

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

Б1.О.28  
(индекс дисциплины)

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**  
(наименование дисциплины)

по направлению подготовки

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

направленность (профиль)

Технология машиностроения

Форма обучения: заочная

Год набора: 2021

Общая трудоемкость: 4 ЗЕ

**Распределение часов дисциплины по семестрам**

| Семестр                                      | 8          | Итого      |
|--|------------|------------|
| Форма контроля                               | зачет      |            |
| Вид занятий                                  |            |            |
| Лекции                                       | 4          | 4          |
| Лабораторные                                 | 6          | 6          |
| Практические                                 | 6          | 6          |
| Руководство: курсовые работы (проекты) / РГР |            |            |
| Промежуточная аттестация                     | 0,25       | 0,25       |
| Контактная работа                            | 16,25      | 16,25      |
| Самостоятельная работа                       | 124        | 124        |
| Контроль                                     | 3,75       | 3,75       |
| <b>Итого</b>                                 | <b>144</b> | <b>144</b> |

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

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

**Срок действия рабочей программы дисциплины до «31» августа 2026 г.**

УТВЕРЖДЕНО

На заседании кафедры

«Оборудование и технологии машиностроительного производства»

---

(протокол заседания № 1 от «31» августа 2020 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: «Высшая математика», «Основы технологии машиностроения», «Металлорежущие станки», «Основы САПР».

Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее: «Автоматизированное проектирование технологических процессов», «Технология машиностроения».

## 3. Планируемые результаты обучения

| Формируемые и контролируемые компетенции<br>(код и наименование)        | Индикаторы достижения компетенций<br>(код и наименование)  | Планируемые результаты обучения   |
|---|--|---|
| ОПК-3. Способен внедрять и осваивать новое технологическое оборудование | ОПК-3.1. Использует нормативную и технологическую документацию для проектирования и сопровождения производства технических объектов, систем и процессов в области машиностроения.<br>ОПК-3.2. Умеет настраивать технологическое оборудование на производство новой номенклатуры изделий в условиях машиностроительного производства. | Знать:<br>- методологические основы функционирования, моделирования и синтеза систем автоматического управления (САУ);<br>- основные методы анализа САУ во временной и частотной областях, способы синтеза САУ;<br>- типовые пакеты прикладных программ анализа динамических систем;<br>- кинематическую структуру и компоновку станков, системы управления ими;<br>- средства для контроля, испытаний, диагностики и адаптивного управления оборудованием. |
|   |  | Уметь:<br>- выполнять анализ технологических процессов как объектов автоматизации и управления;<br>- составлять структурные схемы, их математические модели как объектов управления;<br>- использовать основные методы построения математических  |

| Формируемые и контролируемые компетенции<br>(код и наименование)  | Индикаторы достижения компетенций<br>(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-7. Способен участвовать в разработке технической документации, связанной с профессиональной деятельностью | <p>ОПК-7.1.Использует техническую и справочную литературу, нормативные документы при выполнении исследовательской работы в области машиностроения.</p> <p>ОПК-7.2. Разрабатывает конструкторско-технологическую документацию при технологической подготовке производства.</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 (САУ);</li> <li>- проводить анализ САУ, оценивать статистические и динамические характеристики;</li> <li>- рассчитывать основные качественные показатели САУ, выполнять: анализ ее устойчивости, синтез регулятора;</li> <li>- разрабатывать алгоритмы централизованного контроля координат технологического объекта;</li> <li>- рассчитывать одноконтурные и</li> </ul> |

| <b>Формируемые и контролируемые компетенции</b><br>(код и наименование) | <b>Индикаторы достижения компетенций</b><br>(код и наименование) | <b>Планируемые результаты обучения</b>  |
|---|--|---|
|   |  | <p>многоконтурные системы автоматического регулирования применительно к конкретному технологическому объекту;<br/> - использовать основные технологии передачи информации в среде локальных сетей, сети Internet.</p> <p>Владеть:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- навыками оформления проектной и конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД;</li> <li>- навыками построения систем автоматического управления системами и процессами;</li> </ul> <p>навыками анализа технологических процессов как объекта управления и выбора функциональных схем их автоматизации.</p> |

