

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Б1.О.09.01  
(индекс дисциплины)

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ**

(наименование дисциплины)

по направлению подготовки (специальности)

15.04.05 КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

направленность (профиль)/специализация

ЦИФРОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
МАШИНОСТРОЕНИЯ

Форма обучения: очная

Год набора: 2023

Общая трудоемкость: 7 ЗЕТ

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр	2	Итого
Форма контроля	экзамен	
Вид занятий		
Лекции	8	8
Лабораторные		
Практические	32	32
Руководство: курсовые работы (проекты) / РГР		
Промежуточная аттестация	0,35	0,35
Контактная работа	40,35	40,35
Самостоятельная работа	176	176
Контроль	35,65	35,65
Итого	252	252

Рабочую программу составил(и):

доцент кафедры ОиТМП, доцент, к.т.н., Гуляев В.А.

*(должность, ученое звание, степень, Фамилия И.О.)*

---

*(должность, ученое звание, степень, Фамилия И.О.)*

---

Рецензирование рабочей программы дисциплины:



Отсутствует



Рецензент

*(должность, ученое звание, степень, Фамилия И.О.)*

---

Рабочая программа дисциплины составлена на основании ФГОС ВО и учебного плана направления подготовки (специальности)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

**Срок действия рабочей программы дисциплины до « 30 » августа 2025 г.**

УТВЕРЖДЕНО

На заседании кафедры

«Оборудование и технологии машиностроительного производства»

---

(протокол заседания № 1 от «31» августа 2022 г.).

## 1. Цель освоения дисциплины

Цель освоения дисциплины – освоение общих принципов и средств, необходимых для управления динамическими системами различной физической природы применительно к производственным и технологическим процессам.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплины и практики, на освоении которых базируется данная дисциплина: «Инновационные технологии в машиностроении», «Инструментальные системы автоматизированного машиностроения».

Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: подготовка и защита магистерской диссертации.

## 3. Планируемые результаты обучения

Формируемые и контролируемые компетенции (код и наименование)	Индикаторы достижения компетенций (код и наименование)	Планируемые результаты обучения
УК-2. Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла	УК-2.1. Формулирует в рамках поставленной цели проекта совокупность задач, обеспечивающих ее достижение УК-2.2. Проектирует решение конкретной задачи проекта, выбирая оптимальный способ ее решения, исходя из действующих правовых норм и имеющихся ресурсов и ограничений УК-2.3. Выбирает способы решения задачи профессиональной деятельности с учётом наличия ограничений и ресурсов	Знать: - методологические основы функционирования, моделирования и синтеза систем автоматического управления (ЦСУ); - основные методы анализа ЦСУ во временной и частотной областях, способы синтеза ЦСУ; - типовые пакеты прикладных программ анализа динамических систем; - кинематическую структуру и компоновку станков, системы управления ими; - средства для контроля, испытаний, диагностики и адаптивного управления оборудованием.
		Уметь: - выполнять анализ технологических процессов как объектов автоматизации и управления; - составлять структурные схемы, их математические модели как объектов управления; - использовать основные методы построения математических

Формируемые и контролируемые компетенции (код и наименование)	Индикаторы достижения компетенций (код и наименование)	Планируемые результаты обучения
		<p>моделей процессов, систем, их элементов и систем управления;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- работать с каким-либо из основных типов программных систем, предназначенных для математического и имитационного моделирования Mathcad, Matlab.</li> </ul> <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками применения элементов анализа этапов жизненного цикла продукции и управления ими;</li> <li>- навыками наладки, настройки, регулировки, обслуживания технических средств и систем управления;</li> <li>- навыками оформления результатов исследований и принятия решений.</li> </ul>
ОПК-3. Способен использовать современные информационно-коммуникационные технологии, глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской деятельности	<p>ОПК-3.1. Использует современные информационно-коммуникационные технологии и программное обеспечение при решении задач профессиональной деятельности</p> <p>ОПК-3.2. Использует глобальные информационные ресурсы в научно-исследовательской деятельности</p>	<p>Знать:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- методы и средства геометрического моделирования технических объектов;</li> <li>- тенденции развития компьютерной графики, ее роль и значение в инженерных системах и прикладных программах;</li> <li>- общие требования к автоматизированным системам проектирования;</li> <li>- основы технологического регулирования.</li> </ul> <p>Уметь:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- строить математические модели объектов управления и систем автоматического управления (ЦСУ);</li> <li>- проводить анализ ЦСУ, оценивать статистические и динамические характеристики;</li> <li>- рассчитывать основные качественные показатели ЦСУ, выполнять: анализ ее устойчивости, синтез регулятора;</li> <li>- разрабатывать алгоритмы централизованного контроля координат технологического объекта;</li> </ul>

Формируемые и контролируемые компетенции (код и наименование)	Индикаторы достижения компетенций (код и наименование)	Планируемые результаты обучения
		<p>- рассчитывать одноконтурные и многоконтурные системы автоматического регулирования применительно к конкретному технологическому объекту;</p> <p>- использовать основные технологии передачи информации в среде локальных сетей, сети Internet.</p> <p>Владеть:</p> <p>- навыками оформления проектной и конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД;</p> <p>- навыками построения систем автоматического управления системами и процессами;</p> <p>навыками анализа технологических процессов как объекта управления и выбора функциональных схем их автоматизации.</p>
ОПК-6. Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые системы автоматизированного проектирования производственно-технологической документации машиностроительных производств	<p>ОПК-6.1. Умеет применять современные системы автоматизированного проектирования для формирования конструкторско-технологической документации машиностроительных производств</p> <p>ОПК-6.2. Умеет применять разрабатывать алгоритмы для формирования производственной документации машиностроительных производств</p> <p>ОПК-6.3. Составляет модели деталей и сборочных единиц в системах автоматизированного проектирования</p>	<p>Знать:</p> <p>- основные методы анализа ЦСУ во временной и частотной областях, способы синтеза ЦСУ;</p> <p>- типовые пакеты прикладных программ анализа динамических систем;</p> <p>- кинематическую структуру и компоновку станков, системы управления ими.</p> <p>Уметь:</p> <p>- выполнять анализ технологических процессов как объектов автоматизации и управления;</p> <p>- составлять структурные схемы, их математические модели как объектов управления;</p> <p>- использовать основные методы построения математических моделей процессов, систем, их элементов и систем управления;</p> <p>- работать с каким-либо из основных типов программных систем, предназначенных для математического и имитационного моделирования Mathcad, Matlab</p>

<b>Формируемые и контролируемые компетенции</b> (код и наименование)	<b>Индикаторы достижения компетенций</b> (код и наименование)	<b>Планируемые результаты обучения</b>
		Владеть: - навыками применения элементов анализа этапов жизненного цикла продукции и управления ими; - навыками наладки, настройки, регулировки, обслуживания технических средств и систем управления.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Модуль (раздел)	Вид учебной работы	Наименование тем занятий (учебной работы)	Семестр	Объем, ч.	Баллы	Интерактив, ч.	Формы текущего контроля (наименование оценочного средства)
Модуль 1. Базовые характеристики систем управления.	Лек.	1.1. Основные понятия и определения. Сущность проблемы автоматического управления.	2	2	-	2	Вопросы к экзамену
	Ср.	1.1. Основные понятия и определения. Сущность проблемы автоматического управления.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.2. Основные устройства САР и их классификация по назначению. Классификация автоматического управления. Математическая модель центробежного регулятора скорости двигателя.	2	1	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.2. Основные устройства САР и их классификация по назначению. Классификация автоматического управления. Математическая модель центробежного регулятора скорости двигателя.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.3. Исследование влияния параметров центробежного регулятора скорости на процесс регулирования.	2	1	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.3. Исследование влияния параметров центробежного регулятора скорости на процесс регулирования.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену

Модуль (раздел)	Вид учебной работы	Наименование тем занятий (учебной работы)	Семестр	Объем, ч.	Баллы	Интерактив, ч.	Формы текущего контроля (наименование оценочного средства)
	Пр.	1.4.Характеристики переходного процесса. Частотные характеристики.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.4.Характеристики переходного процесса. Частотные характеристики.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.5.Математические модели. Линеаризация математических моделей.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.5.Математические модели. Линеаризация математических моделей	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.6. Определение частотных характеристик по анализу входного и выходного сигнала во времени.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.6. Определение частотных характеристик по анализу входного и выходного сигнала во времени.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.7. Типовые звенья передаточных функций.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.7. Типовые звенья передаточных функций.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	1.8. Определение переходной частотной характеристики.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	1.8. Определение переходной частотной характеристики.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
Модуль 2. Качественный и количественный анализ систем автоматического управления.	Лек.	2.1.Функциональные и структурные схемы. Правила преобразования структурных схем.	2	2	-	2	Устный опрос
	Ср.	2.1.Функциональные и структурные схемы. Правила преобразования структурных схем.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену



Модуль (раздел)	Вид учебной работы	Наименование тем занятий (учебной работы)	Семестр	Объем, ч.	Баллы	Интерактив, ч.	Формы текущего контроля (наименование оценочного средства)
	Пр.	2.2. Исследование устойчивости ЦСУ по критерию Гурвица.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.2. Исследование устойчивости ЦСУ по критерию Гурвица.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	2.3. Правила преобразования структурных схем.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.3. Правила преобразования структурных схем.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	2.4. Построение годографа системы и логарифмической частотной характеристики.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.4. Построение годографа системы и логарифмической частотной характеристики.	2	8	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	2.5. Математическая оценка устойчивости. Задачи устойчивости. Запас устойчивости.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.5. Математическая оценка устойчивости. Задачи устойчивости. Запас устойчивости.	2	8	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	2.6. Исследование точности ЦСУ в режиме движения по гармоническому закону.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.6. Исследование точности ЦСУ в режиме движения по гармоническому закону.	2	8	-	-	Вопросы к экзамену

Модуль (раздел)	Вид учебной работы	Наименование тем занятий (учебной работы)	Семестр	Объем, ч.	Баллы	Интерактив, ч.	Формы текущего контроля (наименование оценочного средства)
	Пр.	2.7. Определение характеристик электромеханического привода.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	2.7. Определение характеристик электромеханического привода.	2	1	-	-	Вопросы к экзамену
Модуль 3. Синтез и анализ систем автоматического управления.	Лек.	3.1. Комплексная оценка качества систем и объектов автоматического управления.	2	2	-	-	Вопросы к экзамену
	Ср.	3.1. Комплексная оценка качества систем и объектов автоматического управления.	2	1	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	3.2. Определение характеристик ЦСУ продольной подачей при тчении.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	3.2. Определение характеристик ЦСУ продольной подачей при тчении.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	3.3. Обеспечение необходимой точности ЦСУ. Оценка точности ЦСУ.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	3.3. Обеспечение необходимой точности ЦСУ. Оценка точности ЦСУ.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	3.4. Исследование влияния астатизма на качество ЦСУ.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	3.4. Исследование влияния астатизма на качество ЦСУ.	2	7	-	-	Вопросы к экзамену
	Пр.	3.5. Основы синтеза систем автоматического управления.	2	2	-	-	Отчет в электронном виде
	Ср.	3.5. Основы синтеза систем автоматического управления.	2	9	-	-	Вопросы к экзамену
	Лек.	3.6. Исследование влияния гибкой обратной связи на быстродействие ЦСУ.	2	2	-	2	Устный опрос
	Ср.	3.6. Исследование влияния гибкой обратной связи на быстродействие ЦСУ.	2	9	-	-	Вопросы к экзамену
	ПА		2	0,35			

<b>Модуль (раздел)</b>	<b>Вид учебной работы</b>	<b>Наименование тем занятий (учебной работы)</b>	<b>Семестр</b>	<b>Объем, ч.</b>	<b>Баллы</b>	<b>Интерактив, ч.</b>	<b>Формы текущего контроля (наименование оценочного средства)</b>
	Контроль		2	35,65			
<b>Итого:</b>				<b>252</b>			

## **5. Образовательные технологии**

В процессе изучения дисциплины используется технология традиционного обучения (лекции, практические работы, самостоятельная работа студента).

