

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Кафедра электроэнергетики и электротехники**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе

Е.И.Луковникова

«\_\_\_\_\_» декабря 2018 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ  
ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

**Б1.В.ДВ.10.02**

**НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ**

**13.03.02 Энергоэнергетика и электротехника**

**ПРОФИЛЬ ПОДГОТОВКИ**

**Электроснабжение**

Программа академического бакалавриата

Квалификация (степень) выпускника: бакалавр

<b>1. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫХ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ .....</b>	<b>3</b>
<b>3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>4</b>
3.1 Распределение объема дисциплины по формам обучения.....	4
3.2 Распределение объема дисциплины по видам учебных занятий и трудоемкости .....	4
<b>4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>5</b>
4.1 Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий .....	5
4.2 Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам .....	10
4.3 Лабораторные работы.....	65
4.4 Практические занятия.....	65
4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат.....	65
<b>5. МАТРИЦА СООТНЕСЕНИЯ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ К ФОРМИРУЕМЫМ В НИХ КОМПЕТЕНЦИЯМ И ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>66</b>
<b>6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ</b>	<b>66</b>
<b>7. ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>66</b>
<b>8. ПЕРЕЧЕНЬ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО – ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ «ИНТЕРНЕТ» НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ .....</b>	<b>67</b>
<b>9. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....</b>	<b>67</b>
9.1. Методические указания для обучающихся по выполнению практических занятий .....	67
<b>10. ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>11. ОПИСАНИЕ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПО ДИСЦИПЛИНЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>Приложение 1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.....</b>	<b>84</b>
<b>Приложение 2. Аннотация рабочей программы дисциплины .....</b>	<b>92</b>
<b>Приложение 3. Протокол о дополнениях и изменениях в рабочей программе .....</b>	<b>93</b>
<b>Приложение 4. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости по дисциплине.....</b>	<b>94</b>

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

## Вид деятельности выпускника

Дисциплина охватывает круг вопросов, относящихся к производственно-технологическому виду профессиональной деятельности выпускника в соответствии с компетенциями и видами деятельности, указанными в учебном плане.

## Цель дисциплины

Целью изучения дисциплины является формирование знаний классической теории автоматического управления, а также современных методов исследования систем автоматического управления.

## Задачи дисциплины

Изучение способов представления и преобразования структурных и функциональных схем, а также методов исследования систем автоматического управления.

Код компетенции	Содержание компетенций	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
1	2	3
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<b>знать:</b> - теоретические основы и принцип действия современных систем автоматического управления и особенности протекающих в них процессов; <b>уметь:</b> - применять полученную в результате обучения теоретическую и практическую базу для получения математического описания объектов и систем в виде дифференциальных уравнений, структурных схем с целью построения их динамических и статических характеристик, а также моделирования; <b>владеть:</b> - навыками решения практических задач по расчету, анализу устойчивости и качества при проектировании систем автоматического управления с использованием компьютерного моделирования.
ПК-8	способность использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса	<b>знать:</b> - методы представления и измерения параметров систем автоматического управления; <b>уметь:</b> - применять технические средства для контроля параметров систем автоматического управления; <b>владеть:</b> - навыками моделирования систем автоматического управления

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Дисциплина Б1.В.ДВ.10.02 Теория автоматического управления относится к элективной части.

Дисциплина Теория автоматического управления базируется на знаниях, полученных при изучении таких учебных дисциплин, как: Высшая математика, Информатика, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, Основы электропривода.

Основываясь на изучении перечисленных дисциплин, Теория автоматического управления представляет основу для преддипломной практики и 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					Курсовая работа (проект), контрольная работа, реферат, РГР	Вид промежуточной аттестации	
			Всего часов	Аудиторных часов	Лекции	Лабораторные работы	Практические занятия			Самостоятельная работа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Заочная	4	-	108	13	4	-	9	91	-	зачет

### 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 курсам, час
			5
<b>I. Контактная работа обучающихся с преподавателем (всего)</b>	13	6	13
Лекции (Лк)	4	2	4
Практические занятия (ПЗ)	9	4	9
<b>II. Самостоятельная работа обучающихся (СР)</b>	91	-	91
Подготовка к практическим занятиям	27	-	27
Подготовка к зачету	64	-	64
<b>III. Промежуточная аттестация зачет</b>	+	-	+
Общая трудоемкость дисциплины, час.	108	-	108
зач. ед.	3	-	3

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 4.1. Распределение разделов дисциплины по видам учебных занятий

- 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	практические занятия	
1	2	3	4	5	6
<b>1.</b>	<b>Принципы построения систем автоматического управления</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
1.1.	Управление техническими процессами. Разомкнутые системы.	1,1	0,1	-	1
1.2.	Замкнутые системы автоматического управления. Основные элементы системы автоматического управления.	2,2	0,2	-	2
1.3.	Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта).	2,2	0,2	-	2
1.4.	Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе).	2,2	0,2	-	2
1.5.	Понятия о функциональных схемах.	1,1	0,1	-	1
1.6.	Преобразование функциональных схем.	3,2	0,2	2	1
1.7.	Классификация систем автоматического управления.	1	-	-	1
<b>2.</b>	<b>Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>10</b>
2.1.	Общие понятия о статических системах.	2,25	0,25	-	2
2.2.	Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	4,25	0,25	1	3
2.3.	Статическая система с комбинированным регулированием.	3,25	0,25	-	3
2.4.	Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.	3,25	0,25	1	2
<b>3.</b>	<b>Динамика линейных систем автоматического управления</b>	<b>37</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>31</b>
3.1.	Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического	3,1	0,1	-	3

	управления, описывающие динамические процессы.				
3.2.	Применение операторных методов в теории автоматического управления.	5,1	0,1	-	5
3.3.	Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.	5,1	0,1	-	5
3.4.	Понятие о переходных и частотных характеристиках.	5,1	0,1	-	5
3.5.	Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления.	7,6	0,1	3,5	4
3.6.	Особые звенья в системах автоматического управления.	3,1	0,1	-	3
3.7.	Частотные характеристики систем.	3,1	0,1	-	3
3.8.	Устойчивость систем автоматического управления.	3,6	0,1	0,5	3
3.9.	Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.	3,6	0,1	0,5	3
3.10.	Синтез систем автоматического управления.	3,6	0,1	0,5	3
<b>4.</b>	<b>Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</b>	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>20</b>
4.1.	Статика нелинейных систем.	4,25	0,25	-	4
4.2.	Динамика нелинейных систем.	4,25	0,25	-	4
4.3.	Метод фазовой плоскости.	4,25	0,25	-	4
4.4.	Фазовые портреты нелинейных систем.	4,25	0,25	-	4
4.5.	Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.	4	-	-	4
<b>5.</b>	<b>Нечёткие системы автоматического управления</b>	<b>20</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>20</b>
5.1.	Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.	8	-	-	8
5.2.	Система нечёткого логического вывода.	4	-	-	4
5.3.	Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.	8	-	-	8
	<b>ИТОГО</b>	<b>104</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>91</b>

## 4.2. Содержание дисциплины, структурированное по разделам и темам

### Раздел 1. Принципы построения систем автоматического управления

Любой реальный технический процесс весьма сложен, однако его можно разбить на целый ряд простых процессов – единичных цепей воздействия (рис. 1.1).

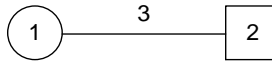


Рис. 1.1. Элементы простого процесса

Единичная цепь воздействия состоит из источника технического воздействия – 1, приемника технического воздействия – 2, линии передачи технического воздействия – 3.

Любой технический процесс характеризуется:

- продолжительностью протекания;
- качественными показателями, т.е. активными силами, приложенными к цепи;
- количественными показателями, т.е. физическими величинами, определяющими интенсивность протекающего процесса.

Совокупность качественных и количественных показателей называется режимом процесса.

Простой технический процесс, являясь составной частью сложного, решает в нём свою задачу, т.е. имеет своё предписание, задание. Чтобы каждый простой процесс протекал должным образом, им нужно управлять.

Следовательно, управление – это обеспечение начала, окончания процесса или изменение его режима. Для того чтобы любой простой процесс начал функционировать, необходимо следующее:

1) наличие потенциальных возможностей источника технического воздействия по отношению к приемнику. Обозначим этот показатель –  $H$ ;

2) наличие проводимости цепи передачи технического воздействия –  $G$ .

При обеспечении этих условий процесс будет протекать с определенной интенсивностью, отражаемой количественным показателем –  $B$ .

$$B = HG. \quad (1.1)$$

Из выражения (1.1) видно, что менять интенсивность процесса, т.е. управлять им, можно, изменяя потенциальное состояние цепи  $H$  или проводимость  $G$ .

Наиболее универсальным способом можно считать управление процессами путем изменения величины –  $G$ . Для этого в цепь вводится элемент управления – 4, т.е. элемент, проводимость которого можно изменять некоторым внешним управляющим воздействием –  $Q$ , (рис. 1.2).

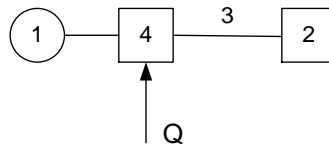


Рис. 1.2. Процесс с элементом управления

Элемент управления обеспечивает зависимость вида

$$G = f_1(Q) \quad (1.2)$$

При постоянном значении  $H$  можно записать

$$B = f_2(Q) \quad (1.3)$$

т.е. интенсивность процесса –  $B$  можно изменять управляющим воздействием –  $Q$ .

Если воздействие  $Q$  может осуществляться человеком, то тогда управление будет ручным (механизация процесса). Если же управление осуществляется техническим устройством, то оно называется автоматическим управлением.

Зависимость (1.3), характеризующую процесс управления, можно переписать в виде

$$Q = \psi(B) \quad (1.4)$$

Это выражение имеет следующий аналитический смысл: «управляющее воздействие содержит в себе информацию об интенсивности протекания процесса». Таким образом, процесс управления – это прежде всего передача информации.

В теории автоматического управления (ТАУ) рассматривается два вида систем: разомкнутые и замкнутые.

### Тема 1.1. Управление техническими процессами. Разомкнутые системы

Разомкнутые системы в качестве основного способа автоматизации реализуют автоматическое связывание отдельных процессов в составе сложных и используются на низшем уровне иерархии систем управления.

Связь между процессами осуществляется через элементы управления, которые, в свою очередь, создают либо порядково-временную зависимость по моментам начала или окончания равноправных процессов, либо причинную зависимость, при которой один процесс – распорядительный управляет ходом другого процесса – исполнительного.

Автоматизационное связывание получило широкое распространение в системах с дискретным управлением (включено, выключено) или в системах поддержания режимов управляемых процессов, где не требуется высокая точность регулирования. Характерным примером порядково-временного связывания процессов может служить групповой переключатель, обеспечивающий жесткую механическую связь ключей, которые, в свою очередь, создают определенный порядок переключения цепей силового трансформатора при регулировании напряжения под нагрузкой (РПН).

Примером реализации причинной зависимости могут служить *релейное связывание процессов* изменения тока объекта при отключении высоковольтного выключателя – работа релейной защиты (причина).

Наиболее совершенным видом реализации причинной зависимости является функциональное связывание процессов, когда реализуется непрерывная, заранее заданная зависимость между показателями исполнительного и распорядительного процессов  $P_{исн.} = f(P_{расн.})$ . Например, при работе генератора для того чтобы его напряжение оставалось постоянным, ток в обмотке возбуждения должен быть связан с током нагрузки, заранее определенной заданной зависимостью  $I_g = f(I_{нагр.})$  (регулирующая характеристика).

Основным недостатком разомкнутых систем является отсутствие контроля результата.

Более совершенными являются замкнутые системы, или системы с обратными связями, т.е. системы с контролем регулируемых параметров.

### Тема 1.2. Замкнутые системы автоматического управления. Основные элементы системы автоматического управления

Целью автоматического регулирования является поддержание заданного значения определенной физической величины, называемой управляемой или регулируемой величиной – показателем  $X$ .

Объект, одна или несколько физических величин (показателей) которого регулируются, называется объектом регулирования (управления) (О.Р.). При этом, для того, чтобы можно было осуществить управление, объект должен иметь управляющий или регулирующий орган, изменяя состояние которого можно было бы изменять показатели процесса.

Устройство, оказывающее воздействие на регулирующий орган объекта регулирования, т.е. осуществляющее управление, объектом, называется регулятором (Р).

Внешние воздействия, оказывающие отрицательное влияние на регулируемые показатели объекта управления называются возмущениями  $Z$ .

Совокупность объекта управления и регулятора называется системой автоматического регулирования (управления) САР (рис.1.3).

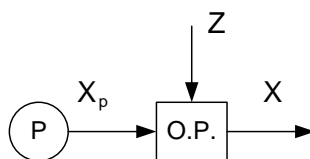


Рис.1.3. Основные элементы системы автоматического управления:



$X$  – регулируемая величина,  $Z$  – возмущение,  $X_p$  – регулирующая величина, О.Р. – объект регулирования,  $P$  – регулятор.

Существует два основных принципа построения систем автоматического регулирования (управления) – по отклонению и по возмущению.

### Тема 1.3. Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта)

Предполагается, что этот принцип появился на основе наблюдения за действиями человека, управляющим процессом вручную. Человек смотрит на измерительный прибор, указывающий значение регулируемой величины, мысленно сравнивает это значение с заданным, оценивает отклонение процесса от заданного значения и воздействует на регулирующий орган объекта таким образом, чтобы свести это отклонение к минимуму.

Для графического изображения систем существуют различные типы схем. На рис. 1.4 приведена простейшая схема САР для генератора постоянного тока с целью поддержания постоянства напряжения на его зажимах, реализованная по принципу Ползунова-Уатта.

Предположим, что в результате сброса нагрузки величина напряжения генератора  $U_G$  начала увеличиваться. При этом повышается напряжение с делителя,  $U'$  и возрастает усилие электромагнита,  $F$ . После этого сердечник электромагнита (4) начинает втягиваться вместе с механической тягой (5), связанной с пружиной (3). Движок реостата  $R_d$  (2) перемещается вниз, вследствие чего в цепь возбуждения вводится дополнительное сопротивление. В этом случае ток в ОВ уменьшается, что приводит к уменьшению величины  $U_G$ .

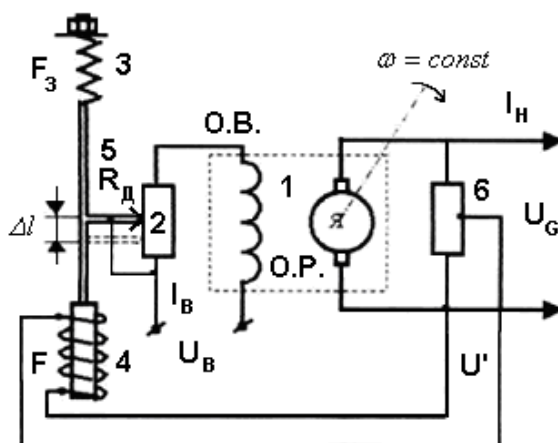


Рис.1.4. САР напряжения генератора, построенная по принципу отклонения:

1 – О.Р. – генератор;  $U_G$  – регулируемая величина; 2 – добавочное регулируемое сопротивление в цепи обмотки возбуждения (О.В.) генератора (исполнительный элемент); 3 – пружина (задающий элемент в системе); 4 – электромагнит (преобразовательный элемент); 5 – механическая связь, выполняющая роль элемента сравнения заданного и действительного значений регулируемого показателя; 6 – измерительное устройство (потенциометр)

Таким образом, система работает по принципу сравнения заданного значения напряжения генератора, мерой которого является усилие механическое пружины  $F_3 \equiv U_{G \text{ зад}}$  и действительного значения напряжения, мерой которого является усилие электромагнита  $F \equiv U_G$ . В результате сравнения вырабатывается такое управляющее воздействие (изменение положения движка  $R_d$  и тока возбуждения  $I_B$ ), чтобы отклонение величины  $U_G$  от  $U_{G \text{ зад}}$  свести к минимуму.

В ряде расчетов для более наглядного восприятия нашли применение так называемые функциональные схемы. В них элементы изображаются в виде прямоугольников. Разделение на элементы в этих схемах осуществляется по их функция, отсюда и названия схем. Функции элементов могут быть самыми разнообразными: объект управления, исполнительный элемент, датчик, усилитель, стабилизатор, преобразователь и т.д.

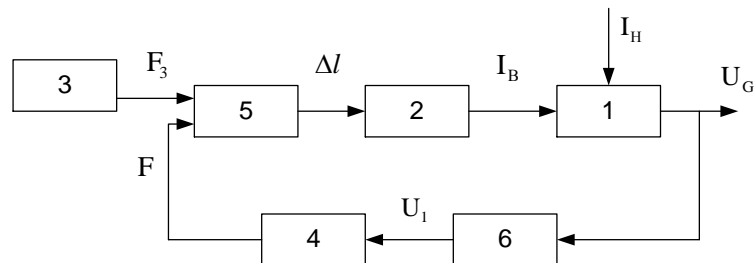


Рис. 1.5. Функциональная схема САР, построенная по принципу отклонения

Объединяя характерные элементы, можно изобразить обобщённую функциональную схему САР (рис. 1.5), построенную по принципу Ползунова-Уатта, т.е. по принципу отклонения регулируемой величины от заданного значения. Из рис.1.5 видно, что такая схема представляет собой замкнутую систему, т.е. систему с обратной связью по регулируемой величине  $X$ . При этом, поскольку основной операцией в данной системе является сравнение заданного и действительного значений регулируемой величины, эта обратная связь всегда *отрицательна*.

Достоинством принципа регулирования по отклонению является его универсальность, т.е. система, построенная по этому принципу выполняет свои функции, при всех возможных возмущениях на О.Р.. Недостатком же является то, что в системе, как правило, имеет место отклонение действительной величины от заданной, т.е. определенная ошибка, которая и является движущей силой в работе системы, т.е. как бы реализуется известная философская категория: точность достигается в результате наличия неточности (ошибки).

#### Тема 1.4. Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе)

Второй принцип построения САР (его еще называют автокомпенсацией) заключается в том, что регулятор в системе реагирует на величину возмущения, действующего на О.Р. и вырабатывает такое управляющее воздействие, чтобы скомпенсировать действие этого возмущения. Например, применительно к генератору постоянного тока основным возмущением можно считать изменение тока нагрузки.