#### 4. Структура и содержание дисциплины

| Модуль<br>(раздел)  | Вид<br>учебной<br>работы | Наименование тем занятий<br>(учебной работы)   | Семестр | Объем,<br>ч. | Баллы | Интерактив, ч. | Формы текущего<br>контроля<br>(наименование<br>оценочного<br>средства) |
|---|--------------------------|--|---------|--------------|-------|----------------|--|
| Модуль 1.<br>Базовые<br>характеристики<br>систем<br>управления. | Лек.                     | 1.1. Основные понятия и определения.<br>Сущность проблемы автоматического<br>управления.   | 8       | 1            | -     | 2              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 1.1. Основные понятия и определения.<br>Сущность проблемы автоматического<br>управления.   | 8       | 5,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 1.2. Основные устройства САР и их<br>классификация по назначению.<br>Классификация автоматического<br>управления. Математическая модель<br>центробежного регулятора скорости<br>двигателя. | 8       | 5,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Лаб.                     | 1.3. Исследование влияния параметров<br>центробежного регулятора скорости на<br>процесс регулирования.   | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном<br>виде  |
|   | Ср.                      | 1.3. Исследование влияния параметров<br>центробежного регулятора скорости на<br>процесс регулирования.   | 8       | 5,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 1.4. Характеристики переходного<br>процесса. Частотные характеристики.   | 8       | 5,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 1.5. Математические модели.<br>Линеаризация математических моделей   | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Лаб.                     | 1.6. Определение частотных<br>характеристик по анализу входного и<br>выходного сигнала во времени.   | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном<br>виде  |

| Модуль<br>(раздел)   | Вид<br>учебной<br>работы | Наименование тем занятий<br>(учебной работы)   | Семестр | Объем,<br>ч. | Баллы | Интерактив, ч. | Формы текущего<br>контроля<br>(наименование<br>оценочного<br>средства) |
|--|--------------------------|--|---------|--------------|-------|----------------|--|
|  | Ср.                      | 1.6. Определение частотных характеристик по анализу входного и выходного сигнала во времени. | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Ср.                      | 1.7. Типовые звенья передаточных функций.  | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Лаб.                     | 1.8. Определение переходной частотной характеристики.  | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|  | Ср.                      | 1.8. Определение переходной частотной характеристики.  | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
| Модуль 2.<br>Качественный и количественный анализ систем автоматического управления. | Лек.                     | 2.1.Функциональные и структурные схемы. Правила преобразования структурных схем.             | 8       | 1            | -     | 2              | Вопросы к зачету   |
|  | Ср.                      | 2.1.Функциональные и структурные схемы. Правила преобразования структурных схем.             | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Лаб.                     | 2.2. Исследование устойчивости САУ по критерию Гурвица.                                      | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|  | Ср.                      | 2.2. Исследование устойчивости САУ по критерию Гурвица.                                      | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Ср.                      | 2.3. Правила преобразования структурных схем.  | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Ср.                      | 2.4. Построение годографа системы и логарифмической частотной характеристики.                | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|  | Ср.                      | 2.5.Математическая оценка устойчивости. Задачи устойчивости. Запас устойчивости.             | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |

| Модуль<br>(раздел)  | Вид<br>учебной<br>работы | Наименование тем занятий<br>(учебной работы)                                   | Семестр | Объем,<br>ч. | Баллы | Интерактив, ч. | Формы текущего<br>контроля<br>(наименование<br>оценочного<br>средства) |
|---|--------------------------|--|---------|--------------|-------|----------------|--|
|   | Пр.                      | 2.6. Исследование точности САУ в режиме движения по гармоническому закону.     | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|   | Ср.                      | 2.6. Исследование точности САУ в режиме движения по гармоническому закону.     | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Пр.                      | 2.7. Определение характеристик электромеханического привода.                   | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|   | Ср.                      | 2.7. Определение характеристик электромеханического привода.                   | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
| Модуль 3.<br>Синтез и анализ систем автоматического управления. | Лек.                     | 3.1. Комплексная оценка качества систем и объектов автоматического управления. | 8       | 1            | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 3.1. Комплексная оценка качества систем и объектов автоматического управления. | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Пр.                      | 3.2. Определение характеристик САУ продольной подачей при тчении.              | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|   | Ср.                      | 3.3. Обеспечение необходимой точности САУ. Оценка точности САУ.                | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Пр.                      | 3.4. Исследование влияния астатизма на качество САУ.                           | 8       | 1,5          | -     | -              | Отчет в электронном виде   |
|   | Ср.                      | 3.4. Исследование влияния астатизма на качество САУ.                           | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 3.5. Основы синтеза систем автоматического управления.                         | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |
|   | Лек.                     | 3.6. Исследование влияния гибкой обратной связи на быстродействие САУ.         | 8       | 1            | -     | 2              | Вопросы к зачету   |
|   | Ср.                      | 3.6. Исследование влияния гибкой обратной связи на быстродействие САУ.         | 8       | 6,4          | -     | -              | Вопросы к зачету   |



| <b>Модуль<br/>(раздел)</b> | <b>Вид<br/>учебной<br/>работы</b> | <b>Наименование тем занятий<br/>(учебной работы)</b> | <b>Семестр</b> | <b>Объем,<br/>ч.</b> | <b>Баллы</b> | <b>Интерактив, ч.</b> | <b>Формы текущего<br/>контроля<br/>(наименование<br/>оценочного<br/>средства)</b> |
|----------------------------|-----------------------------------|--|----------------|----------------------|--------------|-----------------------|---|
|                            | ПА                                |  | 8              | 0,25                 |              |                       |   |
|                            | Контроль                          |  | 8              | 3,75                 |              |                       |   |
| <b>Итого:</b>              |                                   |  |                | <b>144</b>           |              |                       |   |

## **5. Образовательные технологии**

В процессе изучения дисциплины используется метод дистанционного обучения.

