение. Выход усилителя обратной связи подключить к осциллографу.

### ***Определение передаточных функций элементов САР***

Определить значения параметров передаточных функций элементов в соответствии с номером варианта. Ввести эти значения в соответствующие блоки. Рационально разместить блоки диаграммы, предусмотреть место для надписей и комментариев. Указать что это за работа, кем и когда она выполняется, номер варианта и др.

### ***Оценка устойчивости разомкнутого контура***

Разомкнутый контур САР состоит из устойчивых элементов, но, в свою очередь, содержит контур местной обратной связи. Следовательно, САР может быть неустойчивой в разомкнутом состоянии.

Оценка устойчивости разомкнутой САР осуществляется с целью проверки выполнения необходимого условия практического применения критерия Найквиста: разомкнутый контур должен быть устойчивым. Критерий Найквиста выбран для оценки устойчивости замкнутой САР потому, что, инструменты этого критерия (логарифмические частотные характеристики) будут применены при структурно-параметрической оптимизации САР. Последнее является определяющим в выборе критерия Найквиста для оценки устойчивости замкнутой САР. Частотные характеристики разомкнутого контура САР не только позволяют судить о степени устойчивости замкнутой САР и, косвенно, о ее качестве, но и вырабатывать меры и средства оптимизации САР.

Традиционно, устойчивость разомкнутого контура определялась с помощью критериев Михайлова или Гурвица. Однако, имея в своем распоряжении моделирующую программу, например, VisSim, исследователь может непосредственно по виду переходной характеристики определить устойчива ли система. Более того, по виду переходной характеристики качественно можно оценить и степень устойчивости.

Запустить программу на счет, определить по виду переходной характеристики устойчив ли разомкнутый контур.

### ***Стабилизация разомкнутого контура***

Стабилизация разомкнутой САР осуществляется с целью обеспечения выполнения необходимого условия практического применения критерия Найквиста: разомкнутый контур должен быть устойчивым с запасом по амплитуде в диапазоне 6 - 20 дБ (в 2 - 10 раз).

Изменяя параметры элементов контура местной обратной связи: коэффициенты усиления усилителя и тиристорного преобразователя, а возможно, и постоянной времени звена ОСН, добиться, чтобы переходный процесс стал апериодическим с перерегулированием не более  $5 \div 20$  %.

Возможный способ решения этой задачи: вывести разомкнутый контур на границу устойчивости, а затем уменьшить коэффициент усиления усилителя в  $2 \div 10$  раз. В предлагаемой методике контур выводится на границу устойчивости для того, чтобы иметь точку начала отсчета для обеспечения нужного запаса устойчивости по амплитуде. Такая простая методика стабилизации возможна потому, что VisSim легко строит переходные характеристики.

Может оказаться целесообразным выполнить стабилизацию в два этапа: на первом изменять только коэффициенты усиления и если результаты окажутся недостаточно качественными, то на втором этапе можно уменьшить и постоянную времени звена ОСН (обратной связи по напряжению).

### ***Оценка устойчивости замкнутой САР***

Оценка степени устойчивости замкнутой САР проводится с целью определения необходимых мер и средств оптимизации САР. Оценка осуществляется с помощью логарифмического варианта критерия Найквиста. Это позволяет не только косвенно, по



запасам устойчивости, судить о степени устойчивости САР, но и численно определить необходимые для предварительной стабилизации изменения значений параметров элементов.

Выделить элементы разомкнутого контура и вызвать ЛАЧХ и ЛФЧХ. Растянуть и оформить графики. Определить запасы по фазе и амплитуде. Сравнить их значения с допустимыми.

### ***Коррекция замкнутой САР***

Коррекция осуществляется с целью получения работоспособной САР путем оптимизации коэффициента усиления контура управления. Если этого оказывается недостаточно, то в главный контур вводится и настраивается ПИ-регулятор.

Формально, подбор наилучшего значения коэффициента усиления следует называть параметрической оптимизацией системы, в то время как введение ПИ-регулятора и определение его наилучших настроечных параметров является простым случаем структурно-параметрической оптимизации САР, поскольку во втором случае изменяется структурная схема.

По ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутого контура определить необходимую величину изменения коэффициента усиления в дБ, с тем, чтобы запасы устойчивости вошли в требуемые интервалы, предпочтительнее ближе к их верхним границам. По фазе это  $35^{\circ} \div 65^{\circ}$  и по амплитуде  $6 \div 12 \div 20$  дБ. Изменение усиления контура следует провести путем введения П-регулятора (усилителя) непосредственно за сумматором главного контура управления. Если при этом усиление контура окажется меньше 20 дБ, следует ввести в контур главной обратной связи, сразу после П-регулятора, ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W(p) = k_p \cdot \left( 1 + \frac{1}{pT_u} \right) = 0.5 \frac{pT_u + 1}{pT_u}$$

где:

- $k_p$  – коэффициент усиления ПИ-регулятора;
- $T_u$  – постоянная времени интегратора, обратно пропорциональная частоте сопряжения аппроксимаций участков ЛАЧХ с наклонами 0 дБ/дек и -20 дБ/дек соответственно.

***Примечание.*** Усиление П-регулятора можно учесть в ПИ-регуляторе, с тем, чтобы уменьшить количество блоков в схеме.

После корректировки усиления или, может быть, введения ПИ-регулятора, следует заново выделить элементы разомкнутого контура, построить ЛАЧХ и ЛФЧХ и убедиться в том, что запасы по фазе и амплитуде соответствуют требованиям. Коэффициент усиления контура в астатической системе напрямую не регламентируется, а косвенно он характеризует быстродействие системы.

### ***Оценка качества САР***

Оценка выполняется с целью сравнения показателей качества переходного и установившегося режимов оптимизированной САР с требованиями, предъявляемыми к САР заказчиком.

Оценка качества переходного режима САР осуществляется по переходной функции замкнутой САР.

Замкнуть главный контур управления, переключить осциллограф на выход САР, к выходу ДПТ.

Запустить на счет.

Оценить время регулирования, перерегулирование. Перерегулирование хорошей системы находится в пределах  $0\% \div 20\%$ . Если полученное перерегулирование превышает величину  $40\%$ , следует вернуться к коррекции системы и уменьшить усиление контура.

Приближенно определить по ЛАЧХ разомкнутого контура окончательно скорректированной системы коэффициенты ошибок  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$ . Возможно определение коэффициентов ошибок и альтернативным способом, непосредственно в VisSim / Matlab / Scilab.

### *Заключение*

Здесь следует кратко изложить основные результаты работы, сделать выводы и дать рекомендации. Смысл выводов - достигнута ли цель работы и решены ли ее задачи. Рекомендации могут быть как по оптимизации методов решения поставленных задач, способам и возможному дальнейшему улучшению системы, так и по ее применению.