



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИММиМ
А.С. Савинов

05.02.2026 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

***УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ***

Направление подготовки (специальность)
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Направленность (профиль/специализация) программы
Компьютерное моделирование и проектирование в машиностроении

Уровень высшего образования - бакалавриат

Форма обучения
очная

| | |
|---------------------|---|
| Институт/ факультет | Институт металлургии, машиностроения и материалообработки |
| Кафедра | Проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования |
| Курс | 2 |
| Семестр | 4 |

Магнитогорск
2026 год

Рабочая программа составлена на основе ФГОС ВО - бакалавриат по направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование (приказ Минобрнауки России от 09.08.2021 г. № 728)

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры
Проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования
29.01.2026 г., протокол № 4

Зав. кафедрой _____ А.Г. Корчунов

Рабочая программа одобрена методической комиссией ИММиМ
05.02.2026 г., протокол № 5

Председатель _____ А.С. Савинов

Рабочая программа составлена:
доцент кафедры кафедры ПиЭММиО, канд. с.-х. наук

_____ Р.В. Залилов

Рецензент:
гл. механик ООО НПЦ "Гальва", канд. техн. наук

_____ В.А. Русанов

Лист актуализации рабочей программы

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2027 - 2028 учебном году на заседании кафедры Проектирования и эксплуатации

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.Г. Корчунов

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2028 - 2029 учебном году на заседании кафедры Проектирования и эксплуатации

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.Г. Корчунов

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2029 - 2030 учебном году на заседании кафедры Проектирования и эксплуатации

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.Г. Корчунов

Рабочая программа пересмотрена, обсуждена и одобрена для реализации в 2030 - 2031 учебном году на заседании кафедры Проектирования и эксплуатации

Протокол от _____ 20__ г. № ____
Зав. кафедрой _____ А.Г. Корчунов

1 Цели освоения дисциплины (модуля)

Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у студентов знаний о методах функционирования, моделирования и синтеза систем автоматического управления, средствах автоматизации технологических процессов и машиностроительных производств, составлении математических описаний технологических объектов управления;
- овладение достаточным уровнем профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

2 Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина Управление техническими системами технологических машин и оборудования входит в часть учебного плана формируемую участниками образовательных отношений образовательной программы.

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

Математика

Физика

Информатика

Производственная - технологическая (проектно-технологическая) практика

Начертательная геометрия и компьютерная графика

Основы проектирования

Технология конструкционных материалов

Технологические линии и комплексы металлургических цехов

Механическое оборудование металлургических заводов

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

Основы взаимозаменяемости

Монтаж, эксплуатация и ремонт металлургических машин и оборудования

Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы

Метрология, стандартизация и сертификация

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

В результате освоения дисциплины (модуля) «Управление техническими системами технологических машин и оборудования» обучающийся должен обладать следующими компетенциями:

| Код индикатора | Индикатор достижения компетенции |
|----------------|---|
| ПК-1 | Способен проводить конструкторские и расчетные работы по проектированию автоматизированных производств в машиностроении |
| ПК-1.1 | Выполняет конструкторские и расчетные работы по проектированию автоматизированных производств в машиностроении |

4. Структура, объём и содержание дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц 144 академических часов, в том числе:

- контактная работа – 65,7 академических часов;
- аудиторная – 64 академических часов;
- внеаудиторная – 1,7 академических часов;
- самостоятельная работа – 78,3 академических часов;
- в форме практической подготовки – 0 академических часов;

Форма аттестации - зачет

| Раздел/ тема дисциплины | Семестр | Аудиторная контактная работа (в академических часах) | | | Самостоятельная работа студента | Вид самостоятельной работы | Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации | Код компетенции |
|---|---------|--|-----------|-------------|---|--|---|-----------------|
| | | Лек. | лаб. зан. | практ. зан. | | | | |
| 1. | | | | | | | | |
| 1.1 Основные понятия, определения и характеристики систем автоматического контроля, управления и регулирования. Обобщенная схема автоматического контроля. Классификация технических средств автоматизации | 4 | 12 | | | 10 | Самостоятельное изучение учебной и научно литературы, Поиск дополнительной информации по заданной теме | Устный опрос (собеседование) | ПК-1.1 |
| 1.2 Датчики контроля и регулирования: определение и классификация датчиков; датчики перемещения; датчики скорости и ускорения; датчики силового воздействия; датчики температуры; датчики расхода и уровня. | | 8 | 16 | 14,7 | Самостоятельное изучение учебной и научно литературы, Поиск дополнительной информации по заданной теме подготовка к лабораторному занятию | Устный опрос (собеседование), Сдача лабораторной работы | ПК-1.1 | |
| 1.3 Уравнения динамики, статические и динамические характеристики систем автоматического управления. Типовые динамические звенья. | | 6 | 4 | 10 | Самостоятельное изучение учебной и научно литературы, подготовка к лабораторному занятию | Устный опрос (собеседование), Сдача лабораторной работы | ПК-1.1 | |
| 1.4 Критерии устойчивости. Показатели качества. Регуляторы | | 6 | 2 | 18 | Самостоятельное изучение учебной и | Сдача лабораторной работы, проверка | ПК-1.1 | |

| | | | | | | | | |
|--|---|----|----|----|------|---|--|--------|
| | | | | | | научно литературы, подготовка к лабораторному занятию, выполнение контрольной работы | контрольной работы | |
| 1.5 Автоматизация управления металлургических машин: -задачи металлургических машин и оборудования; -автоматизация управления ММиО | 4 | | 2 | | 10 | Самостоятельное изучение учебной и научно литературы, подготовка к лабораторному занятию, выполнение контрольной работы, Работа с электронными библиотеками | Сдача лабораторной работы, проверка контрольной работы | ПК-1.1 |
| 1.6 Управление в гидравлических и пневматических системах ММиО | | | 8 | | 11,7 | Самостоятельное изучение учебной и научно литературы, подготовка к лабораторному заданию, выполнение контрольной работы | Устный опрос (собеседование), сдача лабораторной работы, проверка контрольной работы | ПК-1.1 |
| Итого по разделу | | 32 | 16 | 16 | 74,4 | | | |
| 2. Итого по дисциплине | | | | | | | | |
| 2.1 Зачет | 4 | | | | | Консультация | Зачет | |
| Итого по разделу | | | | | 3,9 | | | |
| Итого за семестр | | 32 | 16 | 16 | 74,4 | | зачёт | |
| Итого по дисциплине | | 32 | 16 | 16 | 78,3 | | зачет | |

5 Образовательные технологии

Применяются традиционная и модульно-компетентностная технологии. Лекции проходят как в традиционной форме, так и в форме лекций-консультаций, где теоретический материал заранее выдается студентам для самостоятельного изучения, для подготовки вопросов лектору, таким образом, лекция проходит по типу вопросы-ответы-дискуссия. Лекции читаются с использованием мультимедийного оборудования, презентационных материалов. Лекционный материал закрепляется в ходе лабораторных работ, на которых выполняются групповые или индивидуальные задания по пройденной теме. При проведении лабораторных занятий используется метод контекстного обучения, который позволяет усвоить материал путем выявления связей между конкретным знанием и его применением. При выполнении лабораторных работ используется технология коллективного взаимодействия. Занятия проводятся в виде лабораторного анализа и эксперимента, при этом студенты работают совместно с последующим групповым анализом

полученных результатов. Например, структуру сплавов определяет каждый студент при изучении экспериментальных образцов, а анализ полученных результатов по

единичным показателям, выполненных отдельными студентами, проводится групповым методом.

В учебном процессе используются активные и интерактивные формы проведения занятий (компьютерные симуляции, разбор конкретных ситуаций) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития

6 Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Представлено в приложении 1.

7 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

Представлены в приложении 2.

8 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) Основная литература:

1. Андросенко, М. В. Основы управления металлургическими машинами и оборудованием : учебное пособие / М. В. Андросенко, О. А. Филатова ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=2578.pdf&show=dcatalogues/1/1130388/2578.pdf&view=true> (дата обращения: 04.04.2026). - Макрообъект. - Текст : электронный. - Сведения доступны также на CD-ROM.