Ведущей деятельностью в процессе обучения является учебная деятельность студентов, характеризующаяся действующей системой познавательных процессов, начиная с восприятия информации и заканчивая сложнейшими творческими процессами, способностями общего и частного характера, эмоциональными явлениями, которые мотивируют многие системы учебных действий, а так же общими и частными мотивациями.

## **6. Методические указания по освоению дисциплины**

К особенностям обучения дисциплине можно отнести постоянное взаимодействие между студентами и преподавателями, а также максимальную приближенность материала к профессиональной деятельности, что выражается в моделировании профессиональных ситуаций.

Подготовка к занятиям заключается в работе с конспектом лекций по данной теме, в изучении соответствующего раздела учебника или учебно-методического пособия, в просмотре дополнительной литературы. Практическая работа выполняется в аудитории. Отчет по выполненной работе подготавливается и заполняется студентом самостоятельно.

1. Автоматическое управление процессами механической обработки [Электронный ресурс] : учебник / С. М. Братан [и др.]. - Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2017. - 228 с. - ISBN 978-5-9558-0514-6.

2. Егоров А. И. Введение в теорию управления системами с распределенными параметрами [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. И. Егоров, Л. Н. Знаменская. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. - 292 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-2554-9.

3. Автоматическое управление процессами механической обработки [Электронный ресурс] : учебник / С. М. Братан [и др.]. - Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2017. - 228 с. - ISBN 978-5-9558-0514-6.

4. Петраков Ю. В. Теория автоматического управления технологическими системами : учеб. пособие для студентов вузов, обуч. по направлению 220100 - Системный анализ и управление / Ю. В. Петраков, О. И. Драчев. - Гриф УМО. - Москва : Машиностроение, 2008. - 336 с. : ил. + CD. - (Для вузов). - Библиогр.: с. 336. - ISBN 978-5-217-03391-1.

5. Гуляев В. А. Теория автоматического управления технологическими процессами : учеб.-метод. пособие / В. А. Гуляев, А. О. Драчев, Ю. В. Петраков ; ТГУ. - ТГУ. - Тольятти : ТГУ, 2008. - 60 с. : ил. - Библиогр.: с. 59. - Прил.: с. 49-58. - 11-82.

6. Управление мехатронными системами распределения и сортировки на базе модульной учебной станции FESTO [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Левашкин, Д. Г., Селиванов, А. С., Мальцев, С. А. ТГУ, 2016. – 63 с. : ил. – Библиогр.: с. 55. – ISBN 978-5-8259-0947-9.

## 7. Оценочные средства

### 7.1. Паспорт оценочных средств

Семестр	Код контролируемой компетенции (или ее части)	Наименование оценочного средства
2	УК-2, ОПК-3, ОПК-6	Практические работы №№ 1-3 Вопросы к экзамену № 1-15
2	УК-2, ОПК-3, ОПК-6	Практические работы №№ 4-6 Вопросы к экзамену № 16-30
2	УК-2, ОПК-3, ОПК-6	Практические работы №№ 7-8 Вопросы к экзамену № 31-50

### 7.2. Типовые задания или иные материалы, необходимые для текущего контроля

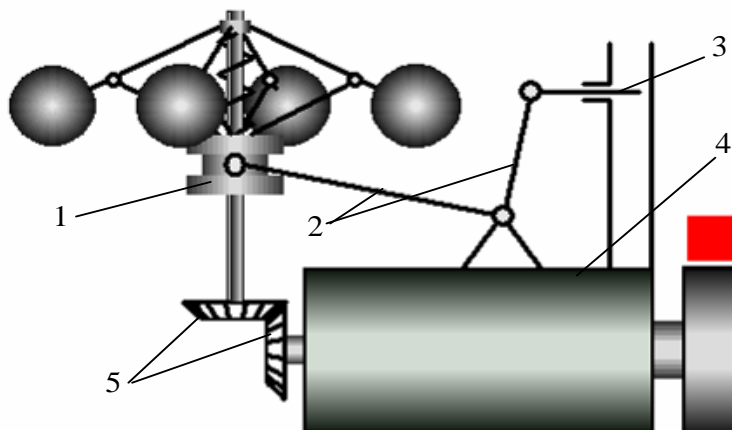
#### 7.2.1. Комплект практических работ (наименование оценочного средства)

**Практическая работа №1. Исследование влияния параметров центробежного регулятора скорости на процесс регулирования.**

**Цель работы:** Приобретение практических навыков экспериментальной оценки процесса регулирования и устойчивой работы системы автоматического управления.

#### **Теоретическая часть**

Исследуется система автоматического управления (рис.1.1), состоящая из центробежного регулятора скорости, ползун 1 которого связан рычагами 2 с заслонкой 3 подачи рабочей смеси в тепловой двигатель 4. Регулятор приводится во вращение от двигателя через зубчатую передачу 5.



**Рис.1.1. Схема ЦСУ скоростью вращения двигателя**

При функционировании ЦСУ вращение двигателя через зубчатую передачу передается регулятору скорости, шарiki которого под действием центробежной силы с одной стороны и силы пружины с другой занимают некоторое положение, что вызывает определенное открытие дросселя и система находится в равновесии. При увеличении момента нагрузки скорость двигателя уменьшается в соответствии с его характеристикой, что вызывает уменьшение скорости вращения регулятора. Центробежные силы также уменьшаются, шарiki опускаются и через рычажную систему увеличивают открытие дросселя. Увеличение подачи рабочей смеси в двигатель вызовет увеличение его скорости, равновесие вновь восстановится, но уже на другом уровне. Ясно, что разность скоростей определяет качество

регулирования: чем она меньше, тем выше качество ЦСУ. При уменьшении нагрузки ЦСУ работает в обратном порядке.

Для анализа ЦСУ необходимо составить ее математическую модель. Анализ показывает, что в систему входят двигатель, дроссель подачи рабочей смеси, рычажная передача и зубчатая передача.

Движение двигателя при ограничении учетом явлений первого порядка, т.е. его инерционностью, может быть представлено дифференциальным уравнением первого порядка:

$$I_{\partial} \frac{d\omega}{dt} + \lambda_{\partial} \omega + M_n = M_{\partial}, \quad (1.1)$$

где  $I_{\partial}$  и  $\lambda_{\partial}$  – момент инерции ротора и коэффициент вязкого трения двигателя,  $M_n$  и  $M_{\partial}$  – момент сопротивления нагрузки и момент двигателя соответственно.

Момент движения зависит от открытия дросселя подачи рабочей смеси:

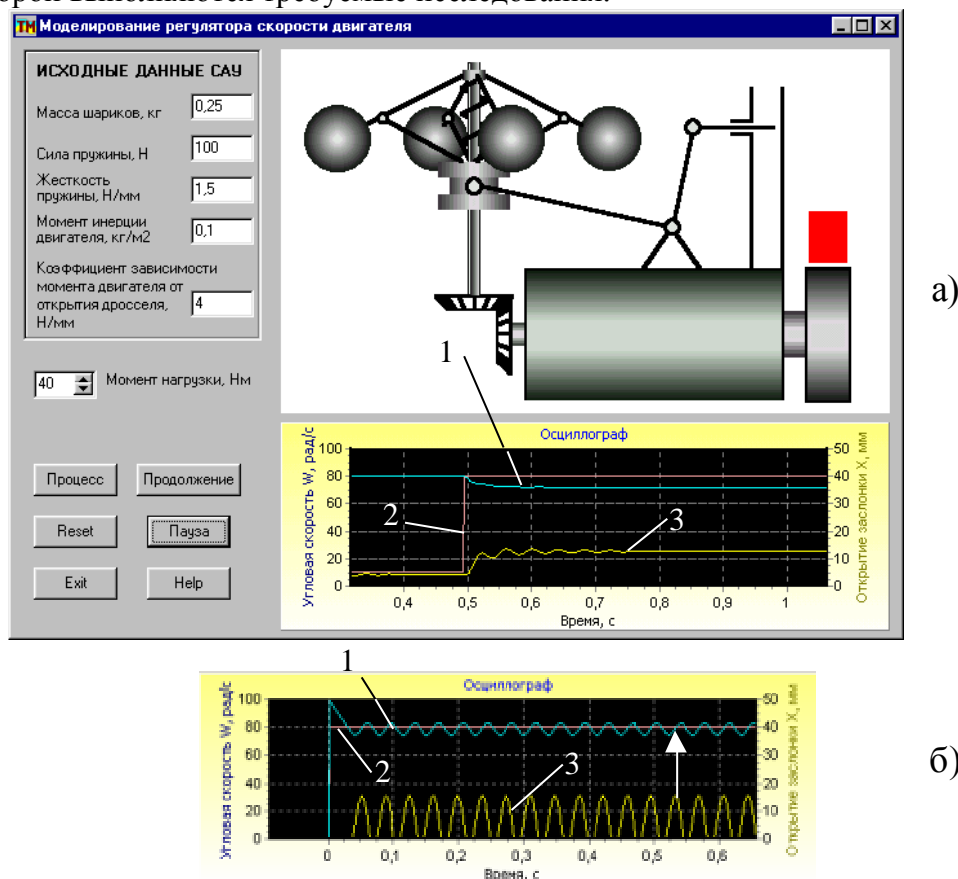
$$M_{\partial} = b k_{\partial}, \quad (1.2)$$

где  $b$  – коэффициент передачи открытия дросселя от перемещения ползуна регулятора через рычажную передачу,  $k_{\partial}$  – коэффициент пропорциональности между открытием дросселя и моментом двигателя.