Компенсацию влияния тока нагрузки на напряжение генератора можно получить введением дополнительной последовательной обмотки возбуждения, включенной в цепь тока нагрузки – способ компаундного возбуждения. Последовательная обмотка такого компаундного возбуждения, подключенная согласно с независимой обмоткой, при увеличении тока нагрузки будет обеспечивать увеличение общего потока возбуждения машины, т.е. компенсировать увеличение реакции якоря и падения напряжения на нем. В результате этого, при соответствующем подборе числа витков последовательной обмотки, напряжение генератора будет оставаться постоянным (рис. 1.6).

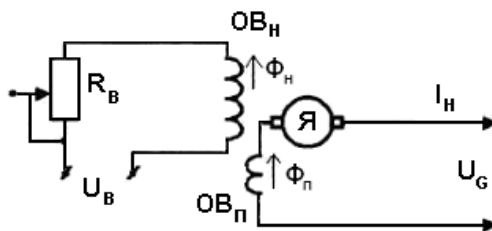


Рис.1.6. Схема генератора с компаундной обмоткой возбуждения

Следует отметить, что принцип регулирования по возмущению дает хорошие результаты в тех случаях, когда на О.Р. действует одно мощное возмущение, а остальные малы и ими можно пренебречь. В этом случае системы, как видно из приведенного примера, получаются простыми и эффективными.

Если же на О.Р. действуют несколько равноценных возмущений, то, скомпенсировав одно из них, мы не получим необходимой эффективности в работе системы. Если же построить систему с компенсацией всех возмущений, то она может оказаться весьма сложной и громоздкой. Иными словами, рассмотренный принцип не является универсальным.

Обобщенная функциональная схема системы, построенной по принципу регулирования по возмущению, приведена на рис. 1.7.

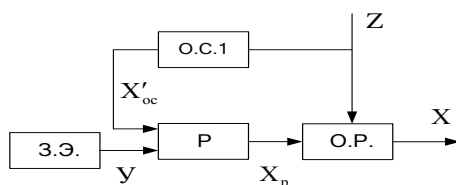


Рис. 1.7. Функциональная схема системы, построенной по принципу возмущения: О.С.1 – компенсирующая обратная связь по возмущению;  $X'_{oc}$  – сигнал обратной связи по возмущению

Наиболее совершенные системы – системы *комбинированного регулирования*, используют сразу оба принципа: и по отклонению, и по возмущению. Функциональная схема такой системы приведена на рис. 1.8.

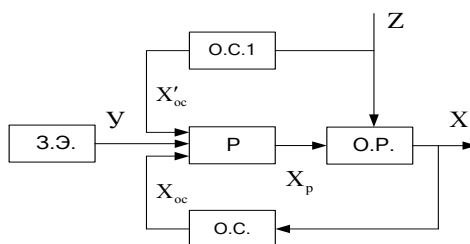
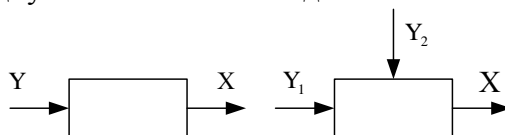


Рис. 1.8. Функциональная схема системы комбинированного регулирования

### Тема 1.5. Понятия о функциональных схемах

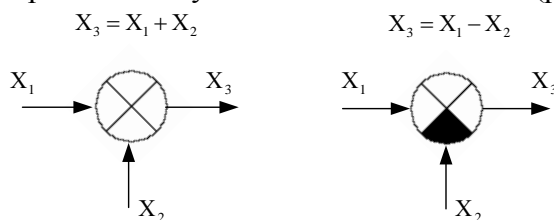
Любой элемент имеет одну или несколько входных величин и выходную (рис. 1.9).



а) одна входная величина      б) две входные величины

Рис. 1.9. Примеры изображения элементов

Важную роль в схемах САР выполняют элементы сравнения – суммирующие узлы, выполняющие операцию алгебраической суммы входных сигналов (рис. 1.10).



а) суммирование сигналов      б) разность сигналов

Рис. 1.10. Примеры изображения суммирующих узлов

Функциональные схемы используются для анализа статических (установившихся) режимов систем. В этих режимах любой элемент характеризуется зависимостью  $X=f(Y)$ , называемой **статической характеристикой элемента**. Входная величина –  $Y$ , выходная –  $X$ , несут в себе определенную информацию в данной системе управления.

Физическая величина, несущая информацию, называется **сигналом**. Таким образом, любой элемент является преобразователем информации. Соотношение  $\frac{\Delta X}{\Delta Y} = K$  называется **передаточным коэффициентом элемента**. Если статическая характеристика линейна и проходит через 0, передаточный коэффициент  $K$  является постоянной величиной (рис. 1.11), то

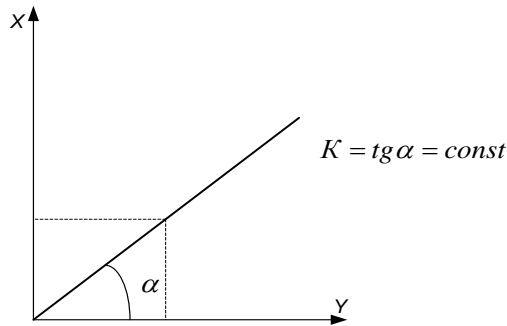


Рис. 1.11. Линейная статическая характеристика

У элементов с нелинейными статическими характеристиками передаточный коэффициент зависит от области характеристики, где работает элемент, т.е. его величина переменная (рис.1.12).

Некоторые элементы имеют неоднозначные статические характеристики. Эти элементы не имеют аналитической записи соотношения между входным и выходным сигналами. Примеры таких характеристик показаны на рис. 1.13.

Некоторые элементы не имеют жесткой математической зависимости между входным и выходным сигналами, но имеют зависимость между входным сигналом и скоростью изменения выходного сигнала:

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot y. \quad (1.5)$$

Такие элементы получили название *астатические*.

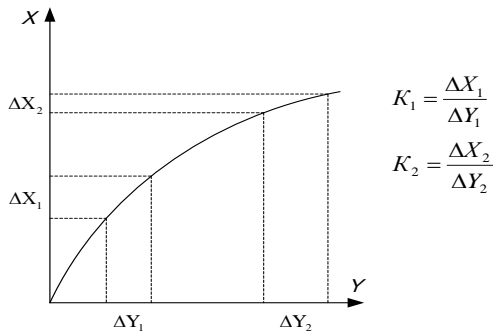


Рис.1.12. Нелинейная статическая характеристика

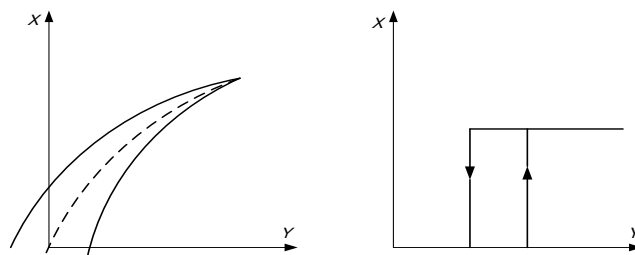


Рис. 1.13. Неоднозначные статические характеристики

В дальнейшем мы будем ориентироваться, в основном, на применение элементов с линейными или приближенно-линейными характеристиками. Для этих элементов соотношение между входным и выходным сигналами записывается выражением

$$x = k \cdot y, \quad (1.6)$$

которое называется **уравнением элемента в установившемся (статическом) режиме**.

Поскольку любой элемент – это устройство, связанное с передачей информации, то для него присущи понятия погрешности и зоны нечувствительности по аналогии с измерительной техникой:

$$\Delta X = X_{\text{вых1}} - X_{\text{вых2}}; \quad (1.7)$$

$$\varepsilon' = \frac{\Delta X}{X_{\text{вых1}}} \cdot 100\%; \quad (1.8)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{\text{вых max}}} \cdot 100\%, \quad (1.9)$$

где  $\Delta X$  – абсолютная погрешность элемента;  $X_{\text{вых1}}$  – идеальное значение выходного сигнала;  $X_{\text{вых2}}$  – реальное значение выходного сигнала;  $\varepsilon'$  – относительная погрешность;  $\varepsilon$  – приведённая погрешность.

Зоной нечувствительности элемента называется максимальный диапазон изменения входного сигнала, при котором выходной сигнал ещё не изменяется, рис. 1.14.

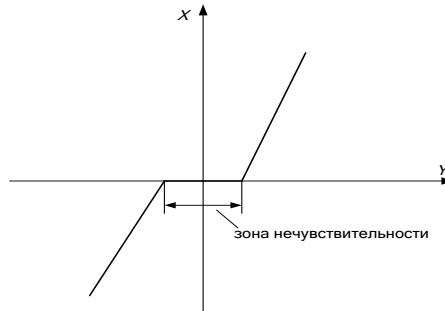


Рис. 1.14. Зона нечувствительности элемента

В схемах элементы могут соединяться между собой различным образом. Однако самые сложные схемы содержат три основных вида соединений элементов:

1. Последовательное соединение (рис. 1.15)

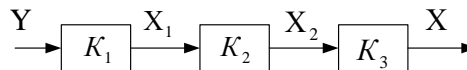


Рис. 1.15. Последовательное соединение элементов

Записывая для каждого элемента уравнения статики, получим

$$X_1 = K_1 \cdot Y;$$

$$X_2 = K_2 \cdot X_1;$$

$$X = K_3 \cdot X_2.$$

Исключая промежуточные неизвестные, можно записать соотношение между входным и выходным сигналами системы:

$$X = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot Y.$$

Таким образом, обобщённый передаточный коэффициент для рассматриваемой системы  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ . Обобщенный передаточный коэффициент для  $n$  последовательно соединенных элементов можно определить как произведение  $n$  коэффициентов отдельных элементов.

$$K = \prod_{i=1}^n K_i. \quad (1.10)$$

2. Параллельное соединение (рис. 1.16).

**Параллельным соединением элементов** принято называть такое, в котором на вход всех элементов поступает общий входной сигнал, а выходные сигналы суммируются.

В соответствии с определением и схемой (рис. 1.16) можно записать

$$X_1 = K_1 \cdot Y;$$

$$X_2 = K_2 \cdot Y;$$

$$X_3 = K_3 \cdot Y;$$

$$X = X_1 + X_2 + X_3 = (K_1 + K_2 + K_3) \cdot Y.$$

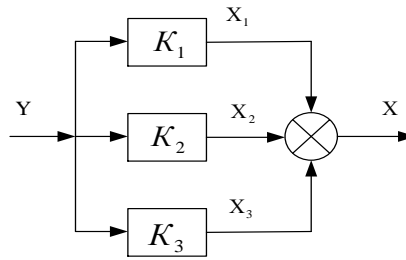


Рис.1.16. Параллельное соединение элементов

Итак, в данном случае обобщенный передаточный коэффициент определяется как  $K = K_1 + K_2 + K_3$ , а в общем случае

$$K = \sum_{i=1}^n K_i. \quad (1.11)$$

3. Встречно-параллельное соединение (элемент, охваченный обратной связью) (рис. 1.17).

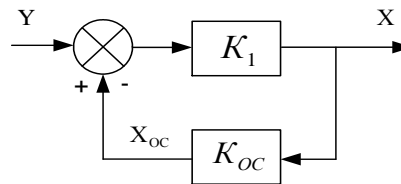


Рис. 1.17. Элемент, охваченный обратной связью

**Встречно-параллельным соединением** называется такое соединение элементов, когда выходной сигнал одного через устройства обратной связи подается снова на вход этого же или одного из предыдущих элементов. Обратная связь может быть положительной, если сигнал обратной связи суммируется с входным сигналом, и отрицательной, если – вычитается.

В соответствии со схемой рисунка 1.17 можно записать

$$X = K_1 (Y \pm X_{oc});$$

$$X_{oc} = K_{oc} \cdot X.$$

Отсюда

$$X = K_1 (X \pm K_{oc} \cdot X);$$

$$X \pm K_1 K_{oc} \cdot X = K_1 Y;$$

$$X = \frac{K_1}{1 \mp K_1 K_{oc}} \cdot Y.$$

Таким образом, обобщенный коэффициент для этого способа соединения элементов определяется по выражению:

$$K = \frac{K_1}{1 \mp K_1 K_{oc}}, \quad (1.12)$$

где знак (“–”) для положительной о.с.; знак (“+”) для отрицательной о.с.

### Тема 1.6. Преобразование функциональных схем

Основным критерием эквивалентности преобразования является сохранение информации, проходящей в исходной схеме. Пути прохождения информации в функциональных схемах обозначены стрелками, характер преобразования информации обуславливается уравнениями элементов.

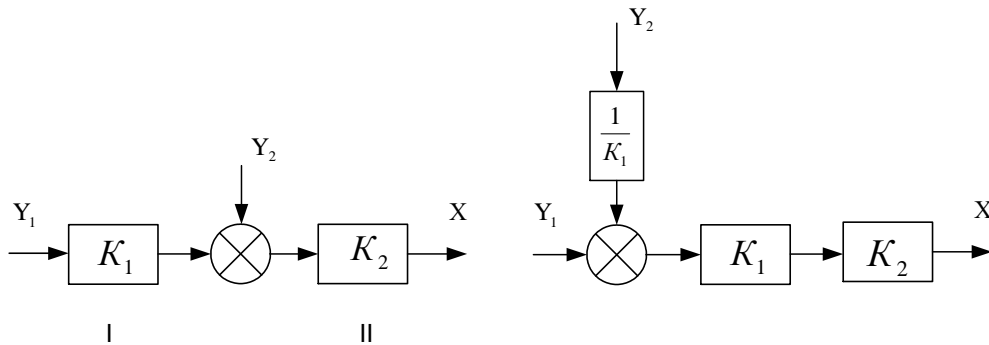
#### Приведем основные правила преобразования.

1. Группу последовательно соединенных элементов можно заменить одним элементом с коэффициентом, равным произведению передаточных коэффициентов элементов.

2. Группу параллельно соединенных элементов можно заменить одним элементом с передаточным коэффициентом, равным сумме передаточных коэффициентов элементов.

3. Элемент и охватывающую его обратную связь можно заменить одним элементом с передаточным коэффициентом, определяющим по формуле (1.12).

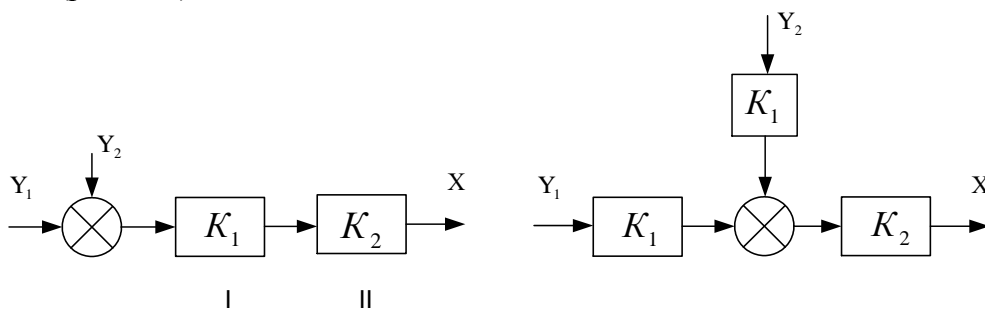
4. Внешнее воздействие, приложенное к входу элемента II (рис.1.18), можно перенести на вход предыдущего последовательно включенного элемента I, добавив между воздействием и входом элемента I элемент с коэффициентом  $K = \frac{1}{K_1}$ .



а) схема до преобразования      б) преобразованная схема

Рис.1.18. Перенос узла суммирования (вариант 1)

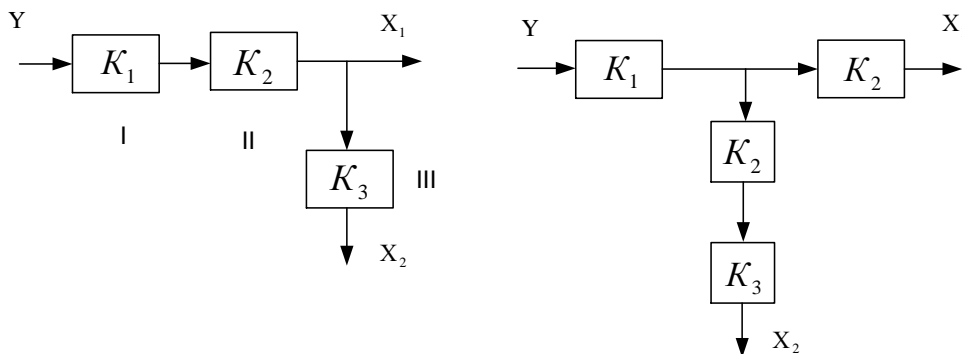
5. Внешнее воздействие, приложенное к входу элемента I, можно перенести на вход последующего элемента II, добавив между воздействием и входом элемента II элемент с коэффициентом  $K_1$  (рис.1.19).



а) схема до преобразования      б) преобразованная схема

Рис.1.19. Перенос узла суммирования (вариант 2)

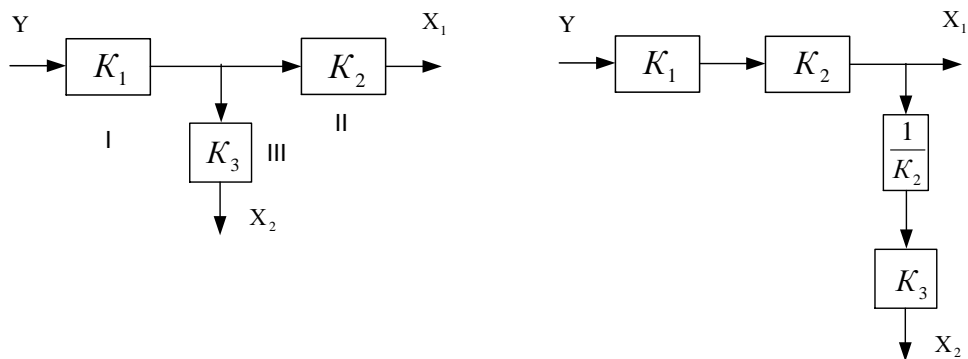
6. Точку присоединения элемента III можно перенести с выхода элемента II на его вход, добавив между входами элементов II и III элемент с коэффициентом  $K_2$  (рис.1.20).



а) схема до преобразования      б) преобразованная схема

Рис.1.20. Перенос узла разветвления (вариант 1)

7. Точку присоединения элемента III можно перенести со входа элемента II на его выход, добавив элемент с коэффициентом  $\frac{1}{K_2}$  (рис.1.21).