2. Андреев, С. М. Моделирование объектов и систем управления : учебное пособие / С. М. Андреев ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2017. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана. - URL: <https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3337.pdf&show=dcatalogues/1/1138496/3337.pdf&view=true> (дата обращения: 04.03.2026). - Макрообъект. - Текст : электронный. - ISBN 978-5-9967-1028-7. - Сведения доступны также на CD-ROM. [496/3337.pdf&view=true](https://magtu.informsystema.ru/uploader/fileUpload?name=3337.pdf&show=dcatalogues/1/1138496/3337.pdf&view=true). - ISBN 978-5-9967-1028-7.

б) Дополнительная литература:

1. Андросенко, М. В. Основы управления металлургическими машинами и оборудованием : учебное пособие / М. В. Андросенко, О. А. Филатова ; МГТУ. - Магнитогорск : МГТУ, 2016. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - Загл. с титул. экрана

в) Методические указания:

Методические указания для самостоятельной работы студентов представлены в приложении 3.

г) Программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Программное обеспечение

| Наименование ПО | № договора | Срок действия лицензии |
|---|------------------------------|------------------------|
| MS Office 2007 Professional | № 135 от 17.09.2007 | бессрочно |
| 7Zip | свободно распространяемое ПО | бессрочно |
| MathCAD v.15 Education University Edition | Д-1662-13 от 22.11.2013 | бессрочно |

Профессиональные базы данных и информационные справочные системы

| Название курса | Ссылка |
|----------------|--------|
| | |

9 Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Материально-техническое обеспечение дисциплины включает:

Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа:

Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации.

Учебные аудитории для проведения лабораторных занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации: Мультимедийные средства хранения, передачи и представления информации.

Комплекс тестовых заданий для проведения промежуточных и рубежных контролей.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся: Персональные компьютеры с пакетом MS Office, выходом в Интернет и с доступом в электронную информационно-образовательную среду университета.

Помещения для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования: Шкафы для хранения учебно-методической документации, учебного оборудования и учебно-наглядных пособий.

Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа в ходе аудиторных занятий предполагает: изучение и повторение теоретического материала по темам лекций (по конспектам и учебной литературе, методическим указаниям), решение задач, выполнение индивидуальных заданий.

Самостоятельная работа под контролем преподавателя предполагает подготовку конспектов и выполнение необходимых расчетов по разделам дисциплины, решение и проверка преподавателем задач, работа с методической литературой, подготовка к тестированию в интерактивной форме.

Внеаудиторная самостоятельная работа студентов предполагает подготовку к лабораторным занятиям, выполнение контрольной работы, подготовку к тестированию в интерактивной форме; изучение необходимых разделов в конспектах, учебных пособиях и методических указаниях; работа со справочной литературой, исправление ошибок, замечаний, оформление заданий; работу с электронными учебниками по дисциплине.

В ходе освоения данной дисциплины студенты самостоятельно составляют принципиальные схемы управления пневматическими и гидравлическими приводами технических систем. Объектами модернизации и усовершенствования могут служить аппараты гидроприводов, различного технологического оборудования, используемого в металлургической промышленности. Итогом работы должны быть разработаны принципиальные схемы.

Примерные задания к контрольной работе

Задача 1. Найти эквивалентную передаточную функцию схемы (рис. 1).

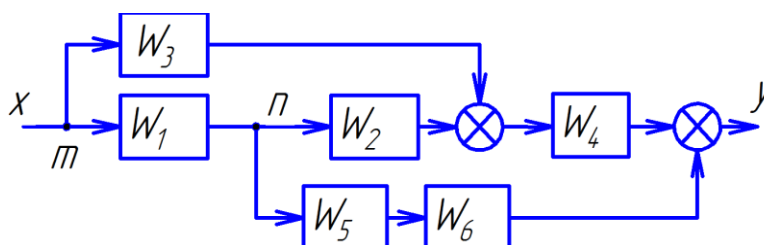


Рис. 1. Структурная схема

Задача 2. Определить передаточную функцию объекта регулирования, модель которого задана дифференциальным уравнением

$$1.1\ddot{y} + 2.2\dot{y} + 3.1y + 4.2x = 1.34\ddot{x} - x.$$

Задача 3. Составить структурную схему по дифференциальному уравнению объекта

$$2y^{(3)} - 4y^{(2)} + 3y^{(1)} + 5y = 2u^{(2)} - 3u^{(1)} + u.$$

Задача 4. Решить дифференциальные уравнения с помощью преобразования Лапласа, с использованием различных методов расчета простых дробей.

$$3 \frac{d^3}{dt^3} y + \frac{d}{dt} y - y = 4x$$

Задача 1. Система автоматического регулирования имеет передаточную функцию

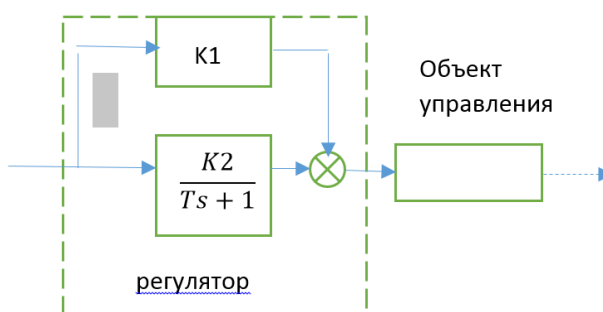
$$W(s) = \frac{K}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

Найти переходную $h(t)$ и весовую $w(t)$ функции системы автоматического регулирования, построить их графики. Параметры системы для различных вариантов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1
Значения параметров системы автоматического регулирования

| Параметр | Вариант | | | | | | | | | |
|-------------------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Коэффициент K | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| Коэффициент a_2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Коэффициент a_1 | 1 | 4 | 2 | 6 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1,5 | 2,5 |
| Коэффициент a_0 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 4 | 4 | 4 |

Задача 5. Определить тип регулятора. Проверить на устойчивость САР.



Задача 6. Построить электрорелейную схему управления гидроцилиндрами шинным методом по диаграмме перемещений гидроцилиндров.

Лабораторная работа 1 Датчики контроля и регулирования

Классификация технических средств автоматизации

Все устройства автоматики можно разделить на несколько групп. К первой относят средства для получения информации о состоянии объектов управления, контроля, регулирования. Эти средства включают в себе измерительные элементы (датчики) и состоят из первичных измерительных и нормирующих приборов преобразователей. Измерительные преобразователи служат для перевода любого контролируемого параметра в физическую величину (усилие, напряжение, сила тока). Нормирующие преобразователи служат для перевода нормирующего сигнала в унифицированный код (двоичный).

Ко второй группе относят средства приема, переработки и дальнейшей передачи информации, полученной от измерительных элементов, а также устройства для преобразования и передачи управляющих команд. К этой группе относят усилители сигналов, каналы связи, преобразователи и сравнительные устройства.

К третьей группе относятся средства для получения информации о задачах автоматического управления. Они включают в себя запоминающие и программирующие устройства, выполненные на базе ЭВМ.

Четвертая группа включает средства регулирования параметров контролируемых процессов (исполнительные устройства и усилители мощности) насос и исполнительные органы.

(1 группа информационных систем)

Датчики (измерительные преобразователи) являются основными средствами измерения, преобразующие измеряемую или контролируемую физическую величину (p, F, v, s) в выходной, обычно в электрический сигнал, предназначенный для дальнейшей регистрации, обработки и передачи исполнительному органу.

Первичный преобразователь, воспринимающий непосредственно параметры состояния (входную величину), называется чувствительным элементом. Кроме того, существуют еще нормирующие преобразователи, которые преобразуют аналоговые электрические сигналы в двоичный код.

Классификация датчиков

1) По назначению:

- датчики перемещения;
- датчики скорости;
- датчики ускорения;
- датчики расхода;
- датчики силы и момента;
- датчики температуры и т.д.

2) По способу преобразования неэлектрической величины в электрический сигнал:

- генераторный (активные);
- параметрические (пассивные).

В генераторных датчиках энергия входного сигнала преобразуется в выходную электрическую энергию выходного сигнала (I, U, q) без участия дополнительных источников энергии.

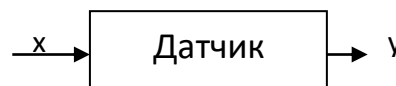
В параметрических датчиках под действием входного сигнала изменяется какой-либо параметр датчика (C, L, R), при этом схема включения этих датчиков в обязательном порядке имеет источник питания.

