

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра управления в технических системах

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

_____ Е.И. Луковникова

«_____» _____ 201__ г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Б1.Б.15

НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ

27.03.04 Управление в технических системах

ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ

Управление и информатика в технических системах

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

СОДЕРЖАНИЕ ПРОГРАММЫ		Стр.
1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ		3
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ		3
3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ		4
3.1 Распределение объёма дисциплины по формам обучения.....		4
3.2 Распределение объёма дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости		4
4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ		5
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий		5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам		9
4.3 Лабораторные работы.....		35
4.4 Семинары / практические занятия.....		35
4.5 Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....		36
5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ		39
6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ		40
7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....		40
8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ		40
9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....		41
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ/ практических работ		41
9.2. Методические указания по выполнению курсового проекта		52
10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....		53
11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....		53
Приложение 1.Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....		54
Приложение 2.Аннотация рабочей программы дисциплины		60
Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе		61
Приложение 4.Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....		62

1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к научно-исследовательской, проектно-конструкторской видам профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

Цель дисциплины

Формирование у обучающихся знаний, умений и навыков, необходимых для выполнения анализа и синтеза систем автоматического управления технологическими процессами

Задачи дисциплины

Изучение методов контроля, обработки, анализа систем автоматического управления технологических процессов в сфере профессиональной деятельности.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	Знать: -Способность выявлять естественнонаучную сущность процесса, -Физико-математические закономерности процессов, -Способы анализа и синтеза систем автоматического управления. Уметь: -Получать необходимую информацию, обрабатывать ее, - Использовать полученные знания на практике, -Проводить анализ, синтез систем автоматического управления. Владеть: - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем, -Соответствующим физико-математическим аппаратом для решения практических задач.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.Б.15 Теория автоматического управления к базовой части.

Дисциплина Теория автоматического управления базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин: Математика, Математические модели и методы.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Теория автоматического управления, представляет основу для подготовки к государственной итоговой аттестации

Такое системное междисциплинарное изучение направлено на достижение требуемого ФГОС уровня подготовки по квалификации бакалавр.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ

3.1. Распределение объема дисциплины по формам обучения

Форма обучения	Курс	Семестр	Трудоемкость дисциплины в часах						Курсовой проект	Вид промежуточной аттестации
			Всего часов (с экз.)	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия	Самостоятельная работа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Очная	3	56	324	140	70	35	35	112	КР кр	Экзамен Экзамен
Заочная	3	-	324	36	18	8	10	279	КР кр	Экзамен
Заочная(ускоренное обучение)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Очно-заочная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3.2. Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости

Вид учебных занятий	Трудоемкость (час.)	в т.ч. в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)	Распределение по семестрам, час	
			5	6
1	2	3	4	5
I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)	140	30	68	72
Лекции (Лк)	70	12	34	36
Лабораторные работы (ЛР)	35	8	17	18
Практические занятия (ПЗ)	35	10	17	18
Курсовая работа	+	+	+	+
Контрольная работа	+	+	+	+
Групповые (индивидуальные) консультации	+	+	+	+
II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)	112	-	40	72
Подготовка к лабораторным работам	20	-	10	10
Подготовка к практическим занятиям	20	-	10	10
Подготовка к экзамену в течение семестра	30	-	-	30
Выполнение курсовой работы	20	-	20	-
Выполнение контрольной работы	22	-	-	22
III. Промежуточная аттестация экзамен	72	-	36	36
Общая трудоемкость дисциплины час.	324	-	144	180
зач. ед.	9	-	4	5

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий - для очной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Объекты управления	26	6	5	5	10
1.1.	Объект управления. Управляющее устройство. Управляемые, управляющие величины.	15	4	3	3	5
1.2.	Возмущающие воздействия. Примеры объектов управления.	11	2	2	2	5
2.	Классификация систем автоматического управления (САУ)	18	8	-	-	10
2.1.	Системы автоматического управления. Разомкнутые, замкнутые, комбинированные системы.	9	4	-	-	5
2.2.	Системы стабилизации, программные, следящие системы. Адаптивные системы.	9	4	-	-	5
3.	Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ	38	12	10	10	6
3.1.	Методы решения дифференциальных уравнений. Преобразование Лапласа. Передаточные функции.	11	4	3	3	1
3.2.	Типовые звенья, их передаточные функции.	4	2	-	-	1
3.3.	Устойчивость систем автоматики.	13	2	7	3	1
3.4.	Частотные характеристики САУ	10	4	-	4	2
4.	Структурные схемы систем автоматического управления	26	8	2	2	14
4.1.	Структурная схема САУ. Элементы структурных схем.	11	4	-	-	7
4.2.	Правила преобразования структурных схем	15	4	2	2	7
5.	Дискретные системы автоматического управления	144	36	18	18	72
5.1.	Основные понятия и классификация	7	2	-	-	5
5.2.	Решетчатые функции, разностные уравнения и дискретное преобразование Лапласа	9	4	-	-	5
5.3.	Описание разомкнутых импульсных систем	7	2	-	-	5
5.4.	Частотные характеристики импульсных систем	15	4	6	-	5
5.5.	Характеристики замкнутых импульсных систем	7	2	-	-	5
5.6.	Процессы в импульсных системах	13	2	6	-	5

5.7.	Устойчивость процессов в импульсных системах	15	4	-	6	5
5.8.	Точность импульсных систем	7	2	-	-	5
5.9.	Оценки качества импульсных систем	13	2	-	6	5
5.10.	Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ	7	2	-	-	5
5.11.	Элементы синтеза импульсных систем	13	2	6	-	5
5.12.	Уравнения состояния линейных импульсных систем	7	2	-	-	5
5.13.	Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний	6	2	-	-	4
5.14.	Цифровые системы автоматического управления	6	2	-	-	4
5.15.	Исследование цифровых систем автоматического управления	12	2	-	6	4
	ИТОГО	252	70	35	35	112

- для заочной формы обучения:

№ раздела и темы	Наименование раздела и тема дисциплины	Трудоемкость, (час.)	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу обучающихся и трудоемкость; (час.)			
			учебные занятия			Самостоятельная работа обучающихся
			лекции	лабораторные работы	практические занятия	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Объекты управления	12	2	-	-	10
1.1.	Объект управления. Управляющее устройство. Управляемые, управляющие величины.	6	1	-	-	5
1.2.	Возмущающие воздействия. Примеры объектов управления.	6	1	-	-	5
2.	Классификация систем автоматического управления (САУ)	11	1	-	-	10
2.1.	Системы автоматического управления. Разомкнутые, замкнутые, комбинированные системы.	6	1	-	-	5
2.2.	Системы стабилизации, программные, следящие системы. Адаптивные системы.	5	-	-	-	5
3.	Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ	32	10	8	8	6
3.1.	Методы решения дифференциальных уравнений. Преобразование Лапласа. Передаточные функции.	7	2	2	2	1
3.2.	Типовые звенья, их передаточные функции.	3	2	-	-	1
3.3.	Устойчивость систем автоматики.	13	2	6	3	2
3.4.	Частотные характеристики САУ	9	4	-	3	2
4.	Структурные схемы систем автоматического управления	18	2	-	2	14
4.1.	Структурная схема САУ. Элементы	8	1	-	-	7

	структурных схем.					
4.2.	Правила преобразования структурных схем	10	1	-	2	7
5.	Дискретные системы автоматического управления	242	3	-	-	239
5.1.	Основные понятия и классификация	19	1	-	-	18
5.2.	Решетчатые функции, разностные уравнения и дискретное преобразование Лапласа	20	2	-	-	18
5.3.	Описание разомкнутых импульсных систем	18	-	-	-	18
5.4.	Частотные характеристики импульсных систем	18	-	-	-	18
5.5.	Характеристики замкнутых импульсных систем	10	-	-	-	10
5.6.	Процессы в импульсных системах	18	-	-	-	18
5.7.	Устойчивость процессов в импульсных системах	18	-	-	-	18
5.8.	Точность импульсных систем	10	-	-	-	10
5.9.	Оценки качества импульсных систем	18	-	-	-	18
5.10.	Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ	18	-	-	-	18
5.11.	Элементы синтеза импульсных систем	18	-	-	-	18
5.12.	Уравнения состояния линейных импульсных систем	18	-	-	-	18
5.13.	Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний	18	-	-	-	18
5.14.	Цифровые системы автоматического управления	11	-	-	-	11
5.15.	Исследование цифровых систем автоматического управления	10	-	-	-	10
	ИТОГО	315	18	8	10	279

4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

РАЗДЕЛ 1 Объекты управления

Автоматика – наука о принципах построения, расчета и конструирование элементов и систем в целом.

Автоматическое устройство – устройство, выполняющее свои функции без непосредственного участия человека.

Автоматизация – процесс внедрения автоматических устройств в производство. Необходимым условием автоматизации является механизация.

Элементы автоматики – конструктивно обособленная часть автоматической системы, выполняющая определённые функции.

Элементы делятся:

- измерительно-преобразовательные (датчики)
- усилительные
- исполнительные

Виды автоматизации:

Частичная – автоматизируются некоторые основные операции производственного процесса (контроль, измерения)

Комплексная – автоматизируются все основные операции и некоторые вспомогательные

Полная – автоматизируются все основные и вспомогательные произ. операции. В этом случае в систему включаются ЭВМ

Управление – одна из функций автоматизации.

Управление – это организация какого-либо процесса, обеспечиваются достижения поставленной цели

САУ – обеспечивает достижения поставленной цели автоматически

В настоящее время во многих технических устройствах управления остается за человеком. Именно он решает как и когда менять действия устройства, чтобы получить желаемый эффект.

Однако увеличение мощности и быстродействия машин и механизмов приводят к тому, что человек не в состоянии управлять ими с необходимой точностью и быстродействием. Т.О. в ходе технического прогресса возникла необходимость исключить человека и операции управления.

Управление объектом – процесс воздействия на него с целью обеспечения требуемого состояния.

Объект управления – техническое устройство (механизм, агрегат, станок, самолет, машина) или коллектив людей и т.д.

Управление, осуществляемое без участия человека, называется автоматическим.

Предметом наших лекций является теория автоматического управления техническими объектами

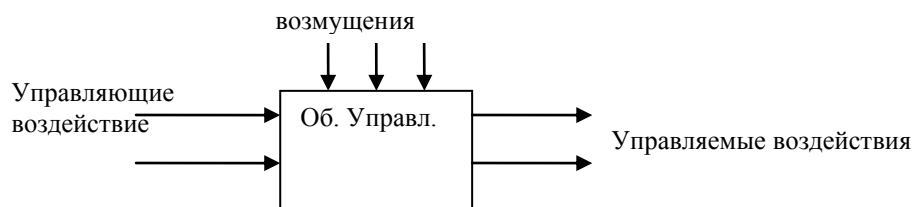
Технологическое устройство, с помощью которого осуществляется автоматическое управление объектом называется управляющим устройством. (УУ)
Совокупность ОУ и УУ образует САУ

В реальных условиях на каждый объект внешняя среда оказывает многочисленное воздействие.

Все эти воздействия практически невозможно учесть, поэтому в поле зрения оставляют лишь те, которые оказывают наибольшее влияние на выходные величины и называется входным воздействием.

С точки зрения влияния входных воздействий на объект разделяют две их группы:

1. управление (положительно влияющие)
2. возмущающие (помехи)



Управляющие воздействия – воздействия, которые обеспечивают желаемое изменение поведения объекта

При ручном управлении такие воздействия на объект осуществляются человеком (оператор), при автоматическом – управляющие устройство.

Например в автомобиле: педаль, коробка передач, руль, клапаны, топливоподающие устройство.

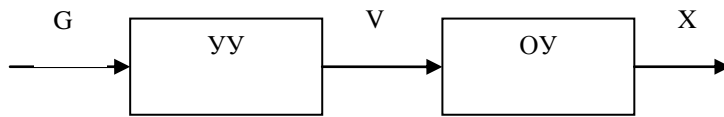
Возмущающее воздействие (помехи, возмущения)-мешают достижению цели, и изменить их, как правило, невозможно.

Например: для а/м неровность дороги, порывы ветра, влияние на скорость, отклонение от пути. Управление воздействия выходной величины, по отклонению которых судим о начале работы ОУ.

Например: для а/м : направление движения а/м, скорость движения, температура двигателя, температура в кабине.

Задача управления заключается в формировании такого закона изменения управляющего воздействия, при котором достигается желаемое поведение объекта, независимо от наличия возмущения.

В общем виде САУ имеет вид



G – задающее воздействие, задание

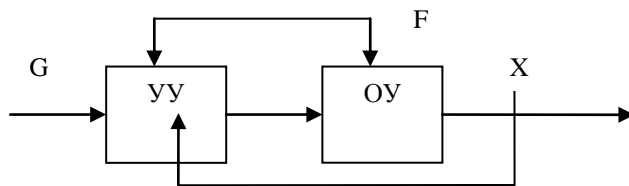
Данная система называется разомкнутой.

Она может функционировать при условиях:

- ОУ не действуют никакие возмущения
- Математическая модель ОУ известна для скорости момента времени с высокой точностью
- Алгоритм управления в УУ реализуется с высокой точностью

Нарушение хотя бы одного из этих условий приводит к появлению неконтролируемой величины от желаемого значения.

Но так как в большинстве задач необходимо вести контроль возмущения и управляемой величиной, то создают более сложные замкнутые САУ.



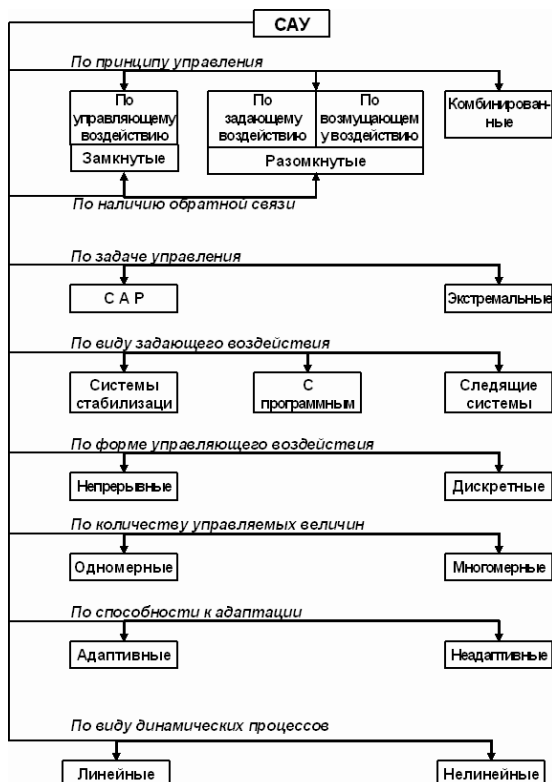
В них используются принцип обратной связи.

На вход УУ подается задающее воздействие G, содержащее информацию о заданном значении X. Помимо этого поступает также информация о текущем состоянии объекта (X) и о действующем на объект возмущение F

УУ – перерабатывает полученную информацию по определённому алгоритму. В результате возникает упра

РАЗДЕЛ 2 Классификация САУ

Для ознакомления с основными видами систем автоматического управления и соответствующей терминологией рассмотрим классификацию САУ по ряду признаков, существенных с точки зрения теории автоматического управления.



1. В зависимости от видов используемой УУ информации различают 3 типа САУ

- Разомкнутые
- Замкнутые
- Комбинированные

1. **Разомкнутые** – не осуществляют контроль за состоянием объекта в них отсутствует обратная связь между выходом объекта и входом УУ-ва.

Различают разомкнутые САУ:

- *По задающему воздействию*: поступающие извне команды G приводят путём изменения управляющего воздействия U к соответствующему изменению выходной величины объекта x

Точность соответствия x и G никак не контролируется. Поэтому такие системы пригодны лишь при достаточно высокой стабильности условий работы и невысоких требований к точности.

- **САУ по возмущению** (САУ компенсации) применяется для поддержания выходной величины OY $x = const$ за счёт частной обратной связи по одному из возмущающих параметров – увеличивается точность управления

В таких системах точность остается невысокой, т.к. нельзя охватить все возмущения параметры объекта изменяются во времени как и возмущения.

2. **Замкнутые САУ** – на вход УУ-ва подаются задающее воздействие G и выходная величина объекта X .