а) схема до преобразования

б) преобразованная схема

Рис.1.21. Перенос узла разветвления (вариант 2)

### Тема 1.7. Классификация систем автоматического управления

САУ можно классифицировать по различным признакам, а именно:

#### 1. По закону воспроизведения регулируемой (выходной) величины:

- стабилизирующая автоматическая система, когда значение выходной величины поддерживается неизменным ( $X=const$ ), именно такие системы называют системами автоматического регулирования;
- программные системы, когда регулируемая величина поддерживается по определенному, априори заданному закону во времени;
- следящие системы, когда регулируемая величина поддерживается по закону неизвестному априори, определяемому каким-либо распорядительным процессом;
- самонастраивающиеся системы, в которых программа может изменяться в зависимости от внешних условий;
- системы оптимального и экстремального регулирования, когда выходная величина поддерживается на возможном максимуме, минимуме или на наиболее выгодном в каком-либо отношении уровне.

#### 2. По характеру воздействия регулятора на объект регулирования:

- системы непрерывного типа, в которых регулирующее воздействие  $X_p$  изменяется непрерывно во времени;
- системы импульсного типа, в которых регулирующее воздействие  $X_p$  импульсного типа с изменяющейся амплитудой или длительностью импульсов;
- системы релейного типа, в которых в качестве исполнительного устройства в регуляторе используется элемент с релейной характеристикой.

#### 3. По характеру регулируемой величины:

- напряжения;
- тока;
- уровня;
- температуры и т.д.

#### 4. По виду уравнений системы:

- линейные;
- нелинейные.

#### 5. По количеству регулируемых величин:

- одномерные (регулируется одна величина);
- многомерные (регулируется несколько величин).

#### 6. По типу элементов в системе:

- статические (все элементы статические);
- астатические (имеется хотя бы один астатический элемент в составе регулятора).



## Раздел 2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия

### Тема 2.1. Общие понятия о статических системах

К линейным системам непрерывного действия относится обширный класс систем, элементы которых обладают линейными характеристиками, т.е. описываются линейными уравнениями.

Методы анализа и синтеза линейных систем наиболее хорошо разработаны и весьма универсальны, т.к. их удаётся распространить и на исследование некоторых нелинейных систем, которые поддаются линеаризации или которые можно приближенно считать линейными.

Различают два основных состояния систем: статическое (установившийся режим); динамическое (режим переходного процесса).

Динамическое состояние является более общим, а статическое состояние системы можно рассматривать как частный случай динамического. Однако, поскольку статика описывается и анализируется значительно проще динамики, её часто рассматривают отдельно, на начальном этапе изучения теории автоматического управления.

Установившееся состояние системы принято характеризовать следующими признаками:

- регулируемый параметр  $X$  достиг установившегося значения, которое равно заданному или отличается от него на определенную величину, которая получила название статической ошибки  $\Delta X$ :  $X_{зад} - X = \Delta X$ ;

- регулирующий орган неподвижен, находится в состоянии равновесия, т.е.  $X_p = const$ .

Задачей раздела «Статика» является выполнение так называемых статических расчётов. Целью статического расчёта может быть:

1. Определение статической ошибки в системе, если заданы параметры системы (передаточные коэффициенты элементов) и величина максимально возможных возмущений.

2. Определение тех или иных параметров системы по заданной точности (статической ошибке) при заданном возмущении и известных остальных параметрах элементов.

Статическими называются системы, у которых все элементы регулятора статические. Объект регулирования может быть как статическим, так и астатическим элементом.

Астатической называют систему, в составе регулятора которой имеется хотя бы один астатический элемент

И в том и в другом случае по результатам статических расчётов, как правило, строится статическая характеристика САУ. Статической характеристикой системы называют графическое изображение зависимости регулируемой величины от возмущения при постоянной величине задающего воздействия, т.е.  $X = f(Z)$ , при  $Y = const$ .

### Тема 2.2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики

Пусть имеется функциональная схема системы (рис.2.1). Требуется вывести математическое выражение для статической ошибки в системе,  $\Delta X$ .

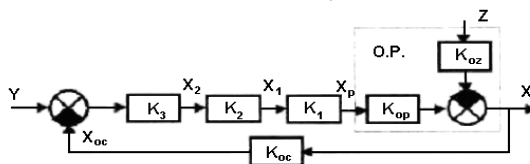


Рис. 2.1. Статическая система автоматического управления

Запишем уравнение статики для каждого элемента согласно функциональной схеме.

Для О.Р.

$$X = K_{op} X_p - K_{oz} Z.$$

Для элементов регулятора

$$\begin{cases} X_p = K_1 X_1; \\ X_1 = K_2 X_2; \\ X_2 = K_3 (Y - X_{oc}); \\ X_{oc} = K_{oc} X. \end{cases} \quad (2.1)$$

Из уравнений системы (2.1) имеем

$$X_p = K_1 K_2 K_3 (Y - K_{oc} X).$$

Подставляя  $X_p$  в уравнение О.Р., получим

$$X = K_1 K_2 K_3 K_{op} Y - K_1 K_2 K_3 K_{oc} X - K_{oz} Z. \quad (2.2)$$

В данном выражении слагаемое, содержащее «Y», умножим и разделим на  $K_{oc}$ . Выражение  $\frac{Y}{K_{oc}}$  есть заданное значение регулируемой величины  $X_{зад}$ , тогда

$$X = K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} X_{зад} - K_1 K_2 K_3 K_{oc} X - K_{oz} Z. \quad (2.3)$$

Исходя из определения признаков установившегося режима системы:

$$\Delta X = X_{зад} - X$$

или

$$X = X_{зад} - \Delta X.$$

Подставляя эти значения в (2.3), получим

$$X_{зад} - \Delta X = K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} \Delta X + K_{oz} Z,$$

тогда выражение для статической ошибки можно записать в виде

$$\Delta X = \frac{1}{1 + K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc}} \cdot X_{зад} + \frac{K_{oz}}{1 + K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc}} \cdot Z, \quad (2.4)$$

Обозначив  $K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} = K_{pc}$ , и, имея в виду, что  $X_{зад} = \frac{Y}{K_{oc}}$ , окончательно получим

$$\Delta X = \frac{1/K_{oc}}{1 + K_{pc}} \cdot Y + \frac{K_{oz}}{1 + K_{pc}} \cdot Z. \quad (2.5)$$

Здесь  $\Delta X$  – полная статическая ошибка воспроизведения сигнала в системе;  $K_{pc}$  – передаточный коэффициент системы в разомкнутом состоянии.

Из выражения (3.5) видно, что полная ошибка состоит из 2-х слагаемых, первое слагаемое  $\frac{1/K_{oc}}{1 + K_{pc}} \cdot Y$  называется собственной ошибкой воспроизведения сигнала; второе  $\frac{K_{oz}}{1 + K_{pc}} \cdot Z$  – ошибкой от возмущения.

В стабилизирующих САР, где регулируемая величина поддерживается по закону  $X = const$ , настройка осуществляется так, чтобы  $X = X_{ном}$  при  $Z = Z_{ном}$ . В этом случае собственная ошибка воспроизведения сигнала теряет свой смысл, т.к. отклонение от  $X_{ном}$  появляется только тогда, когда имеет место отклонение возмущающего воздействия от  $Z_{ном}$ . В таких системах статическая ошибка может определяться по выражению вида

$$\Delta X = \frac{K_{oz}}{1 + K_{pc}} \cdot \Delta Z. \quad (2.6)$$

По выражению (2.6) строится статическая характеристика системы (рис.2.2).

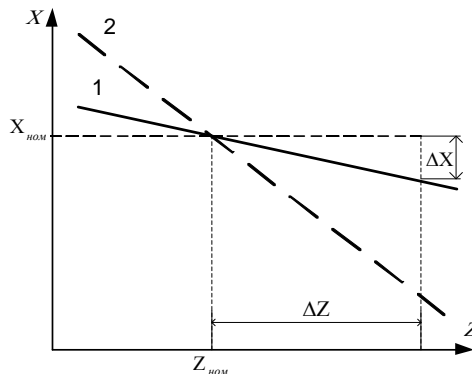


Рис.2.2. Статическая характеристика статической САР

Из выражения (2.6) вытекают основные свойства статических САР:

1) статическая ошибка в статических системах зависит от величины возмущения  $Z$ ;

2) ошибка в системе тем меньше, чем больше коэффициент системы в разомкнутом состоянии  $K_{pc}$ ;

3) при размыкании системы (обрыве обратной связи, т.е.  $K_{oc}=0$ , а значит,  $K_{pc}=0$ ) система может работать, но ошибка возрастает (характеристика 2).

### Тема 2.3. Статическая система с комбинированным регулированием

На рис. 3.3 приведена система автоматического управления с комбинированным регулированием по отклонению и по возмущению.

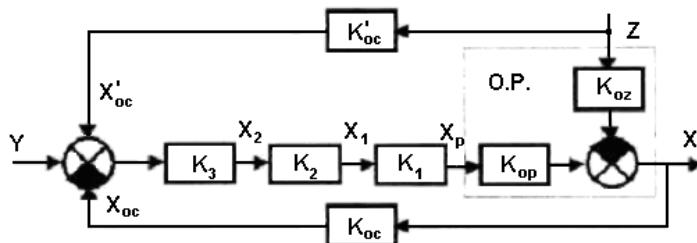


Рис. 3.3. Функциональная схема системы с комбинированным регулированием

Аналогично предыдущему случаю требуется вывести математическое выражение для статической ошибки.

Запишем уравнение элементов системы.

О.Р.  $X = K_{op} \cdot X_p - K_{oz} \cdot Z$

Элементы регулятора:

$$\begin{cases} X_p = K_1 K_2 K_3 (Y - X_{oc} + X'_{oc}) \\ X_{oc} = K_{oc} \cdot X \\ X'_{oc} = K'_{oc} \cdot Z. \end{cases}$$

Осуществляя взаимоподстановки и исключая промежуточные неизвестные, получим

$$X = K_1 K_2 K_3 K_{op} \cdot Y - K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} \cdot X + K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc} \cdot Z - K_{oz} \cdot Z.$$

Поделив и умножив слагаемое  $Y$  на  $K_{oc}$  и имея в виду, что  $\frac{Y}{K_{oc}} = X_{зад}$ ;  $X_{зад} - X = \Delta X$ ;  $X = X_{зад} - \Delta X$ , получим

$$X_{зад} - \Delta X = K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} \cdot \Delta X + (K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc} - K_{oz}) Z,$$

отсюда

$$\Delta X = \frac{1}{1 + K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc}} \cdot X_{зад} + \frac{-K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc} + K_{oz}}{1 + K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc}} \cdot Z.$$

Заменяя  $K_1 K_2 K_3 K_{op} K_{oc} = K_{pc}$  и  $X_{зад} = \frac{Y}{K_{oc}}$ , будем иметь окончательное выражение

$$\Delta X = \frac{1/K_{oc}}{1 + K_{pc}} \cdot Y + \frac{K_{oz} - K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc}}{1 + K_{pc}} \cdot Z.$$

Для стабилизирующих систем выражение для расчёта статической ошибки  $\Delta X$  будет иметь вид

$$\Delta X = \frac{K_{oz} - K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc}}{1 + K_{pc}} \cdot \Delta Z.$$

Из последнего выражения следует, что ошибка в системе зависит от возмущения  $Z$ . Однако можно подобрать такой коэффициент компенсирующей обратной связи  $K'_{oc}$ , что  $K_{oz} - K_1 K_2 K_3 K_{op} K'_{oc} = 0$ , т.е. система будет работать без ошибки. Правда, это может быть лишь при

идеально линейных характеристиках всех элементов. Реально ошибка будет полностью скомпенсирована лишь в каком-то определенном диапазоне функционирования системы.

#### Тема 2.4. Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики

Наиболее часто астатическим элементом бывает последний исполнительный элемент регулятора. Функциональная схема подобного типа системы представлена на рис.2.3. Астатический элемент описывается уравнением  $\frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} = K_a \cdot X_{\text{ВХ}}$ .

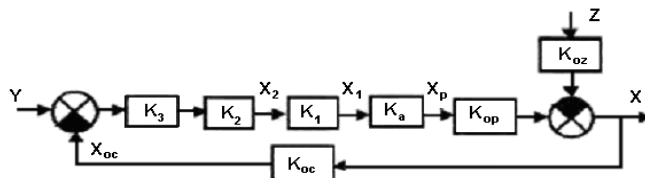


Рис.2.3. Функциональная схема астатической системы

Запишем уравнение элементов системы с учетом специфики астатического элемента:

О.Р.  $X = K_{op} X_p - K_{oz} Z$

Астатический элемент

$$\begin{cases} \frac{dX_p}{dt} = K_a \cdot X_1; \\ X_1 = K_1 K_2 K_3 (Y - X_{oc}); \\ X_{oc} = K_{oc} X. \end{cases} \quad (2.7)$$

Решая совместно два последние уравнения системы (2.7), получим

$$X_1 = K_1 K_2 K_3 Y - K_1 K_2 K_3 K_{oc} X.$$

Воспользуемся тем же искусственным приёмом, что и в предыдущих случаях: умножим и разделим слагаемое, содержащее  $Y$ , на  $K_{oc}$ .

Полагая  $\frac{Y}{K_{oc}} = X_{зад}$  и  $X_{зад} - X = \Delta X$ , получим

$$X_1 = K_1 K_2 K_3 K_{oc} \Delta X. \quad (2.8)$$

Согласно второму признаку установившегося режима системы регулирующее воздействие  $X_p = const$ , вследствие чего,  $\frac{dX_p}{dt} = 0$ . Тогда из первого уравнения системы (2.7)  $K_a X_1 = 0$ , т.е.  $X_1 = 0$ .

Из уравнения (2.8) следует:

$$K_1 K_2 K_3 K_{oc} \Delta X = 0.$$

Поскольку коэффициенты  $K_1, K_2, K_3, K_{oc}$  не могут быть равными нулю, то  $\Delta X = 0$ .

Следовательно, в астатической системе статическая ошибка  $\Delta X = 0$ . Однако это верно только для идеального астатического элемента. Реальные элементы имеют зону нечувствительности. Пусть максимальное значение величины входного сигнала астатического элемента, которую он ещё не чувствует,  $X_1 = \varepsilon$ . Тогда выражение (2.8) можно записать

$$K_1 K_2 K_3 K_{oc} \Delta X = \varepsilon$$

и ошибка системы составит

$$\Delta X = \frac{\varepsilon}{K_1 K_2 K_3 K_{oc}}. \quad (2.9)$$

Это выражение и используют для статических расчётов астатических систем. Из него вытекают следующие свойства астатических систем:

1) ошибка в системе от возмущения не зависит, а зависит только от нечувствительности астатического элемента  $\varepsilon$ ;

2) ошибка тем меньше, чем больше величины коэффициентов  $(K_1 K_2 K_3 K_{oc})$ ;

3) в разомкнутом состоянии ( $K_{oc}=0$ ) система работать не может, т.к.  $\Delta X \rightarrow \infty$ . На основании этого же выражения (2.9) можно построить статическую характеристику для астатической системы.

Зависимость будет иметь вид зоны вокруг  $X_{зад}$  с границами  $\pm \Delta X$  (рис.2.4).

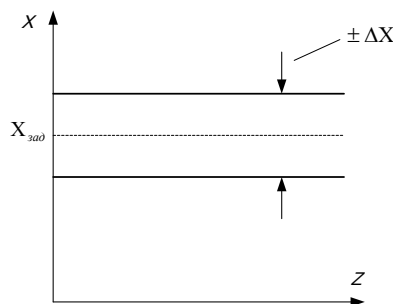


Рис. 2.4. Статическая характеристика астатической системы

### Раздел 3. Динамика линейных систем автоматического управления

#### Тема 3.1. Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы

Для исследования САУ в динамическом режиме необходимо иметь соответствующее математическое описание. В динамике системы и их составные части описываются, как правило, дифференциальными уравнениями. Уравнение системы – это математическая зависимость, связывающая три переменных:  $X$  – регулируемую (выходную) величину;  $Y$  – задающую (входную) величину;  $Z$  – возмущающее воздействие.

Если при составлении уравнения учитываются все основные факторы, то оно оказывается достаточно сложным и, как правило, нелинейным:

$$F_1(x, x', x'' \dots) = F_2(y, y', y'' \dots, z, z', z'' \dots). \quad (3.1)$$

Для упрощения работы с системами нелинейные уравнения линеаризуют или заменяют приближёнными линейными.

В основе линеаризации – положения И.А. Вышнеградского о том, что в течение всего периода регулирования имеют место лишь небольшие отклонения всех изменяющихся переменных от своего установившегося значения.

Линеаризация нелинейных функций означает графически замену кривой отрезком касательной к этой кривой в заданной точке установившегося режима.

В общем виде уравнение системы автоматического управления  $n$ -го порядка после линеаризации и (если это необходимо) приведению к безразмерной форме имеет вид:

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y + c_0 \frac{d^R z}{dt^R} + c_1 \frac{d^{R-1} z}{dt^{R-1}} + \dots + c_R z, \quad (3.2)$$

где  $\left. \begin{matrix} a_0, a_1, \dots, a_n \\ b_0, b_1, \dots, b_m \\ c_0, c_1, \dots, c_R \end{matrix} \right\}$  – постоянные коэффициенты  
 $n \geq m; n \geq R$ .

В линейных системах характер процессов не зависит, как будет показано далее, от величин возмущения,  $Z$ . Поэтому для исследования всех основных свойств систем их можно анализировать при  $Z=0$ . Тогда общий вид уравнения упрощается:

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y, \quad (3.3)$$

### Тема 3.2. Применение операторных методов в теории автоматического управления

Работа с дифференциальными уравнениями высокого порядка связана с определенными трудностями. Значительно облегчаются действия с уравнениями, если использовать операторные методы исчисления. В теории автоматического управления широкое применение нашли операторные методы Лапласа и Фурье.

Известно, что все основные операторные методы основаны на преобразовании функций времени – оригинала в функции какого-либо другого переменного – изображения.

По Лапласу функция времени преобразуется в функцию комплексного переменного, например  $Lx(t) = X(p)$ , где  $P = \sigma \pm j\psi$  – произвольное комплексное число.

Знак  $L$  является символом преобразования Лапласа. Формула прямого преобразования Лапласа имеет вид

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt. \quad (3.4)$$

Воспользовавшись этой формулой, можно найти изображения по Лапласу производных от интересующей нас функции в дифференциальных уравнениях.

Например,

$$L \frac{dx}{dt} = P \cdot X(p) - x(0) \quad (3.5)$$

$$L \frac{d^2x}{dt^2} = P^2 \cdot X(p) - P \cdot x(0) - \left. \frac{dx}{dt} \right|_0. \quad (3.6)$$

При нулевых начальных условиях

$$x(0) = 0; \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_0 = 0 \text{ и т.д.}$$

Поэтому можно записать

$$L \frac{d^k x}{dt^k} = P^k \cdot X(p). \quad (3.7)$$

Поскольку линейная система обладает определенными свойствами независимо от того, при каких начальных условиях она исследуется, то исследования обычно проводят для нулевых начальных условий.