3) По конструкции и принципу действия чувствительного элемента:

- контактные;
- бесконтактные.

4) По характеру зависимости выходного сигнала от входной величины:

- пропорциональные $y=kx$;
- нелинейные.
- релейная зависимость (когда сигнал на выходе изменяется скачкообразно при появлении сигнала на входе);
- импульсные, когда при изменении входной величины на выходе появляются сигналы в виде импульсов, число которых пропорционально входной величине.



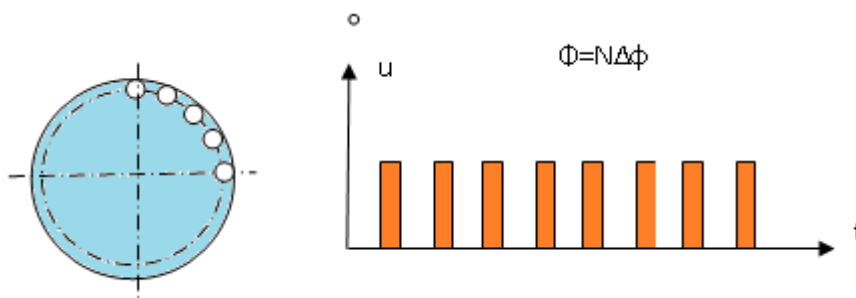


Рис.2.1. Импульсные датчики

5) По виду выходного сигнала:

- релейные (автоматическая система циклового типа - программная);
- аналоговые;
- цифровые (импульсные, кодовые);

} Следящие

6) По виду преобразования сигналов:

- механические в электрические;
- механические в гидравлические;
- световые в электрические.

Датчики положения

Устройства, служащие для получения информации о положении элементов механизма путем преобразований линейных или угловых перемещений в электрические или другие сигналы, называются датчики перемещения.

Концевые выключатели (конечные, путевые) – это простейшие датчики положения релейного типа. Они предназначены для автоматического ввода электрических сигналов или коммутации токопровода при достижении объектом контролируемого положения.

Подразделяют на:

- контактные (рис. 2.2);
- бесконтактные.

По виду преобразования входной величины в выходную:

- электромеханические (контактные);
- индуктивные (контактные и бесконтактные);
- емкостные;
- герконы (бесконтактные);
- электронные (емкостные, фотоэлектронные, индуктивные);
- оптоэлектронные.

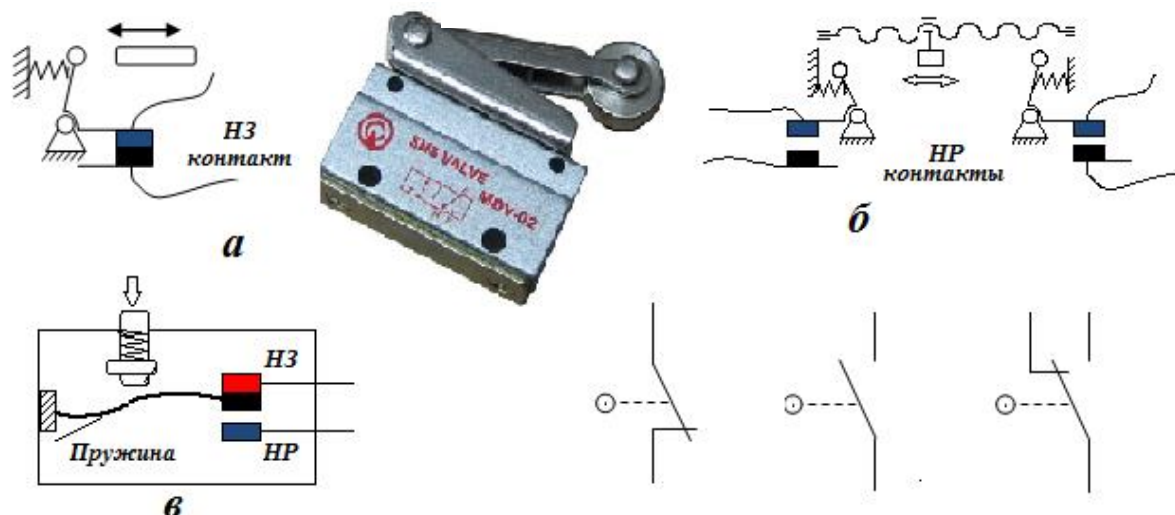
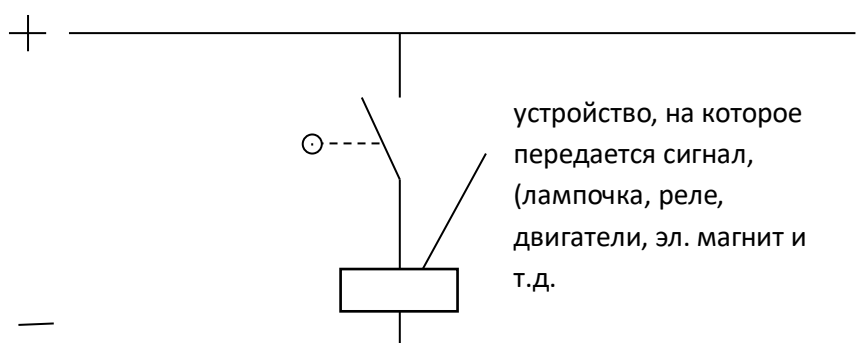


Рис. 2.2. Концевые выключатели контактные и их условные изображения:
 а – рычажного типа; б – шпindelного типа; в- переключающий контакт

Электрический датчик переключающего типа

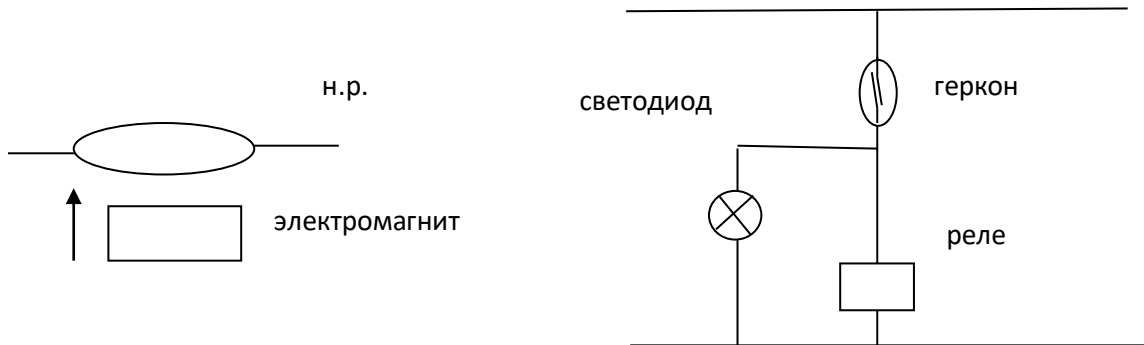


Электроконтактные преобразователи датчиков служат для преобразования механического перемещения исполнительного органа технического устройства (технологического оборудования) в замкнутое или разомкнутое состояние электрических контактов, управляющих одной или несколькими электрическими цепями.

Электрическим контактом называется соединение двух проводников, позволяющее проводить ток между ними. Контакты бывают открытые и закрытые (герметичные).

Расположение контактов в запаянном стеклянном баллоне, заполненном инертным газом (чистым азотом или азотом с небольшой добавкой водорода) под давлением предохраняет их от окисления и загрязнения. Для улучшения контактирования поверхности касания (контакты) покрываются тонким слоем (2...50 мкм) золота, родия, палладия, серебра и др. Такие герметизированные контакты получили название *герконы* (рис.2.3). В связи с тем, что контакты в герконе управляются магнитным полем, герконы называют магнитоуправляемыми контактами.