УУ обеспечивает необходимую обратную связь между X и G путем воздействия на объект.

В таких САУ УУ стремится ликвидировать все отклонения X от его значения, определяемого заданием G , независимо от причин, вызвавших эти отклонения, включая F , внутренние и внешние помехи, а так же изменения параметров системы. УУ создает обратную связь вокруг ОУ, связывая его выход и вход.

Такие САУ называют с обратной связью или СУ по отклонению.

Они имеют неограниченную точность управления и являются основным типом САУ.

3. **Комбинированные САУ** – объединение СУ по отклонению и разомкнутой по внешнему воздействию.

Эти САУ увеличивают точность управления.

В них наиболее полно используется информация об объекте и внешней ситуации.

2. По задаче управления: Частным, но широко распространенным видом систем автоматического управления являются системы автоматического регулирования (САР), или автоматические системы регулирования. Системой автоматического регулирования называется САУ, задача которой заключается в поддержании выходной величины объекта на заданном уровне, т. е. в поддержании равенства $y(t) = x(t)$.

3. По виду задающего воздействия системы автоматического регулирования – системы стабилизации, системы программного управления и следящие системы

В зависимости от характера задающего воздействия САР делятся на три вида:

1. Системы стабилизации
2. Системы программного регулирования (управления)
3. Следящие системы.

В системах стабилизации задающее воздействие постоянно во времени, в системах программного регулирования задающее воздействие изменяется по заранее известному закону,

в следящих системах задающее воздействие является заранее неизвестной функцией времени. В последнем случае задающее воздействие поступает на систему извне и задачей системы является обеспечение слежения выходной величиной объекта за изменяющейся задающей величиной так, чтобы все время поддерживалось равенство $y(t) = x(t)$.

Примером следящей системы автоматического регулирования может служить автопилот, ведущий самолет по заданному курсу.

Однако, если автопилот дополнить вычислительным устройством, которое определяет необходимое направление движения самолета исходя из задачи достижения определенной точки пространства за минимальный промежуток времени или при минимальном расходе

горючего и т. п., такую систему автоматического управления уже нельзя назвать системой регулирования.

4. По форме управляющего воздействия

САУ бывают непрерывного или дискретного действия в зависимости от характера действия составляющих систему звеньев.

Система **непрерывного действия**, состоит только из звеньев непрерывного действия, т. е. звеньев, в которых все сигналы являются непрерывными функциями времени.

Система **дискретного действия**, или дискретная система, - это система, содержащая хотя бы одно звено дискретного действия. Звеном дискретного действия называется звено, выходная величина которого изменяется дискретно, т. е. скачками, даже при плавном изменении входной величины. Или управляющее воздействие формируется в дискретные моменты времени.

Дискретные системы делятся на:

- релейные
- импульсные
- цифровые.

5. По количеству управляемых величин

В зависимости от количества выходных сигналов объекта управления, образующих вектор выходной величины $y(t)$, САУ делятся на одномерные и многомерные (двухмерные и т. д.). Если управляемый объект имеет только один выходной сигнал, то система одномерная, если много, то система многомерная.

Многомерные САУ (и САР), в свою очередь, делятся на системы несвязанного и связанного управления (регулирования).

Система **несвязанного управления** имеет несколько управляющих устройств, каждое из которых осуществляет управление своей выходной координатой объекта. При этом все эти устройства не имеют взаимных связей.

В системе **связанного управления** отдельные управляющие устройства связаны друг с другом внешними связями.

Входящая в состав многомерной системы управления (как связанной, так и несвязанной) отдельная система управления называется автономной, если управляемая ею выходная координата объекта не зависит от значений остальных управляемых координат, так что изменение последних не вызывает изменения этой координаты. Часто с целью получения автономности (необходимой по какой-либо эксплуатационной причине) вводят внешние связи между отдельными управляющими устройствами.

6. По способности к адаптации

Адаптивные, или самоприспосабливающиеся, системы обладают способностью приспосабливаться к изменению внешних условий работы, а также улучшать свою работу по мере накопления опыта. **Неадаптивные**, или, как их еще называют, обыкновенные, системы такой способностью не обладают. Они имеют постоянную настройку. Если вследствие какого-либо изменения условий работы обыкновенной системы ее настройку требуется изменить для того, чтобы сохранить заданное качество управления (например, точность, быстродействие), эту перенастройку должен сделать человек. В адаптивной системе это осуществляется автоматически самим управляющим устройством системы.

Область применения адаптивных САУ - это управление объектами, свойства или условия работы которых недостаточно известны или существенно непостоянны. В этих условиях обыкновенная, неадаптивная, система либо будет работать неудовлетворительно, либо потребует постоянного надзора.

7. По виду динамических процессов

Линейной называется система, которая описывается линейными уравнениями. В противном случае система является нелинейной. Чтобы система была нелинейной, достаточно иметь в ее составе хотя бы одно нелинейное звено, т. е. звено, описываемое нелинейным уравнением.

Если не ограничивать диапазона изменения входных воздействий, то все реальные системы автоматического управления оказываются нелинейными. Трудность исследования нелинейных систем заставляет упрощать их описание. Желательным пределом такого

упрощения является приближенное описание их линейными уравнениями, хотя бы в некоторых из интересующих нас режимов. Это называется линеаризацией нелинейных систем.

8. По изменению во времени

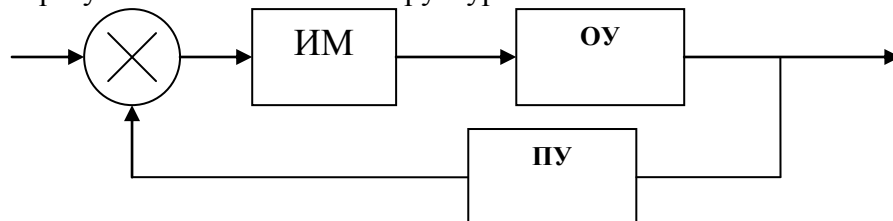
- *стационарные системы* - все параметры которой не изменяются во времени.
- *не стационарные* - системы с переменными параметрами (т.е. являются функциями времени)

РАЗДЕЛ 3. Математическое описание линейных САУ. Анализ устойчивости САУ.

Чтобы управлять объектом необходимо знать его математическое описание. Исследование САУ включает математическое описание систем.

Математическое описание начинается с разбиения её на звенья и описание этих звеньев либо аналитически (уравнений), графически (в виде характ.)

В результате составляется структурная схема САУ



Каждому звену соответствует его характеристика или уравнение

Математическое описание элемента – уравнение, как правило дифференциальное, которое связывает его входные и выходные величины и является функцией времени

Математическая модель можно использовать для проектирования новых САУ и для оценки работоспособности действующих

Математическое описание стандартных средств автоматики (датчиков, испытываемых средств, усилитель) известно заранее. По иному обстоит дело с объектами регулирования; которые отличаются сложностью и разнообразием.

С одной стороны математическая модель должна как можно полнее отражать свойства реального объекта, а с другой стороны, быть по возможности простой, не усложняя исследование.

Существует два способа получения математической модели

- **аналитический** – использование главных физико-химических закономерностей процессов, протекающих в объекте, то есть на знание механизма этих процессов.
- **Экспериментальный** – установление соответствующих между выходными и входными параметрами путём эксперимента.

Примеры объектов управления – поступательное движение механизма подачи лесопильной рамы описывается уравнением

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

m – масса

v – минимальная скорость

F – результирующая действующая сила при сушке пиломатериалов влажность изменяется

$$m c \frac{d\omega}{dt} = W$$

ω – относительная влажность древесины

W – масса влаги, в единице времени

$m c$ – масса абсолютно сухой древесины

Общий вид дифференциальных уравнений $T \frac{dy}{dt} = x$

x – входная величина

y – выходящая (регулируемая)

T – опер-ед свойства объекта

Чтобы определить поведение объекта во времени необходимо решить дифференциальное уравнение

Решить можно двумя способами:

1. метод вариации постоянной интегрирования (на практике рассматривается)
2. метод операторного исчисления (преобразование Лапласа)

Сложная система регулирования содержит большое количество элементов.

Следовательно определение диф. уравнения и решение является сложной задачей

В ТУ применяется метод операторного исчисления - преобразование Лапласа (упрощающее решение задач)

Сущность преобразования состоит в том, что вместо переменной $x(t)$ рассматривается $X(p)$,

p - комплексная переменная – оператор.

$x(t)$ – называют оригиналом функции $x(p)$

$x(p)$ изображением функции $x(t)$

Операцию перехода от искомой функции $x(t)$ к её изображению $x(p)$ называют **прямым** преобразованием Лапласа

$L \{x(t)\} = X(p)$ - Условная запись

Операцию перехода от изображения $x(p)$ к искомой функции $x(t)$ - **обратным** преобразованием Лапласа

$$L^{-1} \{X(p)\} = x(t)$$

При операторном исчислении путём прямого преобразования Лапласа переходят от оригиналов функций к их изображениям, производят вычисления, получают результирующее изображение, а затем с пом. обратного преобразования Лапласа находят оригинал результата.

При этом все расчёты упрощаются, т.к. операции дифференцирования оригиналов $dx/dt, d^2x/dt^2, \dots, d^n x/dt^n$ заменяют операцией умножения изображения $x(p)$ на оператор p в соответствующей степени, т.е. $px(p), p^2 x(p), p^n x(p)$, а операции интегрирования $\int x dt$ заменяют операциями деления: $x(p)/p, x(p)/p^2$

Пример:

Допустим система регулирования описывается уравнением

$a_n d^n x_{\text{вых}}/dt^n + a_{n-1} d^{n-1} x_{\text{вых}}/dt^{n-1} + \dots + a_1 dx_{\text{вых}}/dt + a_0 x_{\text{вых}} = b_m d^m x_{\text{вх}}/dt^m + \dots + b_0 x_{\text{вх}}$ приведём его по Лапласу к виду:

$$a_n p^n x_{\text{вых}}(p) + a_{n-1} p^{n-1} x_{\text{вых}}(p) + \dots + a_1 p x_{\text{вых}}(p) + a_0 x_{\text{вых}}(p) = b_m p^m x_{\text{вх}}(p) + \dots + b_0 x_{\text{вх}}(p)$$

$$x(p) = \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt$$

← Изображение и оригинал имеют зависимость

При расчётах переход от $x(t)$ к $x(p)$ осуществляют с помощью таблиц т.е. задача решения дифференцированного уравнения сводится к тому чтобы преобразовать дифференцированное уравнение элементов по Лапласу, выполнить необходимые вычисления с изображениями и с помощью таблиц перейти от изображения результата к его оригиналу.

Убедимся в правомерности такого перехода.

Обозначим $dx/dt = y(t)$ найдём изображение:

$$Y(p) = L \{dx/dt\} = \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} e^{-pt} dx$$

Согласно примеру интегрирование по частям

$$\int u dv = uv + \int v du$$

Обозначим $e^{-pt} = u, dx = dv$

$$Y(p) = \int_0^{\infty} (t)e^{-pt} \left[\int_0^t p e^{-p\tau} x(\tau) d\tau \right] + \int_0^{\infty} p e^{-pt} x(t) dt = p \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt - x(0)^0$$

При нулевых начальных условиях $x(0)=0$

$$y(p) = L\left(\frac{dx}{dt}\right) = px(p)$$

Таким образом перешли от дифференцированной формы записи производной к её записи операторной форме путём замены $\frac{d}{dt} = P$

Операция дифференцирования оригинала соответствует операции умножения изображения этого оригинала на комплексное число P - одно из свойств преобразования Лапласа.

В преобразованных по Лапласу выражениях с комплексной переменной, p можно производить различные действия: умножение, деление, возведения в степень, вынесение за скобки.

Преобразуем (1)

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) x_{\text{вых}}(p) = b_0 x_{\text{вх}}(p) \quad (2)$$

Определим отношения изображения выходной величины к изображению входной : $x_{\text{вых}}(p) / x_{\text{вх}}(p) = b_0 / (a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) = W(p)$

Отношения изображения выходной величины элемента системы к изображению его входной величины при нулевых начальных условиях называют **передаточной функцией звена**.

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p) x_{\text{вх}}(p)$$

Передаточная функция системы определяет её динамические свойства, следовательно первой задачей САУ является определение её $W(p)$

Передаточную функцию всей системы можно найти по передаточным функциям отдельных её элементов

В уравнение 2 разделим слагаемые на a_0 :

$$\left(\frac{a_n}{a_0} p^n + \frac{a_{n-1}}{a_0} p^{n-1} + \dots + \frac{a_0}{a_0} p + 1 \right) x_{\text{вых}}(p) = \frac{b_0}{a_0} x_{\text{вх}}(p)$$

Обозначим

$$\frac{a_1}{a_0} = T_1, \frac{a_2}{a_0} = T_2^2 \dots \frac{a_n}{a_0} = T_n^n$$

$$K = \frac{b_0}{a_0}$$

Тогда уравнение примет вид:

$$(T_n^n p^n + T_{n-1}^{n-1} p^{n-1} + T_1 p + 1) x_{\text{вых}}(p) = k x_{\text{вх}}(p)$$

T – постоянная времени – время в течение которого выходная величина достигала бы установившееся значение, если бы скорость её измерения была const

τ , T – характеризуют инерционные свойства ОУ

k – коэффициент усиления звена показывает во сколько раз отклонение выходной величины в установившемся режиме превышает обусловившее его отклонение входной величины

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{k}{T_n^n p^n + T_{n-1} p^{n-1} + T_1 p + 1} x_{\text{вх}}(p)$$

$$W(p) = \frac{k}{T_n^n p^n + T_1 p + 1}$$

$$k = \frac{x_{\text{вых}}(t)_{\text{уст}}}{x_{\text{вх}}(t)}$$

Типовые звенья, их переходные характеристики

Структурные звенья состоят из звеньев. Звено описывается дифференцированным уравнением или перед. функцией. По виду уравнений различают 5 типовых звеньев, из которых могут состоять САУ.

1. Безынерционное звено.

Это звено описывается уравнением $x = k * y$ (1) Если на входе звена подать единичную ступенчатую функцию, то на выходе получается сигнал усиления в k раз

Записываем уравнение (1) в операторной форме

$$x(p) = k * y(p)$$

Перед. функция : $W(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = k$

Примеры звена : жесткий механический рычаг, потенциометр, усилитель.

2. Аperiodическое звено 1 порядка

Самое распространённое звено описываем уравнение:

$$T \frac{dx}{dt} + x = k * y$$
 T-постоянное время ; k-коэффициент

$$x = k * y (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

Данная кривая экспонента :

В операторной форме:

$$T * p * x(p) + x(p) = k * y(p)$$

$$W(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{k}{Tp + 1}$$

Пример: пассивные четырехполосники, состоящие из сопротивления и индукции, сопротивления и емкости; термопары; магнитный усилитель, генераторы постоянного и переменного тока

3. Интегрирующие звено

Уравнение имеет вид $\frac{dx}{dt} = k * y$

$$x = k \int_0^t y dt$$

При $y=1^\circ$ $x = k \int_0^t 1 dt = kt$
 $\alpha = \text{arctg}k$

В операторной форме (1)

$$px(p) = ky(p) \Rightarrow W(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{k}{p}$$

Примеры: электрический двигатель, если входной сигналам считать напряжение на якоре, а выходным – углом поворот якоря; операционный усилитель с емкостной обратной связью

4. Дифференцирующие звенья

Три вида:

- Идеальное дифференцированное звено

$$x = k \frac{dy}{dt}$$

- Реальное дифференцирующее звено

$$T \frac{dx}{dt} + x = k \frac{dy}{dt}$$

- Реальное со статизмом дифференцирующее звено

$$T \frac{dx}{dt} + x = k_1 \frac{dy}{dt} + k_2 y$$

Из (1) $\Rightarrow x(p) = kpy(p) \Rightarrow W(p) = kp$

1) $x = k \frac{d(y)}{dt}$ $x(p) = kpy(p)$
 $W(p) = kp$

2) $x = \frac{k}{T} e^{-\frac{t}{T}}$ $W(p) = \frac{kp}{T_p + 1}$

3) $x = k_2 (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \frac{k_1}{T} e^{-\frac{t}{T}}$

Пример реального дифференцированного звена – трансформатор

5. Аperiodическое (колебательное) звено второго порядка

$$T^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\rho T \frac{dx}{dt} + x = ky$$

ρ – коэффициент затухания

$$T^2 p^2 x(p) + 2\rho T p x(p) + x(p) = ky(p)$$

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\rho T p + 1}$$

Пример: контур, содержащий R, L, C, электромагнитный усилитель, электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если входным сигналом считают напряжение на якоре, а выходным – частоту вращения якоря

Помимо типовых встречаются – звено с запаздыванием – устройства, в которых выходной сигнал появляется через некоторое время после возникновения входного сигнала.