В этом случае любое дифференциальное уравнение легко записать в операторной форме, используя формулу (3.7). Например, уравнение (3.3) в операторной форме по Лапласу будет иметь вид

$$a_0 p^n \cdot X(p) + a_1 p^{n-1} \cdot X(p) + \dots + a_n \cdot X(p) = b_0 p^m \cdot Y(p) + b_1 p^{m-1} \cdot Y(p) + \dots + b_m \cdot Y(p) \quad (3.8)$$

Таким образом, вместо дифференциального уравнения получен некий эквивалент в виде алгебраического уравнения. Кроме того, полученное выражение позволяет, по аналогии с понятием передаточного коэффициента в статике, ввести понятие **передаточной функции**.

### Тема 3.3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте

Передаточной функцией в форме преобразования Лапласа принято называть отношение изображения по Лапласу выходного сигнала к изображению входного при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)}. \quad (3.9)$$

Тогда для уравнения (3.8) обобщенной САУ можно записать

$$X(p) \cdot (a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n) = Y(p) \cdot (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)$$

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (3.10)$$

Понятие передаточной функции является важнейшим, чрезвычайно ёмким понятием в теории автоматического управления, на ней основаны многочисленные методы исследования самых разнообразных свойств систем.

Преобразование Фурье отличается от преобразования Лапласа тем, что в качестве комплексного переменного используется комплекс частоты, т.е.  $p=j\omega$ .

Таким образом, от выражений, записанных в форме преобразования Лапласа, можно перейти к выражениям, записанным в форме преобразований Фурье, путем формальной подстановки  $j\omega$  вместо  $p$ .

К примеру, уравнение 3.3. в изображении по Фурье можно получить, если взять его изображение по Лапласу (3.8) и подставить  $p=j\omega$ , т.е.:

$$a_0(j\omega)^n \cdot X(j\omega) + a_1(j\omega)^{n-1} \cdot X(j\omega) + \dots + a_n \cdot X(j\omega) = b_0(j\omega)^m \cdot Y(j\omega) + b_1(j\omega)^{m-1} \cdot Y(j\omega) + \dots + b_m \cdot Y(j\omega) \quad (3.11)$$

Подставляя  $p=j\omega$  в выражение для передаточной функции по Лапласу (3.10), можно получить ещё одно важнейшее понятие – *комплексный передаточный коэффициент*:

$$W(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_n} \quad (3.12)$$

### Тема 3.4. Понятие о переходных и частотных характеристиках

Если получить графическое изображение переходного процесса в системе, т.е.  $x=f(t)$ , то по этой кривой можно проанализировать все свойства системы. Переходный процесс может быть вызван входными воздействиями любого типа. Наиболее наглядным, идеальным переходным процессом будет зависимость  $x=f(t)$ , вызванная единичным ступенчатым воздействием на входе системы. Это сигнал ступенчатого типа (рис.3.1), величина ступени которого может быть принята за условную единицу ( $U=1$ ).

Кривая  $x=f(t)$ , вызванная единичной ступенчатой функцией на входе системы, получила название переходной характеристики.

Если имеется идеальная система и возможно её экспериментальное исследование, то переходную характеристику можно получить экспериментально. Для этого на вход системы подают сигнал в виде единичной ступенчатой функции, а на выходе регистрируют зависимость  $x=f(t)$  (рис.3.2)

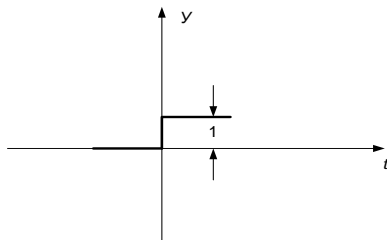


Рис.3.1. Единичная ступенчатая функция

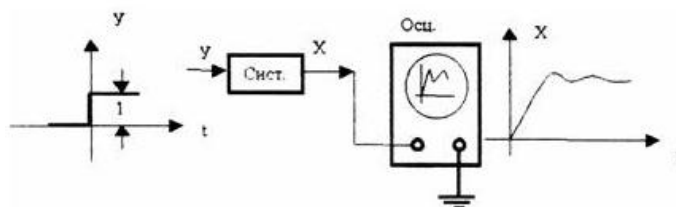


Рис.3.2. Снятие переходной характеристики

Если исходной системы нет или эксперимент невозможен, но есть математическое описание системы – уравнение, то переходную характеристику можно получить аналитически. Это есть графическое изображение решения дифференциального уравнения при  $U=1$ . Однако экспериментальное получение переходной характеристики не всегда возможно, а аналитическое – затруднительно, т.к. приходится решать дифференциальное уравнение высокого по-

рядка. Поэтому весьма распространены методы исследования свойств систем на основании частотных характеристик.

Физический смысл частотных характеристик – это различные аспекты реакции системы на синусоидальные входные сигналы различной частоты. Аналитически все основные частотные характеристики получаются из выражения для комплексного передаточного коэффициента  $W(j\omega)$  вида (3.12), содержащего частоту  $\omega$ .

Поскольку  $W(j\omega)$  есть комплексное число, то, согласно известным математическим правилам его можно записать в алгебраической показательной форме:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = R(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3.13)$$

где  $U(\omega)$  – вещественная частотная характеристика (в.ч.х.);

$V(\omega)$  – мнимая частотная характеристика (м.ч.х.);

$R(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$  – амплитудно-частотная характеристика (а.ч.х.);

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$  – фазово-частотная характеристика (ф.ч.х.).

Любое комплексное число есть вектор, который можно изобразить в комплексной плоскости. При изменении частоты от 0 до  $\infty$  вектор  $W(j\omega)$  будет описывать кривую, которая получила название амплитудно-фазовой характеристики (рис. 3.3)

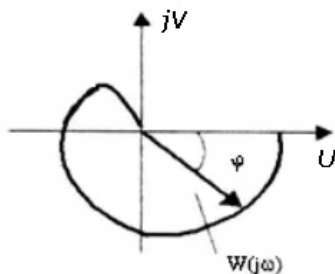


Рис. 3.3. Амплитудно-фазовая характеристика (а.ф.х.)

В практике построения частотных характеристик частота может меняться в очень широких пределах, поэтому линейные шкалы частот не всегда удобны. В связи с этим получили широкое применение логарифмические частотные характеристики. Известны логарифмическая амплитудно-частотная и логарифмическая фазово-частотная характеристики. При построении логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) по вертикальной оси откладывается  $R$  в децибеллах ( $20 \lg R$ ). Горизонтальная ось содержит частоту, отложенную по логарифмической шкале ( $\omega, \text{с}^{-1}$ ). Логарифмическая фазово-частотная характеристика – это зависимость  $\varphi(\omega)$ , где угол (фаза) откладывается в градусах или радианах, а частота опять-таки по логарифмической шкале (рис. 3.4).

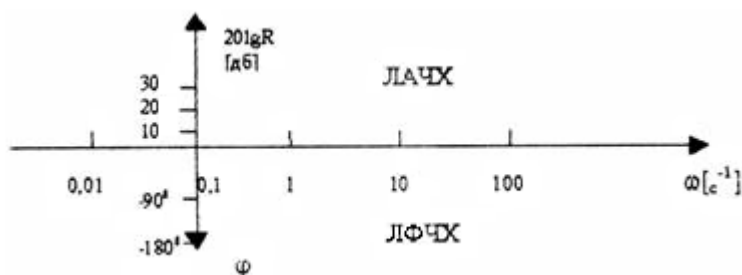


Рис.3.4. Система осей для построения логарифмических характеристик

Таким образом, из одного и того же выражения для комплексного передаточного коэффициента  $W(j\omega)$  получается семь основных частотных характеристик.

- вещественная частотная характеристика (в.ч.х.);
- мнимая частотная характеристика (м.ч.х.);
- амплитудно-частотная характеристика (а.ч.х.);
- фазово-частотная характеристика (ф.ч.х.);
- амплитудно-фазовая характеристика (а.ф.х.);



- логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ);
- логарифмическая фазово-частотная характеристика (ЛФЧХ).

### Тема 3.5. Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления

В статике использовалось понятие функциональной схемы, состоящей из *элементов*, а в динамике – структурной схемы. Структурные схемы графически напоминают функциональные, но состоят из *звеньев*. Звено – это часть системы, определенным образом относящаяся к переходному процессу, т.е. устройство, описываемое определенным видом уравнения (дифференциальным) или передаточной функцией. Следовательно, если элемент – понятие физическое, то звено – понятие математическое (рис. 3.5).

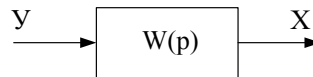


Рис.3.5. Звено системы

Структурные схемы так же, как и функциональные, могут преобразовываться к другому виду, посредством обобщенных передаточных функций. Все правила преобразования ничем не отличаются от тех, что использовались для функциональных схем. Однако в этом случае мы имеем дело уже не с передаточными коэффициентами, а с передаточными функциями –  $W(p)$ . По виду уравнений (передаточных функций) различают пять основных (типовых) звеньев, из которых могут состоять системы автоматического управления: безынерционное звено; апериодическое звено 1 порядка; апериодическое звено 2 порядка; дифференцирующее звено; интегрирующее звено; особые звенья.

#### 3.5.1. Безынерционное звено

Это звено как в статике, так и в динамике описывается одинаково, простейшим уравнением

$$x = k \cdot y. \quad (3.14)$$

Если на вход звена подать единичную ступенчатую функцию, то согласно уравнению (3.14) на выходе сформируется сигнал аналогичный входному, но усиленный в  $k$  раз (рис. 3.6).

Для того чтобы получить частотные характеристики, необходимо записать уравнение в операторной форме:

$$X(p) = k \cdot Y(p);$$

Также записать передаточную функцию

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = k;$$

и комплексный передаточный коэффициент

$$W(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = k \quad (3.15).$$

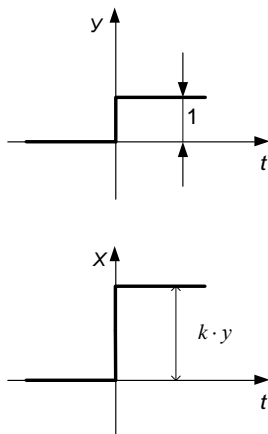


Рис. 3.6. Переходная характеристика безынерционного звена

Из выражения (3.15) и получают все частотные характеристики:

$$W(j\omega) = k + j0 = Re^{j\varphi}$$

$$R = \sqrt{k^2 + 0^2} - \text{а.ч.х.}$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{0}{k} = 0 - \text{ф.ч.х.}$$

На рисунке (3.7) изображены а.ч.х. (а) и ф.ч.х.(б).

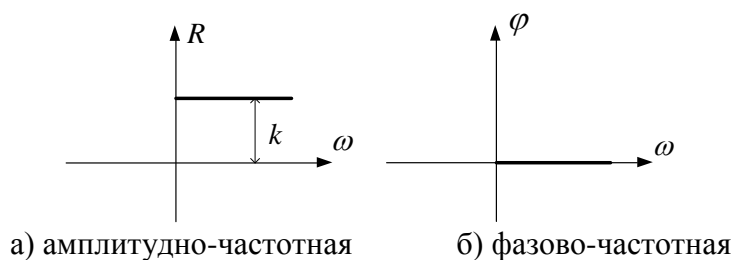


Рис.3.7. Частотные характеристики

Из выражений для  $R$  и  $\varphi$  ясно, что а.ф.х. будет иметь вид точки в комплексной плоскости (рис.3.8).

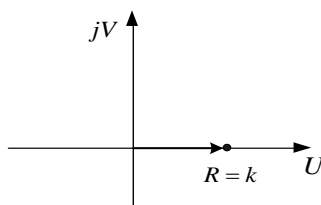


Рис. 3.8. Амплитудно-фазовая характеристика

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика, т.е. зависимость  $20\lg R=f(\omega)$  в такой записи очень проста в построении.  $20\lg R=20\lg k$ , отсюда характеристика имеет вид, представленный на рис.3.9.

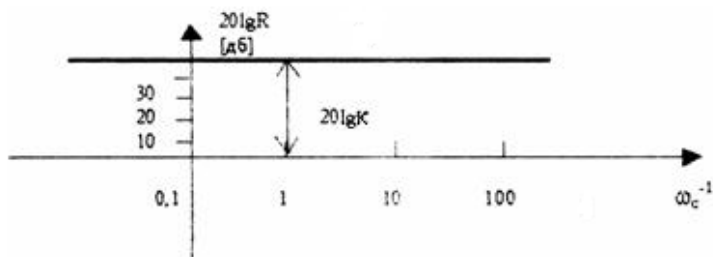


Рис. 4.9. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Примерами безынерционного звена могут быть: жесткий механический рычаг, потенциометр, полупроводниковый усилитель.

### 3.5.2. Аperiodическое звено 1 порядка

Это одно из самых распространенных звеньев описывается уравнением

$$T \frac{dx}{dt} + x = k \cdot y, \quad (3.16)$$

где  $T$  – постоянная времени;  $k$  – передаточный коэффициент.

Переходная характеристика – это графическое изображение решения данного уравнения при  $y=1$ :

$$x = k \cdot y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (3.17)$$

Данная кривая – это экспонента (рис. 3.10).

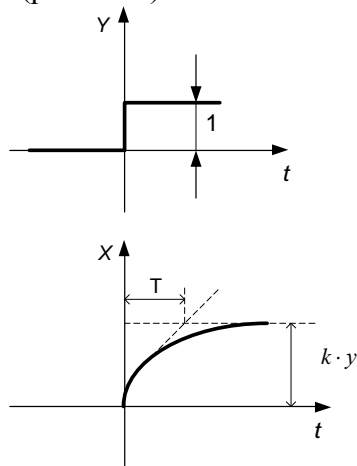


Рис. 3.10. Переходная характеристика аperiodического звена

Для получения частотных характеристик необходимо уравнение (3.16) записать в операторной форме:

$$T \cdot P \cdot X(p) + X(p) = k \cdot Y(p),$$

получить передаточную функцию

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{k}{T \cdot P + 1}, \quad (3.18)$$

комплексный передаточный коэффициент

$$W(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = \frac{k}{j\omega \cdot T + 1}. \quad (3.19)$$

Для того чтобы представить это комплексное число в алгебраической форме, необходимо числитель и знаменатель умножить на выражение, сопряженное знаменателю:

$$W(j\omega) = \frac{k(1 - j\omega T)}{(1 + j\omega T)(1 - j\omega T)} = \frac{k}{1 + \omega^2 T^2} - j \frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2};$$

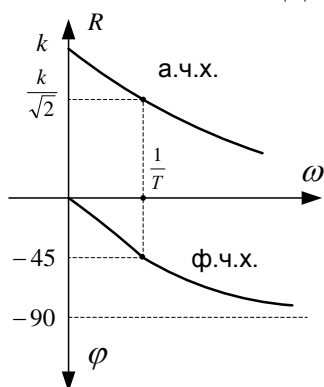
$$U(\omega) = \frac{k}{1 + \omega^2 T^2} \text{ – вещественная частотная характеристика.}$$

$$V(\omega) = -\frac{k\omega T}{1 + \omega^2 T^2}; \text{ – мнимая частотная характеристика}$$

$$R = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{\frac{k^2 + k^2 \omega^2 T^2}{(1 + \omega^2 T^2)^2}} = \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \text{ – а.ч.х.} \quad (3.20)$$

$$\varphi = \arctg \frac{V}{U} = \arctg(-\omega T) = -\arctg(\omega T) \text{ – ф.ч.х.} \quad (3.21)$$

Данные расчётов



$\omega$	R	$\varphi$
0	K	0
$\frac{1}{T}$	$\frac{k}{\sqrt{2}}$	$-45^\circ$
$\infty$	0	$-90^\circ$

Рис. 3.11. Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики

Амплитудно-фазовую характеристику в комплексной плоскости можно построить на основании а.ч.х. и ф.ч.х., приведенных выше. На рис. 3.12 приведена а.ф.х., представляющую собой полуокружность диаметром  $k$ .

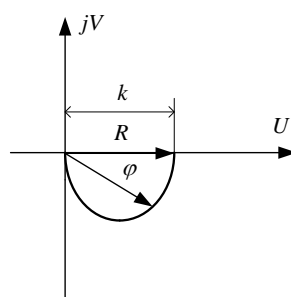


Рис.3.12. Амплитудно-фазовая характеристика

Логарифмическую амплитудно-частотную характеристику можно построить из выражения

$$20 \lg R = 20 \lg \frac{k}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}} = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2}, \quad (3.21)$$

подставляя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$ . Однако, эту характеристику обычно строят не по точкам, а упрощенно. Для этого задаются следующими условиями:

- 1)  $\omega \ll \frac{1}{T}$ ; тогда  $\omega^2 T^2 \ll 1$ ;  $20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \approx 0$  и выражение для 1-го участка характеристики  $20 \lg R = 20 \lg k$  – (горизонтальная линия);
- 2)  $\omega \gg \frac{1}{T}$ ; тогда  $\omega^2 T^2 \gg 1$ ;  $20 \lg \sqrt{1 + \omega^2 T^2} \approx 20 \lg \omega T$  выражение для 2-го участка характеристики

$$20 \lg R = 20 \lg k - 20 \lg \omega T \text{ – (наклонная прямая).} \quad (3.22)$$

Особенность 2-го участка такова, что величина наклона независимо от параметров данного звена будет одинаковой. Для определения наклона характеристики вычислим изменение амплитуды характеристики на участке при изменении частоты в 10 раз (на одну декаду):

$$\Delta = (20 \lg k - 20 \lg \omega T) - (20 \lg k - 20 \lg 10 \omega T) = 20 \lg k - 20 \lg \omega T - (-20 \lg k + 20 \lg \omega T + 20 \lg 10) = 20 \delta \text{б.}$$

Итак, для любого звена 1-го порядка высокочастотный участок имеет наклон  $20 \text{ дБ/дек}$ . Допущением является то, что характеристика изображается не плавной, а в виде двух отрезков, точка сопряжения соответствует  $\omega = \frac{1}{T}$  (рис. 3.13).

