

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Направление подготовки/специальность: 13.03.03 Энергетическое машиностроение

Наименование образовательной программы: Автоматизированные гидравлические и пневматические системы и агрегаты

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная

Рабочая программа дисциплины
НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Блок: | Блок 1 «Дисциплины (модули)» |
| Часть образовательной программы: | Часть, формируемая участниками образовательных отношений |
| № дисциплины по учебному плану: | Б1.Ч.15 |
| Трудоемкость в зачетных единицах: | 8 семестр - 4; |
| Часов (всего) по учебному плану: | 144 часа |
| Лекции | 8 семестр - 28 часа; |
| Практические занятия | 8 семестр - 14 часов; |
| Лабораторные работы | не предусмотрено учебным планом |
| Консультации | 8 семестр - 2 часа; |
| Самостоятельная работа | 8 семестр - 99,5 часа; |
| в том числе на КП/КР | не предусмотрено учебным планом |
| Иная контактная работа | проводится в рамках часов аудиторных занятий |
| включая: Тестирование Контрольная работа Проверочная работа | |
| Промежуточная аттестация: | |
| Экзамен | 8 семестр - 0,5 часа; |

Москва 2021

ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:

Преподаватель

(должность)

| | | |
|--|----------------------------------------------------|-----------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Ляпин В.Ю. |
| | Идентификатор | Red42d7eb-LiapinVY-e216c286 |

(подпись)

В.Ю. Ляпин

(расшифровка подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель образовательной программы

(должность, ученая степень, ученое звание)

| | | |
|--|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Почернина Н.И. |
| | Идентификатор | R1d8f33d8-PocherninaNI-bbd4793 |

(подпись)

Н.И. Почернина

(расшифровка подписи)

Заведующий выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое звание)

| | | |
|--|----------------------------------------------------|-----------------------------|
| | Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» | |
| | Сведения о владельце ЦЭП МЭИ | |
| | Владелец | Волков А.В. |
| | Идентификатор | R369593e9-VolkovAV-775a725f |

(подпись)

А.В. Волков

(расшифровка подписи)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель освоения дисциплины: освоение студентами методов исследования динамики нелинейных и дискретных систем автоматического управления объектами энергетического/гидроэнергетического машиностроения

Задачи дисциплины

- Обеспечение необходимых и достаточных педагогических, системно-методических и материальных условий для успешного освоения обучающимися фундаментальных и прикладных разделов дисциплины;
- Формирование профессионального владения выпускниками теоретическими основаниями и практическими методами анализа динамики оптимизированных по определяющим показателям работоспособности и качества в нелинейной или дискретной постановке технических систем автоматического управления в области энергетического машиностроения;
- Развитие у обучающихся навыков самостоятельной разработки конкурентоспособных элементов систем автоматического регулирования энергетических объектов и особо генерирующих машин гидроэнергетики.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции | Запланированные результаты обучения |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПК-1 Способен к конструкторской деятельности в сфере автоматизированных гидравлических и пневматических систем и агрегатов | ИД-3ПК-1 Выполняет расчеты элементов объектов профессиональной деятельности | знать: - Современные приемы поиска, анализа и обобщения основных источников научно-технической информации в предметной области дисциплины, включающих основополагающие понятия теории линейных систем управления сложными объектами; - Существо системного подхода к исследованию динамики процессов регулирования энергетических, в т.ч. гидроэнергетических машин с нелинейными динамическими звеньями (д.з.); - Принципы ранжирования и установление адапционных свойств САУ/САР с нелинейными д.з. дискретно действующими подсистемами в зависимости от конструктивных особенностей конкретного объекта исследования/проектирования; - Средства компьютерных и сетевых информационных технологий для отыскания и анализа предметных данных в сфере проблем оптимизированного управления/регулирования энергетическими/гидроэнергетическими устройствами/машинами с учетом характерных нелинейностей, либо при |