Например: длинные линии, транспортер, трубопровод

$$x = ky(t - \tau)$$

$$W(p) = e^{-p\tau}$$

Устойчивость систем автоматики

Устойчивость является важнейшим показателем динамики систем автоматического регулирования (САР). Более того, устойчивость – это основополагающее понятие при работе любой саморегулирующейся системы, например энергетической системы, механических движущих систем и т.д. Поэтому принципы и критерии, полученные при изучении устойчивости САР, находят широкое применение и в других областях науки и техники.

САУ или любая другая система считаются устойчивыми, если, будучи выведенной, из состояния равновесия, а затем предоставленной самой себе, возвращается в прежнее или занимает новое состояние равновесия.

САУ считается устойчивой, если переходный процесс в ней затухающий; неустойчивой – если переходный процесс в ней расходящийся.

Поскольку переходный процесс – это результат решения дифференциального уравнения системы (т.е. зависимость $x(t)$), то система устойчива, если $x(t) \rightarrow const$, и система не устойчива, если $x(t) \rightarrow \infty$.

Устойчивость линейных систем зависит только от параметров самих систем и не зависит от величины возмущающих или других внешних воздействий.

Действительно, пусть линейная или линеаризованная система описывается дифференциальным уравнением n -го порядка:

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n \tilde{y} = a_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m \tilde{g} + a_0 p^l + c_1 p^{l-1} + \dots + c_{l-1} p + c_l \tilde{f} \quad (5.1)$$

где y, g и f – соответственно регулируемая величина, задающее воздействие и возмущение или отклонения этих величин от их базисных значений; $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m, c_0, c_1, \dots, c_l$ – постоянные коэффициенты; $m \leq n$ и $l \leq n$, p – оператор дифференцирования.

Для оценки устойчивости системы должна быть исследована свободная составляющая решения уравнения т.е. решение однородного уравнения

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n \tilde{y} = 0$$

при начальных условиях

$$y \overset{\sim}{=} y^0; \dot{y} \overset{\sim}{=} \dot{y}^0; \dots; y^{(n-1)} \overset{\sim}{=} y^{(n-1)0},$$

где $y^0, \dot{y}^0, \dots, y^{(n-1)0}$ – постоянные, ограниченные по абсолютному значению.

Общее решение уравнения есть сумма слагаемых, вид которых определяется значениями корней характеристического уравнения

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + 1 = 0$$

Следует заметить, что коэффициенты уравнения и, следовательно, значения его корней зависят только от свойств и параметров элементов системы, способа их соединения.

Таким образом, для устойчивости (асимптотической устойчивости) линейной стационарной системы необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического

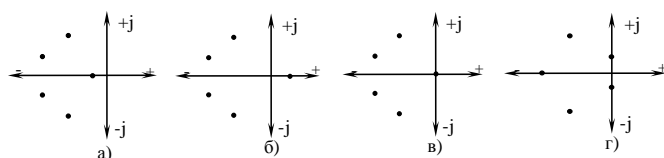
уравнения имели отрицательную вещественную часть. При наличии хотя бы одного корня с положительной вещественной частью система неустойчива.

Среди корней характеристического уравнения может быть корень $\alpha_i = 0$ или пара чисто мнимых корней $\pm j\beta$. Если при этом вещественные части всех остальных корней отрицательны, то решение уравнения будет иметь постоянное слагаемое с постоянной амплитудой $C_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$. В этих случаях система нейтральна.

Сформулированное выше условие устойчивости справедливо как для линейных, так и для линеаризованных систем (теоремы Ляпунова): по корням характеристического уравнения системы, элементы которой описываются линеаризованными уравнениями (см. п. 2.1), действительно можно судить о ее устойчивости или неустойчивости.

Корни алгебраического уравнения, как и всякие комплексные числа, удобно представлять в виде точек на комплексной плоскости. Для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы все корни ее характеристического уравнения лежали слева от мнимой оси комплексной плоскости (рис.а), т. е. чтобы все корни были «левыми». Если хотя бы один вещественный корень или одна пара комплексных сопряженных корней находится справа от мнимой оси, то система неустойчива (рис.б).

Мнимая ось является, следовательно, границей устойчивости. Говорят, что система находится на границе устойчивости, если имеется нулевой корень (рис.в) или пара чисто мнимых корней (рис. г), а остальные корни «левые».



На практике для упрощения расчетов устойчивость САР определяют с помощью критериев устойчивости. Критерий устойчивости – это правило, позволяющее выяснить устойчивость системы без вычисления корней характеристического уравнения. Рассматриваются коэффициенты характеристического уравнения или некоторые функции. Критерии устойчивости эквивалентны сформулированному выше условию устойчивости.

Критерии устойчивости разделяют на алгебраические и частотные. К алгебраическим относят критерии Гурвица, Лъенара-Шипара и Рауса, к частотным – критерии Михайлова и Найквиста.

Критерий устойчивости Гурвица

Используется как для разомкнутых, так и для замкнутых систем.

При использовании критерия из коэффициентов характеристического уравнения составляют матрицу

$$\begin{array}{cccccc}
 a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\
 a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\
 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n
 \end{array}$$

По диагонали таблицы от левого верхнего угла выписывают по порядку все коэффициенты, начиная с a_1 и заканчивая a_n . Затем каждый столбец таблицы дополняют так, чтобы вверх от диагонали индексы коэффициентов увеличивались, а вниз – уменьшались. В случае отсутствия в уравнении какого-либо коэффициента и вместо коэффициентов с индексом меньше 0 и больше n пишут нуль.

Критерий формулируется так: чтобы рассматриваемая система была устойчивой, необходимо и достаточно при $a_0 > 0$ иметь положительными все диагональные определители, получаемые из матрицы (5.5), т.е.

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_{n-1} > 0; \Delta_n = a_n \Delta_{n-1} > 0.$$

Если $a_n > 0$, то последнее неравенство в (5.6) удовлетворяется при $\Delta_{n-1} > 0$.

Система находится на границе устойчивости, если $\Delta_n = 0$ и все предыдущие определители положительны. Это условие распадается на два: $a_n = 0$ (апериодическая граница устойчивости) и $\Delta_{n-1} = 0$ (колебательная граница устойчивости).

Для устойчивости систем первого и второго порядков достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения были положительными. Для систем более высокого порядка кроме этого необходимо удовлетворение следующих неравенств:

Частотные характеристики САУ

При исследовании и проектировании САУ часто используют АФЧХ, ЛАЧХ и ЛФЧХ *разомкнутых систем*. Это объясняется тем, что разомкнутые САУ более просто исследовать экспериментально, чем замкнутые. В то же время по ним можно получить исчерпывающую информацию о поведении данной САУ в замкнутом состоянии.

Любую многоконтурную САУ можно привести к одноконтурной. *Разомкнутая одноконтурная САУ* состоит из цепочки последовательно соединенных динамических звеньев. Зная передаточную функцию разомкнутой САУ можно построить ее ЧХ. И наоборот, зная ЧХ разомкнутой САУ, снятую, например, опытным путем, можно найти ее передаточную функцию.

Передаточная функция разомкнутой одноконтурной системы равна произведению передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p)$$

Заменив в этом выражении p на $j\omega$ получим ее АФЧХ:

$$W(j\omega) = \prod_{i=1}^n W_i(j\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

$$\text{АЧХ: } A(\omega) = \prod_{i=1}^n A_i(\omega)$$

$$\text{ЛАЧХ: } L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega)$$

$$\text{ЛФЧХ: } \varphi(\omega) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(\omega)$$

Таким образом ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой САУ строят путем графического сложения ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев. При этом ограничиваются построением асимптотической ЛАЧХ.

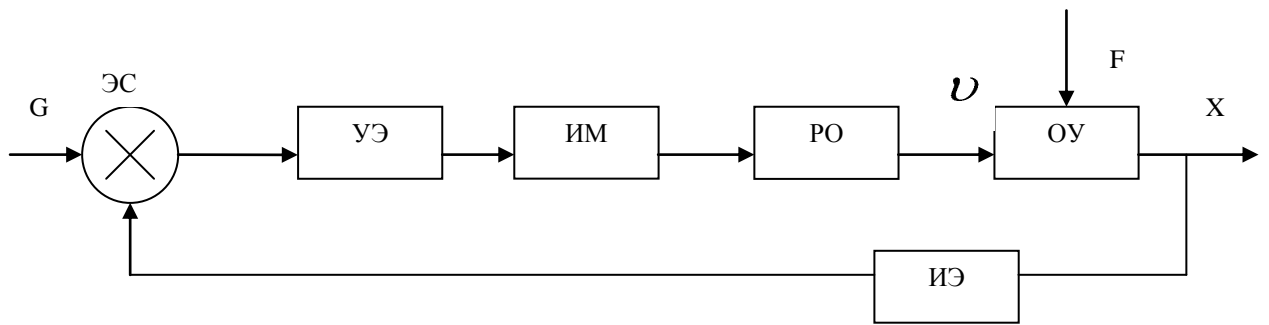
Для построения ЛАЧХ и ЛФЧХ рекомендуется следующий порядок:

- 1) раскладывают сложную передаточную функцию на множители, являющиеся передаточными функциями типовых динамических звеньев (порядок полиномов числителя и знаменателя не выше второго);
- 2) вычисляют сопрягающие частоты отдельных звеньев и строят асимптотические ЛАЧХ и ЛФЧХ каждого элементарного звена;
- 3) путем графического суммирования ЛАЧХ и ЛФЧХ звеньев строят результирующие ЧХ.

Раздел 4. Структурные схемы систем автоматического управления

Вид занятия в интерактивной форме обучения: рассмотреть пример структурной схемы системы автоматического управления, применяемой в теплоэнергетике.

Любая САУ состоит из объекта управления и регулятора.



Основные составные части САУ:

1. ИЭ – измерительный элемент (датчик) – служит для измерения управляемого параметра X (датчик t -ры, P , U ...)
2. ЭС – элемент сравнения – выполняет операции сравнения измеренного значения X с заданными G $\Delta = G - x$
3. УЭ- усилительные элемент – выпол. операции усиления сигнала $k = f(\Delta)$
4. ИМ – исполнительный механизм (двигатель) – воздействует на объект с целью изменения его состояния ч/з РО
5. РО - регулирующий орган (клапан, кран, задвижка)

Кроме этих элементов в состав САУ входят дополнительные элементы: устройства связи, согласования

По функциональному признаку элементы делятся на группы:

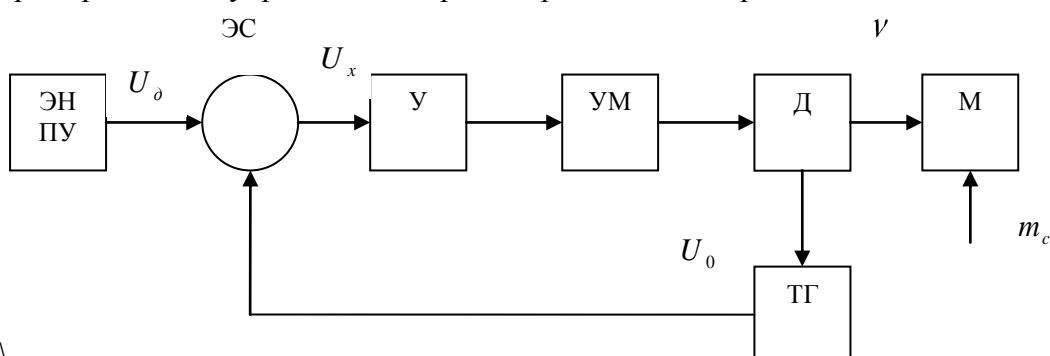
1.Измерительные устройства (ИУ)- устройство для получения информации, которое выдает унифицированный сигнал , соответствующий значению контролируемой физической величины (первичные преобразователи, датчики).

2.Устройства преобразования, обработки, хранения информации и выработки команд управления. Это центральная группа технических устройств включает анализаторы сигналов, функциональные и операционные преобразователи, логические устройства, устройства памяти, задающее устройство (создает сигнал, определяющий желаемое значение регулируемой величины), сумматоры (определяющие отклонение измеренного значения параметра от заданного), регуляторы (вырабатывающие необходимое воздействие на объект), управляющие вычислительные устройства и комплексы.

3.Устройства использования командной информации для воздействия на процесс – исполнительные устройства. К ним принадлежат усилители мощности командного сигнала от регулятора или управляющего комплекса и исполнительные механизмы, воздействующие на регулирующий орган объекта.(кран, клапан, задвижку).

4.Устройства для приема, преобразования и передачи сигнала по каналам связи- телеустройства, шифраторы, дешифраторы. Данная группа содержит приборы, обеспечивающие взаимодействие функциональных блоков первых трех групп. Во многих системах роль таких устройств выполняют провода или трубы, а перечисленные выше используют при передачи на большие расстояния(в телеуправлении) или в условиях сильных помех.

Пример.Система управления скорости вращения электродвигателя постоянного тока



Система состоит из электродвигателя – Д, постоянного тока с независимым возбуждением, вращающего какой-то рабочий механизм – М

Двигатель и механизм составляют объект управления.

Регулируемой величиной являются V - угловая скорость вала, связывающего ЭД и М

Возмущением – является момент сопротивления m_c рабочего механизма.

Необходимо обеспечить скорость вращения V механизма М пропорционально неизменному эталону напряжения ЭН или изменять её пропорционально напряжению программного устройства ПУ - U_0

Для этого с тахогенератора ТГ, связанного с валом электродвигателя снимается напряжение U_0 (пропорциональное угловой скорости)

В устройстве сравнения (УС) U_0 сравнивается с эталонным напряжением U_0 :

$$U_x = U_0 - U_0$$

ТГ осуществляет обр. связь в системе.

Разность U_x подается на усилитель, где усиливается 2-мя каскадами – предварительным усилителем У и усилителем мощности УМ, к которому подключен двигатель Д т.о. выдерживается пропорциональность между скоростью вращения V Д и напряжением, задаваемым ЭН (ПУ)

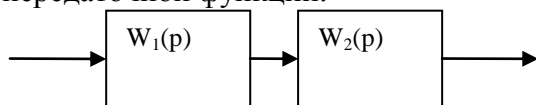
Например: если в какой-то момент $\uparrow m_c$ - момент сопротивления, то угловая скорость $v \downarrow \Rightarrow \downarrow U_0$ (ТГ) и $\uparrow U_x$ - возникает сигнал рассогласования

$\uparrow U$ на выходе У и $\uparrow U$; подаваемое обмотку якоря электродвигателя

В результате $\uparrow I$ и вращ-ся момент ЭД и V восстанавливается (с некоторой погрешностью).

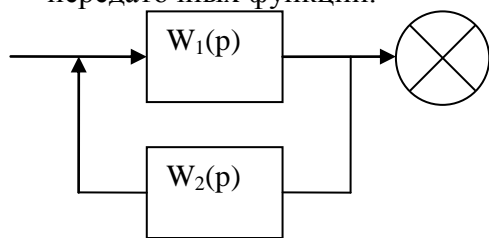
Правила преобразования структурных схем.

1. Передаточная функция последовательно соединенных звеньев равна произведению их передаточной функций.