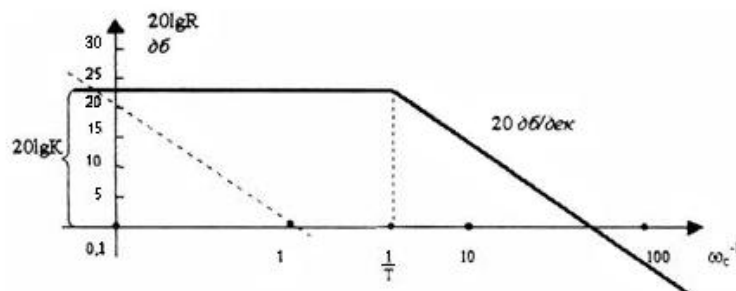


Рис.3.13. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика аperiodического звена 1-го порядка

В качестве примеров звена 1-го порядка можно привести пассивные четырехполюсники, состоящие из сопротивления и индуктивности, сопротивления и ёмкости; термоду; при определенных допущениях – магнитный усилитель; генераторы постоянного и переменного тока.

### 3.5.3. Интегрирующее звено

Уравнение интегрирующего звена имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = K_a \cdot y \quad (3.23)$$

или

$$x = K_a \int_0^t y \cdot dt, \quad (3.24)$$

где  $K_a$  – постоянный коэффициент.

Из формулы (3.24) непосредственно вытекает вид переходной характеристики.

При  $y=1$

$$x = K_a \int_0^t 1 \cdot dt = K_a \cdot t, \quad (3.25)$$

т.е. линейно нарастающая зависимость под углом  $\alpha = \arctg K_a$  (рис. 3.14).

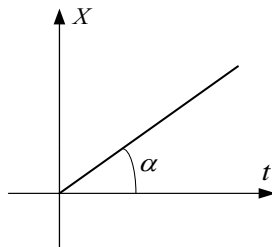


Рис. 3.14. Переходная характеристика интегрирующего звена

Для получения частотных характеристик необходимо записать выражение (3.23) в операторной форме:

$$p X(p) = K_a Y(p),$$

и получить передаточную функцию,  $W(p)$ :

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{K_a}{P}, \quad (3.26)$$

Подставив  $P=j\omega$ , рассчитаем комплексный передаточный коэффициент,  $W(j\omega)$

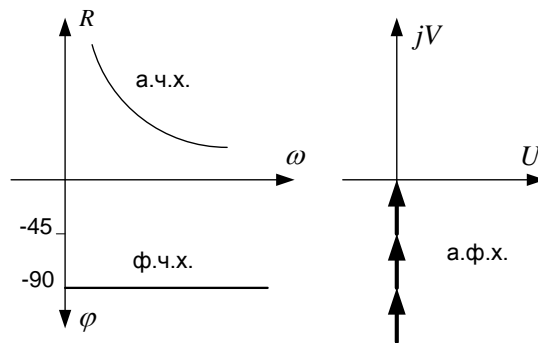
$$W(j\omega) = \frac{K_a}{j\omega} = 0 - j \frac{K_a}{\omega}.$$

Тогда

$$R = \sqrt{0^2 + \frac{K_a^2}{\omega^2}} = \frac{K_a}{\omega} \text{ — а.ч.х.} \quad (3.27)$$

$$\varphi = \arctg \left( \frac{-\frac{K_a}{\omega}}{0} \right) = -\arctg \infty = -90^\circ \text{ — ф.ч.х.} \quad (3.28)$$

Амплитудно-фазовая характеристика получается из анализа выражений  $R$  и  $\varphi$  и совпадает с мнимой отрицательной полуосью комплексной плоскости. На рис. 3.15 изображены соответствующие характеристики.



а) амплитудно- и фазово-частотная б) амплитудно-фазовая  
Рис. 3.15. Частотные характеристики интегрирующего звена

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика строится из выражения

$$20 \lg R = 20 \lg K_a - 20 \lg \omega. \quad (3.29)$$

Это выражение аналогично (3.22), т.е. прямая имеет наклон  $20 \text{ дб/дек}$  (рис. 3.16).

Из выражения (3.29) видно, что при  $\omega=1$   $20 \lg R = 20 \lg K$ , т.е. прямая пройдет через точку с координатами  $\omega=1$ ;  $20 \lg R = 20 \lg K$  с наклоном  $20 \text{ дб/дек}$ .

Примерами интегрирующего звена являются электрический двигатель, если входным сигналом считать напряжение на якоре, а выходным – угол поворота якоря, операционный усилитель с ёмкостной обратной связью.

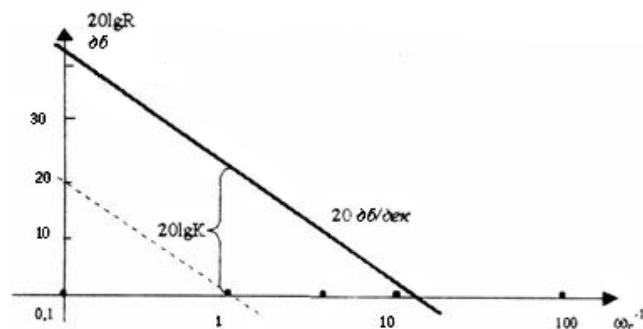


Рис. 3.16. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

### 3.5.4. Дифференцирующие звенья

Различают три вида дифференцирующих звеньев со следующими уравнениями

$$x = K_o \cdot \frac{dy}{dt} \text{ — идеальное дифференцирующее звено,} \quad (3.30)$$

$$T \frac{dx}{dt} + x = K_o \cdot \frac{dy}{dt} \text{ — реальное дифференцирующее звено,} \quad (3.31)$$

$$T \frac{dx}{dt} + x = K_{\delta} \cdot \frac{dy}{dt} + K \cdot y - \text{реальное дифференцирующее звено со статизмом}, \quad (3.32)$$

где  $K_{\delta}$  – коэффициент пропорциональности;  $K$  – передаточный коэффициент;  $T$  – постоянная времени.

Графические изображения решений этих уравнений при подаче на вход единичной ступенчатой функции ( $y=1$ ) приведены на рис. 3.17 а, б, в.

Ниже приведены выражения и частотные характеристики только для идеального дифференцирующего звена. Для остальных двух типов звеньев студентам рекомендуется вывести выражения и построить соответствующие характеристики самостоятельно.

Исходя из уравнения (3.30), можно записать

$$X(p) = K_{\delta} \cdot p \cdot Y(p),$$

и определить передаточные функции

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = K_{\delta} \cdot p, \quad (3.33)$$

$$W(j\omega) = jK_{\delta} \cdot \omega = 0 + jK_{\delta} \cdot \omega,$$

$$R = \sqrt{0^2 + K_{\delta}^2 \omega^2} = K_{\delta} \cdot \omega, - \text{ а.ч.х.} \quad (3.34)$$

$$\varphi = \text{arctg} \frac{V}{U} = \text{arctg} \infty = +90^{\circ} - \text{ ф.ч.х.} \quad (3.35)$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика идеального дифференцирующего звена может быть построена из выражения

$$20 \lg R = 20 \lg K_{\delta} + 20 \lg \omega. \quad (3.36)$$

Выражение (3.36) аналогично формуле (3.29), только второе слагаемое здесь не со знаком (“–”), а со знаком (“+”). Это означает, что характеристика – это прямая линия, имеющая наклон  $20 \text{ дб/дек}$ , но в обратную сторону по сравнению с обычным наклоном ЛАЧХ (рис. 3.19).

При  $\omega=1$ ,  $20 \lg R = 20 \lg K_{\delta}$ , т.е. характеристика проходит через точку  $\omega=1$ ;  $20 \lg R = 20 \lg K_{\delta}$ .

Примером реального дифференцирующего звена является трансформатор. Звено, близкое к идеальному, можно набрать на операционном усилителе с соответствующим включением дополнительных элементов.

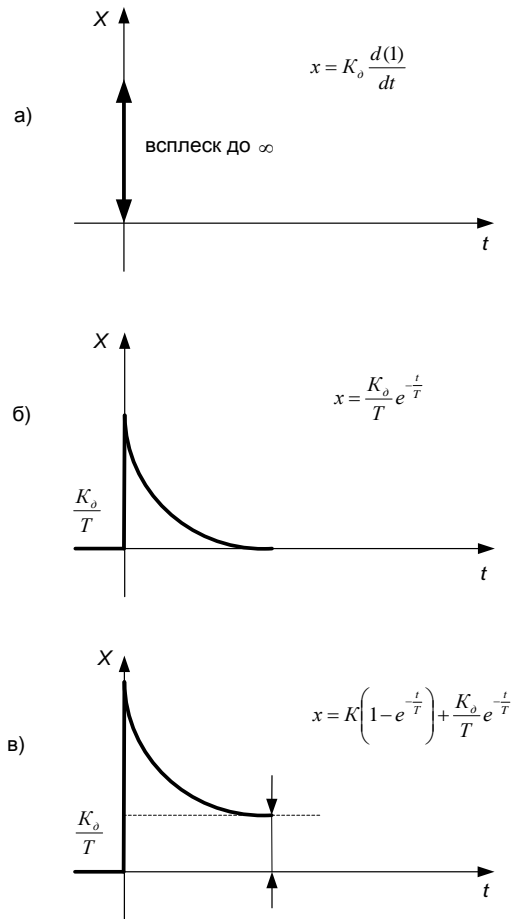
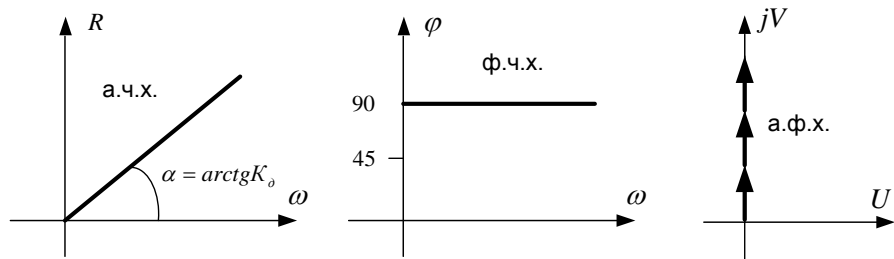


Рис. 3.17. Переходные характеристики дифференцирующих звеньев



а) амплитудно-частотная б) фазово-частотная в) амплитудно-фазовая

Рис. 3.18. Частотные характеристики идеального дифференцирующего звена

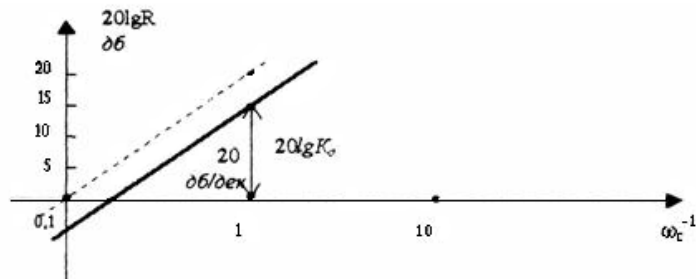


Рис. 3.19. ЛАЧХ идеального дифференцирующего звена

### 3.5.5. Аperiodическое (колебательное) звено 2-го порядка

Уравнение этого звена имеет вид

$$T^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\rho \cdot T \frac{dx}{dt} + x = k \cdot y, \quad (3.37)$$



где  $T$  – постоянная времени;  $\rho$  – коэффициент затухания;  $k$  – передаточный коэффициент.

Характер переходного процесса в звене зависит от вида корней характеристического уравнения.

1. Если корни  $p_1, p_2$  вещественные, то в этом случае  $\rho \geq 1$ , переходный процесс апериодический и звено называют апериодическим (рис.3.20,а).

2. Если корни  $p_1, p_2$  комплексные, тогда  $\rho < 1$ , переходный процесс в звене колебательный и звено называют колебательным (рис.3.20,б).

3. Если корни  $p_1, p_2$  чисто мнимые,  $\rho = 0$ , то переходный процесс представляет собой реализацию незатухающих колебаний, звено называют консервативным (рис.3.20, в).

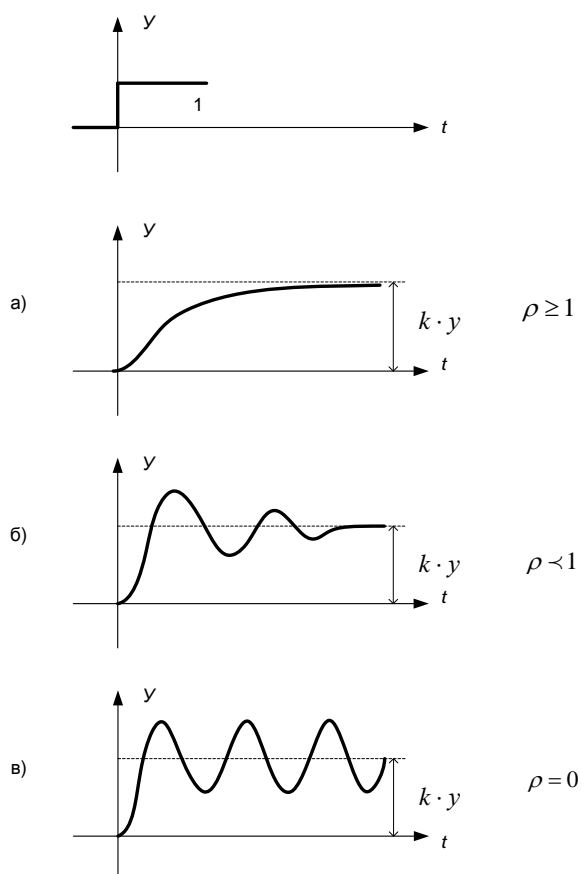


Рис. 3.20. Переходные характеристики апериодического звена 2-го порядка

Для построения частотных характеристик уравнение звена (3.37) необходимо записать в операторной форме

$$T^2 P^2 X(p) + 2\rho \cdot T \cdot P \cdot X(p) + X(p) = k \cdot Y(p),$$

Определив передаточную функцию,  $W(p)$

$$W(p) = \frac{k}{T^2 P^2 + 2\rho T P + 1}; \quad (3.38)$$

и комплексный передаточный коэффициент,  $W(j\omega)$

$$W(j\omega) = \frac{k}{-T^2 \omega^2 + j2\rho T \omega + 1}, \quad (3.39)$$

можно найти основные частотные характеристики.

Умножим и разделим  $W(j\omega)$  на выражение, сопряженное знаменателю:

$$W(j\omega) = \frac{k[(1-T^2\omega^2) - j2\rho T\omega]}{[(1-T^2\omega^2) + j2\rho T\omega] \cdot [(1-T^2\omega^2) - j2\rho T\omega]} = \quad (3.40)$$

$$= \frac{k(1-T^2\omega^2)}{(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2} - j \frac{2k \cdot \rho \cdot T \cdot \omega}{(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2}$$

Первое слагаемое выражения –  $U(\omega)$  – вещественная частотная характеристика; второе слагаемое –  $V(\omega)$  – мнимая частотная характеристика

$$R = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{\frac{k^2(1-T^2\omega^2)^2 + 4k^2\rho^2 T^2 \omega^2}{[(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2]^2}} = \quad \text{- а.ч.х. (3.41)}$$

$$= \frac{\sqrt{k^2[(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2]}}{\sqrt{[(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2]^2}} = \frac{k}{\sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2}}$$

$$\varphi = \arctg \frac{V}{U} = \arctg \left( -\frac{2\rho T\omega}{1-T^2\omega^2} \right) = -\arctg \frac{2\rho T\omega}{1-T^2\omega^2} \quad \text{- ф.ч.х. (3.42)}$$

Последние две характеристики изображены на рис. 3.21.

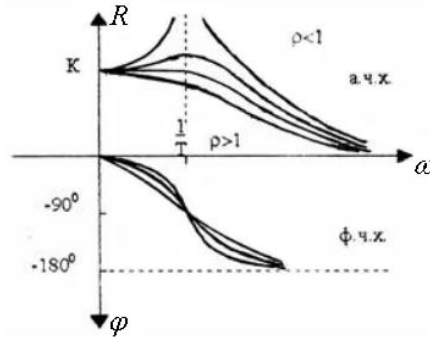


Рис. 3.21. Частотные характеристики аperiodического звена 2-го порядка

На рис. 3.22 изображены амплитудно-фазовые характеристики звена 2-го порядка, т.е. кривые, описываемые вектором  $W(j\omega)$  в комплексной плоскости при изменении частоты от 0 до  $\infty$ .

ЛАЧХ звена 2-го порядка получается на основании выражения 3.41:

$$20 \lg R = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{(1-T^2\omega^2)^2 + 4\rho^2 T^2 \omega^2} \quad (3.43)$$

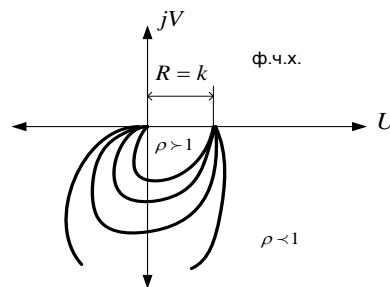


Рис. 3.22. Амплитудно-фазовые характеристики звена 2 порядка

В упрощённом (асимптотическом) варианте эту характеристику можно построить состоящей из двух отрезков (аналогично звену 1-го порядка).

Первый, низкочастотный, участок ( $\omega \ll \frac{1}{T}$ ) получается из (3.44) как  $20 \lg R \approx 20 \lg k$ , т.к.

под корнем второго слагаемого получится величина, близкая к 1, т.е.  $20 \lg \sqrt{1} \approx 0$ . Таким образом, первый участок кривой – горизонтальная прямая с амплитудой  $20 \lg k$ .

Второй участок при высоких частотах ( $\omega \gg \frac{1}{T}$ ) можно описать следующим приближенным выражением

$$20 \lg R \approx 20 \lg k - 20 \lg T^2 \omega^2.$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика в упрощенном изображении (асимптотическая) показана на рис. 3.23.

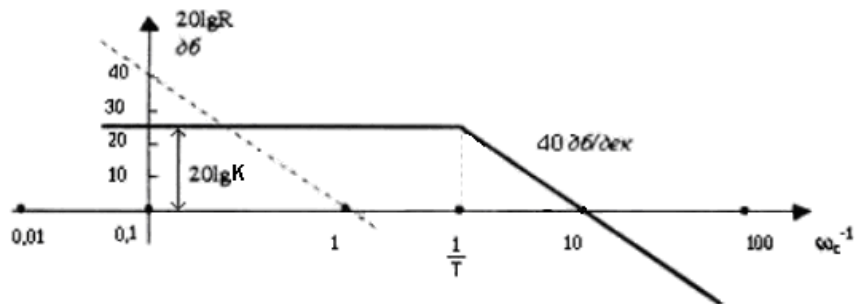


Рис. 3.23. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

Асимптотическая характеристика ЛАЧХ получается достаточно точной в пределах  $0,4 < \rho < 0,6$ . При других значениях  $\rho$  рекомендуется строить ЛАЧХ в виде плавной кривой в соответствии с выражением (3.43).