Если принять передаточное отношение рычагов и зубчатой передачи равным единице, то, из геометрических соотношений, получим уравнение связи, которое определяет замкнутость ЦСУ:

$$b = 2l(1 - \sin \alpha). \quad (1.3)$$

Полученная математическая модель (1.1)-(1.3) используется в прикладной программе, с помощью которой выполняются требуемые исследования.



**Рис.1.2. Моделирование центробежного регулятора скорости**

### Задание

В соответствии с вариантом (табл.1.1) провести исследование качества регулирования в зависимости от изменяемого параметра и построить графики зависимости быстродействия и точности ЦСУ в функции от изменяемого параметра.

Таблица 1.1. Исходные данные

Первая цифра	Масса шариков $m$ , кг	Жесткость пружины $c_{np}$ , Н/мм	Момент инерции двигателя $I_{\partial}$ , кг/м <sup>2</sup>	Вторая цифра	Начальная сила пружины $P_{np}$ , Н	Коэффициент зависимости момента от открытия дросселя $k_{\partial}$ , Н/мм	Изменить параметр
0	0,35	5,0	0,25	0	55	2	$m$
1	0,30	4,5	0,20	1	100	4	$c_{np}$
2	0,25	4,0	0,16	2	150	6	$I_{\partial}$
3	0,20	3,5	0,10	3	200	8	$k_{\partial}$
4	0,15	3,0	0,06	4	130	10	$P_{np}$
5	0,10	2,0	0,04	5	85	9	$m$
6	0,15	1,0	0,12	6	70	7	$c_{np}$
7	0,20	1,5	0,14	7	95	5	$P_{np}$
8	0,25	2,5	0,31	8	170	3	$I_{\partial}$
9	0,30	3,5	0,38	9	135	11	$k_{\partial}$

### Содержание протокола

В протоколе представить цель работы, исходные данные, задание исследования, копию интерфейса для любого эксперимента из выполненной серии, описание работы ЦСУ, таблицу экспериментальных данных, графики требуемых зависимостей. Выводы.

### Практическая работа № 2. Характеристики переходного процесса. Частотные характеристики.

**Цель работы:** Приобретение практических навыков экспериментального определения частотных характеристик.

#### Теоретическая часть

Исследуемой системой является двухмассовая динамическая система, схема которой изображена на рис 2.1. Система находится под действием кинематического возбуждения –  $x$ , выходными сигналами являются координаты  $x_1$  и  $x_2$  перемещения масс  $m_1$  и  $m_2$ , связанных между собою жесткостями  $c_1$  и  $c_2$  и вязким трением  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

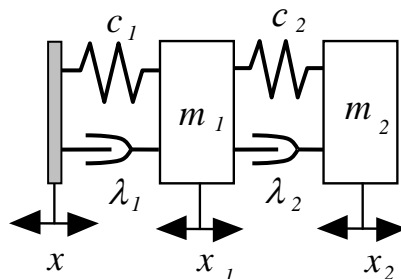


Рис.2.1. Динамическая схема двухмассовой системы

Уравнение движения системы составляется по известным правилам теоретической механики:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \lambda_2 \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + c_2 (x_1 - x_2) = \lambda_1 \left( \frac{dx}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_1 (x - x_1) \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \lambda_2 \left( \frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) + c_2 (x_2 - x_1) = 0 \end{cases}$$

Упрощенная математическая модель:

$$\begin{cases} m_1 s^2 x_1 + (\lambda_2 + \lambda_1) s x_1 + (c_2 + c_1) x_1 = (\lambda_1 + \lambda_2) s x + (c_1 + c_2) x \\ m_2 s^2 x_2 + \lambda_2 s x_2 + c_2 x_2 = \lambda_2 s x_1 + c_2 x_1 \end{cases}$$

где  $s = d/dt$  – оператор Лапласа.

Для представления математической модели в переменных состояния решим каждое уравнение относительно переменных  $x_1$  и  $x_2$ , которые записаны в старших производных соответственно. Преобразованная таким образом математическая модель имеет вид:

$$\begin{cases} x_1 = s^{-1} [-a_1 x_1 + a_1 x + s^{-1} [-a_2 x_1 + a_2 x]] \\ x_2 = s^{-1} [-a_3 x_2 + a_3 x_1 + s^{-1} [-a_4 x_2 + a_4 x]] \end{cases}$$

где коэффициенты модели:  $a_1 = (\lambda_2 + \lambda_1)/m_1$ ,  $a_2 = (c_2 + c_1)/m_1$ ,  $a_3 = \lambda_2/m_2$ ,  $a_4 = c_2/m_2$ ;

Теперь можно записать математическую модель в переменных состояния, то есть в виде системы дифференциальных уравнений, решенных относительно первых производных:

$$\begin{cases} s y_1 = -a_1 y_1 + a_1 x + y_2 \\ s y_2 = -a_2 y_1 + a_2 x \\ s y_3 = -a_3 y_3 + a_3 y_1 + y_4 \\ s y_4 = -a_4 y_3 + a_4 x \end{cases}$$

Именно такая модель реализована в прикладной программе, по которой проводятся исследование частотных характеристик.

### **Задание**

В соответствии с вариантом (Табл.2.1) провести исследование и построить АФЧХ системы (одно массовой или двух массовой, по выходам  $x_1$  или  $x_2$ ).

Таблица 2.1. Исходные данные

Первая цифра	$m_1$ , кг	$c_1$ , Н/мм	$\lambda_1$ , кг/с	Вторая цифра	$m_2$ , кг	$c_2$ , Н/мм	$\lambda_2$ , кг/с
0	10	1000	900	0	5	800	700
1	15	2000	1100	1	10	900	800
2	20	3000	1600	2	15	1100	900
3	25	4000	1800	3	20	1400	1000
4	30	2000	1300	4	30	1000	800
5	35	3000	1500	5	25	1200	1200
6	40	4000	1700	6	20	2200	1400
7	45	6000	1400	7	15	1800	800
8	50	3000	1600	8	40	1500	2000
9	55	5000	1800	9	35	2000	2200

### **Содержание протокола**

В протоколе представить цель работы, необходимые теоретические сведения, исходные данные в соответствии с вариантом задания, копию интерфейса с записью выполненных экспериментов и построениями, необходимыми для определения выходных данных; таблицы экспериментальных и расчетных данных; графики экспериментальных АФЧХ систем. Выводы.

### **Практическая работа № 3. Исследование устойчивости ЦСУ по критерию Гурвица**

**Цель работы:** Приобретение практических навыков оценки устойчивости системы автоматического управления.

#### **Теоретическая часть**

С помощью критерия Гурвица исследовать на устойчивость ЦСУ поводом суппорта металлорежущего станка, схема которого показана на рис. 3.1, а.



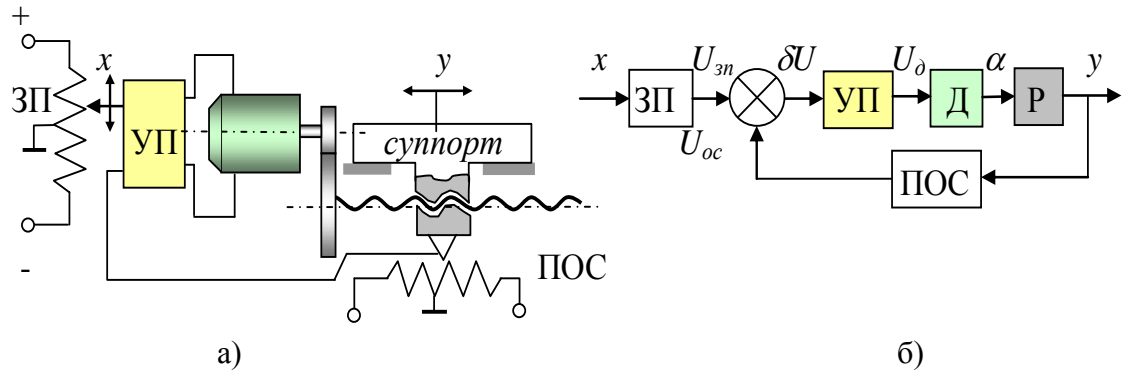


Рис.3.1. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы привода

Привод состоит из усилителя-преобразователя (ПП), двигателя (Д) постоянного тока, редуктора (Р), задающего потенциометра (ЗП) и потенциометра обратной связи (ПОС).

Прежде всего необходимо составить математическую модель повода. Согласно принципу работы, повод представляет собой замкнутую ЦСУ, функциональная схема которой приведена на рис.3.1, б. Пусть выделенные на схеме элементы описываются следующими передаточными функциями:

$$\text{ЗП: } W_{zn}(s) = \frac{U_{zn}(s)}{X(s)} = k_n;$$

$$\text{ПП: } W_{yn}(s) = \frac{U_\delta(s)}{\delta U(s)} = \frac{k_y}{T_y s + 1};$$

$$\text{Д: } W_\delta(s) = \frac{\alpha(s)}{U_\delta(s)} = \frac{k_\delta}{(T_\delta s + 1)s};$$

$$\text{Р: } W_p(s) = \frac{Y(s)}{\alpha(s)} = k_p;$$

$$\text{ПОС: } W_{noc}(s) = \frac{U_{oc}(s)}{Y(s)} = k_{oc}.$$

Теперь может быть построена структурная схема повода, в которой (при равенстве коэффициентов передачи задающего потенциометра и потенциометра обратной связи) два соответствующих элемента на функциональной схеме заменяются одним элементом с коэффициентом передачи  $k_n$  на структурной схеме (рис.3.2).