| Код и наименование компетенции | Код и наименование индикатора достижения компетенции | Запланированные результаты обучения |
|--------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | <p>наличии дискретно действующих устройств;</p> <p>- Закономерности динамических процессов в нелинейных системах и регулирования энергетических объектов и способы их совершенствования.</p> <p>уметь:</p> <p>- Осуществлять выбор наиболее эффективного решения при разработке структуры САУ энергетическим объектом при наличии нелинейных д.з., либо дискретно действующих элементов;</p> <p>- Применять в необходимых объемах для задач управления техническими системами аппараты теорий интегродифференциального исчисления для одного независимого аргумента, а также теорий рядов Фурье, гармонического баланса;</p> <p>- Проводить расчеты временных характеристик устройств регулирования с нелинейными и дискретными элементами;</p> <p>- Профессионально обосновывать принятые структурно-технические решения при наличии нелинейных и дискретно действующих воздействий.</p> |

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Автоматизированные гидравлические и пневматические системы и агрегаты (далее – ОПОП), направления подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать дифференциальное и интегральное исчисление
- знать основы теории и методов решения линейных и нелинейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными и переменными коэффициентами
- знать основы теорий функций комплексного переменного и операционного исчисления
- знать формализм рядов Тейлора, Фурье
- знать законы и фундаментальные законы и уравнения начала термодинамики механики сплошных сред в одномерной глобально равновесной постановке
- уметь использовать указанные знания законов, закономерностей и методов преобразований для составления замкнутых систем дифференциальных уравнений САУ первого порядка относительно обобщенных координат динамики однозначно связанных с исходными параметрами предмета исследования

- уметь применять теорию гармонического баланса к аппроксимации Фурье нелинейных периодических функций времени
- уметь системно анализировать способы модуляции импульсных сигналов для дискретных САР

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

| № п/п | Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации | Всего часов на раздел | Семестр | Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы | | | | | | | | | | Содержание самостоятельной работы/ методические указания |
|-------|-----------------------------------------------------------|-----------------------|---------|----------------------------------------------------------------------|-----|----|--------------|---|-----|----|----|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | Контактная работа | | | | | | | СР | | | |
| | | | | Лек | Лаб | Пр | Консультация | | ИКР | | ПА | Работа в семестре | Подготовка к аттестации /контроль | |
| КПР | ГК | ИККП | ТК | | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 | Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности | 14 | 8 | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | 8 | - | <p><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности"</p> <p><u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях</p> <p><u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности"</p> <p><u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизадч по разделу "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника</p> |
| 1.1 | Основные понятия. Статические и динамические нелинейности | 14 | | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | - | 8 | |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], §§ 16.1-16.4 [2], §§ 11.1-11.2 [3], с.5-11 [5], §§ 11.1-11.2 |
| 2 | Точные методы исследования динамики Н/САР | 28 | 6 | - | 4 | - | - | - | - | - | 18 | - | <u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Точные методы исследования динамики Н/САР". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) |
| 2.1 | Методы фазовых траекторий, точечных преобразований, припасовывания, сечений пространства параметров | 13 | 3 | - | 2 | - | - | - | - | - | 8 | - | повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) |
| 2.2 | Прямой метод Ляпунова | 15 | 3 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Точные методы исследования динамики Н/САР" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Точные методы исследования динамики Н/САР" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Точные методы исследования динамики Н/САР" <u>Изучение материалов литературных</u> |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | <u>источников:</u> [1], §§ 17.1-17.2 [2], §§ 11.3-11.6 [3], с.12-16 [5], §§ 11.1-11.2 |
| 3 | Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности | 16 | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) |
| 3.1 | Виды уравнений при статических и динамических нелинейностях | 16 | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Приближенные методы исследования |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | | Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности" <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], §§ 18.1 [2], §§ 11.8.1 [3], с.17-22 [4], с.32 [5], §§ 11.8.1 |
| 4 | Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР | 17 | 5 | - | 2 | - | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) |
| 4.1 | Общие положения. Способы определения периодических решений. Основной аналитический метод и его обобщения | 17 | 5 | - | 2 | - | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР" подготовка к выполнению заданий на практических |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------------------------------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | занятиях <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР" <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], § 18.2 [2], § 11.8.3 [4], с.32 [5], § 11.8.3 |
| 5 | Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов | 17 | 5 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизаданий по разделу "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов". |
| 5.1 | Понятие о дискретных САР | 17 | 5 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение дополнительного материала по разделу "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов" <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов" подготовка к выполнению заданий на практических |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---------------------------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | занятиях <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов" <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], §§14.1, 15.1-15.3 [2], §§ 7.1, 7.3-7.6 [4], с.32 [5], §§ 7.1, 7.3-7.6 |
| 6 | Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение | 16 | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Подготовка к текущему контролю:</u> Повторение материала по разделу "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение" |
| 6.1 | Понятие импульсного фильтра | 16 | 4 | - | 2 | - | - | - | - | - | 10 | - | <u>Подготовка к практическим занятиям:</u> Изучение материала по разделу "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <u>Подготовка расчетных заданий:</u> Задания ориентированы на решения минизадч по разделу "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение". Студенты необходимо повторить теоретический материал, разобрать примеры решения аналогичных задач. провести расчеты по варианту задания и сделать выводы. В качестве задания используются следующие упражнения: повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (жестко-лопастные гидротурбины; курса полета летательного аппарата; сопла воздухозаборника турбореактивного двигателя самолета; стола фрезерного станка с числовым программным управлением) <u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u> Изучение |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-------|----|---|----|---|---|---|---|-----|----|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | | | | | | дополнительного материала по разделу "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение" <u>Изучение материалов литературных источников:</u> [1], §§ 14.2-14.7 |
| | Экзамен | 36.0 | - | - | - | - | 2 | - | - | 0.5 | - | 33.5 | |
| | Всего за семестр | 144.0 | 28 | - | 14 | - | 2 | - | - | 0.5 | 66 | 33.5 | |
| | Итого за семестр | 144.0 | 28 | - | 14 | | 2 | | - | 0.5 | | 99.5 | |