Примерами звеньев 2-го порядка могут служить: контур, содержащий R, L и C; электромашинный усилитель; электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если за входной сигнал принять напряжение на якоре, а выходным – частоту вращения якоря.

### Тема 3.6. Особые звенья в системах автоматического управления.

Помимо типовых звеньев, рассмотренных выше, в САУ встречаются несколько так называемых особых звеньев.

#### 1. Неминимально-фазовое устойчивое звено 1 порядка.

Уравнение динамики данного звена имеет вид

$$T \frac{dx}{dt} + x = k \left( y - T_0 \frac{dy}{dt} \right). \quad (3.45)$$

Решением уравнения является выражение

$$x = k \cdot y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) - \frac{kT_0}{T} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3.46)$$

отсюда переходная характеристика такого звена имеет вид (рис.3.24).

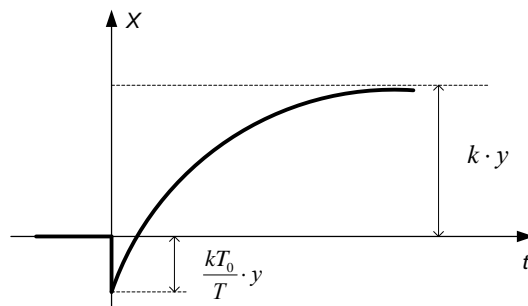


Рис. 3.24. Переходная характеристика

Записав уравнение (3.45) в операторной форме

$$T \cdot p \cdot X(p) + X(p) = k \cdot Y(p) - k \cdot T_0 \cdot p \cdot Y(p),$$

можно записать передаточную функцию следующим образом

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{k(1 - T_0 P)}{1 + TP}. \quad (3.47)$$

Из передаточной функции можно получить все необходимые частотные характеристики.

### 2. Звено с запаздыванием.

На практике встречаются устройства, в которых выходной сигнал появляется через некоторое время после возникновения входного сигнала. Такими устройствами, например, являются длинные линии, транспортеры, трубопроводы. Все они имеют так называемое транспортное запаздывание.

Обычно рассматриваются звенья с  $k=1$ . Уравнение такого звена имеет вид

$$x = 1 \cdot y(t - \tau), \quad (3.48)$$

где  $\tau$  - время запаздывания.

Передаточная функция звена с запаздыванием может быть представлена следующим выражением

$$W(p) = e^{-p\tau}. \quad (3.49)$$

Из передаточной функции по обычным правилам можно получить все частотные характеристики.

### 3. Неустойчивые звенья.

Если характеристическое уравнение звена имеет корни с положительной вещественной частью, то такое звено является неустойчивым.

Неустойчивые звенья имеют уравнения

$$T \frac{dx}{dt} - x = k \cdot y, \quad (3.50)$$

$$T^2 \frac{d^2x}{dt^2} + 2\rho T \frac{dx}{dt} - x = k \cdot y,$$

$$T^2 \frac{d^2x}{dt^2} - 2\rho T \frac{dx}{dt} + x = k \cdot y, \quad (3.51)$$

$$T^2 \frac{d^2x}{dt^2} - 2\rho T \frac{dx}{dt} - x = k \cdot y.$$

Неустойчивые звенья неработоспособны и получают, как правило, в результате расстройки обычных устойчивых звеньев.

## Тема 3.7. Частотные характеристики систем

В практике расчётов САР приходится строить частотные характеристики не только отдельных звеньев, но и систем в целом. Особенно часто возникает необходимость получения характеристик систем в разомкнутом состоянии. Пусть имеется разомкнутая система (рис. 3.25).

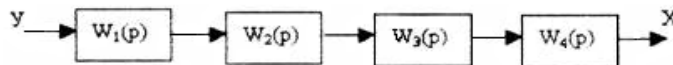


Рис. 3.25. Разомкнутая система

Передаточная функция этой системы может быть получена как произведение передаточных функций отдельных звеньев:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p). \quad (3.52)$$

Комплексный передаточный коэффициент соответственно равен

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) \cdot W_2(j\omega) \cdot W_3(j\omega) \cdot W_4(j\omega) \quad (3.53)$$

$$R_p e^{j\varphi_p} = R_1 e^{j\varphi_1} \cdot R_2 e^{j\varphi_2} \cdot R_3 e^{j\varphi_3} \cdot R_4 e^{j\varphi_4} = R_1 R_2 R_3 R_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)} \quad (3.54)$$

То есть

$$R_p = R_1 R_2 R_3 R_4 - \text{а.ч.х.} \quad (3.55)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 - \text{ф.ч.х.} \quad (3.56)$$

Согласно выражению (3.55), значительно упрощается построение характеристик ЛАЧХ

$$20\lg R_p = 20\lg R_1 + 20\lg R_2 + 20\lg R_3 + 20\lg R_4. \quad (3.57)$$

Таким образом, ЛАЧХ разомкнутой системы получается как геометрическая сумма ЛАЧХ отдельных, последовательно соединенных звеньев. Более того, поскольку ЛАЧХ обычно строятся упрощенно (асимптотически), суммарную ЛАЧХ разомкнутой системы можно построить непосредственно по передаточной функции. Например, дана передаточная функция для четырех последовательно соединенных звеньев 1-го порядка:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (3.58)$$

В этом случае необходимо определить  $20\lg K_p$ , что является амплитуда низкочастотного горизонтального участка ЛАЧХ. Затем необходимо рассчитать частоты сопряжений  $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$ ;  $\omega_2 = \frac{1}{T_2}$ ;  $\omega_3 = \frac{1}{T_3}$ ;  $\omega_4 = \frac{1}{T_4}$ . Каждая последующая частота сопряжений обеспечивает излом характеристики, увеличивая её наклон на  $20 \text{ дБ/дек}$ . ЛАЧХ такой системы показана на рис.3.26.

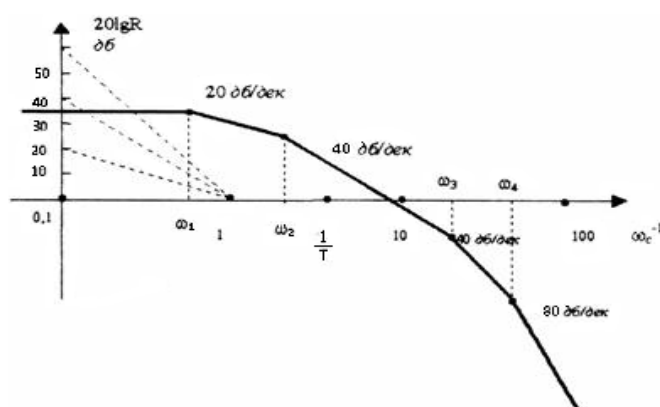


Рис.3.26. ЛАЧХ для системы последовательно соединенных звеньев 1-го порядка

### Тема 3.8. Устойчивость систем автоматического управления

#### 3.8.1. Общие сведения об устойчивости

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

*Система автоматического регулирования 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.*

*Система автоматического регулирования 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 неустойчива, если  $x(t) \rightarrow \infty$ .

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

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

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y.$$

Решение этого дифференциального уравнения, согласно правилам математики, состоит из свободной и вынужденной составляющих:  $x(t) = x_{св}(t) + x_{вын}(t)$  (рис. 3.27).

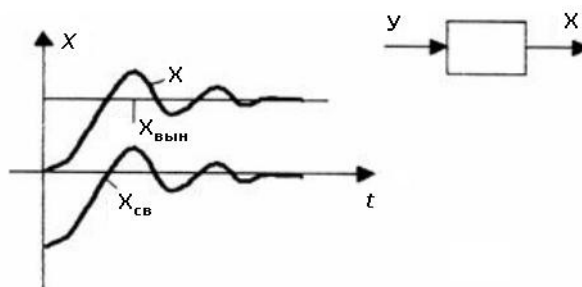


Рис. 3.27. Переходный процесс системы и его составляющие

$x_{вын} = \frac{b_m}{a_n} \cdot y$  – реакция на внешнее воздействие –  $y$ ;  $x_{св}$  – определяется параметрами звеньев, входящих в состав системы, и является решением уравнения без правой части.

Поскольку внешнее воздействие  $y$  не может быть бесконечно большим, то и  $x_{вын}$  не может стремиться к  $\infty$ , т.е. не может быть причиной неустойчивости системы. И если система все же неустойчива, то причиной тому может быть только  $x_{св}$ , т.е. параметры самой системы.

Из сказанного следует: для того чтобы проанализировать систему на устойчивость, достаточно получить  $x_{св}$ , т.е. решить уравнение без правой части:

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = 0. \quad (3.59)$$

Если  $x_{св} \rightarrow 0$ , то система устойчива, если  $x_{св} \rightarrow \infty$ , система неустойчива.

### 3.8.2. Исследование устойчивости по корням характеристического уравнения системы

Из предыдущего параграфа следует, что суждение об устойчивости линейной системы можно вынести на основании решения дифференциального уравнения системы без правой части –  $x_{св}$ . Из математики известно, что свободная составляющая может быть найдена в следующем виде:

$$x_{св} = c_1 e^{P_1 t} + c_2 e^{P_2 t} + c_3 e^{P_3 t} + \dots + c_n e^{P_n t}, \quad (3.60)$$

где  $c_1, c_2, c_3 \dots c_n$  – постоянные интегрирования;  $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$  – корни характеристического уравнения системы.

Из (3.60) видно, что  $x_{св} \rightarrow 0$  в том случае, если корни характеристического уравнения отрицательны. Математика даёт более общий случай,  $x_{св} \rightarrow 0$ , если среди корней характеристического уравнения нет ни одного с положительной вещественной частью (считается, что в общем случае корни комплексные).

Таким образом, для того, чтобы вынести суждение об устойчивости САУ, достаточно решить характеристическое уравнение этой системы и определить вид его корней.

*САУ будет устойчива, т.е. переходный процесс в ней будет сходящимся, если среди корней характеристического уравнения системы не окажется ни одного с положительной вещественной частью.*

Если рассматривать комплексную плоскость корней характеристического уравнения типа  $P_i = \pm \alpha \pm j\beta$ , то область, расположенная левее мнимой оси будет являться областью устойчивой работы системы (рис.3.28).

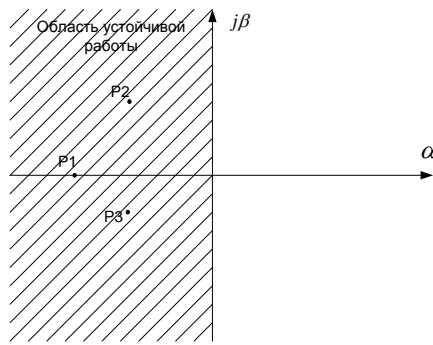


Рис. 3.28. Плоскость корней характеристического уравнения системы

Таким образом, если определены корни характеристического уравнения, то вопрос об устойчивости можно считать решённым. Однако для системы высокого порядка решение даже алгебраического характеристического уравнения может вызвать определенные трудности. Поэтому разработаны способы оценки устойчивости без решения характеристического уравнения. Это так называемые критерии устойчивости.

Различают две группы критериев:

- 1) алгебраические;
- 2) геометрические (частотные).

### 3.8.3. Алгебраические критерии устойчивости

Наиболее известны критерии Рауса, Неймарка, Гурвица. Все они основаны на том, что методами высшей алгебры (определители, матрицы) определяются условия, при которых корни характеристического многочлена системы отрицательны (имеют отрицательную вещественную часть), т.е. система устойчива.

Ниже рассматривается наиболее распространённый алгебраический критерий – критерий Гурвица.

Формулировка критерия:

*Для того чтобы все корни характеристического уравнения системы имели отрицательную вещественную часть, т.е. система была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы при  $a_0 > 0$  главный определитель характеристического многочлена и его диагональные миноры были больше 0.*

Имеем уравнение системы (достаточно без правой части)

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = 0.$$

Характеристическое уравнение

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

Главный определитель имеет n-строк и n-столбцов. По главной диагонали записываются коэффициенты от  $a_1$  до  $a_n$ . Выше коэффициентов, записанных по главной диагонали, записываются коэффициенты на порядок выше, ниже – коэффициенты на порядок ниже.

Выше  $a_n$  записываются 0, ниже коэффициента  $a_0$  также записываются 0.

Тогда главный определитель будет иметь вид

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & & 0 \\ & a_0 & a_2 & a_4 & \\ 0 & a_1 & a_3 & & 0 \\ 0 & a_0 & & \ddots & 0 \\ 0 & & & & a_n \end{vmatrix} > 0. \quad (3.61)$$

Диагональные миноры получаются последовательным вычеркиванием последнего столбца и последней строки, начиная с главного определителя.

Таким образом, зачеркнув последнюю строку и столбец в главном определителе, получим

$$\Delta_{n-1} = |\cdot| > 0,$$

который также должен быть больше 0 и т.д. вплоть до  $\Delta_1$ .

$$\Delta_1 = a_1 > 0.$$

### 3.8.4. Геометрические критерии устойчивости

Известны критерии Михайлова, Найквиста, логарифмический критерий. Сущность всех критериев – связь между видом корней характеристического уравнения системы и формой, видом некоторых частотных характеристик. Преимущества геометрических критериев в их наглядности, универсальности, простоте использования даже для систем высокого порядка. Ниже приводятся формулировки и примеры использования всех трех критериев.

#### **Критерий Михайлова.**

Пусть имеется уравнение замкнутой САР

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} y}{dt^{m-1}} + \dots + b_m y.$$

Записав это уравнение в операторной форме по Лапласу, получим выражение:

$$a_0 p^n \cdot X(p) + a_1 p^{n-1} \cdot X(p) + \dots + a_n \cdot X(p) = b_0 p^m \cdot Y(p) + b_1 p^{m-1} \cdot Y(p) + \dots + b_m \cdot Y(p)$$

из которого можно записать передаточную функцию

$$W(p) = \frac{X(p)}{Y(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}.$$

Здесь  $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$  – характеристический многочлен, вид корней которого позволяет судить об устойчивости данной системы. Подставив в выражение для передаточной функции  $p = j\omega$ , получим выражение для комплексного передаточного коэффициента

$$W'_{z.c.}(j\omega) = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_n}.$$

Знаменатель комплексного передаточного коэффициента (характеристический многочлен в комплексной форме записи) есть некое комплексное число, т.е. некоторый вектор. Это выражение получило название вектора Михайлова:

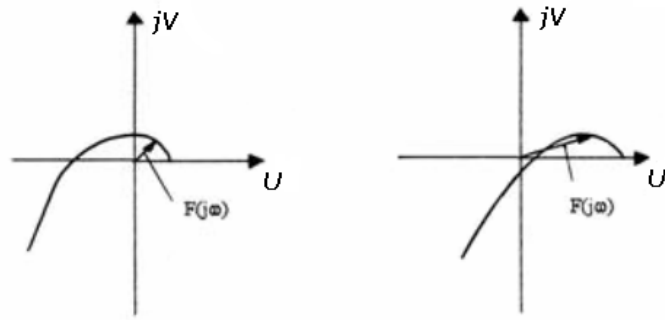
$$F(j\omega) = a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \dots + a_n. \quad (3.62)$$

При изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  этот вектор в комплексной плоскости будет своим концом описывать кривую, которая получила наименование **кривой Михайлова**. Михайлов нашёл связь между видом корней характеристического уравнения замкнутой САР и углом поворота вектора Михайлова (видом кривой Михайлова).

Формулировка критерия: *Для того чтобы система автоматического управления была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы радиус-вектор Михайлова при изменении частоты от 0 до  $\infty$  повернулся на угол  $\varphi = n \cdot \frac{\pi}{2}$ , где  $n$  – порядок системы.*

Формулировку критерия иллюстрирует рис.3.30, а, б. Характер кривой Михайлова для системы 3-го порядка на рис. 3.30,а соответствует устойчивой системе, т.к. вектор, очерчивающий эту кривую, в пределе поворачивается на угол  $\varphi = 3 \cdot \frac{\pi}{2}$ . Кривая (рис. 3.30, б) не обеспечивает этой закономерности, т.е. система, для которой построена эта кривая, устойчивостью не обладает.





а) для устойчивой системы б) для неустойчивой системы  
Рис. 3.30. Кривые Михайлова для системы 3-го порядка

### Критерий Найквиста

Критерий Найквиста основан на анализе АФХ системы в разомкнутом состоянии, при этом позволяет судить об устойчивости этой системы в замкнутом состоянии.

Разомкнутые системы, как правило, устойчивы. Для этого случая формулировка критерия гласит:

*Для того чтобы замкнутая САР была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы а.ф.х. этой системы в разомкнутом состоянии не охватывала точку в комплексной плоскости с координатами  $[-1; j0]$ .*

Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы – это градиент вектора комплексного передаточного коэффициента этой системы (передаточной функции в комплексной форме).

$$W_{p.c.}(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = R(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) \quad (3.63)$$

На рисунке иллюстрируется а.ф.х. разомкнутой системы для случая, когда замкнутая устойчива (кривая 1) и когда замкнутая неустойчива (кривая 2). При этом предполагается, что разомкнутая система заведомо устойчива.

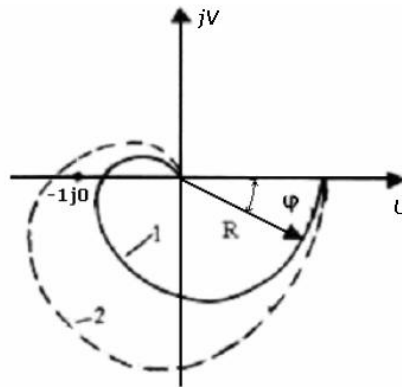


Рис.3.32. А.ф.х. системы в разомкнутом состоянии

Критерий Найквиста может использоваться и для более сложных случаев, а именно определять условия устойчивости замкнутой системы, когда разомкнутая неустойчива.

Критерий Найквиста в чистом виде используется достаточно редко, чаще используется его следствие, которое известно под названием “логарифмический критерий”.

### Логарифмический критерий устойчивости

Позволяет судить об устойчивости замкнутой САР по логарифмическим амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристикам этой системы в разомкнутом состоянии.

Формулировка критерия:

*Для того чтобы замкнутая САР была устойчива, необходимо и достаточно, чтобы фазово-частотная логарифмическая характеристика этой системы (в разомкнутом состоянии) пересекала линию  $-180^\circ$  в зоне отрицательных значений ЛАЧХ.*

Предполагается, что разомкнутая система заведомо устойчива.