Герметичные контакты (герконы)



Электронные датчики

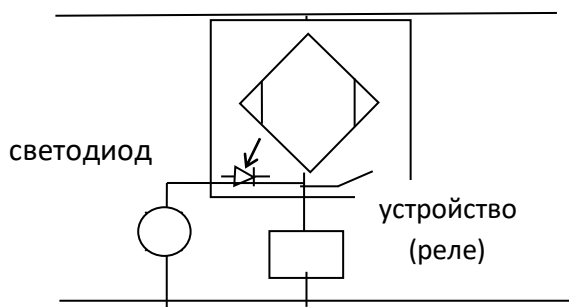
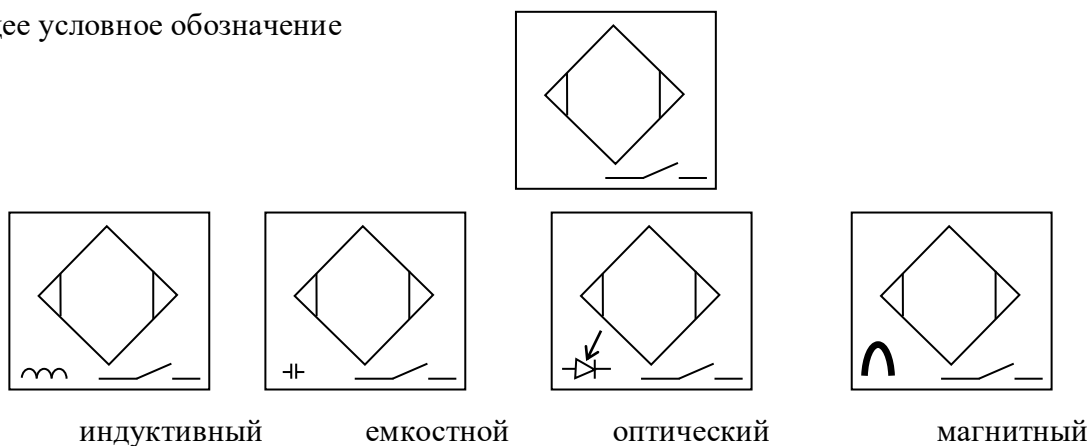
Условные обозначения другого типа бесконтактных датчиков используемое в электрических схемах приведены на рисунке 2.4.

Для получения информации о перемещении в процессе передвижения рабочего органа служат датчики положения. Информация может поступать непрерывно – если ее используют в качестве обратной связи. Эта информация служит для формирования управляющих воздействий на приводы механизмов.

По виду выходного сигнала датчики положения подразделяются на:

- аналоговые;
- кодовые;
- импульсные (цифровые).

Общее условное обозначение



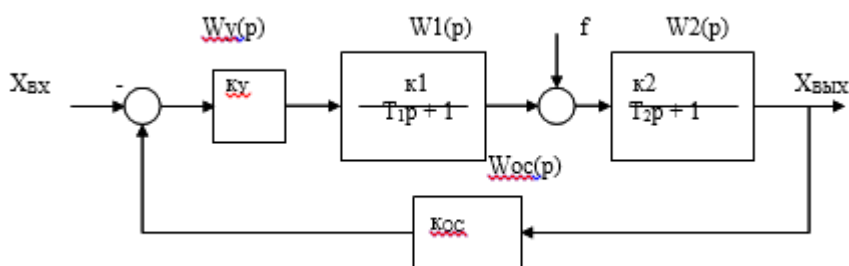
Лабораторная работа 2

Исследование статической САУ в среде MathCad

Цель работы: исследовать статические и динамические свойства статических и астатических систем автоматического управления в среде MathCAD.

Статическая система (рис. 1) состоит из двух апериодических звеньев первого порядка с передаточными функциями $W_1(p)$, $W_2(p)$, усилительного звена ($W_u(p)$) и звена обратной связи ($W_{oc}(p)$), параметры которых приведены в таблице 1.

С помощью пакета прикладных программ MathCAD рассчитать переходную и частотные характеристики ($L(\omega)$, $(\varphi(\omega))$). Определить время переходного процесса $t_{пп}$, перерегулирование, запасы устойчивости по амплитуде и фазе.



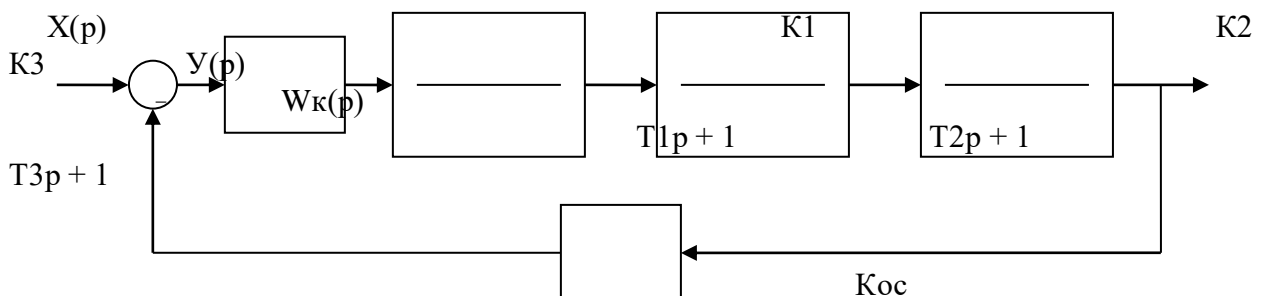
Лабораторная работа 3

Последовательные корректирующие устройства

Цель работы: исследовать влияние различных корректирующих устройств на характеристики замкнутых систем автоматического управления.

Введение.

В работе исследуется система автоматического управления с последовательной коррекцией (рис. 1). Корректирующие устройства: пропорциональное звено; фильтр первого порядка; ПИ- и ПИД - регулятор. Работа выполняется с помощью MathCAD.



Исследование статических и динамических свойств замкнутой системы управления с ПИ - регулятором

Передаточная функция ПИ – регулятора

$$W(p) = \frac{T_i * p + 1}{T_p * p},$$

где $T_p = 1/K_p$ - постоянная регулятора, T_i - время изодрома. При моделировании принять $K_p = 0.5$.

Определить передаточные функции разомкнутой и замкнутой систем управления. Рассчитать временные и частотные характеристики системы. Учесть, что введение ПИ - регулятора с постоянной T_i компенсирует соответствующую постоянную апериодического звена объекта управления.

Определить время переходного процесса, перерегулирование, ошибку, частоту среза $\omega_{ср}$, значение фазы среза на этой частоте $\varphi_{ср}$, частоту переворота фазы ω_l , запас устойчивости по амплитуде ΔL и фазе $\Delta \varphi$. Результаты эксперимента сравнить с предыдущими и свести в таблицу.

Лабораторная работа 4 Устойчивость САУ

Объектом исследования является следящая система, структурная схема которой представлена на рис. 1.

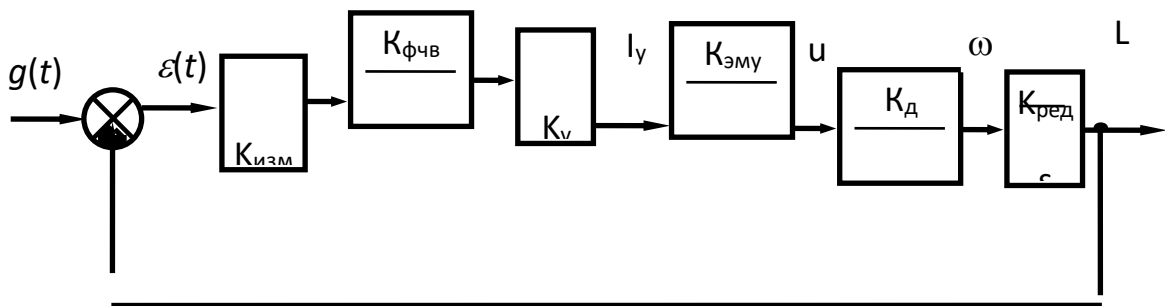


Рис. 1. Структурная схема следящей системы

Здесь: $K_{изм}$ - передаточный коэффициент измерительного устройства;
 $K_{фчв}$, $T_{ф}$ - коэффициент передачи и постоянная времени фазочувствительного выпрямителя;
 $K_{у}$ коэффициент усиления электронного усилителя;
 $K_{эму}$, $T_{э}$ - коэффициент передачи и постоянная времени электромашинного усилителя;
 $K_{д}$, $T_{д}$ - коэффициент передачи и постоянная времени электрического двигателя;
 $K_{ред}$ - коэффициент передачи редуктора.