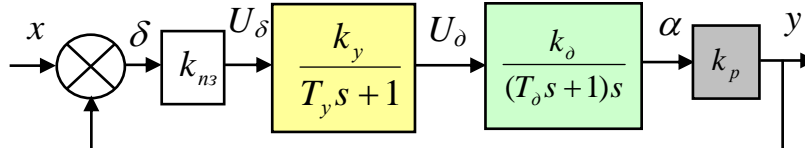


Рис.3.2. Структурная схема привода

Таким образом, передаточная функция замкнутой системы после несложных алгебраических преобразований приобретает вид:

$$W(s) = \frac{k_0}{(T_y s + 1)(T_\delta s + 1)s + k_0},$$

где  $k_0$  – коэффициент передачи системы, равный произведению коэффициентов передачи всех звеньев канала прямого действия. Итак, система имеет характеристическое уравнение 3-го порядка:

$$T_y T_\delta s^3 + (T_y + T_\delta) s^2 + s + k_0 = 0.$$

Составим детерминант Гурвица и найдем условия устойчивости.

$$\Gamma = \begin{vmatrix} T_\delta + T_y & k_0 & 0 \\ T_\delta T_y & 1 & 0 \\ 0 & T_\delta + T_y & k_0 \end{vmatrix}.$$

Анализ условий устойчивости по критерию Гурвица показывает, что единственным условием является позитивность второго детерминанта, поскольку  $a_0 = T_y T_\delta$ , равно как

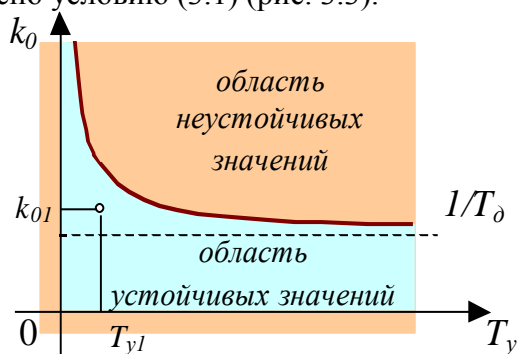
и  $\Delta_1 = a_1 = T_y + T_\delta$ , всегда больше нуля. Таким образом, для устойчивости повода необходимо, чтобы:

$$\Delta_2 = (T_y + T_\delta) - k_0 T_y T_\delta > 0.$$

После несложных преобразований получаем единое условие устойчивости системы:

$$\frac{1}{T_y} + \frac{1}{T_\delta} > k_0. \quad (3.1)$$

Выполнение этого условия обязательно, поэтому на практике вариацией, подбором параметров привода стремятся обеспечить (3.1). При этом наиболее удобно изменять параметры  $k_0$  и  $T_n$  – общий коэффициент передачи привода и постоянную времени усилителя-преобразователя. В любом случае значения вариаций этих параметров должны лежать в области D, построенной согласно условию (3.1) (рис. 3.3).



**Рис.3.3. Область устойчивых значений**

### Задание

1. По исходным данным, в соответствии с вариантом (табл.3.1), построить диаграмму устойчивости системы по критерию устойчивости Гурвица (см. рис.3.3). Определить максимально возможное значение коэффициента передачи усилителя-преобразователя и подготовить таблицу экспериментальных данных.

2. Используя прикладную программу, провести серию экспериментов и результаты записать в таблицу.

3. По результатам экспериментов построить экспериментальный график зависимости и провести его анализ.

*Таблица 3.1. Исходные данные*

Первая цифра	Усилитель $T_y, c$	Двигатель $k_\delta, рад/сВ$	Винт.пара $H_{вп}, мм$	Вторая цифра	Двигатель $T_\delta, c$	Обр.связь $k_{ос}, В/мм$
0	0,003	1,6	12	0	0,050	0,20
1	0,015	2,0	10	1	0,100	0,90
2	0,020	3,2	16	2	0,150	1,10
3	0,025	2,4	8	3	0,200	1,40
4	0,006	5,2	10	4	0,030	1,00
5	0,009	3,0	14	5	0,025	1,20
6	0,004	4,0	16	6	0,120	0,40
7	0,045	3,6	18	7	0,015	0,60
8	0,050	5,6	20	8	0,040	0,15
9	0,005	4,5	14	9	0,035	0,52

### Содержание протокола

В протоколе представить структурную схему ЦСУ, диаграмму качества, таблицу экспериментально-расчетных данных, график зависимости комплексного показателя

динамического качества от коэффициента передачи усилителя-преобразователя, копию интерфейса с записью переходной характеристики при каком-либо значении  $k_{yn}$ . Выводы.

#### Практическая работа № 4. Исследование точности ЦСУ в режиме движения по гармоническому закону

**Цель работы:** Приобретение практических навыков оценки точности систем автоматического управления при тестировании по гармоническому входному сигналу.

##### Теоретическая часть

Исследуется ЦСУ поводом, структурная схема которого представлена на рис.4.1. Видно, что ЦСУ отличается от рассмотренной в практической работе №5 тем, что усилитель-преобразователь представлен не безынерционным звеном, а апериодическим 1-го порядка.

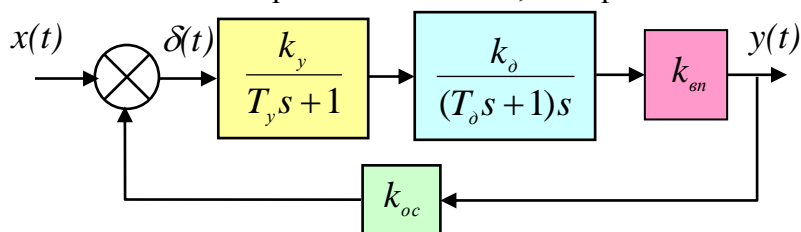


Рис.4.1. Структурная схема исследуемой ЦСУ

Для такой системы важным и первостепенным является вопрос устойчивости. Поэтому перед началом экспериментальных исследований необходимо определить максимально допустимое значение коэффициента  $k_y$  передачи усилителя-преобразователя, пользуясь формулой (3.1) с учетом зависимости для определения общего коэффициента передачи последовательно соединенных звеньев ЦСУ:

$$k_0 = k_y k_\delta k_{oc} k_{en}.$$

где  $k_{en} = H/2\pi$  – передаточная функция винтовой пары ( $H$  – шаг винтовой пары).

##### Задание

1. По исходным данным, в соответствии с вариантом (табл.4.1), рассчитать максимально допустимый коэффициент  $k_{yn}$  передачи усилителя-преобразователя, и подготовить таблицу экспериментальных данных.

2. Используя прикладную программу, выбрать диапазон и шаг изменения частоты входного сигнала. Провести серию экспериментов (для каждого значения коэффициента передачи), записывая результаты в таблицу, а затем построить графики экспериментальных зависимостей.

Таблица 4.1. Исходные данные

Первая цифра	$T_{yn}, c$	$k_\delta, рад/сВ$	$T_\delta, c$	Вторая цифра	$H_{en}, мм$	$K_{oc}$
0	0,003	1,6	0,050	0	12	0,20
1	0,015	2,0	0,100	1	10	0,90
2	0,020	3,2	0,150	2	16	1,10
3	0,025	2,4	0,200	3	8	1,40
4	0,006	5,2	0,030	4	10	1,00
5	0,009	3,0	0,025	5	14	1,20
6	0,004	4,0	0,120	6	16	0,40
7	0,045	3,6	0,015	7	18	0,60
8	0,050	5,6	0,040	8	20	0,15
9	0,005	4,5	0,035	9	14	0,52

##### Содержание протокола

В протоколе привести структурную схему ЦСУ, соответствующие расчеты коэффициента передачи усилителя-преобразователя, таблицу экспериментальных данных, копию интерфейса прикладной программы для какого-либо эксперимента, графики экспериментальных зависимостей. Выводы.

## Практическая работа № 5. Определение характеристик электромеханического привода

**Цель работы:** Приобретение практических навыков комплексного исследования систем и объектов автоматического управления.

### Теоретическая часть

На рис.5.1 представлена электромеханическая система – привод вращающего движения, который состоит из электродвигателя 1 постоянного тока, редуктора 2 и нагрузки, например, шпинделя 3.

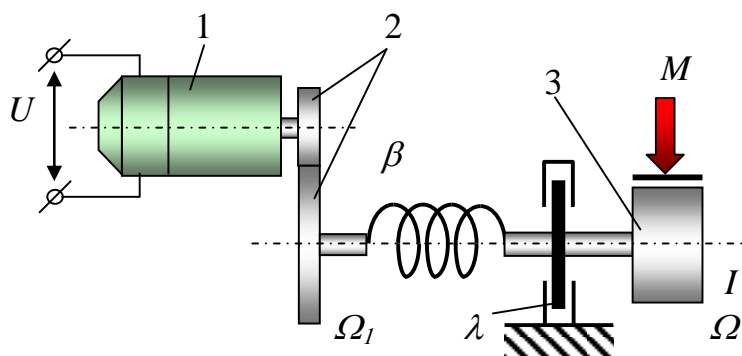


Рис.5.1. Схема электромеханической системы

Уравнения движения двигателя постоянного тока при пренебрежении явлениями второго порядка имеет вид:

$$M_{\text{двиг}} = I_{\text{двиг}} \frac{d\Omega_{\text{двиг}}}{dt} + M_1; \quad (5.1)$$

где  $M_{\text{двиг}}$ ,  $I_{\text{двиг}}$ ,  $\Omega_{\text{двиг}}$  – момент движения, момент инерции ротора и угловая скорость двигателя,  $M_1$  – момент нагрузки на валу двигателя. С другой стороны, в соответствии с электромеханической характеристикой двигателя:

$$M_{\text{двиг}} = k_{\theta} U - k_m \Omega_{\text{двиг}}; \quad (5.2)$$

где  $k_{\theta}$  – коэффициент пропорциональности между напряжением  $U$  и моментом движения,  $k_m$  – коэффициент наклона электромеханической характеристики.

Редуктор может быть представлен безынерционным звеном:

$$\Omega_1 = \Omega_{\text{двиг}} k_{\text{ред}}, \quad (5.3)$$

где  $\Omega_1$  – угловая скорость выходного вала редуктора,  $k_{\text{ред}}$  – коэффициент передачи.