Формулировка иллюстрируется рис.3.33.

Соотношение ЛАЧХ и ЛФЧХ (1) соответствует случаю устойчивости замкнутой системы (точка «а» находится в зоне отрицательных значений ЛАЧХ). Соотношение ЛАЧХ и ЛФЧХ (2) соответствует случаю, когда замкнутая система неустойчива (точка «б» находится в зоне положительных значений ЛАЧХ).

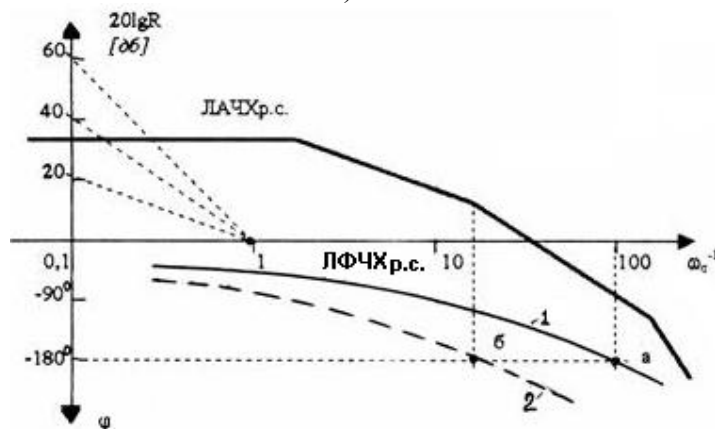


Рис.3.33. Логарифмическая амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики системы в разомкнутом состоянии

### 3.8.5. Области устойчивости в пространстве параметров систем (областей D-разбиения)

Пользуясь критериями устойчивости, можно установить, устойчива или неустойчива система с данными параметрами. При анализе работы систем, а особенно при проектировании, этого иногда бывает недостаточно. Часто требуется определить, в каких пределах можно изменять те или иные параметры (коэффициенты, постоянные времени), чтобы система оставалась устойчивой.

Если изменяется какой-либо один вещественный параметр – задача заключается в отыскании граничных значений этого параметра на некой числовой оси, рис. 3.35.

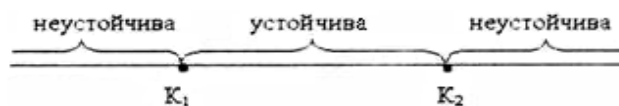


Рис. 3.35. Граничные значения параметра K

Если изменяются два вещественных или один комплексный параметр – задача состоит в отыскании некоторой области в прямоугольной системе координат, ограниченной кривой.

В общем случае в системе может изменяться S параметров, поэтому можно говорить о нахождении некой области устойчивости системы в S-мерном пространстве. Гиперповерхность, ограничивающая эту область, будет границей устойчивости в области параметров.

Из ранее рассмотренного материала известно, что если характеристическое уравнение системы имеет только отрицательные корни (с отрицательной вещественной частью), то система устойчива. То есть если взять значения параметров из области, где система устойчива, и подставить их в характеристическое уравнение, то корни этого уравнения с подставленными параметрами будут отрицательными.

Таким образом, область параметров, внутри которой все n корней характеристического уравнения отрицательны (имеют отрицательную вещественную часть), является областью устойчивой работы данной системы D [n, 0]. n – корней лежит слева от мнимой оси комплексной плоскости корней, 0 – справа. Очевидно, что можно отыскать и другие области параметров D [n-1, 1]; D [n-2, 2] и т.д.

Области параметров, соответствующие равному количеству корней характеристического уравнения с отрицательной (положительной) вещественной частью, получили название областей D-разбиения.

Пусть изменяется некоторый параметр  $\tau = \pm A \pm jB$  – в общем случае величина комплексная, т.е. его можно рассматривать в комплексной плоскости. В характеристическом уравнении системы этот параметр содержится в коэффициентах.

При изменении параметра  $\tau$  будут изменяться те коэффициенты, которые его содержат. Будут изменяться коэффициенты – будут изменяться корни характеристического уравнения системы, т.е. как-то перемещаться по комплексной плоскости корней (рис. 3.36).

Пока корни находятся слева от мнимой оси – система устойчива, если хотя бы один корень переходит направо – система становится неустойчивой. Таким образом, в плоскости корней границей устойчивости является мнимая ось. Те значения параметра  $\tau$ , при которых один или несколько корней окажутся на мнимой оси, являются *границными в области параметров*.

Выделим из характеристического уравнения интересующий нас параметр  $\tau$ , тогда получим некое выражение

$$\tau \cdot P(p) = Q(p),$$

где  $P(p)$  – многочлен, содержащий параметр  $\tau$ ;  $Q(p)$  – многочлен, не содержащий параметр  $\tau$ .

$$\tau = \frac{Q(p)}{P(p)}.$$

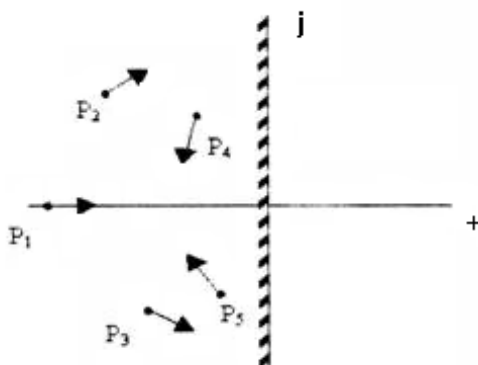


Рис. 3.36. Комплексная плоскость корней

Подставим в это выражение  $p=j\omega$  – чисто мнимый корень

$$\tau = \frac{Q(j\omega)}{P(j\omega)} = A(\omega) + jB(\omega). \quad (3.65)$$

Это выражение геометрического места точек в плоскости параметра  $\tau$ , соответствующего чисто мнимым корням, т.е. *границе устойчивости в плоскости корней*.

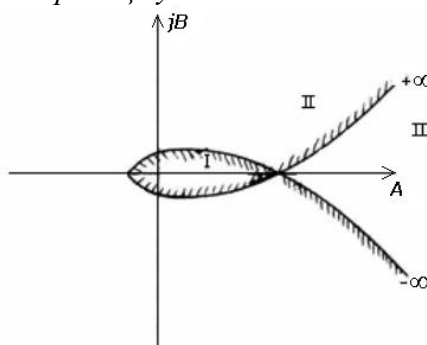


Рис. 3.37. Плоскость параметра  $\tau = \pm A \pm jB$

Подставляя в выражение (3.65) значения частоты  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$ , получим границу областей D-разбиения в плоскости параметра  $\tau$ . Одна из этих областей является областью устойчивости системы в плоскости параметра  $\tau$ . Она содержит параметры, соответствующие характеристиче-

скому уравнению, имеющему только отрицательные корни (с отрицательной вещественной частью).

Для того чтобы определить, какая из получившихся областей (I, II или III) является областью устойчивой работы системы, можно применить логическое правило штриховки. Для этого заштрихуем кривую так же, как заштрихована граница устойчивости в плоскости корней (рис.3.36), а именно, проходя от  $-\infty$  к  $+\infty$ , штрихи будем оставлять слева.

Помня о том, что система становится неустойчивой, если граница пересекается со стороны штрихов (рис.3.36), можно сделать вывод, что наиболее вероятной областью устойчивой работы системы является область I (рис.3.37).

### 3.8.6. Понятие о структурно-неустойчивых системах

В ряде случаев оказывается, что система неустойчива при любых значениях параметров. Сделать её устойчивой в этом случае можно, лишь изменив её структуру. Такие системы относят к так называемым структурно-неустойчивым системам.

К структурно-неустойчивым системам относят:

- 1) системы, имеющие в своём составе хотя бы одно неустойчивое звено I-го либо II-го порядка;
- 2) системы, имеющие два или более интегрирующих звена.

Неустойчивые звенья обеспечивают положительные корни при решении характеристических уравнений систем.

Два последовательно соединенных интегрирующих звена дают сдвиг по фазе  $\varphi = -180^\circ$ , что по логарифмическому критерию устойчивости свидетельствует о неустойчивости замкнутой системы.

### 3.8.6. Запас устойчивости системы

Теоретически устойчивые системы не всегда оказываются устойчивыми на практике. Это может произойти потому, что при составлении уравнений некоторые факторы отбрасываются; параметры, полученные экспериментально, могут оказаться неточными; характеристики элементов могут быть нестабильными и т.д.

В результате, если расчётное состояние системы было слишком близко к границе устойчивости, реальная система может оказаться неустойчивой. Чтобы этого не произошло, необходимо иметь определенный *запас устойчивости*.

Запас устойчивости предусматривает некоторое удаление расчётных параметров от значений, соответствующих границе устойчивости. Формулировка запаса устойчивости вытекает из того, что в основе двух наиболее распространенных критериев устойчивости (Найквиста и логарифмического) лежат характеристики, построенные на выражении для комплексного передаточного коэффициента разомкнутой системы:

$$W(j\omega)_{p.c.} = R(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}.$$

Для оценки запаса устойчивости обычно вводят понятие запаса *по модулю* и *по фазе*. Эти величины можно определить, пользуясь ЛАЧХ<sub>р.с.</sub> и ЛФЧХ<sub>р.с.</sub> (логарифмический критерий) (рис. 3.40).

Запасы устойчивости  $H(\text{дБ})$  и  $\gamma^0$  обычно задаются при проектировании системы и проверяются после её реализации.

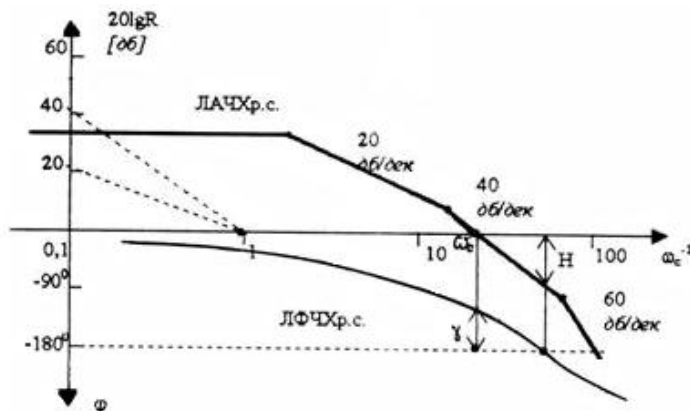


Рис. 3.40. Иллюстрация понятий запаса устойчивости по ЛАЧХ<sub>р.с.</sub> и ЛФЧХ<sub>р.с.</sub>

$H(\text{дб})$  – запас устойчивости по модулю (при  $\varphi = -180^\circ$ );  
 $\gamma^0 = 180^\circ - \varphi_{\omega c}$  – запас устойчивости по фазе (при  $\omega_c$ );  
 $\varphi_{\omega c}$  – угол поворота (фаза) вектора  $W(j\omega)_{р.с.}$  при частоте,  
 равной  $\omega_c$  – частота среза

### 3.8.7. Особенности оценки устойчивости систем с запаздыванием

К линейным системам с запаздыванием относят системы, в составе которых имеется хотя бы одно звено с запаздыванием, т.е. звено с передаточной функцией  $W_c(p) = e^{-p\tau}$ , где  $\tau$  – время запаздывания сигнала.

Записывая для данной системы передаточную функцию, будем иметь выражение

$$W_{з.с.\tau}(p) = \frac{K_1 K_2 e^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + K_1 K_2 e^{-p\tau}}. \quad (3.66)$$

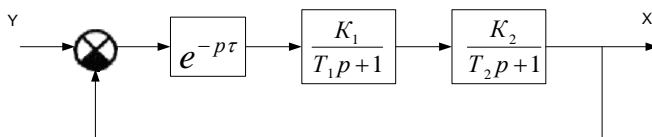


Рис. 3.42. Система с запаздыванием

В характеристическом многочлене системы (знаменатель передаточной функции) содержится слагаемое, содержащее  $e^{p\tau}$ . Такие уравнения в математике называются трансцендентными, действия с такими уравнениями требуют их разложения в ряд Маклорена. Ряд имеет бесконечное число членов, бесконечное число коэффициентов. В результате алгебраические критерии устойчивости здесь оказываются неприемлемыми. Не годится и критерий Михайлова, т.к. он также использует характеристический многочлен.

#### 1. Оценка устойчивости системы по критерию Найквиста.

Из рисунка 3.41 передаточная функция разомкнутой системы с запаздыванием будет иметь вид

$$W_{р.с.\tau}(p) = \frac{K_1 K_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot e^{-p\tau} = W_{р.с.}(p) \cdot e^{-p\tau},$$

где  $W_{р.с.\tau}(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы с запаздыванием;  $W_{р.с.}(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы без звена с запаздыванием.

Если перейти к комплексной форме записи, то соответствующие выражения будут выглядеть следующим образом:

$$W_{р.с.\tau}(j\omega) = W_{р.с.}(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau},$$

или, учитывая, что все эти величины комплексные,

$$W_{р.с.\tau}(j\omega) = R(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)} \cdot e^{-j\omega\tau} = R(\omega) \cdot e^{-j(\varphi - \omega\tau)}, \quad (3.67)$$

где  $R(\omega) \cdot e^{-j\varphi(\omega)}$  – комплексный передаточный коэффициент разомкнутой системы без звена с запаздыванием – выражение для построения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы без звена с запаздыванием (АФХ<sub>р.с.</sub>);  $R(\omega) \cdot e^{-j(\varphi - \omega\tau)}$  – комплексный передаточный коэффициент разомкнутой системы с запаздыванием – выражение для построения амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы с запаздыванием (АФХ<sub>р.с.\tau</sub>).

Из выражения (4.67) можно сделать вывод, что (АФХ<sub>р.с.\tau</sub>) можно получить, если построить (АФХ<sub>р.с.</sub>) и повернуть каждый радиус-вектор последней на угол  $\omega\tau$  по часовой стрелке (рис.4.43).

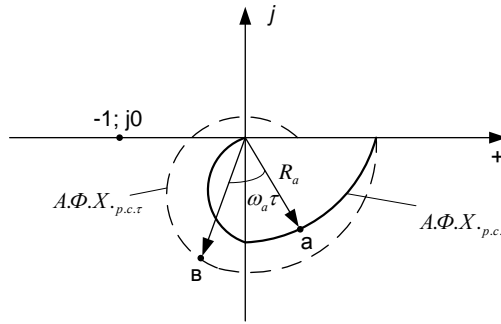


Рис.4.43. Построение АФХ<sub>п.с.т</sub>

Пусть имеется точка «а» на АФХ<sub>п.с.</sub> Эта точка получена для частоты  $\omega_a$ . Тогда, если найти угол, равный  $\omega_a \cdot \tau$ , и повернуть на этот угол вектор  $R_a$ , то получится точка «в» амплитудно-фазовой характеристики системы с запаздыванием, и так для каждой точки. В результате получим геометрическое место точек для построения АФХ<sub>п.с.т</sub>.

По полученной характеристике устойчивость системы с запаздыванием на основании критерия Найквиста оценивается обычным порядком. Однако построение АФХ<sub>п.с.т</sub> обеспечивается графоаналитическим способом, что неудобно и громоздко. Более удобным методом оценки устойчивости системы с запаздыванием является практический критерий, связанный с определением критического времени запаздывания –  $\tau_{кр}$ .

## 2. Практический критерий устойчивости систем с запаздыванием по $\tau_{кр}$ .

Из построения АФХ<sub>п.с.т</sub> по АФХ<sub>п.с.</sub> (рис.4.43) видно, что включение звена с запаздыванием в систему создает тенденцию к неустойчивости, т.к. поворот вектора, описывающего АФХ<sub>п.с.</sub> по часовой стрелке, приближает АФХ<sub>п.с.т</sub> к точке с координатами  $[-1, j0]$ . Вероятность возникновения неустойчивости (охват точки) тем больше, чем больше угол поворота вектора  $\omega\tau$ , т.е. больше время запаздывания –  $\tau$ .

Очевидно, что для данной системы существует некоторое значение времени запаздывания –  $\tau_{кр}$ , превышение которого сделает систему неустойчивой. То есть условие устойчивости системы

$$\tau < \tau_{кр}.$$

Задача заключается, таким образом, в определении  $\tau_{кр}$ .

Предположим критический случай, когда при  $\tau = \tau_{кр}$  АФХ<sub>п.с.т</sub> проходит точно через точку  $[-1; j0]$  комплексной плоскости (рис.4.44). На этом же рисунке обозначена исходная АФХ<sub>п.с.</sub> Положение вектора, описывающего АФХ<sub>п.с.т</sub> при  $\varphi = -\pi$ , соответствует значению  $R=1$ . Положение этого же вектора на исходной АФХ<sub>п.с.</sub> можно обозначить, взяв его на циркуль, и повернуть до совмещения с этой характеристикой (точка «а»). Соответствующий угол поворота вектора (между точкой «а» и точкой  $[-1; j0]$ ) составит, очевидно,  $\omega \cdot \tau_{кр}$ . Весь угол поворота, равный  $-\pi$ , таким образом, состоит из угла поворота вектора  $W_{п.с.}(j\omega)$  до положения, соответствующего  $R=1$ , и угла  $\omega\tau_{кр}$ . Все углы необходимо брать со знаком (-), т.к. поворот происходит по часовой стрелке. Тогда

$$-\pi = -\varphi_{R=1} - \omega_{R=1} \cdot \tau_{кр}.$$

Отсюда  $\tau_{кр} = \frac{\pi - \varphi_{R=1}}{\omega_{R=1}}$ . Если углы брать в градусах, то необходимо ввести коэффициент преобразования, тогда

$$\tau_{кр} = \frac{180^0 - \varphi_{R=1}^0}{\omega_{R=1}} \cdot \frac{\pi}{180^0}.$$

Здесь  $\omega_{R=1}$  – частота, при которой абсолютная величина (модуль) вектора  $W_{п.с.}(j\omega)$ , т.е.  $R=1$ . Эту частоту легко определить из ЛАЧХ<sub>п.с.</sub> Это точка пересечения данной характеристики с осью частот, т.е. так называемая частота среза  $-\omega_c$  (например, рис. 4.40).