Исходные данные для моделирования приведены в таблице 1. Каждый студент получает номер варианта исходных данных от преподавателя.

Для полученного варианта задания по практике студент составляет индивидуальный отчет, содержащий полученные результаты исследования системы в виде графиков с необходимым пояснением и выводами.

Порядок работы

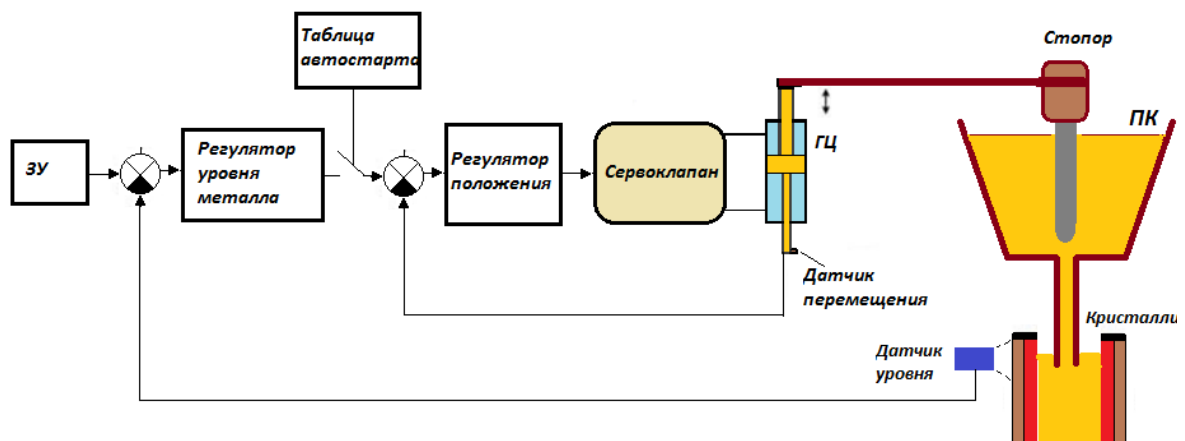
1. Исследовать устойчивость замкнутой системы с помощью критерия Гурвица. Приняв коэффициент усиления электронного усилителя $K_{у}=100$. Определить критическое значение коэффициента усиления $K_{у}$, когда система находится на границе устойчивости.
2. Исследовать устойчивость замкнутой системы с помощью критерия Рауса.
3. Исследовать устойчивость замкнутой системы с помощью критерия Михайлова.
4. Исследовать устойчивость замкнутой системы с помощью критерия Найквиста.

5. Исследовать устойчивость замкнутой системы с помощью логарифмических частотных характеристик, оценить запасы устойчивости по фазе и амплитуде.

Лабораторная работа 5

Изучение схем САУ металлургических машин и оборудования

Система автоматического управления стопорным механизмом. В течение процесса разливки в МНЛЗ требуется поддерживать заданный уровень металла в кристаллизаторе. Постоянный уровень можно обеспечить несколькими способами: автоматическим изменением скорости разливки (на тянуще-правильной машине); применением схемы дозирования типа «стопор» – «стакан-дозатор».



Функциональная схема системы управления стопорным механизмом

Система управления гидравлическим механизмом качания кристаллизатора. На рис. представлена функциональная схема системы управления механизмом качания сортовой МНЛЗ. Механизма ее качания с гидравлическим сервоприводом обладает высокой точностью управления, обеспечивает требуемые параметры качания с учетом текущей скорости разливки металла

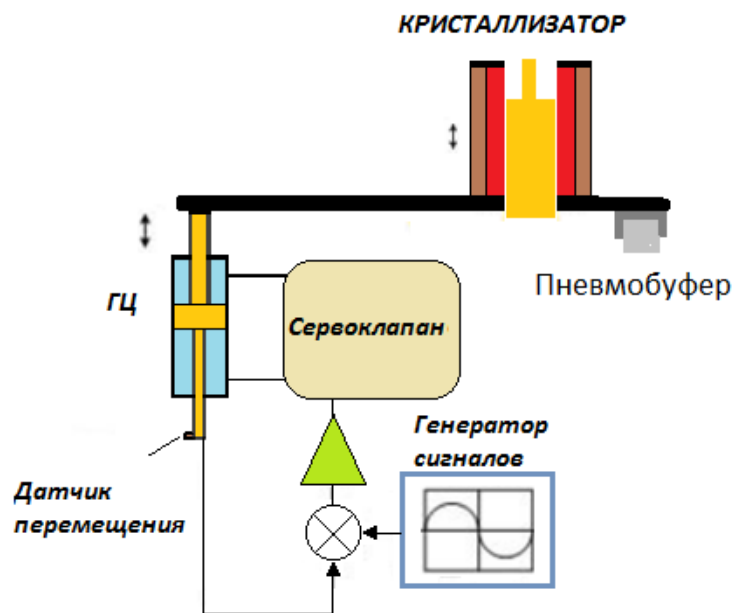


Рис. 3.4. Функциональная схема системы управления механизмом качания сортовой МНЛЗ

Контрольные вопросы и задачи для самопроверки

Пример 1. Проверить свойство управляемости для объекта, модель которого задана системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dot{x}_3 = -3x_3 - 5x_2 - x_1 + u. \end{cases}$$

Решение. Определим матрицу коэффициентов системы (A) и матрицу входа (B)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -3 & -5 & -1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -4 \end{bmatrix}$$

Порядок системы равен 3, следовательно, матрица управляемости имеет вид $Q = (B \ AB \ A^2B)$.

Вычислим матрицы произведений

$$AB = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad A^2B = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -4 \end{bmatrix}.$$

Составим матрицу управляемости

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -4 \end{bmatrix},$$

ее определитель равен $\det Q = -1$, следовательно, объект управляем.

2. Проверить свойство управляемости для объекта, модель которого задана системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -x_1 + 5x_2 + 2u. \end{cases}$$

3. Проверить свойство управляемости для объекта, модель которого задана системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = 2x_1 - x_2 + u, \\ y = x_1. \end{cases}$$

Найти передаточную функцию модели объекта, вычислить нули и полюса.

4 Проверить свойство управляемости для объекта, модель которого задана системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 + x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_2 + u, \\ y = x_1 + 3x_2. \end{cases}$$

Найти передаточную функцию модели объекта, вычислить нули и полюса.

5. Проверить свойство управляемости для объекта, модель которого задана системой дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 + x_2 + u, \\ \dot{x}_2 = x_2 + x_3, \\ y = x_1 - x_3 + 2u. \end{cases}$$

6 Модель объекта управления задана передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{2p+1}{p^2+5p+6}.$$

Записать уравнения модели в форме Коши, проверить свойство управляемости.

7 Модель объекта управления задана передаточной функцией:

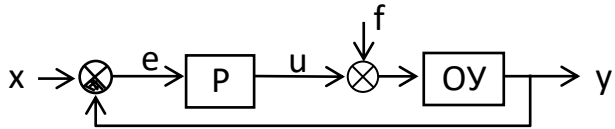
$$W(p) = \frac{p+1}{p^2+3p+2}.$$

Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

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

| Код индикатора | Индикатор достижения компетенции | Оценочные средства |
|---|--|---|
| ПК-1 Способен проводить конструкторские и расчетные работы по проектированию автоматизированных производств в машиностроении | | |
| ПК-1.1 | Выполняет конструкторские и расчетные работы по проектированию автоматизированных производств в машиностроении | <p>Перечень теоретических вопросов к зачету:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Системы автоматического контроля. 2. Системы автоматического регулирования. 3. Системы автоматического управления. 4. Классификация технических средств автоматизации. 5. Определение и классификация датчиков. 6. Датчики положения и скорости. 7. Классификация исполнительных механизмов. 8. Качество процессов управления. 9. Критерии устойчивости. 10. Понятие устойчивости линейных систем. 11. Датчики положения и скорости. 12. Датчики силового воздействия 13. Исполнительные электрические механизмы. 14. Гидравлические и пневматические исполнительные механизмы. 15. Исполнительные двигатели постоянного тока. 16. Усилители и переключатели. Реле. 17. Настройка регуляторов. 18. Типовые законы регулирования. 19. Синтез корректирующих устройств. 20. Приборы и устройства безопасности металлургических машин. |

| Код индикатора | Индикатор достижения компетенции | Оценочные средства |
|----------------|----------------------------------|---|
| | | <p>Примерные задачи к зачету.</p> <p>Задача 1. Найти передаточную функцию САУ и характеристический полином</p>  <p>Задача 2. Проверить САУ на устойчивость. Передаточная функция системы имеет вид:</p> $W(s) = \frac{3s + 4}{s^3 + 2s^2 + 2.25s + 1.25}.$ |
| | | <p>Примерные задание на зачете</p> <p>Дана одноконтурная АСР, для которой определена передаточная функция регулятора (Р) с настройками и дифференциальное уравнение объекта управления (ОУ). Требуется определить:</p> <ul style="list-style-type: none"> - передаточную функцию разомкнутой системы $W_{\infty}(s)$, - характеристическое выражение замкнутой системы (ХВЗС), - передаточные функции замкнутой системы $\Phi_3(s)$ – по заданию, |

| Код индикатора | Индикатор достижения компетенции | Оценочные средства |
|----------------|----------------------------------|---|
| | | <p> $\Phi_B(s)$ – по возмущению, $\Phi_E(s)$ – по ошибке, - коэффициенты усиления АСР, - устойчивость системы. </p>  |