При подготовке к ответам на тесты по темам курса и выполнению типовых заданий студенту необходимо тщательно изучить предлагаемую литературу, нормативные правовые акты, учебный материал.

Студент самостоятельно работает с дополнительной и основной литературой, нормативными актами, интернет-ресурсами.

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

При изучении дисциплины необходимо изучить материалы тем, выполнить соответствующие тесты. При необходимости задать вопросы преподавателю в форуме.

После изучения курса выполнить итоговый тест.

Разместить на личной странице курса выполненные задания для проверки преподавателем.

## 7. Оценочные средства

### 7.1. Паспорт оценочных средств

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

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

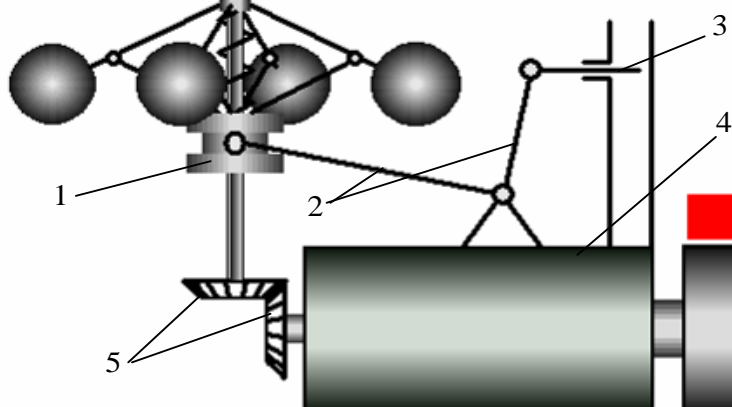
#### 7.2.1. Комплект лабораторных работ (наименование оценочного средства)

**Лабораторная 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 САУ скоростью вращения двигателя**

При функционировании САУ вращение двигателя через зубчатую передачу передается регулятору скорости, шарики 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, шарики 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 САУ. При уменьшении нагрузки САУ работает в обратном порядке.

Для анализа САУ 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:

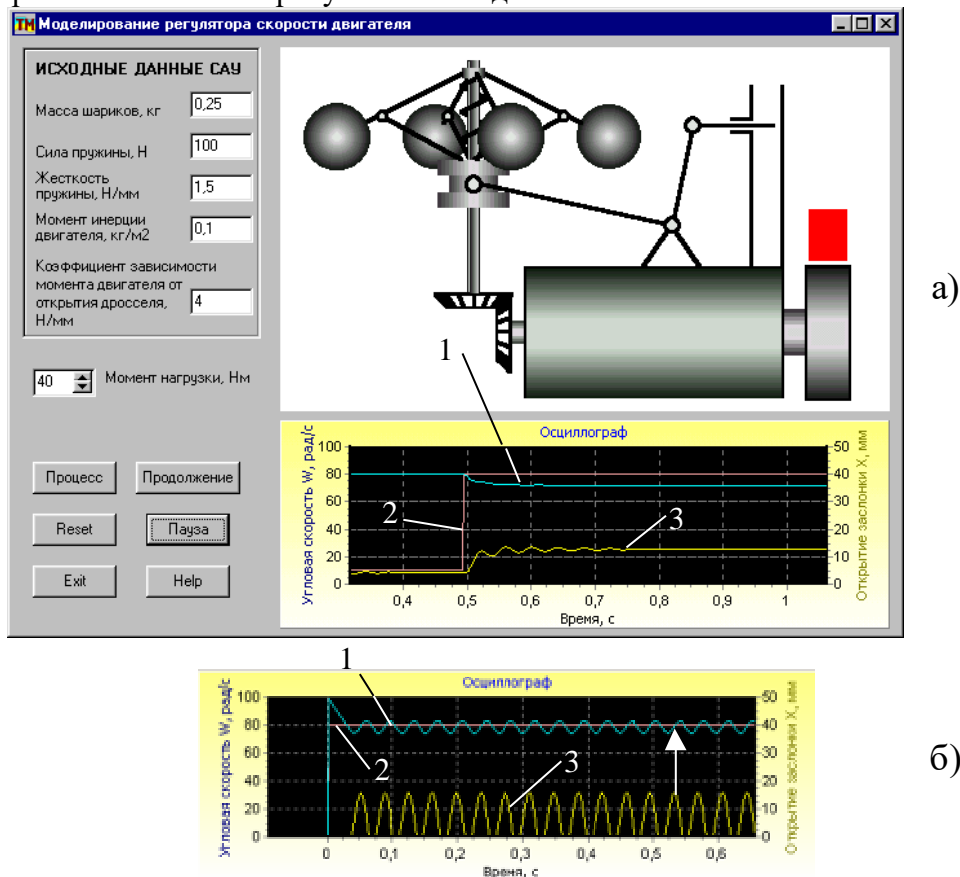
$$M_{\partial} = bk_{\partial}, \quad (1.2)$$

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 САУ:

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

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 САУ 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 | Изменять 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 САУ, таблицу экспериментальных данных, графики требуемых зависимостей. Выводы.