Примечание: Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

3.2 Краткое содержание разделов

1. Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности

1.1. Основные понятия. Статические и динамические нелинейности

Составление уравнений динамики Н/САР. Характерные нелинейные динамические звенья и их уравнения. Особенности динамического состояния Н/САР. Влияние начальных условий. Явление автоколебаний. Метода расщепления структуры Н/САР. Общий вид уравнений динамики линейной и «сильно» нелинейной подсистем САР. Примеры САР с типовыми нелинейностями. Обобщенные координаты. Их связь с физическими переменными. Математическая модель динамики Н/САР в виде замкнутой системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно обобщенных координат системы.

2. Точные методы исследования динамики Н/САР

2.1. Методы фазовых траекторий, точечных преобразований, припасовывания, сечений пространства параметров

Примеры для консервативных и неконсервативных систем второго и более высоких порядков.

2.2. Прямой метод Ляпунова

Теоремы Ляпунова об устойчивости и неустойчивости САП, в т.ч. Н/САР. Свойство достаточности теоремы об устойчивости Н/САР. Проблема отыскания функции Ляпунова. Примеры практического применения.

3. Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности

3.1. Виды уравнений при статических и динамических нелинейностях

Принимаемый вид нелинейных зависимостей выходных переменных от входных в нелинейной подсистеме Н/САР. Ряды Фурье, их свойства. Процедура гармонической линеаризации нелинейного дифференциального уравнения. Физическая трактовка принимаемых допущений. Свойство фильтра линейной части Н/САР. Применение теории устойчивости линейных САР. Коэффициенты гармонической линеаризации статических характеристик и квазистатических нелинейных характеристик звеньев: релейных, с зоной нечувствительности и насыщением. Примеры из предметной области специальности: САР стабилизации частоты вращения рабочего колеса жестколопастной гидротурбины.

4. Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР

4.1. Общие положения. Способы определения периодических решений. Основной аналитический метод и его обобщения

Графический и алгебраический способы отыскания периодических решений Н/САР. Установление устойчивости периодических решений. Использование полинома Михайлова. Аналитический критерий устойчивости периодических решений, примеры его применения из предметной области специальности. Устойчивость равновесного состояния системы. Области возможных динамических и установившихся состояний Н/САР. Варианты видов границ этих областей при различных практических существенных нелинейностях.

5. Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов

5.1. Понятие о дискретных САР

Преимущества Д/САР. Этапы преобразования непрерывного сигнала в импульсную последовательность. Квантование по времени и уровню. Структура и уравнения импульсных модуляторов. Структурная схема и уравнения действия Д/САР с амплитудно-импульсной, частотно-импульсной и широтно-импульсной модуляциями входного непрерывного сигнала. Области их применения. Структурные схемы Д/САР с импульсно-кодовой модуляцией, Д/САР с применением специализированных компьютеров, элементов струйной автоматики.

6. Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение

6.1. Понятие импульсного фильтра

Решетчатые функции. Решетчатые аналоги первых и вторых производных непрерывных функций. Разностные уравнения. Z-преобразование. Единичная импульсная функция. Основные правила и теоремы Z-преобразования. Решение разностных уравнений. Примеры. Дискретно-передаточные функции. Исследование устойчивости Д/САР.

3.3. Темы практических занятий

1. Установление устойчивости равновесного состояния Н/САР второго порядка методами фазовых траекторий, точечных преобразований и припасовывания;
2. Решение задачи определения устойчивости Н/САР с нелинейной статической характеристикой гидроусилителя прямым методом Ляпунова, применительно к САР жестколопастной гидротурбины;
3. Определение и анализ коэффициентов в гармонически линеаризованных уравнениях динамики динамических звеньев с нелинейными расходными и перепадными статическими характеристиками;
4. Рассмотрение задач отыскания периодических решений и установление условий их устойчивости в гидроприводных Н/САР с нелинейностями в виде зоны нечувствительности и насыщения;
5. Построение областей возможных динамических состояний гидрофицированных САР линейных и с нелинейностями в золотниковом гидроусилителе в виде сухого трения и насыщения применительно к САР жестколопастной гидротурбины;
6. Решение задач преобразования непрерывных сигналов в дискретные на основе широтно, частотно- и амплитудно-импульсных модуляций;
7. Нахождение передаточной функции и пример решения разностного уравнения на основе Z-преобразования для гидроприводной дискретной САР.

3.4. Темы лабораторных работ

не предусмотрено

3.5 Консультации

Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Точные методы исследования динамики Н/САР"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР"

5. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов"
6. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение"

Текущий контроль (ТК)

1. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности"
2. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Точные методы исследования динамики Н/САР"
3. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности"
4. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР"
5. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов"
6. Консультации направлены на получение индивидуального задания для выполнения контрольных мероприятий по разделу "Разностные уравнения, Z-преобразование и его применение"