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

Промежуточная аттестация по дисциплине «Управление техническими системами» включает теоретические вопросы, позволяющие оценить уровень усвоения обучающимися знаний, и практические задания, выявляющие степень сформированности умений и владений, проводится в форме зачета.

Зачет по данной дисциплине проводится в устной форме, включает 1 теоретический вопрос и одно практическое задание.

Показатели и критерии оценивания зачета:

- «зачтено» ставится в случае овладения студентом пороговым уровнем сформированности компетенций, т.е. знаний о устройстве и принципе работы датчиков технологических параметров, об устройстве и принципе работы САУ, умений использовать технические средства для измерения различных физических параметров технологического оборудования, проводить анализ САУ, оценивать статистические и динамические характеристики; владения навыками, необходимыми для выбора, создания, внедрения и эксплуатации автоматизированных средств технологических измерений, а также информационного управления.

- «Не зачтено» ставится, если обучающийся не может показать знания на уровне воспроизведения и объяснения информации, не может показать интеллектуальные навыки решения простых задач.

Методические рекомендации для подготовки к зачету

1. При подготовке к зачету у студента должен быть хороший учебник или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.
2. Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения, используя при этом опорные конспекты лекций. При этом нужно обратить особое внимание на темы учебных занятий, пропущенных студентом по разным причинам.
3. При подготовке к зачету необходимо повторять пройденный материал в строгом соответствии с учебной рабочей программой дисциплины, примерным перечнем учебных вопросов, выносящихся на зачет и содержащихся в данной программе.
4. Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при решении задач у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

РЕЖИМ ПРОСМОТРА МАКРООБЪЕКТОВ

1. Перейти по адресу электронного каталога <https://magtu.informsistema.ru>.
2. Произвести авторизацию.
3. Активизировать гиперссылку макрообъекта.

Методические указания по выполнению контрольной работы

Введение

При изучении дисциплины “**Управление техническими системами**” необходимо:

1. Рассмотреть перечень и порядок чередования тем и вопросов изучения данной дисциплины.

2. Рассмотреть и при необходимости уточнить у ведущего преподавателя план-график самостоятельной работы студента, порядок изучения дисциплины, в чем заключается самостоятельная работа, промежуточная и итоговая аттестация по данной дисциплине.

3. Уточнить порядок и цель проведения лабораторных работ.

4. Рассмотреть и при необходимости уточнить у ведущего преподавателя порядок изучения вопросов теоретического цикла, вынесенных на самостоятельную работу студента, а также порядок аттестации по рассмотрению данных вопросов. Самостоятельная работа студентом выполняется в аудитории и на дому по алгоритму, заданному преподавателем для создания конспекта дисциплины.

5. Ознакомится с содержанием и объемом домашней и контрольной работы, для самостоятельного ее выполнения и уточнить непонятные моменты. Подобрать в библиотеке университета или любой другой библиотеке города литературу по теме и проконсультироваться у преподавателя с целью уточнения непонятных моментов.

Основные требования и методические рекомендации

Контрольная работа является важной формой самостоятельной работы студентов заочной формы обучения. Она служит допуском к зачету.

Выполняемые студентами контрольные работы позволяют преподавателю дать предварительную оценку степени усвоения ими учебного материала по данной дисциплине.

Контрольная работа состоит из нескольких задач на различные темы по всему курсу дисциплины.

Вариант контрольной работы выбирается в соответствии с порядковым номером журнала преподавателя по данной группе. Исходя из этого предлагается 20 вариантов контрольных работ от 1 до 20-го варианта включительно.

Прежде чем приступить к написанию контрольной работы, необходимо изучить теоретический материал, чтобы определить место предлагаемых вопросов задачи в структуре курса. Обязательно указывать литературные и иные источники, из которых эта информация взята.

Список использованной литературы помещается в конце контрольной работы (не менее 2–3 наименований источников, изданных не ранее, чем за 5 лет до времени написания работы).

Контрольная работа выполняется на основе использования рекомендованной литературы. Список рекомендованной литературы приводится после изложения вариантов контрольной работы.

Наличие списка рекомендованной литературы не исключает использования другой литературы, которая подбирается студентом самостоятельно.

Список использованной литературы обязательно помещается в конце контрольной работы в алфавите фамилий авторов или названий использованных источников (если не указаны авторы используемых работ).

Примеры решения задач контрольной работы

Пример 1. Найти эквивалентную передаточную функцию схемы (рис.1).

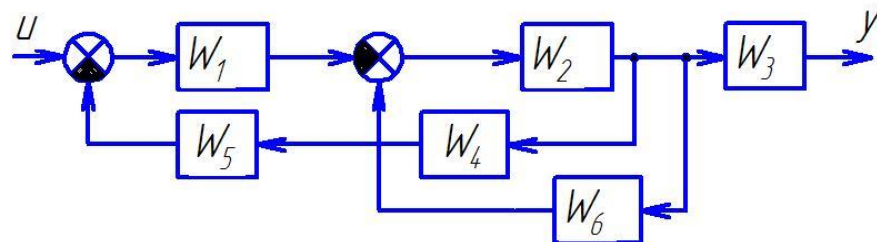


Рис.1. Структурная схема многоконтурной системы

Так как схема имеет перекрещивающиеся связи, то ее нужно преобразовать. Перенесем начало обратной связи за звено W_3 . При таком переносе в обратную связь надо добавить фиктивное звено $1/W_3$ (рис. 2).

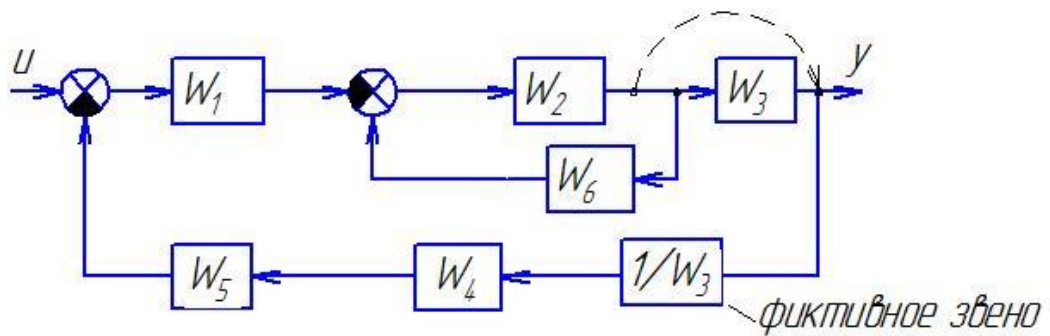


Рисунок 2. Преобразованная структурная схема

Начинаем сворачивать схему и находить передаточную функцию:

$$W^I = \frac{W_2}{1 - W_2 \cdot W_6},$$

$$W^{II} = W_5 \cdot W_4 \cdot 1/W_3,$$

$$W^{III} = -W_1 \cdot W^I = \frac{-W_1 \cdot W_2}{1 + W_2 \cdot W_6},$$

$$W = \frac{W^{III}}{1 + W^{II} \cdot W^{III}} = \frac{\frac{-W_1 \cdot W_2}{1 + W_2 \cdot W_6}}{1 + \frac{-W_1 \cdot W_2}{1 + W_2 \cdot W_6} (W_5 \cdot W_4 \cdot 1/W_3)} = \frac{-W_1 \cdot W_2}{1 + W_2 \cdot W_6 - W_1 \cdot W_2 \cdot W_5 \cdot W_4 \cdot 1/W_3}.$$

Пример 2. Составить структурную схему по дифференциальному уравнению объекта $2y^{(3)} - 3y^{(2)} + 4y^{(1)} - 6y = 3u^{(2)} - u^{(1)} + 2u$.