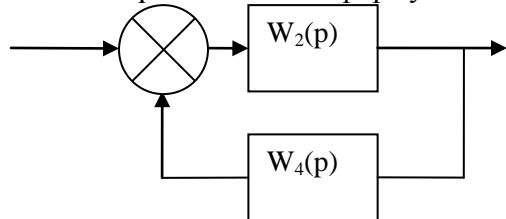
$$W(p) = \prod_{i=1}^n W(p)_i$$

2. Передаточная функция параллельно соединенных звеньев равна сумме их передаточных функций.



$$W(p) = \sum_{i=1}^n W(p)_i$$

3. Передаточная функция при встречном параллельном соединении звеньев определяется по формуле:



$$W(p) = \frac{W(p)_{\text{прямцепи}}}{1 \pm W(p)_{\text{прямцепи}} \cdot W(p)_{\text{обратсвязи}}}$$

Раздел 5. Дискретные системы автоматического управления Основные понятия и классификация

Если хотя бы один из сигналов в замкнутом контуре системы автоматического управления (САУ) подвергается дискретизации (квантованию), то такая система будет относиться к классу дискретных САУ. Различают квантование сигнала по времени, по уровню и одновременно по времени и уровню. Соответственно дискретные САУ делятся на импульсные, релейные и цифровые. Дискретизация в импульсных САУ обычно осуществляется устройствами, называемыми импульсными элементами ИЭ (модуляторами), в релейных – устройствами, имеющими релейные характеристики (реле), а в цифровых – аналого-цифровыми или цифро-аналоговыми преобразователями. Класс релейных систем рассмотрен в разделе 2, т.к. методы исследования релейных систем базируется на теории и методах исследования нелинейных непрерывных САУ. В данном разделе будем рассматривать импульсные и цифровые САУ.

На вход ИЭ поступает непрерывный сигнал $e(t)$, на выходе имеем импульсный сигнал в виде модулированной последовательности прямоугольных импульсов. Параметрами импульсной последовательности, которые подвергаются модуляции, являются ширина τ , высота h и период T (частота $\omega_0 = 2\pi/T$). Соответственно различают амплитудно-импульсную (АИМ), широотно-импульсную (ШИМ) и частотно-импульсную (ЧИМ) модуляции. Наиболее широко используется АИМ и ШИМ. Кроме этого, различают модуляцию 1-ого и 2-ого рода.

Классификацию импульсных САУ по виду модуляции закончим еще одним разделением их на два класса: если все элементы САУ (в том числе и ИЭ) описываются линейными уравнениями, то такую САУ будем называть линейной. Если хотя бы один элемент (в том числе и ИЭ) описывается нелинейными уравнениями, то такую САУ будем относить к классу нелинейных.

Основой общей теории дискретных САУ является теория линейных импульсных систем с АИМ-1 (амплитудно-импульсной модуляцией 1-ого рода), в которой все звенья системы описываются линейными дифференциальными уравнениями или передаточными функциями, а ИЭ осуществляет линейную модуляцию 1-ого рода. Базовая структура линейной стационарной импульсной САУ, к которой можно во многих случаях свести реальную структуру и которая будет являться предметом дальнейшего рассмотрения, представлена на рис. 1.3, где ЛНЧ – линейная непрерывная часть системы, $y(t)$, $v(t)$ – выход и вход системы, $e(t)$ – сигнал ошибки, e^* – последовательность прямоугольных импульсов, модулированных по амплитуде.

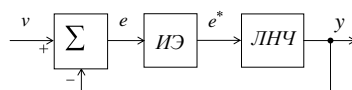


Рис. 1.3

$$h(kT) = h_k = k_u e(kT) = k_u e_k, \quad (1.3)$$

причем переменные v , e , f , y являются непрерывными функциями времени. В дальнейшем можно полагать $k_u = 1$. Если $k_u \neq 1$, то его можно отнести к ЛНЧ.

Связь координат v , e , f , y можно записать в операторной форме

$$E(s) = V(s) - Y(s), \quad Y(s) = E^*(s) W_0(s). \quad (1.4)$$

Уравнения (1.3), (1.4) можно интерпретировать как модель импульсной САУ.

Решетчатые функции, разностные уравнения и дискретное преобразование Лапласа

Основной математической теории описания процессов в импульсных системах является аппарат решетчатых функций и разностных уравнений.

Решетчатой функцией $f(t_k)$ будем называть функцию, определенную для целочисленных значений аргумента t_k ($k = 0, 1, \dots$). Впредь будем рассматривать t_k или k

как дискретное время. Для ШИМ и АИМ $T_k = t_{k+1} - t_k = T = const$, поэтому функции будем обозначать $f(kT)$ или f_k . Решетчатые функции $f(kT)$ часто получаются из непрерывных $f(t)$ при замене $t = kT$.

Аналогом производных непрерывных функций для решетчатых функций являются конечные разности. Конечная разность первого порядка (первая разность) для решетчатой функции $f(k)$ обозначается $\Delta f(k)$ и определяется выражением

$$\Delta f(k) = f(k+1) - f(k). \quad (1.5)$$

Вторая разность $\Delta^2 f(k)$ определяется как

$$\Delta^2 f(k) = \Delta \Delta f(k) = f(k+2) - 2f(k+1) + f(k) \text{ и т.д. } \mathbb{Z}^-.$$

Аналогом операции интегрирования для решетчатой функции является операция суммирования

$$F(k) = \sum_{i=0}^{k-1} f(i).$$

Очевидна связь $\Delta F(k) = f(k)$, а функция $F(k)$ называется первообразной для решетчатой функции $f(k)$.

Аналогом дифференциальных уравнений непрерывных функций для решетчатых функций являются разностные уравнения, связывающие функцию $f(k)$ с ее разностями $\Delta f(k)$, ..., $\Delta^n f(k)$, или разностные уравнения, связывающие функцию $f(k)$ с ее значениями $f(k+1)$, ..., $f(k+n)$. В дальнейшем будем рассматривать второй вариант разностных уравнений.

Линейные импульсные системы описываются линейными разностными уравнениями следующего вида:

$$a_0 y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \dots + a_n y(k) = b_0 v(k+m) + \dots + b_m v(k), \quad (1.6)$$

Аналогом преобразования Лапласа для решетчатых функций является дискретное преобразование Лапласа или Z-преобразование, определяемое соотношениями

$$F(z) = Z \{ f(k) \} = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) z^{-k},$$

$$f(k) = Z^{-1} \{ F^*(z) \} = \frac{1}{2\pi j} \oint F^*(z) z^{k-1} dz,$$

Существует однозначная связь между перечисленными функциями и изображениями [6]. Эти соотношения для наиболее употребительных функций приведены в табл.1.1. Z-преобразование получается из последнего столбца при $\varepsilon = 0$.

Таблица 1.1

Непрерывная функция		Решетчатая функция	Z_ε - преобразование для $f(kT + \varepsilon T)$
$f(t)$	$F(s)$		
$1 \mathbb{1}$	$\frac{1}{s}$	$1 \mathbb{Z}^-$	$\frac{z}{z-1}$
t	$\frac{1}{s^2}$	kT	$Tz \left[\frac{\varepsilon}{z-1} + \frac{1}{(z-1)^2} \right]$
$\frac{t^2}{2!}$	$\frac{1}{s^3}$	$\frac{(kT)^2}{2!}$	$\frac{T^2 z}{2!} \left[\frac{\varepsilon^2}{z-1} + \frac{2\varepsilon}{(z-1)^2} + \frac{1}{(z-1)^3} \right]$

$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{s + \alpha}$	$e^{-\alpha kT} = d^k$	$\frac{zd^\varepsilon}{z - d}, d = e^{-\alpha T}$
$1 - e^{-\alpha T}$	$\frac{\alpha}{s(s + \alpha)}$	$1 - e^{-\alpha kT}$	$\frac{z}{z - 1} + \frac{zd^\varepsilon}{z - d}$
$te^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(s + \alpha)^2}$	$kTe^{-\alpha kT}$	$\frac{zd^\varepsilon \varepsilon}{z - d} + \frac{zd^{\varepsilon+1}}{(z - d)^2}$

Описание разомкнутых импульсных систем

Структура разомкнутой импульсной системы приведена на рис. 1.4.

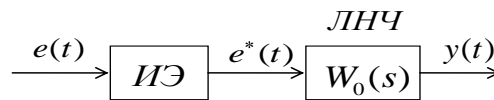


Рис. 1.4

Линейная непрерывная часть системы характеризуется передаточной функцией $W_0(s)$, а импульсный элемент законом модуляции $h_k = e(kT) = e_k$ и постоянными значениями величин τ и T . Заметим, что сигналы $e(t)$ и $y(t)$ непрерывные, а $e^*(t)$

– последовательность прямоугольных импульсов, модулированных по амплитуде.

Применяя к (1.15) Z –преобразование, найдем для данного случая передаточную функцию

$$W(z) = \frac{k_0 d (d^{-\gamma} - 1)}{z - d} \quad d = e^{-\frac{T}{T_1}}, \gamma = \frac{\tau}{T}. \quad (1.16)$$

Для простейших случаев передаточных функций $W_0(s)$ можно по этой методике получить дискретные передаточные функции разомкнутой системы. Ниже приведем таблицу для трех вариантов передаточной функции $W_0(s)$.

Таблица 1.2

$W_0(s)$	$\frac{a}{s}$	$\frac{b}{T_1 s + 1}$	$\frac{c}{s(T_1 s + 1)}$
$W(z)$	$\frac{a\alpha T}{z - 1}$	$\frac{bd(d^{-\gamma} - 1)}{z - d}$	$cT \left[\frac{\gamma}{z - 1} + \frac{d(1 - d^{-\gamma})T_1}{T(z - d)} \right]$

Частотные характеристики импульсных систем

При описании и исследовании импульсных систем наряду с передаточными функциями и разностными уравнениями широкое распространение получили методы на базе частотных характеристик.

Если в формуле (1.7), определяющей прямое Z –преобразование, сделать замену переменной $z = e^{j\omega T}$, то получим соотношение

$$F^*(j\omega) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) e^{-j\omega kT}, \quad (1.23)$$

которое определяет прямое дискретное преобразование Фурье.

Пусть известна передаточная функция разомкнутой системы $W(z)$, тогда после формальной замены $z = e^{j\omega T}$ получим $W(e^{j\omega T}) = W^* j\omega$, где ω – угловая частота.

Функция $W^*(j\omega)$ называется амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ) импульсной системы. Далее знак * будет относиться к частотным характеристикам

импульсных систем. Характеристики без этого знака (например, $W(j\omega)$) будут относиться к непрерывным системам.

$A^* \omega = |W^*(j\omega)|$ называется амплитудной частотной характеристикой (АЧХ)

системы, а $\varphi^* \omega = \arg W^*(j\omega)$ – фазовой частотной характеристикой системы. Можно также ввести понятия вещественной и мнимой частотных характеристик.

Физический смысл частотных характеристик импульсной системы точно такой же, как и для непрерывной.

Характеристики замкнутых импульсных систем

Рассмотрим базовую структуру импульсной САУ. Пусть найдена передаточная функция разомкнутой импульсной САУ $W(z)$, связывающая Z -изображения выхода y и сигнала ошибки e . Тогда $Y(z) = W(z)E(z)$.

$$\Phi_e(z) = \frac{W(z)}{1+W(z)}, \quad \Phi_e z = \frac{1}{1+W(z)}, \quad (1.35)$$

тогда (1.33), (1.34) запишутся как $Y(z) = \Phi(z)V(z)$, $E(z) = \Phi_e(z)V(z)$.

Функцию $\Phi(z)$ будем называть главной передаточной функцией замкнутой импульсной системы, а $\Phi_e(z)$ – передаточной функцией замкнутой импульсной системы по ошибке.

Итак, зная $W(z)$, нетрудно найти $\Phi(z)$ и $\Phi_e(z)$. Если $W(z)$ есть отношение двух полиномов некоторых степеней относительно z , то $\Phi(z)$ и $\Phi_e(z)$ также будут отношением полиномов. Поэтому в конечном итоге $\Phi(z)$ можно представить в виде

$$\Phi(z) = \frac{Q(z)}{D(z)} = \frac{b_0 z^m + \dots + b_n}{a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (1.36)$$

Используя (1.36) и связь $Y(z) = \Phi(z)V(z)$, нетрудно найти разностное уравнение замкнутой импульсной системы, связывающее вход и выход

$$a_0 y(k+n) + a_1 y(k+n-1) + \dots + a_n y(k) = b_0 v(k+m) + \dots + b_n v(k). \quad (1.37)$$

Кроме этого, введем еще одну важную характеристику системы – характеристическое уравнение замкнутой системы

$$D(z) = a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n = 0, \quad (1.38)$$

которое является алгебраическим уравнением n -ой степени. Полином $D(z)$ называется характеристическим полиномом замкнутой системы.

Следующим классом характеристик импульсной системы являются временные характеристики: весовая функция импульсной системы $\varphi(k)$ и переходная функция импульсной системы $h(k)$, определяемые следующими соотношениями:

$$\varphi(k) = Z^{-1} \Phi(k), \quad h(k) = Z^{-1} \left\{ \frac{z}{z-1} \Phi(k) \right\}.$$

Физический смысл временных характеристик следующий. Если на вход замкнутой системы поступает сигнал в виде δ -функции $v(t) = \delta(t)$, изображение которой $Z v(t) = V(z) = 1$, то изображение выхода будет равно $Y(z) = \Phi(z)V(z) = \Phi(z)$. Таким образом, $y(k) = Z^{-1} \Phi(k) = \varphi(k)$, т.е. $\varphi(k)$ есть реакция системы на сигнал в виде δ -функции. Если же на вход системы поступает сигнал в виде единичного ступенчатого воздействия $v(t) = 1[t]$, изображение которого равно $Z v(k) = Z 1[k] = z/(z-1)$, то изображение выхода будет $Y(z) = \Phi(z) z/(z-1)$, а оригинал $y(k) = Z^{-1} \Phi(z) z/(z-1) = h(k)$. Таким образом, $h(k)$ – это реакция системы на

единичное ступенчатое воздействие. Функции $\varphi(k)$ и $h(k)$ связаны следующим соотношением $\varphi(k) = \Delta h(k)$.

Если для системы известна весовая функция $\varphi(k)$, то при заданном входе $v(k)$ выход определяется следующим образом:

$$y(k) = \sum_{i=0}^{k-1} \varphi(k-i)v(i). \quad (1.40)$$

Выражение (1.40) представляет собой аналог интеграла свертки для импульсных систем.

Процессы в импульсных системах

Под процессом в импульсной САУ будем понимать изменение во времени некоторых координат, характеризующих систему. Чаще всего исследуется поведение системы по отношению к выходной координате y или по отношению к сигналу ошибки. Будем рассматривать все процессы для дискретных моментов времени kT , т.е. в виде решетчатых функций $y(k)$, $v(k)$ и т.д. Процессы в САУ возникают за счет приложения внешних воздействий (управляющих, возмущений и т.п.), либо за счет изменения значений внутренних координат системы (вариации начальных условий).

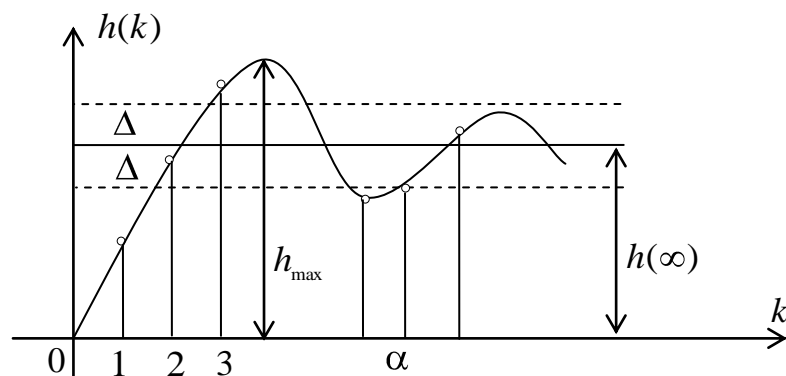
Исходными характеристиками при анализе процессов являются разностное уравнение замкнутой системы, главная передаточная функция системы $\Phi(z)$, либо АФЧХ замкнутой системы $\Phi^*(j\omega)$.

Методы вычисления процессов можно разделить на три категории: аналитические, графоаналитические и методы моделирования с использованием ЭВМ.