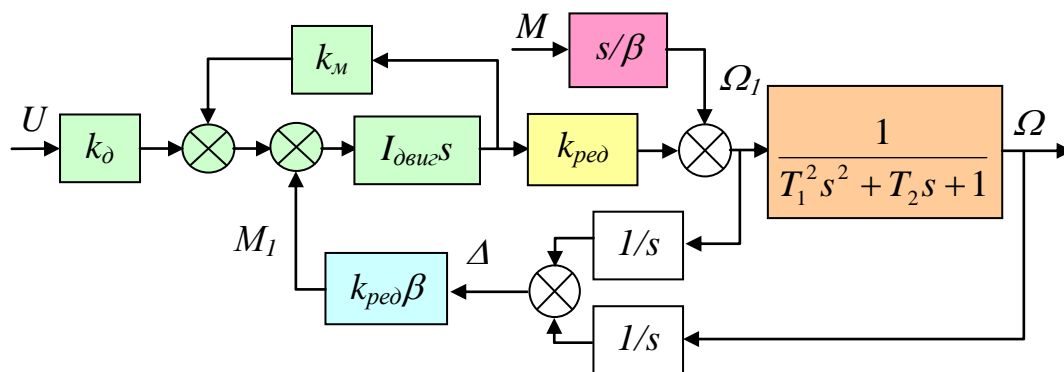
В конечном итоге, уравнение движения вала нагрузки:

$$I \frac{d\Omega}{dt} + \lambda \Omega + \beta \left( \int \Omega dt - \int \Omega_1 dt \right) + M = 0, \quad (5.4)$$

где  $M$ ,  $I$ ,  $\Omega$  – полезный момент, момент инерции и угловая скорость нагрузки,  $\beta$  – крутильная жесткость,  $\lambda$  – коэффициент вязкого трения. Таким образом, уравнение связи, которое показывает, на что расходуется полезная часть момента двигателя, имеет вид:

$$M_1 = k_{\text{ред}} \beta \left( \int \Omega_1 dt - \int \Omega dt \right). \quad (5.5)$$

По полученной математической модели, которая состоит из уравнений (5.1-5.5), построена структурная схема электромеханической системы (рис.5.2).



**Рис.5.2. Структурная схема электромеханической системы**

На схеме есть два входа: один по управляющему воздействию  $U$ , а второй - по возмущению  $M$ . Не смотря на то, что по исходной схеме (см. рис.5.1) система кажется разомкнутой, на самом деле она замкнута с обратными потоками сигналов. По разработанной математической модели электромеханического привода можно проводить предварительные исследования с целью определения характеристик, оценки качества и выбора некоторых его параметров. Такой этап предварительного проектирования всегда должен присутствовать при разработке систем и объектов автоматического управления и является чрезвычайно важным, так как именно здесь определяются общие направления удовлетворения требованиям технического задания и улучшения характеристик системы.

Например, известно, что передаточное отношение редуктора существенно влияет на динамические характеристики электромеханического привода. Оценка переходных характеристик системы, представленной разработанной математической моделью, при разных значениях коэффициента передачи редуктора позволяет решить такую задачу.

#### **Задание**

1. По исходным данным, в соответствии с вариантом (табл.5.1), определить статические характеристики электромеханического привода для разных значений напряжения питания двигателя и построить соответствующие графики. (Диапазон изменения напряжения определяет преподаватель).

2. Провести серию экспериментов по моделированию переходной характеристики при разных значениях коэффициента  $k_p$  передачи редуктора, выполнить необходимые измерения, рассчитать комплексный показатель  $A$  и построить соответствующий график для определения оптимального по быстродействию коэффициента  $k_p$ .

**Таблица 5.1 Исходные данные**

Первая цифра	$I_d$ кгм <sup>2</sup>	$k_d$ Нм/В	$k_m$ Нмс/рад	$k_p$	Вторая цифра	$I$ кгм <sup>2</sup>	$\beta$ Нм/рад	$\lambda$ Нмс/рад
0	0.004	0.50	0.63	0.1	0	0,20	1000	0.15
1	0.006	0.48	0.70	0.2	1	0,30	500	0.17
2	0.008	0.35	0.52	0.3	2	0,05	740	0.09
3	0.010	0.25	0.45	0.4	3	0,08	600	0.11
4	0.012	0.55	0.85	0.5	4	0,10	520	0.19
5	0.014	0.52	0.91	0.3	5	0,12	860	0.12
6	0.016	0.32	0.65	0.1	6	0,18	960	0.14
7	0.018	0.28	0.54	0.2	7	0,22	640	0.13
8	0.020	0.42	0.58	0.3	8	0,14	1200	0.07
9	0.022	0.30	0.43	0.5	9	0,16	1100	0.09

#### **Содержание протокола**

В протоколе представить структурную схему электромеханической системы, таблицы экспериментальных данных, соответствующие графики статических характеристик и график зависимости комплексного показателя динамического качества от коэффициента передачи редуктора, копию интерфейса прикладной программы с переходным процессом при оптимальном по быстродействию значении коэффициента передачи редуктора. Выводы.

## Практическая работа № 6. Определение характеристик гидромеханического привода

**Цель работы:** Приобретение практических навыков комплексного исследования систем и объектов автоматического управления.

### Теоретическая часть

На рис.6.1 представлена гидромеханическая система – привод поступательного движения. Привод состоит из гидравлического цилиндра 1, шток которого связан с суппортом 2 (нагрузкой) механической связью с жесткостью  $c$ . Суппорт передвигается по направляющим 3, которые характеризуются коэффициентом вязкого трения  $\lambda$ , а скорость регулируется гидравлическим дросселем 4. Таким образом, система имеет управляющий вход (открытие  $x$  дросселя) и возмущение – силу полезной нагрузки  $F$ . Целью управления является перемещение суппорта с заданной скоростью  $dy/dt$  по координате  $y$ .

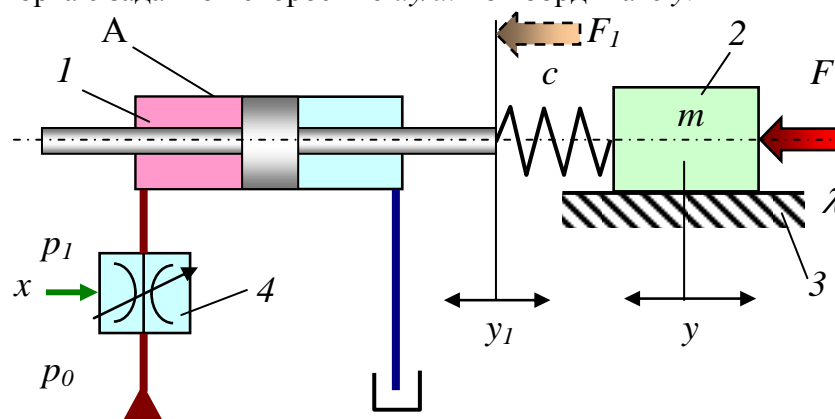


Рис.6.1. Гидромеханическая система

Движение суппорта может быть описано дифференциальным уравнением второго порядка:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + c(y - y_1) = F, \quad (6.1)$$

где  $m$  – масса суппорта;  $\lambda$  – коэффициент вязкого трения;  $y$  – перемещение массы;  $F$  – полезная нагрузка.

Гидравлический цилиндр с полезной площадью  $P$  поршня должен быть представлен двумя уравнениями, которые отвечают кинематическому и силовому возбуждению. Первое описывает движение по расходу  $Q$  масла через цилиндр:

$$y_1 = \int \frac{Q}{P} dt, \quad (6.2)$$

а второе – изменение давления в полости:

$$p_1 = \frac{F_1}{P}. \quad (6.3)$$

Расход масла через дроссель зависит от открытия дросселирующей щели и перепада давления на ней:

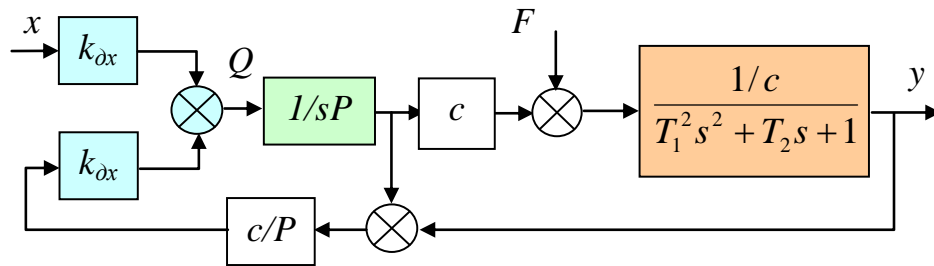
$$Q = \mu k x \sqrt{\frac{p_0 - p_1}{\rho}}, \quad (6.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода через дросселирующую щель,  $k$  – коэффициент пропорциональности между площадью щели и открытием  $x$  дросселя,  $p_0$  – давление линии питания,  $\rho$  – удельный вес масла.

К математической модели необходимо прибавить уравнение связи:

$$F_1 = (y_1 - y)c. \quad (6.5)$$

По полученной математической модели, которая состоит из уравнений (6.1-6.5), построена структурная схема гидромеханической системы (рис.6.2). На структурной схеме есть два входа: один по управляющему воздействию  $x$ , а второй по возмущению  $F$ .



**Рис.6.2. Структурная схема гидромеханической системы**

Дроссель на входе схемы представлен двумя передаточными функциями с линеаризованными коэффициентами передачи  $k_{\partial x}$  – по управляющему воздействию  $x$  и  $k_{\partial p}$  – по перепаду давления. При моделировании системы с применением численных алгоритмов можно использовать первичную нелинейную зависимость (6.4). Постоянные времени передаточной функции нагрузки в соответствии с (6.1) равняются:  $T_1^2 = m/c$ ,  $T_2 = \lambda/c$ . Здесь, как и для электромеханического привода, можно констатировать замкнутость системы, которая, тем не менее, не является ЦСУ.

Разработанная математическая модель позволяет на этапе предварительного проектирования проводить исследования с целью определения влияния параметров привода на плавность движения, оценки качества управления и возможности сопротивления внешней нагрузке и т.п. В зависимости от желаемого диапазона скоростей движения рабочего органа можно правильно выбрать соотношение: давление питания – геометрические параметры дросселя, что является важной задачей, от решения которой будут зависеть энергетические показатели привода в целом.

### **Задание**

1. По исходным данным, в соответствии с вариантом (табл.6.1), определить статические характеристики гидромеханического привода (зависимость скорости рабочего органа от силы полезной нагрузки) для разных значений давления питания гидравлической системы и построить соответствующий график. (Диапазон изменения давления определяет преподаватель).

2. Определить динамические показатели гидромеханического привода: относительное перерегулирование и затухание за период.

**Таблица 6.1 Исходные данные**

Первая цифра	$k$ , мм	$p_0$ , МПа	$P$ , см <sup>2</sup>	Вторая цифра	$c$ , Н/мм	$\lambda$ , кг/с	$m$ , кг
0	0.50	1.0	80	0	1800	1750	5
1	0.25	1.5	100	1	5000	2000	10
2	0.08	2.0	120	2	2500	1250	15
3	0.12	2.5	140	3	2000	1360	20
4	0.35	1.0	160	4	3250	2500	25
5	0.45	1.5	180	5	1250	1500	30



6	0.30	3.0	200	6	4500	1800	35
7	0.20	3.5	80	7	5250	1450	40
8	0.40	4.0	150	8	3500	1300	45
9	0.14	4.5	170	9	4000	1600	20

### Содержание протокола

В протоколе представить структурную схему исследуемой системы с исходными данными, таблицы экспериментальных данных, графики статических характеристик, динамические показатели качества переходной характеристики гидромеханического привода.