1. Прежде всего уравнение нормируют (делят все коэффициенты на коэффициент a_0 при старшей производной левой части). В нашем примере $a_0=2$, делим уравнение на 2, получим

$$y^{(3)} - 1,5y^{(2)} + 2y^{(1)} - 3y = 1,5u^{(2)} - 0,5u^{(1)} + u.$$

2. Затем составим структурную схему, используя блоки интегрирования (т.е. деления на переменную Лапласа s). Их число равно порядку системы n (в данном примере трём).

3. С выхода каждого интегратора организуем обратные связи к общему (входному) сумматору с инвертирующим входом, начиная с коэффициента a_1 при $n-1$ производной.

4. С выхода интеграторов организуем связи с коэффициентами из правой части уравнения к выходному сумматору объекта (если производные здесь отсутствуют, то выходной сумматор не нужен, а блок с коэффициентом b можно поместить и на выходе, и на входе системы до главного сумматора). Полученная схема показана на рисунке 3.

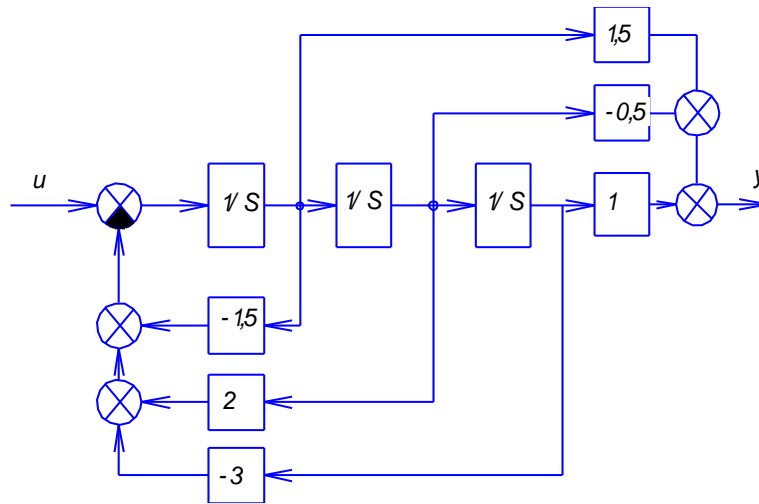


Рис. 3. Структурная схема

Пример 3. Определить передаточную функцию объекта регулирования, модель которого задана дифференциальным уравнением

$$1,5y^{(3)} + 3,5y^{(2)} - 3,1y^{(1)} + 4y = 2,2u^{(2)} - u$$

Введем в уравнение оператор Лапласа – s и вынесем u за скобки.

$$(1,5s^3 + 3,5s^2 - 3,1s + 4)y = (2,2s^2 - 1)u$$

Делим многочлен правой части дифференциального уравнения на многочлен левой части, получаем выражение передаточной функции

$$W_{yu}(s) = \frac{2,2s^2 - 1}{1,5s^3 + 3,5s^2 - 3,1s + 4}$$

Пример 4. Решение ДУ с использованием преобразований Лапласа.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} - 3 \frac{dy}{dt} - 4y = 2 \frac{dx}{dt} + 6x$$

Допустим, входной сигнал имеет форму единичного ступенчатого воздействия, т.е. $x(t) = 1$. Тогда изображение входного сигнала, согласно таблице 1.2, имеет вид $X(s) = \frac{1}{s}$.

Производим преобразование исходного ДУ по Лапласу и подставляем X(s):

$$s^2 \cdot Y(s) - 3 \cdot s \cdot Y(s) - 4 \cdot Y(s) = 2 \cdot s \cdot X(s) + 6 \cdot X(s),$$

$$s^2 \cdot Y(s) - 3 \cdot s \cdot Y(s) - 4 \cdot Y(s) = 2 \cdot s \cdot \frac{1}{s} + 6 \cdot \frac{1}{s},$$

$$Y(s) \cdot (s^3 - 3s^2 - 4s) = 2 \cdot s + 6.$$

Определяется выражение для Y:

$$Y(s) = \frac{2s + 6}{s^3 - 3s^2 - 4s}.$$

Оригинал полученной функции отсутствует в таблице оригиналов и изображений. Для решения задачи его поиска дробь разбивается на сумму простых дробей с учетом того, что знаменатель может быть представлен в виде $s(s + 2)(s + 3)$:

$$Y = \frac{2s + 6}{s^3 - 3s^2 - 4s} = \frac{2s + 6}{s(s - 4)(s + 1)} = \frac{-1.5}{s} + \frac{0.7}{s - 4} + \frac{0.8}{s + 1}.$$

Теперь, используя табличные функции (см. табл. 2), определяется оригинал выходной функции:

$$y(t) = -1.5 + 0.7 \cdot e^{4t} + 0.8 \cdot e^{-t}.$$

При решении ДУ с использованием преобразований Лапласа часто встает промежуточная задача разбиения дроби на сумму простых дробей. Существуют два пути решения этой задачи:

- путем решения системы уравнений относительно коэффициентов числителей,
- путем расчета коэффициентов числителей по известным формулам.

Общий алгоритм разбиения дроби на сумму простых дробей:

шаг 1 – определяются корни знаменателя s_i (знаменатель дроби приравнивается к нулю и решается полученное уравнение относительно s);

шаг 2 – каждому корню ставится в соответствие простая дробь вида $\frac{k_i}{s - s_i}$, где M_i – неизвестный коэффициент; если имеет место кратный корень с

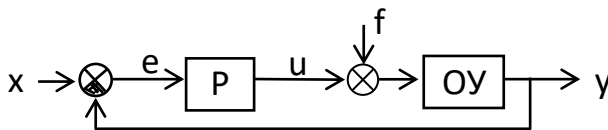
кратностью n , то ему ставится в соответствие n дробей вида $\frac{k_{ij}}{(s - s_i)^j}$, $j = \overline{1, n}$

;

шаг 3 – определяются коэффициенты k_i по одному из вариантов расчета.

Пример 5. Проверка на устойчивость АСР

Общее задание



Дана одноконтурная АСР, для которой определена передаточная функция регулятора (Р) с настройками и дифференциальное уравнение объекта управления (ОУ). Требуется определить:

- передаточную функцию разомкнутой системы $W_{\infty}(s)$,
- характеристическое выражение замкнутой системы (ХВЗС),
- передаточные функции замкнутой системы $\Phi_z(s)$ – по заданию, $\Phi_v(s)$ – по возмущению, $\Phi_e(s)$ – по ошибке,
- коэффициенты усиления АСР,
- устойчивость системы.

ОБРАЗЕЦ

Дан ПИ-регулятор с ПФ вида $W_p = 2 + \frac{1}{s}$ и объект управления, описываемый дифференциальным уравнением

$$2 \frac{d^3 y}{dt^3} + 3 \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{dy}{dt} = \frac{d^2 u}{dt^2} + 4 \frac{du}{dt} + u$$

Определяется передаточная функция объекта:

$$W_{об}(s) = \frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s}$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_{\infty}(s) = W_p(s) \cdot W_{об}(s) = \left(2 + \frac{1}{s}\right) \cdot \frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s} = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

ХВЗС:

$$D(s) = A(s) + B(s) = 2s^4 + 3s^3 + s^2 + 2s^3 + 9s^2 + 6s + 1 = 2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1$$

Передаточные функции замкнутой системы:

$$\Phi_3(s) = \frac{W_{\infty}(s)}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{B(s)}{D(s)} = \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad \text{- по заданию,}$$

$$\Phi_E(s) = \frac{1}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{A(s)}{D(s)} = \frac{2s^4 + 3s^3 + s^2}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad \text{- по ошибке,}$$

$$\Phi_B(s) = \frac{W_{об}(s)}{1 + W_{\infty}(s)} = \frac{\frac{s^2 + 4s + 1}{2s^3 + 3s^2 + s}}{1 + \frac{2s^3 + 9s^2 + 6s + 1}{2s^4 + 3s^3 + s^2}} = \frac{s^3 + 4s^2 + s}{2s^4 + 5s^3 + 10s^2 + 6s + 1} \quad \text{- по возмущению.}$$

По передаточным функциям определяются коэффициенты усиления путем подстановки в них $s = 0$:

$$K_3 = \Phi_3(0) = 1 \quad \text{- по заданию;}$$

$$K_E = \Phi_E(0) = 0 \quad \text{- по ошибке;}$$

$$K_B = \Phi_B(0) = 0 \quad \text{- по возмущению.}$$

Устойчивость АСР определяется по критерию Гурвица.