С математической точки зрения вычисление процессов – это нахождение решения разностного уравнения (1.37). В теории разностных уравнений доказано, что общее решение уравнения (1.37) всегда представимо в виде суммы двух слагаемых

$$y(k) = y_c(k) + y_g(k), \quad (1.41)$$

Типичный вид функции $h(k)$ приведен на рис. 1.8, на котором представлен график решетчатой функции $h(k)$ и непрерывная функция – огибающая.



Величина Δ – задается, а $h(\infty)$ – установившееся значение функции $h(k)$. Используя график, введем два важнейших показателя качества системы, характеризующие ее динамические свойства: перерегулирование

$$\sigma\% = \frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} 100\%,$$

Рассмотрим аналитический способ вычисления переходной функции замкнутой системы $h(k)$. Пусть задана передаточная функция замкнутой системы в виде $\Phi(z) = Q(z)/D(z)$, где $Q(z)$ и $D(z)$ полиномы степеней m и n , причем $m < n$. Тогда при входном сигнале $v(k) = 1[k]$, изображение которого равно $V(z) = z/(z-1)$, изображение выходного сигнала будет

$$Y(z) = \Phi(z) \cdot \tilde{Y}(z) = \frac{z \cdot Q(z)}{z-1 D(z)} = \frac{z Q(z)}{B(z)},$$

$$h(k) = \Phi(1) + \sum_{i=1}^n c_i z_i^k \quad (1.42)$$

Первое слагаемое в (1.42) характеризует установившуюся (постоянную) составляющую, а второе – переходную.

Недостатком такого подхода является необходимость вычисления корней алгебраических уравнений. Кроме того, после получения аналитического выражения, требуется строить график $h(k)$ для оценки вида переходного процесса и параметров $\sigma\%$ и t_p . Обычно такой подход применим для систем не выше третьего порядка.

Существуют графо-аналитические способы построения переходного процесса $h(k)$, базирующиеся на вещественной частотной характеристике замкнутой системы $P^*(\omega) = \text{Re}\Phi^*(j\omega)$. Эти методы изложены, например, в [4], однако в настоящее время мало применяются.

Наиболее распространенный в настоящее время путь вычисления и построения переходной функции $h(k)$ – это компьютерное моделирование.

В импульсных системах, в отличие от непрерывных, при определенных параметрах системы возможно существование процессов “конечной длительности”, т.е. достигающих установившегося положения за конечный промежуток времени.

Устойчивость процессов в импульсных системах

На устойчивость процессов, протекающих в импульсной системе, или на устойчивость импульсной системы, влияет только поведение свободной составляющей. Дадим определения устойчивости, аналогичные определениям для непрерывных систем [1].

Если с течением времени при $k \rightarrow \infty$ свободная составляющая $y_c(k)$ затухает и стремится к нулю, т.е. $\lim_{k \rightarrow \infty} y_c(k) = 0$, то система будет асимптотически устойчивой (далее просто устойчивой).

Если $y_c(k)$ при $k \rightarrow \infty$ неограниченно возрастает, т.е. $\lim_{k \rightarrow \infty} y_c(k) = \infty$, то система будет неустойчивой.

Наконец, если при $k \rightarrow \infty$ $y_c(k)$ не возрастает до бесконечности и не затухает до нуля, то система будет нейтральна или находится на границе устойчивости.

Разработаны специальные критерии устойчивости для импульсных систем, которые являются аналогами соответствующих критериев непрерывных систем. Существуют их две разновидности: алгебраические и частотные.

Рассмотрим для импульсных систем частотный критерий устойчивости Найквиста, аналог критерия Найквиста для непрерывных систем. Для оценки устойчивости импульсной замкнутой системы базовой структуры (рис. 1.3) будем использовать АФЧХ разомкнутой системы $W(j\omega)$. Формулировка критериев Найквиста для импульсных систем аналогична формулировке для непрерывных систем. Итак, критерий Найквиста: замкнутая система будет устойчива, если годограф $W(j\omega)$ при изменении ω от 0 до $\omega_0/2$ не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $(-1, j0)$.

Исследовать устойчивость также можно по логарифмическим характеристикам разомкнутой системы $L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$. Формулировка вышеприведенного критерия Найквиста для логарифмических характеристик разомкнутой системы следующая: замкнутая импульсная система будет устойчивой, если до частоты среза ω_{wc} фазовая характеристика $\varphi(\omega)$ не пересекает ось $\varphi(\omega) = -\pi$, либо пересекает ее четное количество раз. Аналогично непрерывным системам вводятся понятия запасов устойчивости замкнутой импульсной системы по модулю ΔL и по фазе $\Delta\varphi$.

Совокупность параметров, при которых система будет устойчивой, определяет область устойчивости в пространстве исследуемых параметров, а граница этой области будет границей устойчивости.

Точность импульсных систем

Точность замкнутой импульсной системы в дискретные моменты времени kT определяется сигналом ошибки (рассогласования) $e(kT) = v(kT) - y(kT)$, который характеризует текущую ошибку. Для оценки точности более удобно ввести, как это сделано для непрерывных систем, понятие установившейся ошибки e_∞ , которая определяется для достаточно больших моментов времени k после затухания переходной (свободной) составляющей процессов и в отличие от текущей ошибки часто является числом.

Обычно оценивается точность импульсной системы на два вида воздействий: полиномиального $v(k) = v_0 + v_1 k + v_2 k^2 + \dots + v_r k^r$ и гармонического $v(k) = A \sin \Omega k T$.

Итак, можно сделать вывод, который является общим для импульсных систем: точность системы тем выше (ошибки тем меньше), чем выше порядок астатизма системы и больше величина $W_1(0)$. Так как $W_1(0)$ прямо пропорциональна коэффициенту усиления k_0 линейной, непрерывной части системы $W_0(s)$, то увеличение k_0 будет приводить к повышению точности импульсной системы.

Так же как и для непрерывных систем, для замкнутой импульсной системы можно ввести понятие полосы пропускания: это диапазон частот от 0 до ω_n , в котором ошибка воспроизведения гармонического сигнала Δ_y не превышает заданной величины Δ , т.е. $|\Delta_y| \leq \Delta$.

Таким образом, на точность воспроизведения гармонического сигнала влияет порядок астатизма и коэффициент усиления k_0 непрерывной части системы, входящей в $W_1(0)$.

Оценки качества импульсных систем

Так же как и для непрерывных систем, для импульсных САУ существуют различные оценки качественных показателей.

Динамические показатели системы можно оценить по корням характеристического уравнения замкнутой системы $D(z) = 0$ (1.38). Качественные показатели динамических свойств линейной импульсной системы в основном определяются характером поведения свободной составляющей $y_c(k)$ общего решения (1.41) или, что тоже самое, переходной составляющей, которая является вторым слагаемым переходной функции $h(k)$ в (1.42). В случае различных корней z_i характеристического уравнения (1.38), свободная (переходная) составляющая имеет вид (1.45), а при наличии одного кратного корня z_1 кратности r , и остальных простых корней z_{r+1}, \dots, z_n будет

$$y_c(k) = c_1 z_1^k + c_2 k z_1^k + \dots + c_r k^{r-1} z_1^k + c_{r+1} z_{r+1}^k + \dots + c_n z_n^k.$$

В теории линейных импульсных систем принято вводить корневые оценки относительно корней s_i характеристического уравнения $D(s) = 0$,

Степенью устойчивости η будем называть минимальную величину модуля вещественной части корня характеристического уравнения $D(s) = 0$ замкнутой системы

$$\eta = \min_i |a_i| = \min_i \frac{1}{T} \left| \ln \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \right|. \quad (1.62)$$

Второй корневой оценкой является степень колебательности (колебательность системы) μ , определяемая как

$$\mu = \max_i \left| \frac{b_i}{a_i} \right| = \max_i \frac{|\varphi_i|}{\left| \ln \sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2} \right|}. \quad (1.64)$$

Величина μ характеризует склонность системы к колебаниям: чем больше μ , тем переходные процессы становятся более колебательными.

Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ

Сформулирован аналог известной теоремы Котельникова: если спектр частот входного воздействия ограничен и лежит в диапазоне частот $-\omega_n < \omega < \omega_n$, то свойство системы с АИМ, у которой $\omega_0 > 2\omega_n$ тождественны свойствам эквивалентной непрерывной системы с

$$\text{АФЧХ } \frac{1}{T} W(j\omega).$$

Частотные характеристики входного сигнала $V(j\omega)$ и системы $W(j\omega)$ на практике реально не ограничены по частоте величинами ω_c и ω_n , и можно говорить лишь об их малости при $\omega > \omega_c$ и $\omega > \omega_n$. Поэтому на практике условие сведения системы с АИМ к соответствующей непрерывной системе обычно ужесточают и требуют, чтобы

$$\omega_0 \geq 10\omega_n, \quad (1.71)$$

где ω_n – частота, характеризующая полосу пропускания ЭЛНЧ.

Для проверки выполнения (1.71) следует построить $|W(j\omega)|$ и найти ω_n . Иногда вместо (1.71) легче воспользоваться другой более простой рекомендацией [6]:

$$T_{\max} \geq 10T, \quad (1.72)$$

где T_{\max} – максимальная постоянная времени передаточной функции $W_0(s)$.

Условие устойчивости для такой системы

$$T \leq 2T_1 \frac{\pi - \arctg \sqrt{k_0^2 - 1}}{\sqrt{k_0^2 - 1}}.$$

Здесь опять имеем ограничения на коэффициент усиления k_0 из условий устойчивости, как и в исходной импульсной системе.

Наконец, замена импульсной системы непрерывной с передаточной функцией (1.74) приводит нас в данном случае к дифференциально-разностному уравнению второго порядка

$$y''(t) + \frac{1}{T_1} y'(t) + \frac{k'}{T_1} y(t) - \frac{k'}{T_1} y(t-T) = \frac{k'}{T_1} v(t) - \frac{k'}{T_1} v(t-T), \quad k' = \frac{k_0}{T}.$$

Элементы синтеза импульсных систем

Как известно, под синтезом любой САУ понимают создание и построение системы, удовлетворяющей заданным требованиям. Частным случаем синтеза является оптимальный, когда наряду с обеспечением заданных требований необходимо минимизировать (максимизировать) некоторые показатели системы. Оптимальные методы синтеза в данном разделе рассматриваться не будут.

Основные этапы синтеза САУ следующие:

1. Выбор отдельных функционально необходимых элементов системы и исходной структуры системы. На этом этапе формируется исходная структура, включающая объект управления, исполнительное устройство, усилительно-преобразовательные устройства, датчики и т.п. Желательно уже здесь учесть некоторые требования к показателям создаваемой системы. Определяют математические модели отдельных элементов и получают исходную структуру системы рис.1.3 с передаточной функцией $W(s) = W_\phi(s) W_0(s)$.

2. Анализ полученной системы на соответствие ее заданным требованиям. Если они не удовлетворяются, то возникает задача изменения параметров, структуры или отдельных элементов до получения требуемых показателей.

3. Придание системе нужных свойств – этап коррекции системы, которая осуществляется путем введения в систему специальных корректирующих устройств.

4. Последний этап – проверочный. Так как большинство методов синтеза являются приближенными, то для синтезированной системы определяются все необходимые показатели на соответствие их заданным требованиям.

Коснемся третьего, наиболее важного этапа синтеза. Характеристиками исходной нескорректированной системы являются, $W_{\phi}(s)$, $W_0(s)$ или, $W(z) = Z W_{\phi}(s) W_0(s)$. Требуется создать систему, передаточная функция прямой цепи которой была бы требуемой (желаемой) $W_{0,ж}(z)$. Реализация этого возможна двумя путями.

Первый путь заключается в изменении $W_0(s)$ введением в прямую цепь после формирующего устройства корректирующих устройств обычного непрерывного типа: последовательных, параллельно-встречных или параллельных с некоторыми передаточными функциями $W_k(s)$, так чтобы передаточная функция прямой цепи стала $W_{0,ж}(s)$ и $W_{ж}(z) = Z W_{\phi}(s) W_{0,ж}(s)$. Такой подход носит название непрерывной коррекции.

Второй путь заключается во введении в прямую цепь (обычно) до ИИЭ звена с импульсной передаточной функцией $W_k(z)$, так что $W_{ж}(z) = W_k(z) W(z)$. Этот подход носит название дискретной или импульсной коррекции.

Уравнения состояния линейных импульсных систем

Так же как и непрерывные системы [1], импульсные можно описывать с помощью векторно-матричных уравнений, называемых уравнениями состояния.

Уравнениями состояния линейной импульсной системы называются уравнения вида

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= Ax^k + Bv^k, \\ y^k &= Cx^k, \end{aligned} \quad (1.80)$$

где $x = \text{col } x_1, \dots, x_n$ – вектор состояния системы, $v = v_1, \dots, v_m$ – вектор входа системы, $y = [y_1, \dots, y_p]$ – вектор выхода системы, A – основная матрица системы размерности $n \times n$, B – матрица входа системы размерности $n \times m$, C – матрица выхода системы размерности $p \times n$, $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время.

Первое уравнение в (1.80) – уравнение входа системы, второе – уравнение выхода. Уравнениями (1.80) описываются как многомерные системы, когда v , y – вектора, так и одномерные системы, когда v , y – скалярные величины.

В случае кратных корней s_i матрица A_0 будет в форме Жордана.

Получим уравнения состояния замкнутой линейной импульсной системы рис. 1.3. С учетом уравнения замыкания $e^k = y^k - v^k$ из (1.86) получим уравнения состояния замкнутой импульсной системы

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= A - BC \ x^k + Bv^k, \\ y^k &= Cx^k, \end{aligned} \quad (1.89)$$

где $A - BC$ – основная матрица замкнутой системы.

Возможно также получение уравнений состояния импульсной системы с использованием в качестве исходных передаточной функций разомкнутой $W(z)$ или замкнутой $\Phi(z)$ импульсной системы, либо соответствующих разностных уравнений [5].

Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний

Если в первом уравнении (1.80), которое является неоднородным разностным уравнением считать матрицу B нулевой, то получим однородное разностное уравнение

$$x^{k+1} = Ax^k, \quad (1.91)$$

Матрица $\Phi^k = A^k$ носит название переходной матрицы состояния линейной импульсной системы.

Матрица $W(z) = C(zE - A)^{-1}B$ размерности $p \times m$ носит название передаточной матрицы (матрицы передаточных функций) импульсной системы. Ее элементы $W_{ij}(z)$ являются обычными скалярными функциями, связывающими j вход v_j с i выходом y_i . Если y^k, v^k – скалярные величины, то $W(z)$ – обычная скалярная передаточная функция.

Матрицу $W(k) = C\Phi^{k-1}B$ будем называть весовой матрицей. Очевидна связь

$$W(z) = Z W(k), W(k) = Z^{-1} W(z).$$

Отметим один из способов определения переходной матрицы состояния Φ^k с помощью Z -преобразования

$$\Phi^k = Z^{-1} (zE - A)^{-1} z.$$

Введем еще одну из важнейших характеристик импульсной системы, заданной уравнениями состояния (1.80), – характеристическое уравнение импульсной системы

$$\det(zE - A) = 0, \quad (1.95)$$

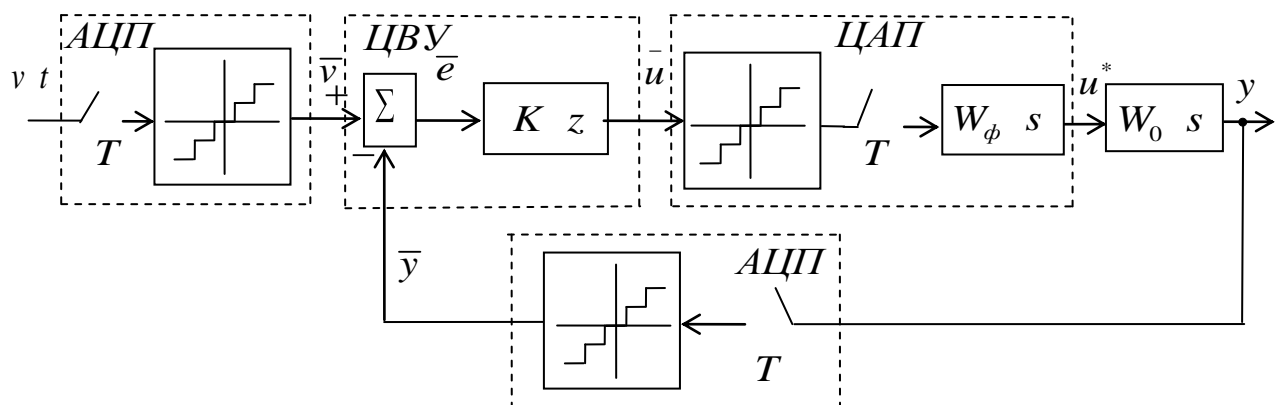
Цифровые системы автоматического управления

Цифровой САУ можно назвать такую, в состав которой включено цифровое вычислительное устройство (ЦВУ) в виде отдельных схем на базе элементов цифровой логики, микропроцессоров, микроконтроллеров и в наиболее сложных случаях в виде специализированных управляющих вычислительных машин (комплексов).