### Практическая работа № 7. Определение характеристик ЦСУ продольной подачи при тчении

**Цель работы:** Приобретение практических навыков комплексного исследования систем и объектов автоматического управления.

#### Теоретическая часть

Наиболее распространенный в металлообработке тип замкнутых ЦСУ – это ЦСУ, предназначенные для автоматического регулирования процесса резания заранее установленным образом. Такие системы могут применяться как для стабилизации заданных выходных параметров процесса резания, так и для их изменения в цикле обработки по определенному алгоритму. Наиболее целесообразно использование таких систем на заключительных, финишных операциях технологического процесса.

При механической обработке резанием точность обработки, в основном, определяется упругими деформациями технологической системы, которые, в свою очередь, зависят от силы резания. Поэтому система автоматической стабилизации силы резания на заранее заданном уровне или программного регулирования ее по заданному закону позволяет повысить точность обработки и значительно улучшить качество поверхности деталей.

ЦСУ стабилизации силы резания при тчении (рис.7.1) смонтирована на токарном станке и состоит из привода подачи и измерительного устройства. Измерительная цепь реализована с помощью динамометрического преобразователя ДП, который через усилитель У обеспечивает сигнал обратной связи  $U_{oc}$ , пропорциональный составляющей  $P_z$  силы резания. Привод подачи состоит из усилителя-преобразователя УП, двигателя постоянного тока Д и редуктора Р.

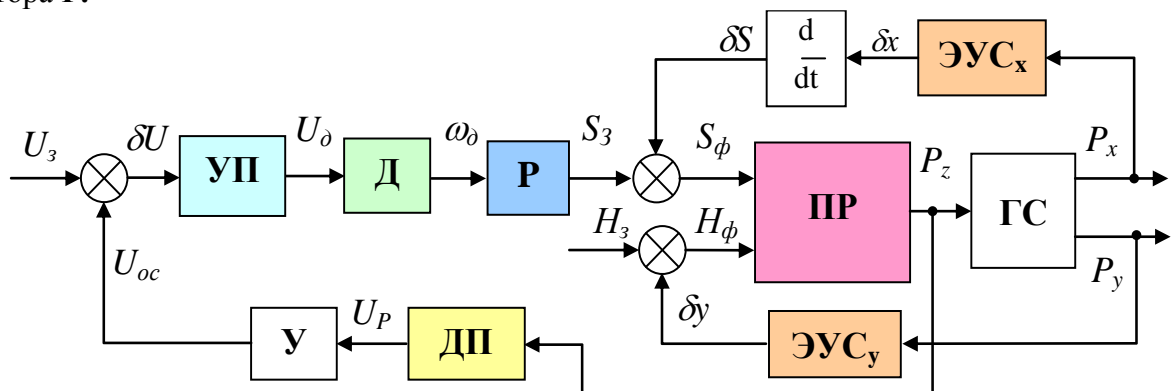


Рис.7.1. Функциональная схема ЦСУ стабилизации силы резания при тчении

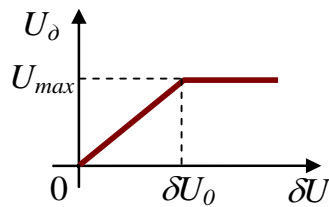
ЦСУ функционирует следующим образом. На вход системы, к сравнивающему устройству поступает сигнал  $U_3$ , который соответствует требуемому значению силы резания в определенном масштабе. На второй вход сравнивающего устройства поступает сигнал  $U_{oc}$ , вырабатываемый динамометрическим преобразователем ДП и усилителем У. Таким образом напряжение  $U_{oc}$  пропорционально реальному значению силы резания. Ошибка  $\delta U = U_3 - U_{oc}$  поступает на вход усилителя-преобразователя УП, который вырабатывает напряжение  $U_\delta$



питания двигателя **Д**. Двигатель **Д**, через редуктор **Р** определяет величину продольной подачи так, чтобы свести ошибку к минимуму.

Как управляемый объект в ЦСУ входит процесс резания **ПР**, который происходит в замкнутой технологической обрабатывающей системе.

Математическая модель ЦСУ состоит из математических моделей элементов, составляющих систему. Усилитель-преобразователь описывается дифференциальным уравнением первого порядка,



**Рис. 7.2. Характеристика усилителя-преобразователя**

где  $k_{yn}$ ,  $T_{yn}$  – коэффициент усиления и постоянная времени усилителя-преобразователя;  $U_{max}$  – напряжение насыщения.

Двигатель постоянного тока описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_e T_m \frac{d^2 \omega_\delta}{dt^2} + T_m \frac{d\omega_\delta}{dt} + \omega_\delta = k_\delta U_\delta, \quad (7.2)$$

где  $k_\delta$ ,  $T_\delta$ ,  $T_m$  – коэффициент передачи, постоянные времени (электромагнитная и механическая) двигателя.

Редуктор, тензометрический динамометр и электронный усилитель описываются линейными уравнениями, которые соответствуют безынерционным звеньям с коэффициентами передачи:  $k_p$ ,  $k_{\partial n}$ ,  $k_y$ .

Эквивалентные упругие системы (ЭУС) по соответствующим осям координат могут быть представлены дифференциальными уравнениями второго порядка, как для одномассовых систем:

$$\begin{cases} P_x = m \frac{d^2 \delta x}{dt^2} + \lambda \frac{d\delta x}{dt} + c_x \delta x; \\ P_y = m \frac{d^2 \delta y}{dt^2} + \lambda \frac{d\delta y}{dt} + c_y \delta y; \end{cases} \quad (7.3)$$

где  $m$  – масса суппорта;  $\lambda$  – коэффициент вязкого трения (сила трения пропорциональна скорости);  $c_x$ ,  $c_y$  – жесткости по соответствующей координате.

Процесс резания **ПР** может быть представлен уравнением, связывающим фактические величины подачи  $S_\phi$  и глубины  $H_\phi$  резания с составляющей  $P_z$  силы резания:

$$P_z = C_p H_\phi^{x_p} S_\phi^{y_p} V^{n_p}, \quad (7.4)$$

где  $C_p$ ,  $x_p$ ,  $y_p$ ,  $n_p$  – эмпирические коэффициент и показатели степени,  $V$  – скорость резания.

Блок **ГС** выполняет операции в соответствии с геометрическими соотношениями между составляющими силы резания:

$$P_y = \sqrt{\frac{(0.6P_z)^2}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi + \eta)}}; \quad P_x = P_y \cdot \operatorname{tg}(\varphi + \eta); \quad (7.5)$$

где  $\varphi$  – главный угол в плане резца,  $\eta$  – угол схода стружки.

С учетом приведенных выше уравнений (7.1-7.5) и связей функциональной схемы по рис. 5.30, математическую модель всей ЦСУ надо дополнить следующими зависимостями:

$$\begin{cases} \delta U = U_z - U_{oc}; \\ S_z = \omega_0 k_p; \\ S_\phi = S_z - \frac{d\delta x}{dt}; \\ H_\phi = H_z - \delta y; \\ U_{oc} = \delta y \cdot k_{\partial n} \cdot k_y; \end{cases} \quad (7.6)$$

Таким образом, стабилизация силы резания на требуемом уровне, который в определенном масштабе отвечает заданному напряжению  $U_z$  на входе ЦСУ, происходит по счет управления продольной подачей. При точении детали, припуск которой изменяется, регулирование подачи должно происходить так, чтобы сила резания оставалась постоянной на всей длине обработки. Но качество работы ЦСУ целиком зависит от его параметров, а также от параметров технологической обрабатывающей системы (ТОС) где именно и реализуется процесс точения. Поэтому важнейшей задачей при проектировании системы является правильный выбор ее параметров, а при эксплуатации – оценка качества в зависимости от параметров ТОС, которые в данном случае являются возмущениями.

#### **Задание**

1. По исходным данным, в соответствии с вариантом (табл.7.1), провести моделирование с целью определения качества переходной характеристики ЦСУ по комплексному показателю (смотри формулу (5.2)) и точности по ошибке  $\delta P$  от следующих параметров ЦСУ:

- 1) от коэффициента передачи редуктора;
- 2) от жесткости  $c_x$  упругой ТОС;
- 3) от коэффициента передачи усилителя обратной связи.

#### **Примечание:**

- диапазон изменения жесткости (Н/мм)  $18000 \leq c_x \leq 50000$ ;
- диапазон варьирования коэффициента усилителя обратной связи  $5 \leq k_y \leq 55$ ;
- диапазон изменения коэффициента передачи редуктора (мм/рад)  $0,2 \leq k_p \leq 0,05$ .

2. Выбирая шаг изменения заданного параметра, провести эксперименты на всем диапазоне его изменения, определить необходимые (см. выше) динамические характеристики и записать результаты в соответствующие таблицы.

3. Построить графики экспериментальных зависимостей комплексного показателя качества и ошибки от указанных выше параметров ЦСУ. Определить динамические показатели ЦСУ: относительное перерегулирование и затухание за период.

**Внимание!** Поскольку исходные данные задаются случайно, не исключается ситуация, когда ЦСУ оказывается неустойчивой, то есть совсем не пригодной к функционированию. Сообщения об этом, в таком случае, появляется на экране монитора во время моделирования. Рекомендации для решения такой проблемы – действовать в следующей последовательности:

- 1) изменять параметр, в функции которого анализируется динамическое качество ЦСУ в диапазоне, указанном в задании;
- 2) если в результате выполнения п.1 не удастся обеспечить постоянство ЦСУ, уменьшать коэффициент передачи прямого канала ЦСУ за счет уменьшения коэффициента усиления транзисторного (тиристорного) преобразователя. Полученный таким образом новый коэффициент занести в исходные данные с соответствующим комментарием.