## Лабораторная 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  $\lambda_2$ .

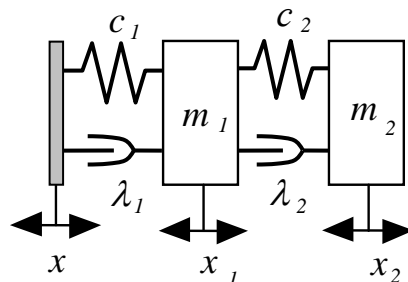


Рис.2.1. Динамическая схема двухмассовой системы

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:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -a_1 y_1 + a_1 x + y_2 \\ \dot{y}_2 = -a_2 y_1 + a_2 x \\ \dot{y}_3 = -a_3 y_3 + a_3 y_1 + y_4 \\ \dot{y}_4 = -a_4 y_3 + a_4 x \end{cases}$$

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.

### **Лабораторная работа № 3. Исследование устойчивости САУ по критерию Гурвица**

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

#### **Теоретическая часть**

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

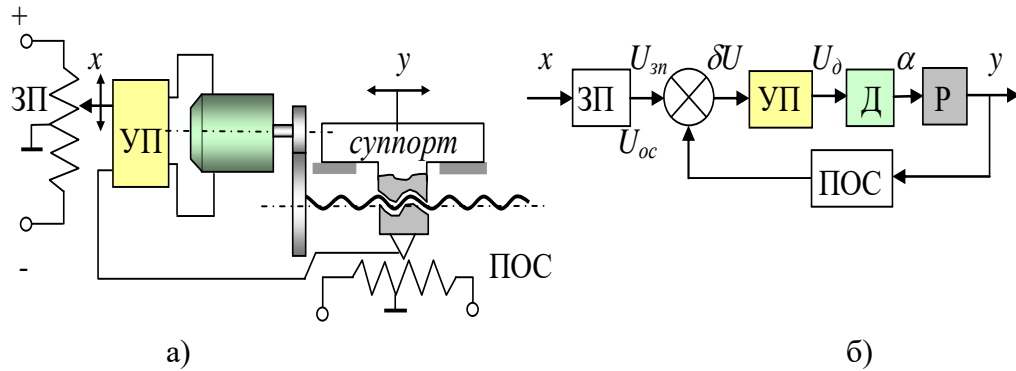


Рис.3.1. Принципиальная (а) и функциональная (б) схемы привода

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 САУ, функциональная схема которой приведена на рис.3.1, б. Пусть выделенные на схеме элементы описываются следующими передаточными функциями:

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

$$\text{Д: } W_o(s) = \frac{\alpha(s)}{U_o(s)} = \frac{k_o}{(T_o s + 1)s};$$

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

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

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

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).

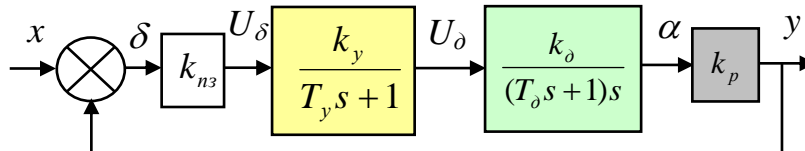


Рис.3.2. Структурная схема привода

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

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

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

$$T_y T_o s^3 + (T_y + T_o) s^2 + s + k_0 = 0.$$

Составим детерминант Гурвица и найдем условия устойчивости.

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

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

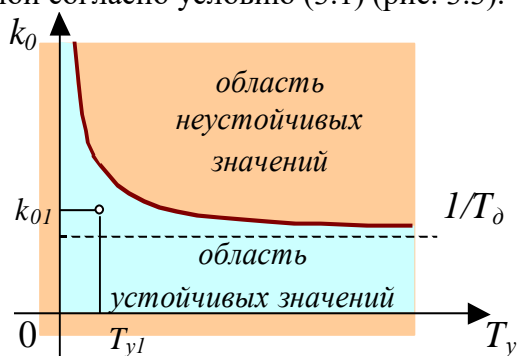
и  $\Delta_1 = a_1 = T_y + T_\partial$ , всегда больше нуля. Таким образом, для устойчивости привода необходимо, чтобы:

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

После несложных преобразований получаем единое условие устойчивости системы:

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

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<br>$T_y, c$ | Двигатель<br>$k_\partial, рад/сВ$ | Винт.пара<br>$H_{вп}, мм$ | Вторая цифра | Двигатель<br>$T_\partial, c$ | Обр.связь<br>$k_{ос}, В/мм$ |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|
| 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 САУ, 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.

#### Лабораторная работа № 4. Исследование точности САУ 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 САУ поводом, структурная схема которого представлена на рис.4.1. Видно, что САУ отличается от рассмотренной в практической работе №5 тем, что усилитель-преобразователь представлен не безынерционным звеном, а апериодическим 1-го порядка.