При классификации САУ по виду математических моделей под цифровой САУ будем понимать такую, в которой хотя бы один из сигналов в контуре управления подвергается одновременной дискретизации (квантованию) по уровню и времени. С этой точки зрения цифровая САУ является подклассом дискретных систем.

На ЦВУ возлагаются следующие основные функции: формирование программы управления (для систем стабилизации, позиционирования и программного управления), реализация цифровых алгоритмов управления и реализация дискретной коррекции. Кроме этого ЦВУ можно применять и для выполнения других функций: контроля элементов и состояния всей системы в целом, некоторых сервисных функций (учет времени работы и т.п.).

Цифровая САУ содержит две части: ЦВУ и непрерывную часть, включающую объект управления, исполнительное устройство, усилительно-преобразовательные и корректирующие устройства, датчики и т.п. Будем считать непрерывную часть линейной, описываемой передаточной функцией $W_0(s)$. Тогда базовая структура рассматриваемой системы будет иметь следующий вид:



Исследование цифровых систем автоматического управления

В первом приближении без учета нелинейностей характеристик АЦП и ЦАП и считая запаздывание малым $t_3 \approx 0$, структура цифровой системы сводится к структуре системы с АИМ-1, к которой возможно применение всех изложенных выше методов анализа и синтеза импульсных систем.

Более подробно остановимся на функциях ЦВУ, которыми являются реализация дискретных алгоритмов управления и дискретной коррекции. Будем рассматривать линейные модели, реализуемые ЦВУ в общем случае. Этими моделями являются линейные разностные уравнения

$$\begin{aligned} u_{k+m} + \alpha_1 u_{k+m-1} + \dots + \alpha_n u_k &= \\ = \beta_0 e_{k+p} + \beta_1 e_{k+p-1} + \dots + \beta_p e_k, \end{aligned} \quad (1.96)$$

где переменные u_k , e_k представлены в виде цифровых кодов.

Применяя к (1.96) Z-преобразование, получим

$$U(z) = \frac{\beta_0 z^p + \beta_1 z^{p-1} + \dots + \beta_p}{z^m + \alpha_1 z^{m-1} + \dots + \alpha_n} E(z) = K(z) E(z), \quad (1.97)$$

где $K(z)$ – передаточная функция ЦВУ.

Линейное разностное уравнение (1.96) представляет собой алгоритм работы ЦВУ и может быть записано в виде

$$u_{k+m} = -\alpha_1 u_{k+m-1} - \dots - \alpha_n u_k + \beta_0 e_{k+p} + \dots + \beta_p e_k. \quad (1.98)$$

Рассмотрим несколько возможных алгоритмов управления и найдем для них передаточные функции.

1. Пропорциональный закон (по отклонению) $u(t) = k_1 e(t)$.

В дискретном случае $u_k = k_1 e_k$, $K_1(z) = k_1$. Это наиболее простой алгоритм. При этом ЦВУ выступает в роли элемента сравнения (сумматора), осуществляя операцию вычитания $u_k = k_1 (v_k - y_k)$ в цифровой форме.

2. Дифференциальный закон (по производной от отклонения) $u(t) = k_2 \frac{de(t)}{dt}$. Найдем

дискретный аналог этого закона

$$u(t) = k_2 \lim_{T \rightarrow 0} \frac{e(t) - e(t-kT)}{T} \approx k_2 \frac{e(t) - e(t-kT)}{T}.$$

Полагая $t = kT$, получим

$$u_k = \frac{k_2}{T} [e_k - e_{k-1}]. \quad (1.99)$$

Применяя z-преобразование, найдем передаточную функцию

$$K_2(z) = \frac{k_2}{T} \frac{z-1}{z}. \quad (1.100)$$

3. Интегральный закон (по интегралу от отклонения) $u(t) = k_3 \int e(t) dt$. В зависимости от способа вычисления интеграла рассмотрим два варианта дискретных аналогов:
– по методу Эйлера

$$u_k = u_{k-1} + k_3 T e_{k-1}, \quad K_3(z) = \frac{k_3 T z}{z-1}; \quad (1.101)$$

– по методу трапеций

$$u_k = u_{k-1} + \frac{k_3 T}{2} [e_k - e_{k-1}], \quad K_3(z) = \frac{k_3 T}{2} \frac{z+1}{z-1}. \quad (1.102)$$

Комбинируя рассмотренные законы 1, 2, 3, можно получить пропорционально-интегральный закон $K(z) = K_1(z) + K_3(z)$, пропорционально-дифференциальный закон

$K(z) = K_1(z) + K_2(z)$ и пропорционально-интегрально-дифференциальный

$K(z) = K_1(z) + K_2(z) + K_3(z)$.

Кроме реализации законов управления в дискретной форме ЦВУ используется также для реализации цифровой коррекции, т.е. синтеза передаточной функции $K z$, обеспечивающей цифровой системе заданные свойства.

Синтез цифровых САУ при их сведении к структуре рис. 1.11 может производиться тремя способами: при заданной $K z$ введением непрерывной коррекции, т.е. изменением передаточной функции $W_0 s$; при заданной $W_0 s$ отыскание дискретной коррекции $K z$; применением обоих подходов. О проблемах, связанных с этими путями коррекции, говорилось при рассмотрении линейных импульсных систем.

4.3. Лабораторные работы

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование лабораторной работы</i>	<i>Объём (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Идентификация объектов управления (1 способ)	3	Разбор конкретных ситуаций (4 час.).
2	1.	Идентификация объектов управления (2 способ)	2	-
3	4.	Преобразование структурных схем систем автоматики	2	Разбор конкретных ситуаций (4 час.).
4	3.	Преобразование Лапласа	3	-
5	3.	Устойчивость систем автоматики	7	-
6	5.	Графоаналитический метод определения параметров автоколебательного режима	6	-
7	5.	Аналитический метод определения параметров автоколебательного режима	6	-
8	5.	Частотный критерий абсолютной устойчивости	6	-
ИТОГО			35	8

4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Наименование тем практических занятий</i>	<i>Объём (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивно й, активной, инновационно й формах, (час.)</i>
1	1.	Моделирование динамических характеристик САУ с помощью программного обеспечения Matlab	5	Работа в малых группах (4час.)
2	4.	Моделирование разомкнутых и замкнутых САУ с помощью программного обеспечения Matlab	2	Работа в малых группах (4час.)
3	3.	Моделирование частотных характеристик САУ	10	Работа в малых группах (2час.)

4	5.	Построение исходных ЛАЧХ и ЛФЧХ САР	6	-
5	5.	Синтез последовательно включенных корректирующих устройств	6	-
6	5.	Анализ результатов синтеза САР	6	-
ИТОГО			35	10

4.5. Контрольные мероприятия: курсовая работа (5 семестр)

Цель: приобретение теоретических знаний и навыков самостоятельного решения расчетно-исследовательских задач анализа динамических и частотных свойств линейных САР, входящих в состав современных автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает выполнение следующих разделов:

1. Выполнение структурных преобразований линейной САР
2. Построение частотных характеристик линейной САР.
3. Исследование устойчивости и оценка показателей качества линейной САР.

Основная тематика: Исследование свойств линейных САР.

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 20-25 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

Контрольная работа (6 семестр)

Цель: закрепление теоретических знаний и приобретение навыков самостоятельного решения расчетно-исследовательских задач синтеза линейной САР, исследование и анализ основных свойств нелинейных САР.

Структура: Каждое индивидуальное задание предполагает выполнение следующих задач:

1. Исследование статических свойств и построение логарифмических частотных характеристик линейной САР.
2. Оценка запасов устойчивости.
3. Коррекция линейной САР, Построение переходного процесса и анализ основных показателей качества скорректированной линейной САР.
4. Включение в структуру системы звена с нелинейной статической характеристикой и исследование периодических режимов с помощью метода гармонического баланса. Определение абсолютной устойчивости скорректированной нелинейной САР.

Основная тематика: Синтез линейной САР и исследование нелинейной САР.

Рекомендуемый объем: Пояснительная записка объемом 5-10 страниц должна содержать титульный лист, задание, описание выполняемых действий по каждому разделу и полученные результаты.

Выдача задания, прием контрольной работы и защита КР проводится в соответствии с календарным учебным графиком.

Оценка	Критерии оценки курсовой работы, контрольной работы
отлично	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических

	ошибок; уверенное владение материалом при устной защите.
хорошо	соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, переходными характеристиками; самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; хорошее владение материалом при устной защите.
удовлетворительно	не полное соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неточность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; частичная самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; наличие некоторых стилистических ошибок; не уверенное владение материалом при устной защите.
неудовлетворительно	несоответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неправильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; отсутствие самостоятельности выполнения; оформление работы и списка использованных источников не соответствует требованиям; грамотность, наличие стилистических ошибок; отсутствие владения материалом при устной защите.

5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

<i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Компетенции</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенции</i>	Σ <i>комп.</i>	<i>t_{ср}, час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
			<i>ОПК</i>				
			2				
1	2	3	4	5	6	7	
1.Объекты управления		26	+	1	26	Лк,ПЗ,ЛР, СРС	Экзамен, КР
2.Классификация систем автоматического управления (САУ)		18	+	1	18	Лк, СРС	Экзамен, КР
3.Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ		38	+	1	38	Лк,ПЗ,ЛР, СРС	Экзамен, КР
4.Структурные схемы систем автоматического управления		26	+	1	26	Лк,ПЗ,ЛР, СРС	Экзамен, КР
5.Дискретные системы автоматического управления		144	+	1	144	Лк,ПЗ,ЛР, СРС	Экзамен, кр
<i>всего часов</i>		252	252	1	252		

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с. (с. 30-34, 38-44, 74-78, 92-108).

7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№	<i>Наименование издания</i>	<i>Вид занятия (Лк, ЛР, ПЗ, КР)</i>	<i>Количество экземпляров в библиотеке, шт.</i>	<i>Обеспеченность, (экз./ чел.)</i>
1	2	3	4	5
Основная литература				
1.	Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.	Лк, ЛР, ПЗ, КР, кр	26	1
2.	Малафеев С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления : учебник для студ.вузов / С.И.Малафеев. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - 384с.	Лк	15	1
Дополнительная литература				
3.	Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем: Методические указания к выполнению курсовой работы / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГУ, 2009. – 34 с.	КР, ПЗ, ЛР	56	1
4.	Григорьева, Т. А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.	ЛР	48	1
5.	Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.	кр	69	1

8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Электронный каталог библиотеки БрГУ
http://irbis.brstu.ru/CGI/irbis64r_15/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=F&I21DBN=BOOK&P21DBN=BOOK&S21CNR=&Z21ID=.
2. Электронная библиотека БрГУ
<http://ecat.brstu.ru/catalog> .
3. Электронно-библиотечная система «Университетская библиотека online» <http://biblioclub.ru> .
4. Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань»
<http://e.lanbook.com> .

5. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам" <http://window.edu.ru> .
6. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://elibrary.ru> .
7. Университетская информационная система РОССИЯ (УИС РОССИЯ) <https://uisrussia.msu.ru/> .
8. Национальная электронная библиотека НЭБ <http://xn--90ax2c.xn--p1ai/how-to-search/>.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению лабораторных работ

Лабораторная работа №1 Идентификация объектов управления (1 способ)

Цель работы.

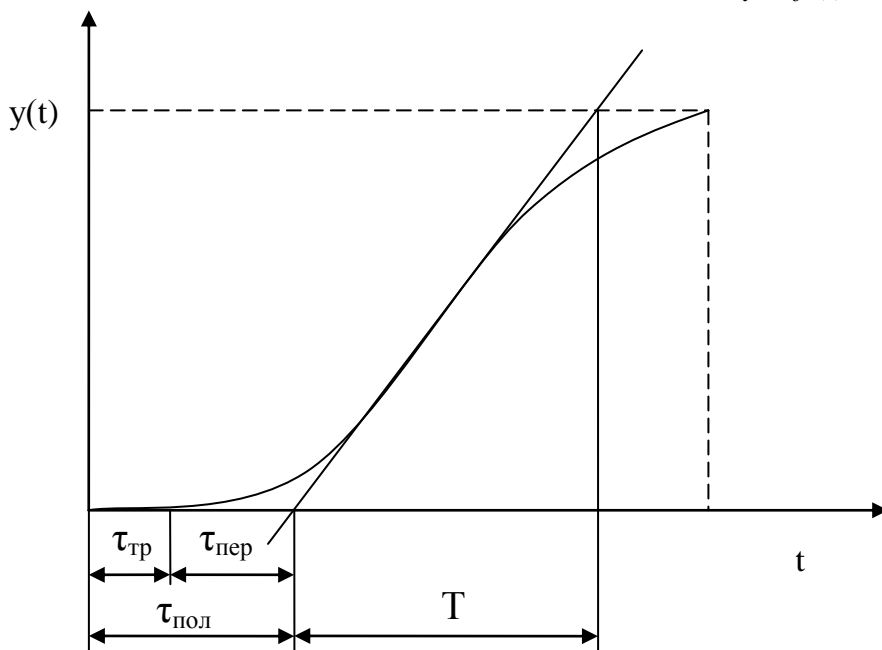
Определить параметры передаточной функции объекта: (k, T, τ)

Вид занятия в интерактивной, активной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример объекта управления.

Задание: в соответствии с вариантом, выданным преподавателем, выполнить все пункты, прописанные в ходе работы

Ход работы.

1. Построить экспериментальную характеристику $y = f(t)$.



2. Определить коэффициент усиления.

$$K = \frac{y_{уст}(t)}{x_{вх}(t)}$$

где;

$y_{уст}(t)$ – установившаяся величина параметра,

$x_{вх}(t)$ - входное воздействие $1(t)$.

Транспортное запаздывание $\tau_{тр}$,

Переходное запаздывание $\tau_{пер}$,

Полное запаздывание $\tau_{пол} = \tau_{тр} + \tau_{пер}$.

Постоянную времени T (по графику)

3. Заполнить таблицу 1.

Таблица 1

t	0					
$y_{(t)уѐнi}$	0					
$y_{(t)расч}$	0					
Δ	0					

4. Вычислить передаточную функцию, подставив найденные значения k, T, τ :

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau p}}{T_p + 1}$$

5. Определить координаты расчетной характеристики по формуле: $y_{расч}(t) = K \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$

6. Определить ошибку идентификации: $\Delta = \frac{h_{(t)эксп} - h_{(t)расч}}{h_{(t)уѐнi}} \cdot 100$

7. Сделать вывод о точности метода, определив $|\Delta_{max}|$.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы идентификации систем управления.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Григорьева, Т. А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.

Вопросы к защите

1. Идентификация объекта.
2. Переходная характеристика .
3. Единичное ступенчатое воздействие.
4. Параметры передаточной функции.

Лабораторная работа №2

Идентификация объектов управления (2 способ)

Цель работы.

Определить параметры передаточной функции объекта: (k, T, τ)

Вид занятия в интерактивной, активной форме: выполнить задание и разобрать конкретный пример объекта управления.

Задание: в соответствии с вариантом, выданным преподавателем, выполнить все пункты, прописанные в ходе работы

Ход работы.

1. Построить экспериментальную характеристику $y = f(t)$.
2. Найти произведение $0,63 \cdot y_{уѐнi}(t)$.