3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

| Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1) | Коды индикаторов | Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1) | | | | | | Оценочное средство (тип и наименование) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Знать: | | | | | | | | |
| Закономерности динамических процессов в нелинейных системах и регулирования энергетических объектов и способы их совершенствования | ИД-3ПК-1 | + | | | | | | Тестирование/Типовые нелинейности, их формализация, терминология |
| Средства компьютерных и сетевых информационных технологий для отыскания и анализа предметных данных в сфере проблем оптимизированного управления/регулирования энергетическими/гидроэнергетическими устройствами/машинами с учетом характерных нелинейностей, либо при наличии дискретно действующих устройств | ИД-3ПК-1 | | | | + | | | Контрольная работа/Определение коэффициентов гармонической линеаризации для динамических звеньев (д.з.) с характерными нелинейностями |
| Принципы ранжирования и установление адаптационных свойств САУ/САР с нелинейными д.з. дискретно действующими подсистемами в зависимости от конструктивных особенностей конкретного объекта исследования/проектирования | ИД-3ПК-1 | | + | | | | | Тестирование/Основные отличия динамических состояний нелинейных САР от их линеаризованных моделей |
| Существо системного подхода к исследованию динамики процессов регулирования энергетических, в т.ч. гидроэнергетических машин с нелинейными динамическими звеньями (д.з.) | ИД-3ПК-1 | | | | | + | | Проверочная работа/Повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта |
| Современные приемы поиска, анализа и обобщения основных источников научно-технической информации в предметной области дисциплины, включающих основополагающие понятия теории линейных систем управления сложными объектами | ИД-3ПК-1 | | | + | | | | Тестирование/Структуры и принципы действия модуляторов дискретных сигналов, их применения |
| Уметь: | | | | | | | | |
| Профессионально обосновывать принятые структурно-технические решения при наличии нелинейных и дискретно действующих воздействий | ИД-3ПК-1 | | + | | | | | Тестирование/Основные отличия динамических состояний нелинейных САР от их |

| | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--|--|---|--|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | | | | | линеаризированных моделей |
| Проводить расчеты временных характеристик устройств регулирования с нелинейными и дискретными элементами | ИД-3ПК-1 | | | + | | | | Тестирование/Структуры и принципы действия модуляторов дискретных сигналов, их применения |
| Применять в необходимых объемах для задач управления техническими системами аппараты теорий интегродифференциального исчисления для одного независимого аргумента, а также теорий рядов Фурье, гармонического баланса | ИД-3ПК-1 | | | | | + | | Проверочная работа/Повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта |
| Осуществлять выбор наиболее эффективного решения при разработке структуры САУ энергетическим объектом при наличии нелинейных д.з., либо дискретно действующих элементов | ИД-3ПК-1 | | | | | | + | Контрольная работа/Цели и способы модуляции импульсных сигналов в дискретных САР |

4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)

4.1. Текущий контроль успеваемости

8 семестр

Форма реализации: Защита задания

1. Повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (Проверочная работа)

Форма реализации: Смешанная форма

1. Определение коэффициентов гармонической линеаризации для динамических звеньев (д.з.) с характерными нелинейностями (Контрольная работа)
2. Основные отличия динамических состояний нелинейных САР от их линеаризованных моделей (Тестирование)
3. Структуры и принципы действия модуляторов дискретных сигналов, их применения (Тестирование)
4. Типовые нелинейности, их формализация, терминология (Тестирование)
5. Цели и способы модуляции импульсных сигналов в дискретных САР (Контрольная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине

Экзамен (Семестр №8)

Итоговая оценка определяется по итогам текущего контроля успеваемости и экзаменационной оценки

В диплом выставляется оценка за 8 семестр.

Примечание: Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 Печатные и электронные издания:

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов . – 3-е изд., испр . – М. : Наука, 1975 . – 768 с.;
2. Булкин, А. Е. Автоматическое регулирование энергоустановок : учебное пособие для вузов по специальности "Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели" направления "Энергомашиностроение" / А. Е. Булкин . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 508 с. - ISBN 978-5-383-00208-7 .
[http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=4176;](http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=4176)
3. Моргунов, Г. М. Сборник задач по курсу "Теория автоматических систем": Ч.2. Нелинейные и дискретные системы / Г. М. Моргунов, А. М. Попов, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 1997 . – 88 с. - ISBN 5-7046-0221-5 : 5000.00 .;
4. Моргунов, Г. М. Управление техническими системами: Комплексные лабораторные работы : Методическое пособие по курсу "Управление техническими системами" по направлению "Технологические машины и оборудование" / Г. М. Моргунов, А. М. Попов,

Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2004 . – 32 с.

http://elib.mpei.ru/action.php?kt_path_info=ktcore.SecViewPlugin.actions.document&fDocumentId=3264;

5. Булкин А. Е.- "Автоматическое регулирование энергоустановок", Издательство: "Издательский дом МЭИ", Москва, 2016 - (508 с.)