Критерий Гурвица: система устойчива, если все коэффициенты ее характеристического уравнения $D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n = 0$ и все диагональные миноры $\Delta_1 \dots \Delta_{n-1}$ матрицы Гурвица положительны.

Поскольку коэффициенты ХВЗС $a_4 = 2$, $a_3 = 5$, $a_2 = 10$, $a_1 = 6$, $a_0 = 1$ (степень полинома $n = 4$), то матрица Гурвица имеет вид:

$$\begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 & 0 \\ 2 & 10 & 1 & 0 \\ 0 & 5 & 6 & 0 \\ 0 & 2 & 10 & 1 \end{pmatrix}$$

(обратите внимание на сходство строк матрицы: 1 с 3 и 2 с 4). Определители:

$$\Delta_1 = 5 > 0,$$

$$\Delta_2 = \begin{pmatrix} 5 & 6 \\ 2 & 10 \end{pmatrix} = 5*10 - 2*6 = 38 > 0$$

$$\Delta_3 = \begin{pmatrix} 5 & 6 & 0 \\ 2 & 10 & 1 \\ 0 & 5 & 6 \end{pmatrix} = (5*10*6 + 6*1*0 + 2*5*0) - (0*10*0 + 5*5*1 + 2*6*6) =$$
$$= 209 > 0$$

$$\Delta_4 = 1 * \Delta_3 = 1 * 209 > 0.$$

Поскольку все определители положительны, то АСР устойчива.

Методические указания по выполнению лабораторных работ

На лабораторных занятиях для достижения поставленных задач желательно выполнение работы студентами непосредственно на компьютерной технике. Для лучшего закрепления материала студенты получают задания, которые выполняются на протяжении всех практических занятий в отрезки времени, отведенные для закрепления материала и получения навыков работы. Такие задания сдаются студентами преподавателю в конце изучения данной дисциплины.

Образец лабораторной работы 2

Ɖàñ÷, ò ìãðãõîãíúõ ïðîãññîâ

$$k_y := 100 \quad k_1 := 2 \quad T_1 := 0.31 \quad k_2 := 0.11 \quad T_2 := 0.2 \quad k_{oc} := 1$$

$$a_2 := T_1 \cdot T_2 \quad a_2 = 0.062 \quad a_1 := T_1 + T_2 \quad a_1 = 0.51 \quad a_0 := k_y \cdot k_1 \cdot k_2 + 1$$

$$a_0 = 23 \quad b_0 := k_{in} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_{oc} \quad b_0 = 22$$

Ōàðàèòãðèñòè÷ãñèèé ïèèèñì çàìéíóòíé ñèñòãìú

$$A(p) := a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0$$

Êîðíè òàðàèòãðèñòè÷ãñèèãñ ïèèèñìà $j := \sqrt{-1}$

$$p := -4 + 18 \cdot j \quad p_1 := \text{root}(A(p), p) \quad p_1 = -4.113 + 18.816i$$

$$p_2 := -4 - 18 \cdot j \quad p_2 := \text{root}(A(p), p) \quad p_2 = -4.113 - 18.816i$$

Ōòèçãîãîãü òàðàèòãðèñòè÷ãñèèãñ ïèèèñìà

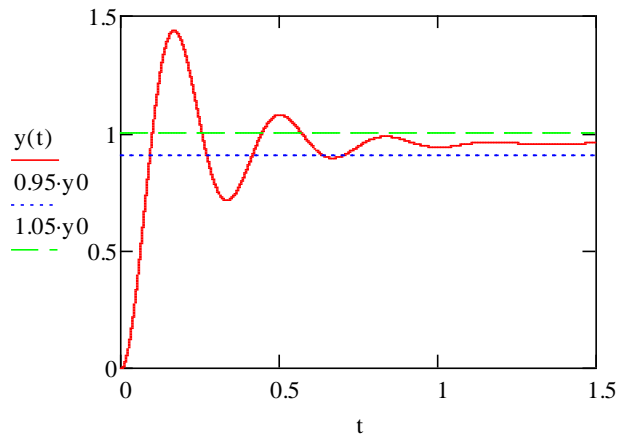
$$C(p) := 2 \cdot a_2 \cdot p + a_1$$

Ōãðãõîãíü òàðàèòãðèñòèèèà

$$t := 0, 0.0001 \dots 1.5 \quad y_0 := \frac{b_0}{a_0}$$

$$y(t) := 2 \cdot \text{Re} \left(\frac{b_0 \exp(p_1 \cdot t)}{p_1 C(p_1)} \right) + y_0$$

$$y_m := 1.579$$



Перерегулирование

$$\sigma := \frac{(y_m - y_0)}{y_0} \cdot 100$$

$$\sigma = 65.077$$

Âðãîý ìãðãõîãíü ïðîãññîâ

$$t := 0.7$$

Giver

$$y(t) = 0.95 \cdot y_0$$

$$tr := \text{Find}(t)$$

$$tr = 0.705$$

Δαῖς, ὁ εἰσῆλθεῖς ἀπὸ τοῦ ἑξῆς ἀπὸ τοῦ ἑξῆς

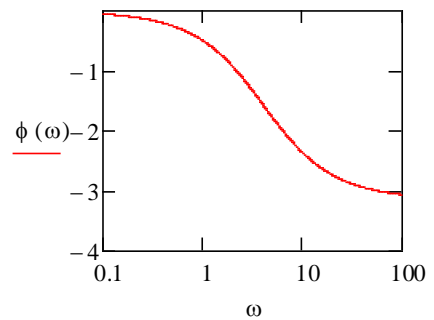
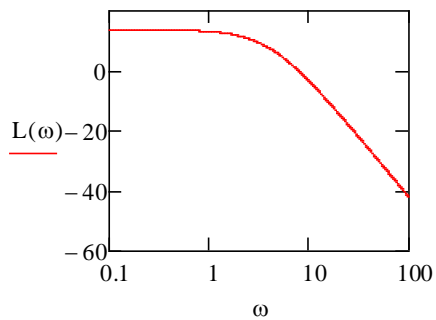
$$j := \sqrt{-1} \quad W1(\omega) := \frac{2}{0.31 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad W2(\omega) := \frac{0.11}{0.2 \cdot j \cdot \omega + 1} \quad Wy(\omega) := 22$$

Ὁ δαῖς ἔχει ἄξιν $\times \tilde{\omega}$ ἀπὸ τοῦ ἑξῆς

$$L(\omega) := 20 \cdot \log(|W1(\omega) \cdot W2(\omega) \cdot Wy(\omega)|)$$

Ὁ δαῖς ἔχει ἄξιν $\times \tilde{\omega}$ ἀπὸ τοῦ ἑξῆς

$$\phi(\omega) := \arg(W1(\omega)) + \arg(W2(\omega))$$



Δαῖς, ὁ ἀπὸ τοῦ ἑξῆς

$$\omega := 100 \quad \text{Giver} \quad \omega > 0 \quad L(\omega) = 0 \quad \omega_{sr} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{sr} = 7.791$$

Δαῖς, ὁ

$$\omega := 100 \quad \text{Giver} \quad \omega > 0 \quad \phi(\omega) = -\pi \quad \omega_{\pi} := \text{Find}(\omega) \quad \omega_{\pi} = 1.37 \times 10^9$$