3. Отложить это значение на оси координат.
4. Отметить точку А.
5. Определить Т по формуле: $T = A - \tau_{полн}$
6. Значения К и $\tau_{полн}$ взять из 1 способа и подставить в передаточную функцию.

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau p}}{T_p + 1}$$

7. Построение расчетной характеристики. Пользуясь формулой: $y_{расч}(t) = K \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$

8. Заполнить таблицу.

t	0										
$y_{(t)эксп}$	0										
$y_{(t)расч}$	0										
Δ	0										

9. Определить ошибку идентификации: $\Delta = \frac{h_{(t)эксп} - h_{(t)расч}}{h_{(t)уст}} \cdot 100$

10. Сделать вывод о точности метода, определив $|\Delta \max|$.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы идентификации систем управления.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Григорьева, Т. А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.

Вопросы к защите

1. Постоянная времени
2. Передаточная функция .
3. Параметры передаточной функции.

Лабораторная работа № 3

Преобразование структурных схем систем автоматики

Цель работы: Преобразовать структурную схему (вариант выдает преподаватель).

Вид занятия в интерактивной, активной форме: выполнить задание и разобрать конкретный

пример системы автоматического управления.

Задание: в соответствии с вариантом, выданным преподавателем, преобразовать структурную схему.

Варианты выполнения работ выдает преподаватель..

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить правила преобразования структурных схем.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Григорьева, Т.А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.

Вопросы к защите

1. Передаточная функция последовательно соединенных звеньев.
2. Передаточная функция параллельно соединенных звеньев.
3. Передаточная функция при встречном параллельном соединении звеньев.

Лабораторная работа № 4

Преобразование Лапласа

Цель работы: решить дифференциальное уравнение (из лаб. раб. №2) операторным способом (с помощью преобразования Лапласа).

Задание: дифференциальное уравнение, полученное в лабораторной работе №3 решить операторным способом.

Ход работы.

1. Получить дифференциальное уравнение из передаточной функции:

$$W(p)_{ia} = \frac{k}{Tp+1} \quad (1)$$

$$x_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(p) = x_{\dot{a}\dot{a}}(p) * W(p)$$

$$x_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(p) = \frac{\hat{e}}{Tp+1} * x_{\dot{a}\dot{a}}(p)$$

$$Tpx_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(p) + x_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(p) = k x_{\dot{a}\dot{a}}(p) \quad (2)$$

$$T \frac{dx_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(t)}{dt} + x_{\dot{a}\dot{a}\dot{a}}(t) = k x_{\dot{a}\dot{a}}(t)$$

То есть передаточная функция (1) соответствует дифференциальному уравнению (2)

2. Решить дифференциальное уравнение операторным способом

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{ex}}$$

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p)x_{\text{ex}}(p)$$

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{kx_{\text{ex}}(p)}{Tp+1}$$

$$Tpx_{\text{вых}}(p) + x_{\text{вых}}(p) = kx_{\text{вх}}$$

По таблицам Лапласа определяем

$$x_{\text{вх}}(p) \Rightarrow x_{0\text{вх}} / p$$

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{kx_{0\text{вх}}}{p(Tp + 1)}$$

$$x_{\text{вых}}(p)(Tp + 1) = kx_{\text{вх}}(p)$$

Из таблиц Лапласа: $x_{\text{вх}}(t) = 1(t)$ $x(p) = \frac{1}{p}$

$$x_{\text{вых}}(p) = \frac{k}{Tp(p + \frac{1}{T})}$$

Из таблиц Лапласа: $\frac{1}{(p + \alpha)p} \Rightarrow \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})$

$$x_{\text{вых}}(t) = \frac{kx_{\text{вх}}}{T} xT(1 - e^{-t/T}) = kx_{\text{вх}}(1 - e^{-t/T})$$

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Предусмотрены вариантом студента.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Григорьева, Т. А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.

Вопросы к защите

1. Сущность преобразования Лапласа.
2. Прямое преобразования Лапласа.
3. Обратное преобразования Лапласа.

Лабораторная работа № 5

Устойчивость систем автоматики

Цель работы: приобрести навыки и умение по определению устойчивости разомкнутых и замкнутых систем с использованием различных критериев устойчивости.

Варианты индивидуальных заданий совпадают с вариантами лабораторной работы №2.

Задание:

1. Найти передаточные функции разомкнутой и замкнутой системы.
2. Провести исследование на устойчивость разомкнутой и замкнутой системы по критерию Гурвица.
3. Сделать вывод об устойчивости системы.

Ход работы.

Критерий устойчивости Гурвица используется как для разомкнутых, так и для замкнутых систем.

При использовании критерия из коэффициентов характеристического уравнения составляют матрицу

$$\begin{array}{cccccc} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{array}$$

По диагонали таблицы от левого верхнего угла выписывают по порядку все коэффициенты, начиная с a_1 и заканчивая a_n . Затем каждый столбец таблицы дополняют так, чтобы вверх от диагонали индексы коэффициентов увеличивались, а вниз - уменьшались. В случае отсутствия в уравнении какого-либо коэффициента и вместо коэффициентов с индексом меньше 0 и больше n пишут нуль.

Критерий формулируется так: чтобы рассматриваемая система была устойчивой, необходимо и достаточно при $a_0 > 0$ иметь положительными все диагональные определители, получаемые из матрицы, т.е.

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0; \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0;$$

$$\Delta_{n-1} > 0; \Delta_n = a_n \Delta_{n-1} > 0.$$

Если $a_n > 0$, то последнее неравенство в (5.6) удовлетворяется при $\Delta_{n-1} > 0$.

Система находится на границе устойчивости, если $\Delta_n = 0$ и все предыдущие определители положительны. Это условие распадается на два: $a_n = 0$ (апериодическая граница устойчивости) и $\Delta_{n-1} = 0$ (колебательная граница устойчивости).

Для устойчивости систем первого и второго порядков достаточно, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения были положительными.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить критерии устойчивости систем управления.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Григорьева, Т. А. Управление техническими системами: методические указания к выполнению лабораторных работ / Т. А. Григорьева, Д. С. Семенов. - Братск: БрГУ, 2013. - 27с.

Вопросы к защите

1. Устойчивость системы.
2. Критерии устойчивости.
3. Устойчивая, неустойчивая системы.

4. Система на границе устойчивости.
5. Устойчивость системы по критерию Гурвица.

Лабораторная работа №6

Графоаналитический метод определения параметров автоколебательного режима

Цель работы: выполнить анализ нелинейной скорректированной САР с помощью графоаналитического метода гармонического баланса.

Варианты индивидуальных заданий совпадают с вариантами практической работы №5.

Задание:

1. Построить годографы линейной и нелинейной гармоник звена.
2. Определить наличие автоколебательного режима и его устойчивость.

Ход работы.

Получить вещественную и мнимую составляющие из уравнения гармонического баланса и построить их.

Уравнение гармонического баланса:

$$1 + W_n p, A \cdot W_n p = 0$$

$$p \rightarrow j\omega$$

$$1 + W_H(j\omega, A)W_n(j\omega) = 0$$

$$W_n j\omega = -\frac{1}{W_H(j\omega, A)}$$

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить способы построения годографов на комплексной плоскости.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

Вопросы к защите

1. Гармоническая линеаризация.
2. Коэффициенты гармонической линеаризации.
3. методы определения устойчивости.
4. Недостатки метода Гольдфарба.

Лабораторная работа №7

Аналитический метод определения параметров автоколебательного режима

Цель работы: выполнить анализ нелинейной скорректированной САР с помощью аналитического метода.

Варианты индивидуальных заданий совпадают с вариантами практической работы №5.

Задание:

1. Определить наличие автоколебательного режима по параметрам амплитуды и частоты.
2. Определить устойчивость колебательного режима с помощью годографа Михайлова.

Ход работы.

Построить годограф Михайлова.

$$1 + W_{\text{л}} p \cdot W_{\text{н}} p, A = 0$$

Задать приращение.

Определить устойчивость.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта
2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы оценки устойчивости автоколебательного режима.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

2. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

Вопросы к защите

1. Условия автоколебательного режима.
2. Параметры устойчивости автоколебательного режима.
3. Годограф Михайлова.
4. Преимущества метода Е.П. Попова

Лабораторная работа №8

Частотный критерий абсолютной устойчивости

Цель работы: выполнить анализ абсолютной устойчивости нелинейной скорректированной САР с помощью критерия В.М. Попова.

Варианты индивидуальных заданий совпадают с вариантами практической работы №5.

Задание:

1. Определить наличие абсолютной устойчивости САР.

Ход работы.

Получить вещественную и мнимую составляющие из уравнения гармонического баланса и построить изменённую АФЧХ.

$$W_{\text{л}}^* j\omega = Re_{\text{л}}^* + jIm_{\text{л}}^*(\omega)$$

$$Re_{\text{л}}^* = Re_{\text{л}}(\omega)$$

$$Im_{\text{л}}^* \omega = \omega * Im_{\text{л}}(\omega)$$

Построить прямую Попова на том же графике.

Определить устойчивость САР.

Форма отчетности:

Отчет набирается на компьютере и сдается в печатном виде. В отчете должны присутствовать:

1. Номер варианта

2. Цель работы
3. Задание
4. Поэтапное выполнение всех заданий варианта
5. Вывод.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы оценки устойчивости автоколебательного режима.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к лабораторной работе

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

Вопросы к защите

1. Абсолютная устойчивость.
2. Условие абсолютной устойчивости.
3. Прямая Попова.
4. Критерий абсолютной устойчивости В.М. Попова.

Практическое занятие № 1.

Моделирование динамических характеристик САУ с помощью программного обеспечения Matlab

Цель работы:

Построение переходных и весовых характеристик с помощью программного обеспечения Matlab.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

1. Для варианта, выданного преподавателем на лабораторной работе, смоделировать переходную и весовую характеристики в среде Matlab.
2. Меняя коэффициент усиления, постоянную времени, запаздывание в системе, построить графики переходных и весовых характеристик в среде Matlab.
3. Сделать вывод о влиянии параметров передаточной функции на переходную и весовую характеристики.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить программное обеспечение Matlab, методы построения переходных и весовых характеристик.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в первом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем: Методические указания к выполнению курсовой работы / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГУ, 2009. – 34 с.

Практическое занятие № 2

Моделирование разомкнутых и замкнутых САУ с помощью программного обеспечения Matlab

Цель работы:

Построение разомкнутых и замкнутых систем и их переходных характеристик с помощью программного обеспечения Matlab.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

1. Для варианта, выданного преподавателем на лабораторной работе, смоделировать переходные характеристики разомкнутой и замкнутой систем автоматического управления в среде Matlab.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить программное обеспечение Matlab, структуры построения разомкнутых и замкнутых систем.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в четвертом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем: Методические указания к выполнению курсовой работы / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГУ, 2009. – 34 с.

Практическое занятие № 3

Моделирование частотных характеристик САУ

Цель работы:

Построение частотных характеристик.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

Для варианта, выданного преподавателем на лабораторной работе, смоделировать частотные характеристики.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы построения частотных характеристик.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в третьем разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем: Методические указания к выполнению курсовой работы / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГУ, 2009. – 34 с.

Практическое занятие № 4

Построение исходных ЛАЧХ и ЛФЧХ САУ

Цель работы:

Построить ЛАЧХ САУ в РС определить запас устойчивости ЗС. Приблизительно оценить длительность переходного процесса в замкнутой САУ.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

Для варианта, выданного преподавателем на практической работе, оценить длительность переходного процесса.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы построения частотных характеристик.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

Практическое занятие № 5

Синтез последовательно включенных корректирующих устройств

Цель работы:

Построить желаемую ЛАЧХ ЗС. Построить ЛАЧХ корректирующего звена.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

Для варианта, выданного преподавателем на практической работе, смоделировать ЛАЧХ корректирующего звена.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы построения корректирующих звеньев.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

1. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

Практическое занятие № 6

Анализ результатов синтеза САР

Цель работы:

С помощью справочной литературы выбрать структуру корректирующего устройства и определить его параметры. Выполнить анализ результатов синтеза САР.

Вид занятия в интерактивной, активной форме: В группе из 2-3 человек выполнить задание, выданное преподавателем.

Задание:

Для варианта, выданного преподавателем на практической работе, произвести анализ результатов синтеза САР.

Задания для самостоятельной работы:

Изучить методы анализа результатов синтеза.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическим занятиям:

Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в пятом разделе данной дисциплины.

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

2. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

9.2. Методические указания по выполнению курсовой работы, контрольной работы

Порядок выполнения курсовой работы.

Для выполнения курсовой работы студентам преподаватель выдает вариант работы.

Готовая курсовая работа сдается преподавателю на проверку за 2 недели до начала экзаменационной сессии. Результатом проверки могут быть:

- «допущен к защите»;
- «допущен к защите после доработки по замечаниям»;
- «не допущен к защите».

Если после проверки курсовая работа рекомендована преподавателем к защите, то следует подготовиться к ее защите.

В случае выявления при проверке ошибок и неточностей, студент допускается к защите курсовой работы только после их устранения.

В последнем случае требуется переделать курсовую работу в соответствии с предъявляемыми требованиями. Если курсовая работа не рекомендована преподавателем к защите, то после переработки работа вновь сдается на проверку.

Без защиты курсовой работы студент не допускается к сдаче экзамена по дисциплине.

Защита курсовой работы производится в часы, определенные в соответствии с расписанием занятий.

На защите курсовой работы студент в краткой форме излагает основные результаты, полученные в ходе ее выполнения и практическую значимость выполненной работы, отвечает на возникшие в ходе защиты вопросы.

Рекомендации по выполнению курсовой работы (5 семестр).

Задание: провести анализ динамических и частотных свойств линейных САР, входящих в состав современных автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Исходные данные: структурная схема САР.

Во введении необходимо описать автоматизацию технологического процесса.

Основная часть содержит этапы: структурные преобразования линейной САР и получение ее передаточных функций, составление аналитических выражений и построение частотных характеристик линейной САР, исследование устойчивости и оценка показателей качества линейной САР.

В заключении необходимо провести анализ выполненной работы. Сделать выводы по работе.

Список литературы:

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

2. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Анализ линейных систем:

Методические указания к выполнению курсовой работы / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГУ, 2009. – 34 с.

Порядок выполнения контрольной работы.

Для выполнения контрольной работы студентам преподаватель выдает вариант работы.

Готовая контрольная работа сдается преподавателю на проверку за 2 недели до начала экзаменационной сессии. Результатом проверки могут быть:

- «допущен к защите»;
- «допущен к защите после доработки по замечаниям»;
- «не допущен к защите».

Если после проверки контрольная работа рекомендована преподавателем к защите, то следует подготовиться к ее защите.

В случае выявления при проверке ошибок и неточностей, студент допускается к защите контрольной работы только после их устранения.

В последнем случае требуется переделать контрольную работу в соответствии с предъявляемыми требованиями. Если контрольная работа не рекомендована преподавателем к защите, то после переработки работа вновь сдается на проверку.

Без защиты контрольной работы студент не допускается к сдаче экзамена по дисциплине.

Защита контрольной работы производится в часы, определенные в соответствии с расписанием занятий.

На защите контрольной работы студент в краткой форме излагает основные результаты, полученные в ходе ее выполнения и практическую значимость выполненной работы, отвечает на возникшие в ходе защиты вопросы.

Рекомендации по выполнению контрольной работы (6 семестр).

Задание: провести синтез линейных САР и анализ основных свойств нелинейных САР.

Исходные данные: вариант структурной схемы системы автоматического регулирования.

Во введении необходимо описать автоматизацию технологического процесса.

Основная часть содержит этапы: исследование статических свойств и построение логарифмических частотных характеристик линейной САР, оценка запасов устойчивости, коррекция линейной САР, в соответствии с предъявленными к ней требованиями, построение переходного процесса и анализ основных показателей качества скорректированной линейной САР, включение в структуру системы звена с нелинейной статической характеристикой и исследование периодических режимов с помощью метода гармонического баланса, определение абсолютной устойчивости скорректированной нелинейной САР.

В заключении необходимо провести анализ выполненной работы. Сделать выводы по работе.

Список литературы:

Основная литература

1. Коновалов Б. И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б. И. Коновалов, Ю. М. Лебедев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург: Лань, 2010. - 224с.