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72194.

5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Майнд Видеоконференции;
5. Антиплагиат ВУЗ.

5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red
3. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
4. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>

6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

| Тип помещения | Номер аудитории, наименование | Оснащение |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| | Г-102(а), Мультимедийный класс | парта со скамьей, стол преподавателя, шкаф для хранения инвентаря, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки звуковые, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный, принтер |
| Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации | Ж-120, Машинный зал ИВЦ | сервер, кондиционер |
| | Г-102(а), Мультимедийный класс | парта со скамьей, стол преподавателя, шкаф для хранения инвентаря, доска меловая, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки звуковые, мультимедийный проектор, доска маркерная, компьютер персональный, принтер |
| Помещения для самостоятельной работы | Г-205/2, Кабинет сотрудников каф. "ГГМ" | кресло рабочее, стеллаж, стул, шкаф, шкаф для документов, стол письменный, компьютерная сеть с выходом в Интернет, компьютер персональный, принтер, холодильник |
| Помещения для | Г-219/2, | кресло рабочее, стол преподавателя, стол, |

| | | |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| консультирования | Преподавательская | стул, шкаф, шкаф для документов, шкаф для одежды, шкаф для хранения инвентаря, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки, многофункциональный центр, компьютер персональный, холодильник, кондиционер |
| Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря | Г-05, Мастерская каф. "ГГМ" | стеллаж для хранения инвентаря |

БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Нелинейная теория систем управления

(название дисциплины)

8 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Типовые нелинейности, их формализация, терминология (Тестирование)
- КМ-2 Основные отличия динамических состояний нелинейных САР от их линеаризованных моделей (Тестирование)
- КМ-3 Структуры и принципы действия модуляторов дискретных сигналов, их применения (Тестирование)
- КМ-4 Определение коэффициентов гармонической линеаризации для динамических звеньев (д.з.) с характерными нелинейностями (Контрольная работа)
- КМ-5 Повышение качественных показателей электрогидравлической САР сложного объекта (Проверочная работа)
- КМ-6 Цели и способы модуляции импульсных сигналов в дискретных САР (Контрольная работа)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

| Номер раздела | Раздел дисциплины | Индекс КМ: | КМ-1 | КМ-2 | КМ-3 | КМ-4 | КМ-5 | КМ-6 |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|
| | | Неделя КМ: | 4 | 6 | 8 | 10 | 14 | 16 |
| 1 | Нелинейные САР (Н/САР), характеристики нелинейности | | | | | | | |
| 1.1 | Основные понятия. Статические и динамические нелинейности | | + | | | | | |
| 2 | Точные методы исследования динамики Н/САР | | | | | | | |
| 2.1 | Методы фазовых траекторий, точечных преобразований, припасовывания, сечений пространства параметров | | | + | | | | |
| 2.2 | Прямой метод Ляпунова | | | + | | | | |
| 3 | Приближенные методы исследования Н/САР, формализм метода гармонической линеаризации нелинейности | | | | | | | |
| 3.1 | Виды уравнений при статических и динамических нелинейностях | | | | + | | | |
| 4 | Исследование устойчивости и автоколебаний гармонически линеаризованных Н/САР | | | | | | | |
| 4.1 | Общие положения. Способы определения периодических решений. Основной аналитический метод и его обобщения | | | | | + | | |
| 5 | Дискретные САР (Д/САР) и способы модуляции импульсных сигналов | | | | | | | |

| | | | | | | | |
|------------|------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| 5.1 | Понятие о дискретных САР | | | | | + | |
| 6 | Разностные уравнения, Z -преобразование и его применение | | | | | | |
| 6.1 | Понятие импульсного фильтра | | | | | | + |
| Вес КМ, %: | | 15 | 15 | 15 | 15 | 20 | 20 |