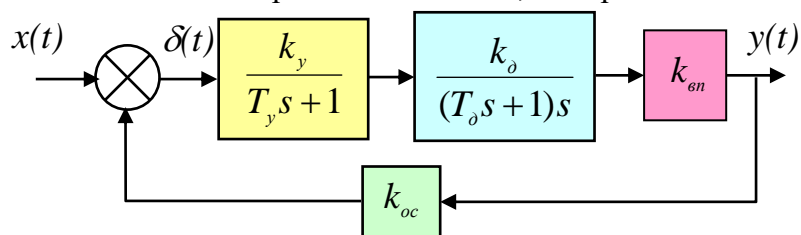


Рис.4.1. Структурная схема исследуемой САУ

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 САУ:

$$k_0 = k_y k_o k_{oc} k_{en}.$$

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 | $T_{yn}, c$ | $k_o, рад/сВ$ | $T_o, c$ | 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 САУ, соответствующие расчеты коэффициента передачи усилителя-преобразователя, таблицу экспериментальных данных, копию интерфейса прикладной программы для какого-либо эксперимента, графики экспериментальных зависимостей. Выводы.

### Практическая работа № 1. 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 вращающегося движения, который состоит из электродвигателя 1 постоянного тока, редуктора 2 и нагрузки, например, шпинделя 3.

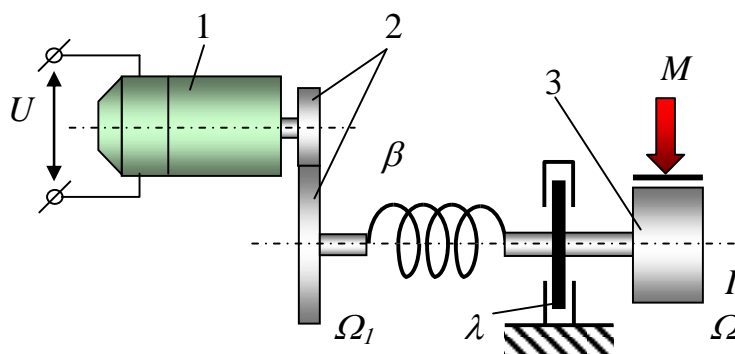


Рис.5.1. Схема электромеханической системы

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:

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

где  $k_{\partial}$  – 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.

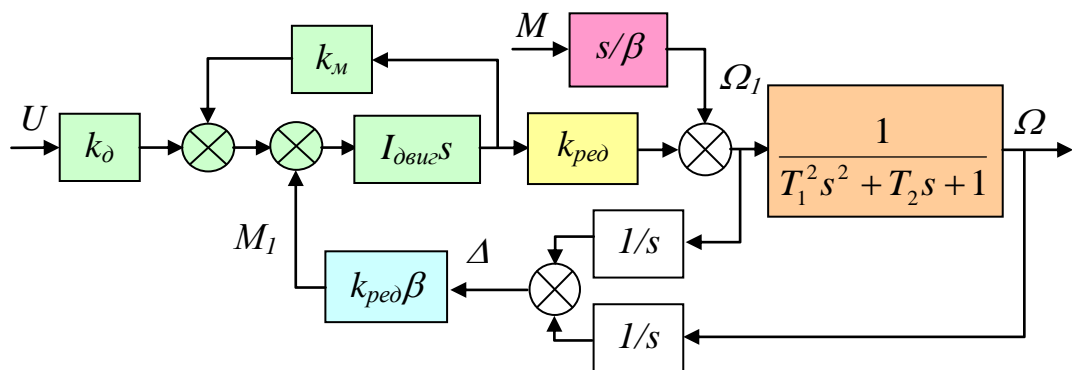
В конечном итоге, уравнение движения вала нагрузки:

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

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 | $I_d$<br>кгм <sup>2</sup> | $k_d$<br>Нм/В | $k_m$<br>Нмс/рад | $k_p$ | Вторая цифра | $I$<br>кгм <sup>2</sup> | $\beta$<br>Нм/рад | $\lambda$<br>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 № 2. 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  $y$ .

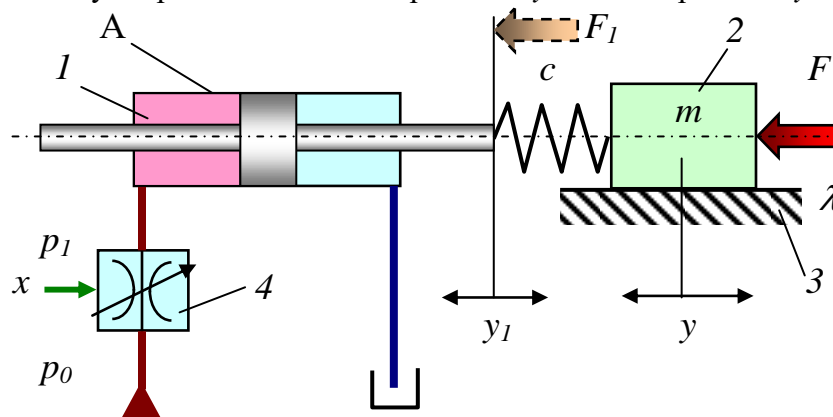


Рис.6.1. Гидромеханическая система

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:

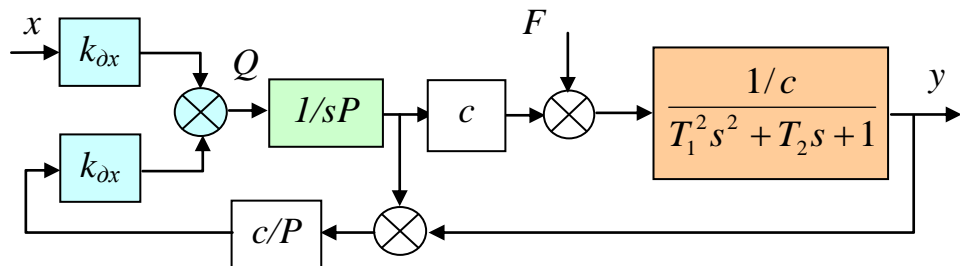
$$Q = \mu k x \sqrt{\frac{p_0 - p_1}{\rho}}, \quad (6.4)$$

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 САУ.

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 № 3. Определение характеристик САУ продольной подачей при тчении

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

#### Теоретическая часть

Наиболее распространенный в металлообработке тип замкнутых САУ – это САУ, 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.

САУ 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.

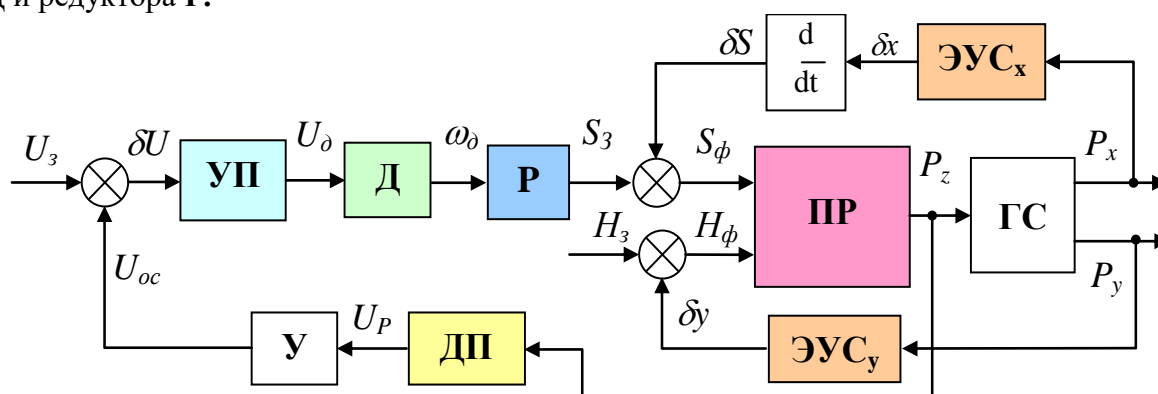


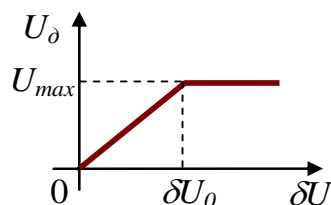
Рис.7.1. Функциональная схема САУ стабилизации силы резания при тчении

САУ функционирует следующим образом. На вход системы, к сравнивающему устройству поступает сигнал  $U_z$ , 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  $\delta U = U_z - U_{oc}$

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 САУ входит процесс резания **ПР**, который происходит в замкнутой технологической обрабатывающей системе.

Математическая модель САУ 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:

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

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 САУ надо дополнить следующими зависимостями:



$$\begin{cases} \delta U = U_3 - U_{oc}; \\ S_3 = \omega_0 k_p; \\ S_\phi = S_3 - \frac{d\delta x}{dt}; \\ H_\phi = H_3 - \delta y; \\ U_{oc} = \delta y \cdot k_{on} \cdot k_y; \end{cases} \quad (7.6)$$

Таким образом, стабилизация силы резания на требуемом уровне, который в определенном масштабе отвечает заданному напряжению  $U_3$  на входе САУ, 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 САУ 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 САУ по комплексному показателю (смотри формулу (5.2)) и точности по ошибке  $\delta P$  от следующих параметров САУ:

- 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 САУ. Определить динамические показатели САУ: относительное перерегулирование и затухание за период.

**Внимание!** Поскольку исходные данные задаются случайно, не исключается ситуация, когда САУ 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 САУ в диапазоне, указанном в задании;
- 2) если в результате выполнения п.1 не удастся обеспечить постоянство САУ, уменьшать коэффициент передачи прямого канала САУ 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 |                 |                    |                    |
|--------------------|----------------------|------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|
|                    |                      |                        |             |                                      |                           |                                     |                                 |                    | 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 САУ с исходными данными, копию интерфейса при моделировании, таблицы экспериментальных данных, графики соответствующих зависимостей. Выводы.