Таблица 7.1. – Исходные данные

Первая цифра шифра	Диаметр детали, мм D	Жесткость ТОС, Н/мм Су	Масса М, кг	Коэффициент вязкого трения $\lambda$	Скорость резания, м/мин V	Главный угол резца в плане, град FI	Коэф. передачи динамометра, В/Н	Вторая цифра шифра	Тиристорный преобразователь	Двигатель		
									к <sub>уп</sub>	к <sub>дв</sub>	Т <sub>я</sub> , с	Т <sub>м</sub> , с
0	200	30000	100	1200	200	30	0.001	0	20	0.8	0.003	0.01
1	180	28000	90	1400	180	45	0.002	1	30	0.9	0.005	0.02
2	160	26000	70	1000	160	60	0.003	2	40	1.0	0.007	0.03
3	140	24000	60	800	140	75	0.004	3	50	1.1	0.010	0.04
4	120	22000	50	900	80	80	0.005	4	60	1.2	0.008	0.05
5	100	20000	40	600	100	45	0.006	5	70	1.3	0.009	0.01
6	80	23000	30	700	110	60	0.007	6	80	0.7	0.006	0.02
7	60	25000	55	1100	120	75	0.008	7	90	0.6	0.004	0.03
8	40	27000	65	550	90	30	0.002	8	100	1.5	0.003	0.04
9	20	29000	85	750	130	45	0.004	9	110	1.8	0.005	0.05

### **Содержание протокола**

В протоколе представить структурную схему исследуемой ЦСУ с исходными данными, копию интерфейса при моделировании, таблицы экспериментальных данных, графики соответствующих зависимостей. Выводы.

### **Практическая работа № 8. Исследование влияния астатизма на качество ЦСУ**

**Цель работы:** Приобретение практических навыков экспериментального определения параметров ПИ-регулятора.

#### **Теоретическая часть**

Исследуются две ЦСУ: исходная система с астатизмом первого порядка, преобразованная (с ПИ-регулятором) – система с астатизмом второго порядка. Известно, что для оценки точности астатических систем второго порядка используется управляющее воздействие в виде сигнала с постоянным ускорением. При таком режиме работы астатическая система второго порядка имеет ошибку, по величине которой можно проводить оценку качества ЦСУ и процесса регулирования. Установившаяся ошибка астатической ЦСУ первого порядка в этом случае будет стремиться к бесконечности.

#### **Задание**

В соответствии с вариантом (табл.8.1) провести следующие исследования.

1. Установить экспериментально минимальное значение постоянной времени ПИ-регулятора, при которой ЦСУ теряет устойчивость. Определить диапазон и шаг изменения постоянной времени  $T_u$  и подготовить таблицу экспериментальных и расчетных данных.
2. Провести эксперименты при статическом режиме работы и рассчитать комплексный критерий качества ЦСУ с ПИ-регулятором.
3. Убедиться в устранении скоростной ошибки для ЦСУ с ПИ-регулятором.
4. Провести эксперименты при движении с постоянным ускорением и определить точность регулирования.
5. Обработать результаты экспериментальных исследований и построить соответствующие графики.

Таблица 8.1. Исходные данные

Первая цифра	Усилитель-преобразователь		Вторая цифра	Двигатель	
	$k_{yn}$	$T_{yn}, c$		$k_{\partial}, рад/сВ$	$T_{\partial}, c$
0	10	0,012	0	0,5	0,08
1	15	0,025	1	1,0	0,09
2	7	0,030	2	1,5	0,11
3	8	0,003	3	2,0	0,14
4	9	0,006	4	0,8	0,10
5	12	0,004	5	0,9	0,12
6	13	0,005	6	1,2	0,07
7	14	0,056	7	1,3	0,06
8	16	0,037	8	0,7	0,05
9	18	0,045	9	0,6	0,15

### **Содержание протокола**

В протоколе представить структурные схемы исходной ЦСУ и системы с ПИ-регулятором, исходные данные, копию интерфейса для какого-либо режима работы, таблицу экспериментальных и расчетных данных; графики экспериментальных зависимостей. Выводы.

### **Типовой пример задания**

#### **Практическая работа № 8. Исследование влияния астатизма на качество ЦСУ**

**Цель работы:** Приобретение практических навыков экспериментального определения параметров ПИ-регулятора.

#### **Практическая часть**

На рис.8.1 представлен интерфейс прикладной программы, с помощью которой выполняются экспериментальные исследования. Программа «ПИ\_регулятор» находится на диске. Инструкции и пояснения для работы с программой содержатся в самой программе и появляются на экране монитора при нажатии кнопки Help.

После активизации прикладной программы «ЦСУ\_с\_ПИ-регулятором», которая находится на диске, на главном интерфейсе задаются исходные данные в соответствии с вариантом.

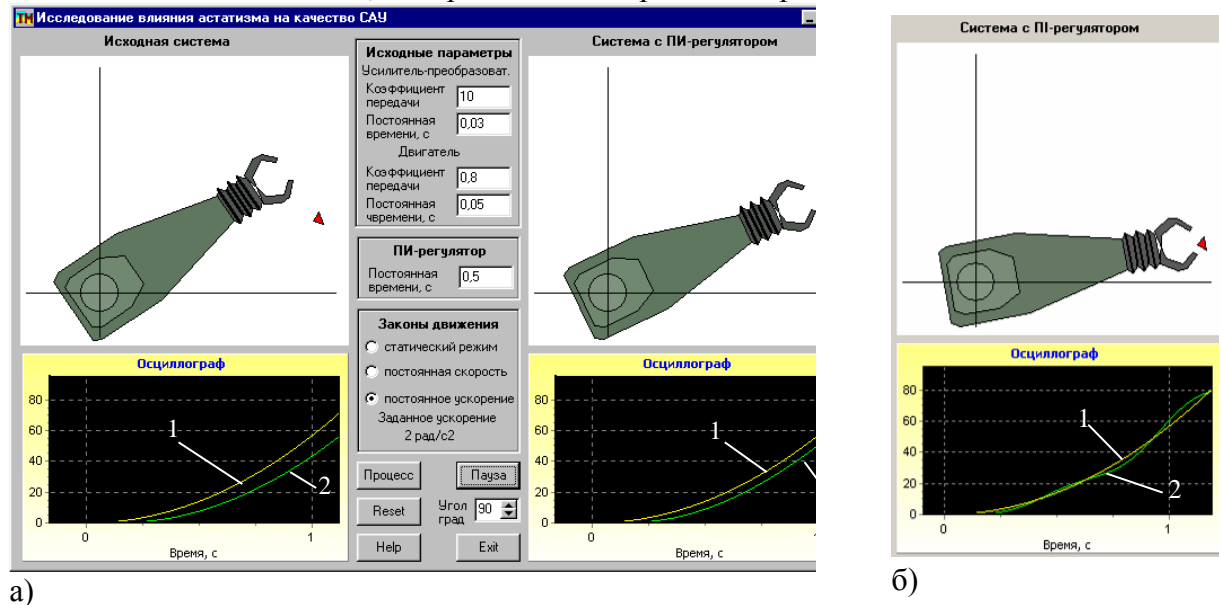
При исследовании влияния постоянной времени ПИ-регулятора на качество регулирования установить статический режим и провести серию экспериментов для оценки комплексного критерия  $A$  качества, в соответствии с формулой (5.2). Измерение экспериментальных данных, необходимых для расчетов, проводится по осциллограммам. При этом для исходной системы комплексный критерий  $A$  рассчитывается один раз, а для ЦСУ с ПИ-регулятором – для всего выбранного диапазона изменения постоянной времени  $T_u$ . Диапазон изменения постоянной  $T_u$  времени определяется от значения, при котором ЦСУ становится неустойчивой, в сторону увеличения. Экспериментальные данные записывают в таблицу, пример которой представлен ниже.

*Таблица 8.1. Экспериментальные и расчетные данные*

№	$T_u, c$	Статический режим			Движ. с пост ускорением
		$\alpha_{max}, град$	$t_n, c$	$A$	$\delta\alpha, град$
1	0,8	76,28	2,61	3,32	8,3
2	0,7	77,63	2,34	3,03	8,1
3	0,6	79,40	2,10	2,78	7,2
4	0,5	81,80	1,72	2,34	6,1
5	0,4	85,30	1,40	1,99	5,2
6	0,3	90,70	1,40	2,12	4,0
7	0,2	100,40	2,05	3,43	2,6

8	0,1	123,50	30,0	61,75	2,2
9	0,05	Система неустойчива			

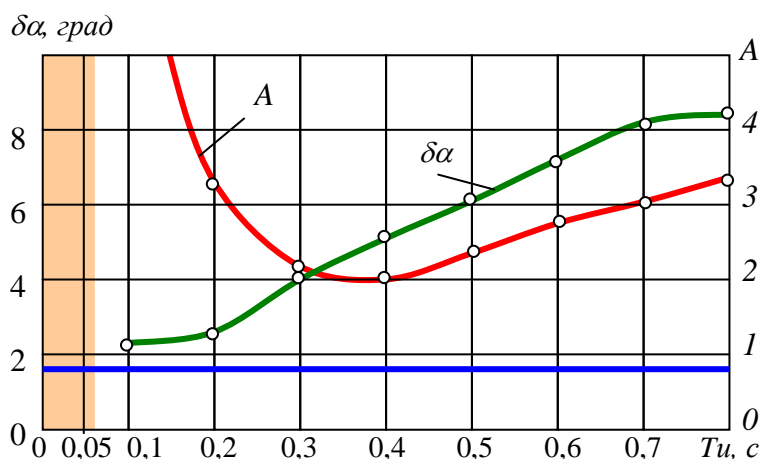
Затем выбирается закон движения с постоянным ускорением ( $2 \text{ рад/с}^2$ ). На рис.8.1 на изображении осциллографов линией 1 обозначен закон движения, который задается, а линией 2 – фактический закон движения, воспроизводимый рабочим органом.



**Рис.8.1. Исследование влияния постоянной времени ПИ-регулятора на точность ЦСУ**

При выполнении экспериментов определяется зависимость установившейся ошибки через 1 с после начала переходного процесса от постоянной  $T_u$  времени ПИ-регулятора. Рекомендуется начинать эксперименты с максимальной величины постоянной времени ПИ-регулятора, а затем постепенно, согласно выбранному шагу, уменьшать ее до величины, при которой система теряет устойчивость.

На рис.8.1, а представлен интерфейс прикладной программы при моделировании исходной системы (слева) и системы с ПИ-регулятором, который имеет постоянную времени 0,7 с. Ошибка исходной системы, которая установилась через 1 с, равняется  $13,4^0$ , а ошибка системы с ПИ-регулятором –  $8,1^0$ . Кроме того, моделирование позволяет убедиться, что для исходной системы ошибка с течением времени увеличивается, то есть такая ЦСУ не способна работать в заданном режиме работы. Преобразованная ЦСУ будет поддерживать постоянное значение установившейся ошибки. Графики экспериментальных зависимостей ошибки, которая установилась через 1с, и комплексного критерия качества  $A$  от  $T_u$ , построенные по изложенной методике, представлены на рис.8.2. Там же, для сравнения, прямой линией, параллельной оси абсцисс, показано значение комплексного критерия для исходной системы.