Дополнительная литература

2. Михайлов Ю.А. Теория автоматического управления. Синтез линейных систем. Исследование нелинейных систем: Методические указания к выполнению курсового проекта / Ю.А. Михайлов. – Братск: БрГТУ, 2004. – 38 с.

10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

- MATLAB Academic new Product Concurrent Licenses
- Simulink Academic new Product Concurrent Licenses
- Microsoft Imagine Premium
- ОС Windows 7 Professional
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level
- Антивирусное программное обеспечение KasperskySecurity

При реализации дисциплины применяются инновационные технологии обучения, активные и интерактивные формы проведения занятий, указанные в разделах 4.3, 4.4.

11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ

<i>Вид занятия</i>	<i>Наименование аудитории</i>	<i>Перечень основного оборудования</i>	<i>№ ЛР или Лк</i>
1	2	3	4
Лк	Лекционная аудитория	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	Лк 1-35
ЛР	Дисплейный класс	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	ЛР 1-8
ПЗ	Дисплейный класс	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	ПЗ 1-6
СР	Читальный зал № 3	Оборудование 15-CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	
КР	Дисплейный класс	AMD Athlon 64 (5GHz/250Gb/2Gb/DD-RW), 2 ядра	

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-2	Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	1.Объекты управления	1.1.Объект управления. Управляющее устройство. Управляемые, управляющие величины. 1.2. Возмущающие воздействия. Примеры объектов управления.	Экзаменационные вопросы 1.1-1.4
		2.Классификация систем автоматического управления (САУ)	2.1.Системы автоматического управления. Разомкнутые, замкнутые, комбинированные системы. 2.2. Системы стабилизации, программные, следящие системы. Адаптивные системы.	Экзаменационные вопросы 2.1-2.5
		3.Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ	3.1.Методы решения дифференциальных уравнений. Преобразование Лапласа. Передаточные функции. 3.2. Типовые звенья, их передаточные функции. 3.3. Устойчивость систем автоматики 3.4.Частотные характеристики САУ.	Экзаменационные вопросы 3.1-3.11
		4.Структурные схемы систем автоматического управления	4.1.Структурная схема САУ. Элементы структурных схем. 4.2. Правила преобразования структурных схем	Экзаменационные вопросы 4.1-4.5
		5.Дискретные системы автоматического управления	5.1.Основные понятия и классификация 5.2. Решетчатые функции, разностные уравнения и дискретное преобразование	Экзаменационные вопросы 5.1-5.29

			<p>Лапласа</p> <p>5.3. Описание разомкнутых импульсных систем</p> <p>5.4. Частотные характеристики импульсных систем</p> <p>5.5. Характеристики замкнутых импульсных систем</p> <p>5.6. Процессы в импульсных системах</p> <p>5.7. Устойчивость процессов в импульсных системах</p> <p>5.8. Точность импульсных систем</p> <p>5.9. Оценки качества импульсных систем</p> <p>5.10. Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ</p> <p>5.11. Элементы синтеза импульсных систем</p> <p>5.12. Уравнения состояния линейных импульсных систем</p> <p>5.13. Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний</p> <p>5.14. Цифровые системы автоматического управления</p> <p>5.15. Исследование цифровых систем автоматического управления</p>	
--	--	--	--	--

2. Экзаменационные вопросы

№ п/п	Компетенции		ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ОПК-2	Способность выявлять естественнонаучную сущность	<p>1.1. Объект управления. Управляющее устройство.</p> <p>1.2. Типы входных воздействий и их характеристики.</p>	1.Объекты управления

		<p>проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат</p>	<p>1.3. Управляемые, управляющие величины. Возмущающие воздействия.</p> <p>1.4. Примеры объектов управления.</p> <p>2.1 Системы автоматического управления.</p> <p>2.2 Виды обратных связей.</p> <p>2.3 Принципы регулирования. Разомкнутые, замкнутые, комбинированные САУ.</p> <p>2.4 Системы стабилизации, программные, следящие системы.</p> <p>2.5 Адаптивные системы.</p> <p>3.1 Математическое описание линейных САУ.</p> <p>3.2.Преобразование Лапласа.</p> <p>3.3.Передаточная функция. Коэффициент усиления, постоянная времени, запаздывание.</p> <p>3.4.Типовые звенья, их передаточные функции, переходные характеристики.</p> <p>3.5.Устойчивость систем автоматики.</p> <p>3.6.Критерии устойчивости</p> <p>3.7. Устойчивые, неустойчивые, на границе устойчивости системы автоматического управления.</p> <p>3.8. Критерий устойчивости Гурвица.</p> <p>3.9. Критерий устойчивости Михайлова.</p> <p>3.10Критерий устойчивости Найквиста</p> <p>3.11. Частотные характеристики САУ</p> <p>4.1.Структурная схема САУ.</p> <p>4.2. Элементы структурных схем.</p> <p>4.3. Примеры структурных схем систем автоматического управления</p> <p>4.4.Преобразование структурных схем.</p> <p>4.5. Правила преобразования структурных схем</p> <p>5.1.Основные понятия дискретных САУ</p> <p>5.2.Классификация Дискретных САУ</p> <p>5.3.Решетчатые функции</p> <p>5.4.Разностные уравнения</p> <p>5.5.Дискретное преобразование Лапласа</p> <p>5.6.Описание разомкнутых импульсных систем</p> <p>5.7.ЛАЧХ импульсных систем</p> <p>5.8.ЛФЧХ импульсных систем</p> <p>5.9.Весовая функция замкнутых импульсных систем</p> <p>5.10.Переходная функция замкнутых импульсных систем</p> <p>5.11.Процессы в импульсных системах</p> <p>5.12.Методы вычисления процессов</p> <p>5.13.Устойчивость процессов в импульсных системах</p> <p>5.14.Критерий устойчивости Найквиста</p> <p>5.15.Точность импульсных систем</p> <p>5.16.Оценки качества импульсных систем</p> <p>5.17.Степень устойчивости импульсных систем</p>	<p>2.Классификация систем автоматического управления (САУ)</p> <hr/> <p>3.Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ</p> <hr/> <p>4.Структурные схемы систем автоматического управления</p> <hr/> <p>5.Дискретные системы автоматического управления</p>
--	--	---	--	--

			<p>5.18. Степень колебательности импульсных систем</p> <p>5.19. Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ</p> <p>5.20. Элементы синтеза импульсных систем</p> <p>5.21. Подход непрерывной коррекции</p> <p>5.22. Подход дискретной коррекции</p> <p>5.23. Уравнения состояния линейных импульсных систем</p> <p>5.24. Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний</p> <p>5.25. Характеристическое уравнение импульсных систем</p> <p>5.26. Цифровые системы автоматического управления</p> <p>5.27. Структура цифровой САУ</p> <p>5.28. Исследование цифровых систем автоматического управления</p> <p>5.29. Алгоритмы управления цифровых САУ</p>	
--	--	--	--	--

3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Способность выявлять естественнонаучную сущность процесса, - Физико-математические закономерности процессов, - Способы анализа и синтеза систем автоматического управления. <p>Уметь (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Получать необходимую информацию, обрабатывать ее, - Использовать полученные знания на практике, - Проводить анализ, синтез систем автоматического управления. <p>Владеть (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем, - Соответствующим физико-математическим аппаратом для решения практических задач. 	отлично	<p>Оценка «отлично» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> – всестороннее систематическое знание программного материала; – правильное выполнение практических заданий, направленных на применение программного материала; – правильное применение основных положений программного материала.

	хорошо	<p>Оценка «хорошо» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> – недостаточно полное знание программного материала; – выполнение с несущественными ошибками практических заданий, направленных на применение программного материала; – применение с несущественными ошибками основных положений программного материала.
	удовлетворительно	<p>Оценка «удовлетворительно» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> – частичное знание программного материала; – частичное выполнение практических заданий, направленных на применение программного материала; – частичное применение основных положений программного материала.
	неудовлетворительно	<p>Оценка «неудовлетворительно» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> – существенные пробелы в знании программного материала; – принципиальные ошибки при выполнении практических заданий, направленных на применение программного материала; – невозможность применения основных положений программного материала.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности

Дисциплина Теория автоматического управления направлена на изучение методов контроля, обработки, анализа и синтеза систем автоматического управления технологических процессов.

Изучение дисциплины предусматривает:

- лекции,
- лабораторные работы,
- практические занятия.
- курсовую работу,
- контрольную работу,
- самостоятельную работу,
- 2 экзамена.

В ходе освоения раздела 1 «Объекты управления» студенты должны научиться проводить идентификацию объектов управления, анализировать регулируемые, регулирующие, возмущающие воздействия.

В ходе освоения раздела 2 «Классификация систем автоматического управления (САУ)» студенты должны проводить классификацию систем автоматического управления различных технологических процессов.

В ходе освоения раздела 3 «Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ» студенты должны уметь составлять математическое описание систем автоматического управления параметрами, уметь анализировать устойчивость данных систем различными способами, строить частотные характеристики САУ.

В ходе освоения раздела 4 «Структурные схемы систем автоматического управления» студенты должны знать способы соединения элементов автоматики в структурных схемах, уметь составлять схемы автоматизации для различных технологических процессов.

В ходе освоения раздела 5 «Дискретные системы автоматического управления» студенты должны знать основные понятия импульсных систем, уметь составлять математическое описание систем автоматического регулирования, уметь анализировать устойчивость данных систем различными способами, строить частотные характеристики САУ.

В процессе проведения лабораторных работ происходит закрепление знаний, формирование умений и навыков реализации представления о различных системах автоматического управления, их идентификации, анализа данных систем на устойчивость.

В процессе выполнения практических заданий, студенты приобретают навыки моделирования систем автоматического управления, работы с программным обеспечением Matlab.

Полученные на занятиях знания, закрепляются при выполнении курсовой и контрольной работ.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературой. Дополнительные сведения по изучаемым темам можно найти в периодической печати и Интернете.

К экзамену допускаются студенты, которые выполнили и оформили все лабораторные и практические работы, контрольную работу, курсовую работу.

Оценка знаний, умений, навыков осуществляется в процессе промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине, которая осуществляется в виде экзамена. Для оценивания знаний, умений, навыков используются ФОС по дисциплине, содержащие, вопросы к экзамену.

АННОТАЦИЯ
рабочей программы дисциплины
Теория автоматического управления

1. Цель и задачи дисциплины

Целью изучения дисциплины является: формирование у обучающихся знаний, умений и навыков необходимых для выполнения анализа систем автоматического управления технологическими процессами

Задачей изучения дисциплины является :изучение методов контроля, обработки, анализа систем автоматического управления технологических процессов в сфере профессиональной деятельности.

2. Структура дисциплины

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: лекций – 70 часов, лабораторные работы – 35 часов, практические занятия - 35 часов, самостоятельная работа студента – 112 часов.
Общая трудоемкость дисциплины составляет 324 часов, 9 зачетных единиц.

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Объекты управления
2. Классификация систем автоматического управления (САУ)
3. Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ
4. Структурные схемы систем автоматического управления
5. Дискретные системы автоматического управления

3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 - способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат

4. Вид промежуточной аттестации: 2 экзамена, КР.

*Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе
на 20__-20__ учебный год*

1. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие дополнения:

2. В рабочую программу по дисциплине вносятся следующие изменения:

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 20__ г.,
(разработчик)

Заведующий кафедрой _____
(подпись)

(Ф.И.О.)

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО
КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
ОПК-2	Способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат	1.Объекты управления	1.1.Объект управления. Управляющее устройство. Управляемые, управляющие величины. 1.2. Возмущающие воздействия. Примеры объектов управления.	Отчеты по лабораторным работам Курсовая работа
		2.Классификация систем автоматического управления (САУ)	2.1.Системы автоматического управления. Разомкнутые, замкнутые, комбинированные системы. 2.2. Системы стабилизации, программные, следящие системы. Адаптивные системы.	Курсовая работа
		3.Математическое описание САУ. Анализ устойчивости САУ	3.1.Методы решения дифференциальных уравнений. Преобразование Лапласа. Передаточные функции. 3.2. Типовые звенья, их передаточные функции. 3.3. Устойчивость систем автоматики 3.4.Частотные характеристики САУ.	Отчеты по лабораторным работам Курсовая работа
		4.Структурные схемы систем автоматического управления	4.1.Структурная схема САУ. Элементы структурных схем. 4.2. Правила преобразования структурных схем	Отчеты по лабораторным работам Курсовая работа
		5.Дискретные системы автоматического управления	5.1.Основные понятия и классификация 5.2. Решетчатые функции, разностные уравнения и дискретное преобразование Лапласа 5.3. Описание разомкнутых импульсных систем	Отчеты по лабораторным работам, контрольная работа

		<p>5.4. Частотные характеристики импульсных систем</p> <p>5.5. Характеристики замкнутых импульсных систем</p> <p>5.6. Процессы в импульсных системах</p> <p>5.7. Устойчивость процессов в импульсных системах</p> <p>5.8. Точность импульсных систем</p> <p>5.9. Оценки качества импульсных систем</p> <p>5.10. Условия эквивалентности импульсных и непрерывных САУ</p> <p>5.11. Элементы синтеза импульсных систем</p> <p>5.12. Уравнения состояния линейных импульсных систем</p> <p>5.13. Характеристики импульсных систем, описываемых уравнениями в пространстве состояний</p> <p>5.14. Цифровые системы автоматического управления</p> <p>5.15. Исследование цифровых систем автоматического управления</p>	
--	--	--	--

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p>Знать ОПК-2: -Способность выявлять естественнонаучную сущность процесса, -Физико-математические закономерности процессов, -Способы анализа и синтеза систем автоматического управления.</p> <p>Уметь ОПК-2: -Получать необходимую информацию, обрабатывать ее, - Использовать полученные знания</p>	<p>отлично</p>	<p>соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами; переходными характеристиками, самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; уверенное владение материалом при устной защите.</p>

<p>на практике, -Проводить анализ, синтез систем автоматического управления. Владеть ОПК-2: - Достаточным уровнем понимания материала, и способностью выявлять сущность проблем, -Соответствующим физико-математическим аппаратом для решения практических задач</p>	<p>хорошо</p>	<p>соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; правильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, переходными характеристиками; самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; грамотность, отсутствие стилистических ошибок; хорошее владение материалом при устной защите.</p>
	<p>удовлетворительно</p>	<p>не полное соответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неточность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, переходными характеристиками, частичная самостоятельность выполнения; оформление работы и списка использованных источников не полностью соответствует требованиям; наличие некоторых стилистических ошибок; не уверенное владение материалом при устной защите.</p>
	<p>неудовлетворительно</p>	<p>несоответствие требованиям по структурному содержанию и объему работы; неправильность выполнения задания, сопровождающегося схемами, таблицами, формулами, переходными характеристиками; отсутствие самостоятельности выполнения; оформление работы и списка использованных источников не соответствует требованиям; наличие стилистических ошибок; отсутствие владения материалом при устной защите.</p>
	<p>зачтено</p>	<p>Оценка «зачтено» выставляется в случае, если студент демонстрирует:</p> <ul style="list-style-type: none"> – всестороннее систематическое знание программного материала; – правильное выполнение лабораторных работ, направленных на применение программного материала; - правильное применение основных положений программного материала.

	не зачтено	Оценка «незачтено» выставляется в случае, если студент демонстрирует: <ul style="list-style-type: none">– существенные пробелы в знании программного материала;– принципиальные ошибки при выполнении лабораторных работ, направленных на применение программного материала;- невозможность применения основных положений программного материала.
--	-------------------	---

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 27.03.04 Управление в технических системах от «20» октября 2015 г. № 1171

для набора 2018 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для очной формы обучения от «12» марта 2018 г. № 130, заочной формы обучения от «12» марта 2018 г. № 130.

Программу составил:

Григорьева Т.А. к.т.н, доцент кафедры УТС _____

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры УТС

от «28» декабря 2018 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой _____ И.В. Игнатьев

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой _____ И.В. Игнатьев

Директор библиотеки _____ Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией факультета ЭиА

от «28» декабря 2018 г., протокол № 5

Председатель методической комиссии факультета _____ А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
учебно-методического управления _____ Г.П. Нежевец

Регистрационный № _____