### Практическая работа № 4. Исследование влияния астатизма на качество САУ

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

#### Теоретическая часть

Исследуются две САУ: 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 САУ и процесса регулирования. Установившаяся ошибка астатической САУ 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 САУ 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 САУ с ПИ-регулятором.
3. Убедиться в устранении скоростной ошибки для САУ 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     |          |
|--------------|---------------------------|-------------|--------------|---------------|----------|
|              | $k_{yn}$                  | $T_{yn}, c$ |              | $k_d, рад/сВ$ | $T_d, c$ |

|   |    |       |   |     |      |
|---|----|-------|---|-----|------|
| 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 САУ 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 № 4. Исследование влияния астатизма на качество САУ**

**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.

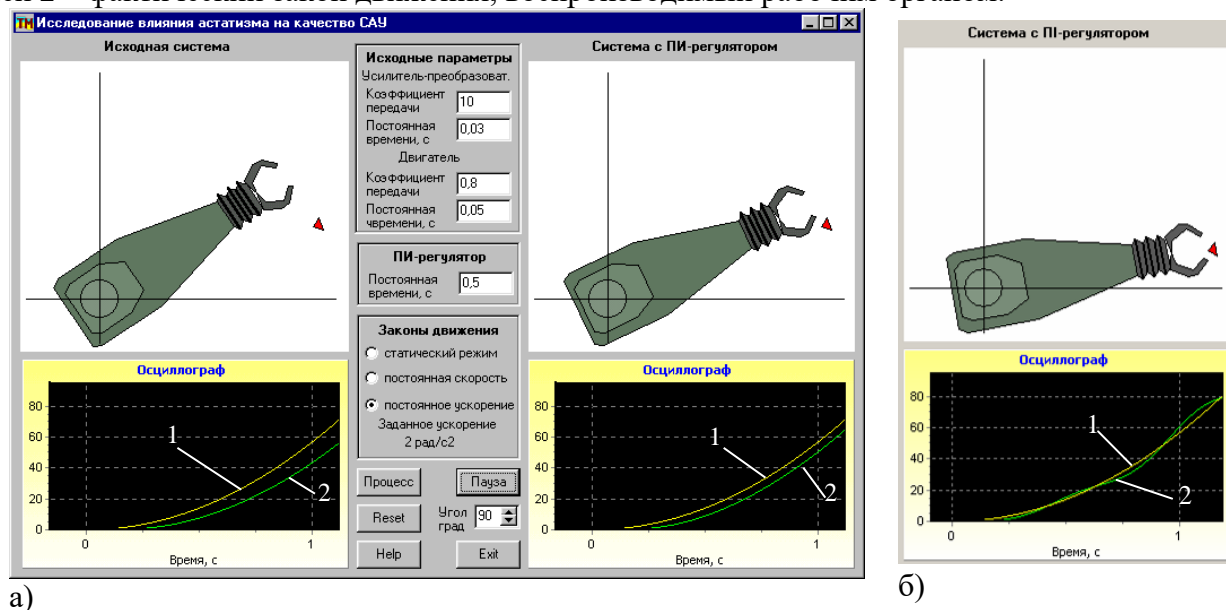
После активизации прикладной программы «САУ\_с\_ПИ-регулятором», которая находится на диске, на главном интерфейсе задаются исходные данные в соответствии с вариантом.

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 САУ с ПИ-регулятором – для всего выбранного диапазона изменения постоянной времени  $T_u$ . Диапазон изменения постоянной  $T_u$  времени определяется от значения, при котором САУ 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  |          |       |                         |

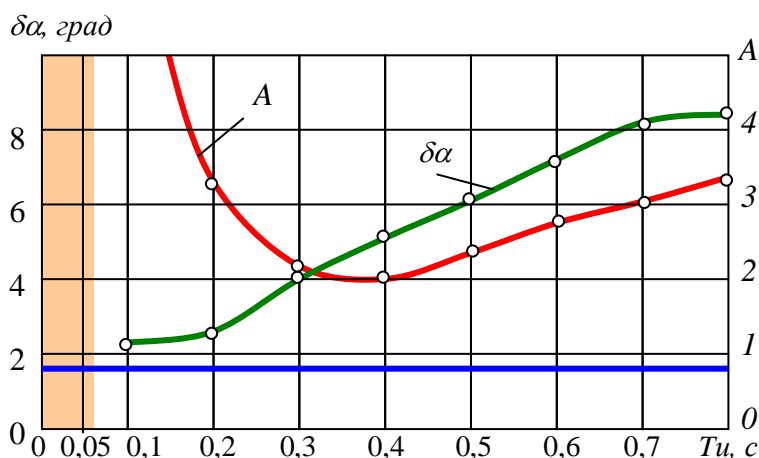
Затем выбирается закон движения с постоянным ускорением ( $2 \text{ рад/с}^2$ ). На рис.8.1 на изображении осциллографов линией 1 обозначен закон движения, который задается, а линией 2 – фактический закон движения, воспроизводимый рабочим органом.