**Рис.8.2. Зависимость установившейся ошибки (через 1с) и критерия  $A$  от постоянной времени ПИ-регулятора**

Уменьшение постоянной времени ПИ-регулятора положительно влияет на точность системы, но после некоторой величины постоянной времени ПИ-регулятора система теряет устойчивость, то есть становится не способной к функционированию. Такой случай зафиксирован на рис.8.1, б, когда постоянная времени  $T_u \leq 0,1c$ .

### **7.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

#### **7.3.1. Вопросы к промежуточной аттестации**

Семестр 2

№ п/п	Вопросы к экзамену
1	Основные понятия и определения
2	Содержание понятий: «система управления», «объект управления», «управляющие и возмущающие воздействия», «управляющие координаты»
3	Классификация систем автомеханического управления
4	Принцип разомкнутого управления. Управление по возмущению и отклонению
5	Основные виды алгоритмов функционирования
6	Классификация систем по характеру передачи сигналов
7	Классификация систем по основным видам уравнений динамики процессов управления
8	Математическое описание линейных систем
9	Математическое моделирование элементов ЦСУ
10	Классификация элементов ЦСУ. Статистические и динамические характеристики элементов
11	Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений динамических режимов работы элементов ЦСУ. Стандартная форма записи дифференциальных уравнений
12	Основные свойства преобразования Лапласа
13	Характеристики динамических звеньев ЦСУ
14	Понятие о динамическом звене. Характеристики динамического звена, передаточные функции, частотные характеристики (амплитудные и фазовые), логарифмические частотные характеристики, временные характеристики (переходные и весовые)
15	Типовые динамические звенья и их характеристики

№ п/п	Вопросы к экзамену
16	Структурная схема систематического управления. Основные правила преобразования структурных схем: последовательное соединение звеньев; параллельное соединение звеньев; звено, охваченное обратной связью; перенос сумматора; перенос узла, перестановка узлов и сумматоров
17	Вычисление передаточных функций и частотных характеристик одноконтурной и многоконтурной разомкнутой системы. Передаточные функции и управление замкнутой ЦСУ. Частотные характеристики замкнутой системы
18	Математическое моделирование и составление структурной схемы
19	Устойчивость систем автоматического управления. Понятие устойчивости линеаризованных систем. Необходимое и достаточное условие устойчивости
20	Алгебраические критерии устойчивости Рауса и Гурвица
21	Частотные критерии устойчивости. Принцип аргумента. Критерии устойчивости Михайлова А.В. Построение областей устойчивости. Понятие о Д-разбиении
22	Критерии устойчивости Найквиста. Анализ устойчивости по логарифмическим частотным характеристикам
23	Устойчивость систем с запаздыванием
24	Методы оценки качества регулирования ЦСУ
25	Понятие о качестве процесса управления. Оценка качества систем управления в установившихся режимах. Постоянные ошибки. Астатические системы. Точность при гармоническом воздействии. Установившиеся ошибки при произвольном воздействии, коэффициенты ошибок
26	Оценки качества переходного процесса. Оценки качества процесса при воздействии ступенчатой функции
27	Частотные методы оценки качества регулирования. Оценка качества регулирования по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы; по вещественной частотной характеристике замкнутой системы; с по амплитудно-фазовой характеристике разомкнутой системы; по логарифмическим частотным характеристикам
28	Корневые оценки качества регулирования
29	Синтез ЦСУ по заданным показателям качества процесса управления
30	Повышение точности в установившихся режимах и обеспечение устойчивости и качества управления синтезируемых систем за счет изменения параметров систем и путем введения корректирующих устройств
31	Система автоматического управления продольной подачей при точении
32	Система автоматического управления поперечной подачей при врезном шлифовании
33	Система автоматического управления поворотом рабочего органа промышленного робота
34	Система автоматического регулирования размера детали на бесцентрово-шлифовальном станке
35	Система автоматического дистанционного управления манипулятором
36	Система автоматического управления гидравлическим суппортом токарного станка
37	Система автоматического управления подачей при фрезеровании
38	Система автоматического управления продольной подачей при сверлении
39	Содержание понятий: «система управления», «объект управления», «управляющие и возмущающие воздействия», «управляющие координаты»
40	Классификация систем автомеханического управления
41	Принцип разомкнутого управления. Управление по возмущению и отклонению
42	Основные виды алгоритмов функционирования
43	Классификация систем по характеру передачи сигналов

<b>№ п/п</b>	<b>Вопросы к экзамену</b>
44	Классификация систем по основным видам уравнений динамики процессов управления
45	Математическое описание линейных систем
46	Математическое моделирование элементов ЦСУ
47	Классификация элементов ЦСУ. Статистические и динамические характеристики элементов
48	Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений динамических режимов работы элементов ЦСУ. Стандартная форма записи дифференциальных уравнений
49	Содержание понятий: «система управления», «объект управления», «управляющие и возмущающие воздействия», «управляющие координаты»
50	Классификация систем автомеханического управления



### 7.3.2. Критерии и нормы оценки

Семестр	Форма проведения промежуточной аттестации	Критерии и нормы оценки	
2	Экзамен (устно)	«отлично»	исчерпывающие ответы на вопросы экзаменационного билета и на дополнительные вопросы
		«хорошо»	правильные ответы на вопросы билета с незначительными недочетами
		«удовлетворительно»	правильные ответы на вопросы билета с существенными недочетами
		«неудовлетворительно»	неправильные ответы на вопросы экзаменационного билета

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### 8.1. Обязательная литература

№ п/п	Авторы, составители	Заглавие (заголовок)	Тип (учебник, учебное пособие, учебно-методическое пособие, практикум, др.)	Год издания	Количество в научной библиотеке / Наименование ЭБС
1	С. М. Братан [и др.]	Автоматическое управление процессами механической обработки	Учебник	2017	ЭБС "ZNANIUM.CO M"
2	А. И. Егоров, Л. Н. Знаменская	Введение в теорию управления системами с распределенными параметрами	Учебное пособие	2017	ЭБС "Лань"

### 8.2. Дополнительная литература

№ п/п	Авторы, составители	Заглавие (заголовок)	Тип (учебник, учебное пособие, учебно-методическое пособие, практикум, др.)	Год издания	Количество в научной библиотеке / Наименование ЭБС
1	Ю.В. Петраков, О. И. Драчев	Теория автоматического управления технологическими системами	Учебное пособие	2009	109
2	В. А. Гуляев, А. О. Драчев, Ю. В. Петраков	Теория автоматического управления технологическими системами	Учебно-методическое пособие	2009	138

### 8.3. Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

- Российская государственная библиотека (РГБ), г. Москва – Режим доступа: <http://www.pnb.rsl.ru>;
- Российская государственная библиотека. г. Москва. Диссертации – Режим доступа: <http://www.diss.rsl.ru>;
- Российская национальная библиотека (РНБ), г. Санкт-Петербург – Режим доступа: <http://www.nlr.ru>;
- Открытая русская электронная библиотека РГБ (OREL) – Режим доступа: <http://www.orel.rsl.ru>;
- Сайт Всероссийского научно-исследовательского конъюнктурного института - старейшего в России научного учреждения, имеющего прямое отношение к маркетингу – Режим доступа: [www.vniki.ru](http://www.vniki.ru).
- Elibrary [Электронный ресурс] : научная электронная библиотека. – Москва : НЭБ, 2000. – Режим доступа: <http://www.elibrary.ru>.
- Scopus [Электронный ресурс] библиографическая и реферативная база данных и инструмент для отслеживания цитируемости статей, опубликованных в научных изданиях. - Режим доступа: <http://www.scopus.com>;
- Web of Science [Электронный ресурс] [поисковая интернет-платформа](#), объединяющая реферативные базы данных публикаций в [научных журналах](#) и [патентов](#), в том числе базы, учитывающие взаимное цитирование публикаций. Web of Science охватывает материалы по естественным, техническим, общественным, гуманитарным наукам и искусству. - Режим доступа: <http://www.webofknowledge.com>.

### 8.4. Перечень программного обеспечения

№ п/п	Наименование ПО	Реквизиты договора (дата, номер, срок действия)
1	Windows: WinPro 10 RUS Upgrd OLP NL Acdmc	договор № 757 от 04.07.2018, срок действия – бессрочно; контракт № 1653 от 14.12.2018, срок действия – бессрочно
2	Office Standard: Office Stdandard 2013 Russian OLP NL AcademicEdition  Office Stdandard 2016 Russian OLP NL AcademicEdition  Office Stdandard 2016 Russian OLP NL AcademicEdition	контракт № 690 от 19.05.2015, срок действия – бессрочно  договор № 757 от 04.07.2018, срок действия – бессрочно  контракт № 727 от 20.07.2016, срок действия – бессрочно
3	КОМПАС-3D v 18 (Проектирование и конструирование в машиностроении)	контракт № 1198 от 18.11.2019, срок действия – бессрочно

**8.5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

№ п/п	<b>Наименование оборудованных учебных кабинетов, лабораторий, мастерских и др. объектов для проведения практических и лабораторных занятий, помещений для самостоятельной работы обучающихся (номер аудитории)</b>	<b>Перечень основного оборудования</b>
1	Компьютерный класс. Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа. Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа. Учебная аудитория для курсового проектирования (выполнения курсовых работ). Учебная аудитория для проведения групповых и индивидуальных консультаций. Учебная аудитория для проведения занятий текущего контроля и промежуточной аттестации. (Е-306)	Переносной проектор, экран, компьютерные Столы, стол преподавательский, стулья, доска аудиторная, Столы ученические двухместные, ПК
2	Учебная аудитория для проведения занятий лекционного типа. Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа. Учебная аудитория для курсового проектирования (выполнения курсовых работ). Учебная аудитория для проведения групповых и индивидуальных консультаций. Учебная аудитория для проведения занятий текущего контроля и промежуточной аттестации. (Е-309)	Стол преподавательский, Столы ученические двухместные (моноблок) , стулья, доска аудиторная (меловая), кафедра, проектор, экран, процессор, шкафы
3	Помещение для самостоятельной работы студентов (Г-401)	Столы, стулья, компьютеры
4	Помещение для самостоятельной работы обучающихся (С-508)	Доска аудиторная (меловая), столы ученические, стол преподавательский, стулья, стенды, шкафы.