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

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  $13,4^\circ$ , а ошибка системы с ПИ-регулятором –  $8,1^\circ$ . Кроме того, моделирование позволяет убедиться, что для исходной системы ошибка с течением времени увеличивается, то есть такая САУ не способна работать в заданном режиме работы. Преобразованная САУ 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 8

| №<br>п/п | Вопросы к зачету   |
|----------|--|
| 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 САУ   |
| 10       | Классификация элементов САУ. Статистические и динамические характеристики элементов  |
| 11       | Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений динамических режимов работы элементов САУ. Стандартная форма записи дифференциальных уравнений  |
| 12       | Основные свойства преобразования Лапласа   |
| 13       | Характеристики динамических звеньев САУ  |
| 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  |
| 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 САУ. 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  |

| №<br>п/п | Вопросы к зачету   |
|----------|--|
|          | частотным характеристикам  |
| 23       | Устойчивость систем с запаздыванием  |
| 24       | Методы оценки качества регулирования САУ   |
| 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 САУ 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  |
| 44       | Классификация систем по основным видам уравнений динамики процессов управления   |
| 45       | Математическое описание линейных систем  |
| 46       | Математическое моделирование элементов САУ   |
| 47       | Классификация элементов САУ. Статистические и динамические характеристики элементов  |
| 48       | Линеаризация нелинейных дифференциальных уравнений динамических режимов работы элементов САУ. 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 |                   |
|---------|--|-------------------------|-------------------|
|         |  | «зачтено»               | 40 и более баллов |
| 8       | Проверка заданий и прохождение итогового теста | «не зачтено»            | менее 40 баллов   |

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### 8.1. Обязательная литература

| №<br>п/п | Авторы, составители            | Заглавие (заголовок)   | Тип (учебник, учебное пособие, учебно-методическое пособие, практикум, др.) | Год издания | Количество в научной библиотеке /<br>Наименование ЭБС |
|----------|--------------------------------|--|---|-------------|---|
| 1        | С. М. Братан [и др.]           | Автоматическое управление процессами механической обработки          | Учебник   | 2017        | ЭБС<br>"ZNANIUM.CO<br>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

| №<br>п/п | Авторы, составители | Заглавие (заголовок)                   | Тип (учебник, учебное пособие, учебно-методическое пособие, практикум, др.) | Год издания | Количество в научной библиотеке /<br>Наименование ЭБС |
|----------|---------------------|--|---|-------------|---|
| 1        | Л. И. Вереина       | Конструкции и наладка токарных станков | Учебное пособие   | 2017        | ZNANIUM.CO<br>M"                                      |

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

- Web of Science [Электронный ресурс] : мультидисциплинарная реферативная база данных. – Philadelphia: ClarivateAnalytics, 2016– . – Режим доступа : apps.webofknowledge.com. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
- Scopus [Электронный ресурс] : реферативная база данных. – Netherlands: Elsevier, 2004– . – Режим доступа : scopus.com. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
- Elibrary [Электронный ресурс] : научная электронная библиотека. – Москва : НЭБ, 2000– . – Режим доступа : elibrary.ru. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.
- Springer Link [Электронный ресурс] : [база данных]. – Switzerland: SpringerNature, 1842– . – Режим доступа : link.springer.com. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
- Science Direct [Электронный ресурс] : коллекция электронных книг издательства Elsevier. – Netherlands: Elsevier, 2018– . – Режим доступа : sciencedirect.com. – Загл. с экрана. – Яз. англ.

### 8.4. Перечень программного обеспечения

| № п/п | Наименование ПО | Реквизиты договора<br>(дата, номер, срок действия)                |
|-------|-----------------|---|
| 1     | Windows         | Договор № 690 от 19.05.2015г., срок действия - бессрочно          |
| 2     | Office Standart | Договор № 727 от 20.07.2016г., срок действия - бессрочно          |
| 3     | Компас-3D       | Договор 652/2014 от 07.07.2014, срок действия - бессрочно         |
| 4     | MathCAD         | Акт п/п от 21.07.09 (Гос. Контракт 487 от 28.05.09)<br>Бессрочная |



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

| №<br>п/п | Наименование оборудованных учебных кабинетов, лабораторий, мастерских и др. объектов для проведения практических и лабораторных занятий, помещений для самостоятельной работы обучающихся (номер аудитории)  | Перечень основного оборудования  |
|----------|--|--|
| 1        | Аудитория вебконференций. 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 (УЛК-810) | Экран телевизионный, ширма, прожекторы на штативе, стол преподавательский, стул преподавательский, транспарант-перетяжка, системный блок |
| 2        | Помещение для самостоятельной работы студентов (Г-401)   | Столы ученические, стулья ученические, ПК с выходом в сеть Интернет  |