$180^0 - \varphi_{R=1} = \gamma$  – запас устойчивости системы без запаздывания по фазе (см.п.4.9 и рис.4.40), тогда окончательный вид формулы для определения критического времени запаздывания будет следующим:

$$\tau_{кр} = \frac{\gamma^0}{\omega_c} \cdot \frac{\pi}{180^0}. \quad (4.68)$$

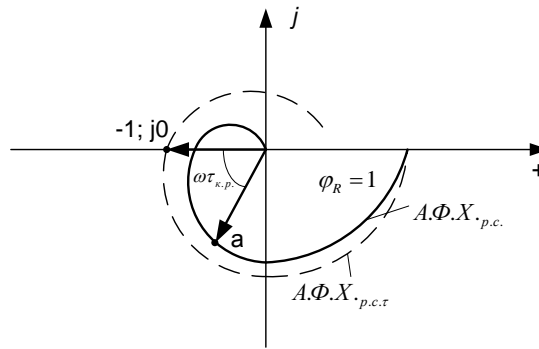


Рис. 4.43. АФХ<sub>р.с.</sub> и АФХ<sub>р.с.т.</sub> для определения величины  $\tau_{кр}$

### Тема 3.9. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования

Качество переходного процесса определяется поведением системы при переходе из одного установившегося состояния к другому.

Качество процесса оценивается целым рядом очень важных показателей, основными из которых являются:

#### 1. Устойчивость и запас устойчивости.

Показатели, характеризующие работоспособность системы.

#### 2. Колебательность.

При изменении установившегося состояния системы, например при подаче на вход единичной ступенчатой функции, выходная величина может до достижения нового установившегося значения с определённой точностью совершать большее или меньшее число колебаний (рис.3.41). Колебания в системе – явление нежелательное, т.к. это приводит к дополнительному износу деталей, отклонению выходного сигнала от установившегося значения. Поэтому стремятся так выполнить САР, чтобы колебательность свести к минимуму. Колебательность процесса соответствует наличию комплексных корней в характеристическом уравнении системы. Аналитически колебательность оценивается показателем  $\mu = \frac{\beta}{\alpha}$ , где  $\beta$  – мнимая часть комплексного корня ( $p = \alpha + j\beta$ );  $\alpha$  – вещественная часть комплексного корня.

Для характеристики колебательности выбирается максимальное значение  $\mu$  из всех. (Например, если хотя бы один корень оказался на мнимой оси, т.е.  $\mu = \frac{\beta}{0} = \infty$ , это означает, что колебания незатухающие, и наоборот, если все корни вещественные  $\mu = \frac{0}{\alpha} = 0$ , это означает, что колебаний нет, процесс аperiodический).

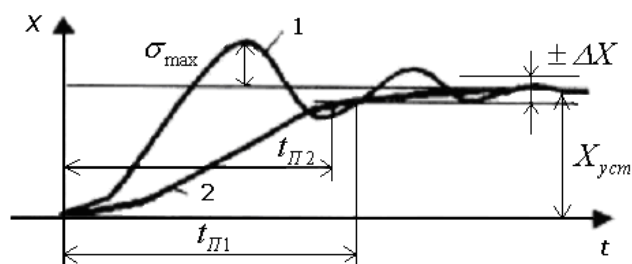


Рис.3.41. Переходная характеристика и основные показатели качества: 1 – колебательный переходный процесс; 2 – аperiodический переходный процесс;  $\pm \Delta X$  – точность, с которой оценивается окончание процесса

#### 3. Быстродействие системы

Показатель характеризует скорость реагирования САР на внешние воздействия. Для оценки быстродействия используется величина времени переходного процесса, т.е. времени, за которое выходной сигнал с определенной заданной точностью достигает своего установившегося значения (на рис.3.41 это  $t_{п1}$  или  $t_{п2}$ ).

#### 4. Перерегулирование

Характеризует отклонение выходного сигнала от установившегося значения в процессе перехода. Оценка идет по максимальному отклонению,  $\sigma_{\max}$  (рис.3.41).

Перерегулирование также явление нежелательное, т.к. это механические или электрические перегрузки, перенапряжения. Обычно перерегулирование оценивается в % к установившемуся значению выходного сигнала  $\sigma_{\max} \% = \frac{\sigma_{\max}}{X_{уст}} \cdot 100\%$ .

При проектировании САУ основные показатели качества задаются, а после её синтеза и математического описания проверяются.

Методы оценки качества переходного процесса подразделяются на *прямые* и *косвенные*. Прямые методы основаны на получении кривой переходного процесса  $x=f(t)$  (достаточно частного случая – переходной характеристики как решения дифференциального уравнения системы). Как было показано выше, по переходной характеристике можно оценить все основные показатели качества. Инженерные методы решения дифференциальных уравнений достаточно сложны, громоздки, а само исследование качества пассивно, т.к. с изменением параметров системы требует повторного решения дифференциального уравнения системы. Однако современные технические средства позволяют придать прямым методам исследования совершенно новый перспективный характер.

Существуют современные «гибкие» программы решения дифференциальных уравнений на цифровой и аналоговой вычислительной технике.

В этой связи косвенные методы исследования качества переходных процессов в САУ постепенно теряют свою значимость, хотя до недавнего времени эти методы считались основными. Они заключаются в анализе показателей качества без решения дифференциальных уравнений по частотным характеристикам, корням характеристического уравнения и т.д.

### **Тема 3.10. Синтез систем автоматического управления**

Необходимость в коррекции систем возникает при их проектировании или настройке. Создание, синтез САУ не является чисто математической задачей, т.к. содержит множество решений. Это задача более инженерная, чем математическая. Обычно задаётся ряд элементов системы (объект регулирования, двигатели, датчики, усилители), т.к. разумно пользоваться стандартными устройствами, выпускаемыми промышленностью. Выбор этих элементов отражает исходную структуру системы.

Далее на основании заданной статической точности, известных возмущений определяется требуемый передаточный коэффициент – добротность системы в разомкнутом состоянии. Этот коэффициент устанавливается за счёт изменения коэффициентов одного или нескольких элементов. После этого система исследуется на устойчивость, определяются показатели качества переходного процесса. Как правило, показатели работы системы оказываются неудовлетворительными (либо система неустойчива, либо малы запасы устойчивости, либо не соответствуют заданным показателям колебательность, быстродействие, перерегулирование).

В связи с этим возникает необходимость введения в САУ дополнительных устройств, обеспечивающих устойчивость и заданные показатели качества.

*Обеспечение устойчивой и качественной работы САУ с помощью дополнительных устройств называется коррекцией, а сами устройства – корректирующими.*

В настоящее время промышленностью выпускаются регуляторы, т.е. целая совокупность управляющих элементов с заранее заданными и изменяемыми динамическими свойствами, т.е. с уже готовой коррекцией системы в нужном направлении. Это в значительной мере облегчает синтез систем с заданным качеством переходного процесса. Однако применение таких устройств не исключает необходимости знания принципов классической коррекции систем, т.к. регуляторы далеко не всегда подходят по габаритам, параметрам, широте технических свойств.

По способу включения корректирующих звеньев различают последовательную и параллельную коррекцию (рис.4.47 а, б).



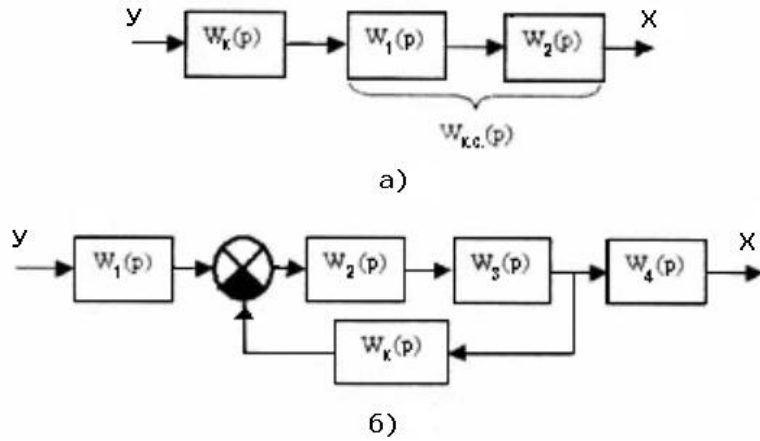


Рис. 4.47. Включение корректирующих звеньев:  
 а) последовательное корректирующее звено; б) параллельное корректирующее звено

Задачу синтеза корректирующего звена по заданным показателям качества уже можно рассматривать как математическую.

В общем случае задача обычно решается в следующей последовательности:

1) по заданным показателям качества ( $\sigma_{\max}$ ,  $t_n$ ,  $H$ ,  $\gamma$ ) ищут либо передаточную функцию, либо частотную характеристику, либо уравнение системы, удовлетворяющей исходным требованиям (желаемой системы);

2) по передаточной функции (характеристике, уравнению) желаемой системы, сравнивая её с передаточной функцией (характеристикой, уравнением) исходной системы, находят передаточную функцию (характеристику, уравнение) дополнительного, корректирующего звена;

3) по передаточной функции (характеристике, уравнению) корректирующего звена определяют его вид и рассчитывают его параметры.

Конкретный ход решения задачи коррекции зависит от способа включения звеньев и от выбранного метода.

Ниже описан один из методов, получивший наибольшее распространение, – **метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик**.

### 3.10.1. Синтез последовательного корректирующего звена методом ЛАЧХ

Пусть последовательное корректирующее звено с передаточной функцией  $W_k(p)$  включено последовательно с исходной системой (рис.4.47, а). Тогда, если рассматривать передаточную функцию скорректированной (желаемой) системы в разомкнутом состоянии, можно записать

$$W_{жс}(p) = W_k(p) \cdot W_{н.с.}(p),$$

где  $W_{н.с.}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p)$  – передаточная функция исходной (нескорректированной) системы.

Перейдя к комплексной форме записи, получим

$$W_{жс}(j\omega) = W_k(j\omega) \cdot W_{н.с.}(j\omega)$$

или

$$R_{жс} e^{j\varphi_{жс}} = R_k e^{j\varphi_k} \cdot R_{н.с.} e^{j\varphi_{н.с.}} = R_k \cdot R_{н.с.} e^{j(\varphi_k + \varphi_{н.с.})}$$

Из полученного выражения

$$R_{жс} = R_k \cdot R_{н.с.}$$

Перейдя к ЛАЧХ, запишем

$$20 \lg R_{жс} = 20 \lg R_k + 20 \lg R_{н.с.},$$

где  $20 \lg R_{жс}$  – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика желаемой системы (для краткости обычно обозначается  $L_{жс}$ );  $20 \lg R_k$  – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика корректирующего звена ( $L_k$ );  $20 \lg R_{н.с.}$  – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика исходной системы ( $L_{н.с.}$ ).

$$L_{жс} = L_k + L_{н.с.}$$

Отсюда

$$L_k = L_{жс} - L_{н.с.} \quad (4.69)$$

Таким образом, ЛАЧХ последовательного корректирующего звена можно найти как геометрическую разность между ЛАЧХ желаемой системы и ЛАЧХ исходной системы.

В соответствии с вышеизложенным синтез последовательного корректирующего звена можно осуществить в такой последовательности:

1) по передаточной функции  $W_{н.с.}(p)$  в разомкнутом состоянии системы строится ЛАЧХ нескорректированной исходной системы  $L_{н.с.}$ ; по заданным показателям качества переходного процесса ( $\sigma_{\max}, t_n, H, \gamma$ ) строится  $L_{жс}$ ;

2) производится графическое вычитание  $L_{к} = L_{жс} - L_{н.с.}$ , и строится ЛАЧХ последовательного корректирующего звена  $-L_{к}$ ;

3) по найденной характеристике  $L_{к}$  определяется тип звена и его параметры.

В литературе для этого приводятся таблицы, в которых в соответствии с  $L_{к}$  даются конструкции звена и формулы расчёта его параметров (например, табл. 11.2 [1]).

Как явствует из выше сказанного, наиболее ответственным этапом синтеза корректирующего звена является построение  $L_{жс}$ , т.е. ЛАЧХ системы, удовлетворяющей заранее заданным свойствам.

*Построение желаемой ЛАЧХ ( $L_{жс}$ )*

При построении  $L_{жс}$  учитывается целый ряд требований.

Построение  $L_{жс}$  обычно начинается со среднего участка, с точки пересечения этой характеристики оси частот, т.е. с так называемой частоты среза  $-\omega_c$ . Величина этой частоты определяется из условия получения *требуемой длительности переходного процесса*  $-t_n$  и *заданного значения перегруппирования*  $-\sigma_{\max}$ . Согласно [2], связь между данными параметрами определяется выражением.

$$\omega_c \geq \frac{K \cdot \pi}{t_n}. \quad (4.70)$$

Коэффициент  $K=f(\sigma_{\max})$  определяется из графиков, приводимых в литературе. В пределах допустимых значений  $\sigma_{\max}$  (25-35%) коэффициент  $K$  можно брать равным  $3,5 \div 3,8$ .

*Требование устойчивости работы системы* отражается в характеристике  $L_{жс}$  наклоном её в окрестности частоты среза. Исследования показали, что система будет заведомо устойчивой, если этот наклон равен  $20 \text{ дб/дек}$ .

*Требование необходимых запасов устойчивости ( $H, \gamma$ )* отражается длиной участка  $L_{жс}$  в районе частоты среза, имеющего наклон  $20 \text{ дб/дек}$ . Длина участка может быть вычислена в зависимости от  $H$  и  $\gamma$  по специальным номограммам (например, рис. 10.16 [2]).

В первом приближении для обеспечения практически приемлемых запасов устойчивости участка с наклоном  $20 \text{ дб/дек}$  можно брать длиной, равной  $\pm 10-15 \text{ дб}$ .

*Условие сохранения статической точности системы* будет соблюдено, если совместить низкочастотные участки  $L_{жс}$  и  $L_{н.с.}$ . Итак, известен низкочастотный участок  $L_{жс}$ , её отрезок в среднечастотной части, в окрестностях частоты среза. Из условия наиболее простой реализации корректирующего звена высокочастотный участок  $L_{жс}$ , мало влияющий на свойства системы, можно также совместить с  $L_{н.с.}$  или провести параллельно этой характеристике.

Чем меньше изломов у характеристики корректирующего звена, тем проще его техническая реализация. Так как  $L_{к} = L_{жс} - L_{н.с.}$ , то наименьшее число изломов  $L_{к}$  получится в том случае, если изломы  $L_{жс}$  будут происходить при тех же частотах, при каких наблюдаются изломы  $L_{н.с.}$ , т.е. при сопрягающих частотах, и если изменения углов наклона этих двух характеристик в точках излома будут одинаковыми. Поэтому переход от среднечастотной части  $L_{жс}$  к её низко- и высокочастотным участкам желательно по возможности осуществлять с помощью отрезков, которые имеют изломы в сопрягающих частотах  $L_{н.с.}$ .

### 3.10.2. Синтез параллельного корректирующего звена

Пусть корректирующее звено включено как местная обратная связь, охватывающая часть звеньев системы (рис. 4.47,б). Такое включение корректирующего звена получило название *параллельного*.

Запишем передаточную функцию системы в соответствии с рис. 4.47,б:

$$W_{жс}(p) = W_1(p) \cdot W_4(p) \cdot \frac{W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_{к}(p)} = \frac{W_{н.с.}(p)}{1 + W_{ошв}(p) \cdot W_{к}(p)}, \quad (4.71)$$

где  $W_{н.с.}(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)$  – передаточная функция исходной (нескорректированной) системы;  $W_{охв}(p) = W_2(p) \cdot W_3(p)$  – передаточная функция охваченной части системы;  $W_{к}(p)$  – передаточная функция параллельного корректирующего звена.

В наиболее значимом для свойств системы интервале частот, как показали исследования,  $|W_{охв}(p) \cdot W_{к}(p)| \gg 1$ . Поэтому с достаточной точностью задачу нахождения корректирующего звена можно решать, пренебрегая в знаменателе полученного выражения единицей. Тогда это выражение можно записать как

$$W_{жс}(p) = \frac{W_{н.с.}(p)}{W_{охв}(p) \cdot W_{к}(p)}.$$

Переходя к логарифмическим характеристикам, можно записать

$$L_{жс} = L_{н.с.} - L_{охв} - L_{к}$$

или

$$L_{к} = L_{н.с.} - L_{жс} - L_{охв},$$

из предыдущего параграфа известно, что

$$L_{н.с.} - L_{жс} = - \underset{(посл)}{L_{к}},$$

тогда

$$\underset{(пар)}{L_{к}} = - \underset{(посл)}{L_{к}} - L_{охв}.$$

Из последнего выражения можно сформулировать правило синтеза параллельного корректирующего звена.

*ЛАЧХ параллельного корректирующего звена –  $L_{к(пар)}$  можно получить, если построить ЛАЧХ последовательного корректирующего звена –  $L_{к(посл)}$ , ЛАЧХ охваченной части системы –  $L_{охв}$ , сложить геометрически последние две характеристики и взять результат с обратным знаком.*

Поскольку при синтезе параллельного корректирующего звена были приняты допущения, рекомендуется произвести исследование скорректированной системы на устойчивость и качество переходного процесса.

## Раздел 4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления

### Тема 4.1. Статика нелинейных систем

Реальные САУ, как правило, нелинейны. Многие из них можно приближённо считать линейными, т.е. поведение их практически не отличается от поведения линейных систем. Часть нелинейных систем поддаются линеаризации, и для них также приемлемы методы, рассмотренные ранее.

Однако в ряде случаев поведение нелинейных систем даже приближенно не может быть описано линейными дифференциальными уравнениями, т.е. системы не могут быть представлены как линейные.

*Нелинейной САУ называется такая система, в которой содержится хотя бы одно звено, описываемое нелинейным уравнением. Уравнение является нелинейным, если некоторые переменные или их производные входят в уравнение в виде произведений или степеней выше первой, а также если коэффициенты уравнения являются функциями некоторых переменных или их производных.*

Исследования нелинейных систем сопряжены с рядом трудностей, связанных, в основном, с тем, что не существует единого точного метода решения нелинейных уравнений, и для каждого вида нелинейности приходится изыскивать специфический частный метод. Помимо общих признаков, рассмотренных ранее (п.2.5), нелинейные системы обычно классифицируются по виду нелинейных характеристик элементов в составе систем.

Наиболее типичные виды статических характеристик нелинейных элементов представлены на рис. 5.1, 5.2, 5.3.

Характеристики рис.5.1,а,б; рис.5.2,а,б,в; рис.5.3,а,б,в называются однозначными. Такие характеристики можно описать математически. Характеристики рис.5.1,в; рис.5.2,г; рис.5.3,г называются неоднозначными и вообще не имеют аналитического описания. В соответствии с видом элементов, входящих в систему, нелинейные системы обычно получают соответствующие названия: «релейная система», «система с люфтом» и т.д.

В целом процессы в нелинейных системах значительно богаче и разнообразнее процессов в линейных системах. Особенности процессов в нелинейных системах таковы:

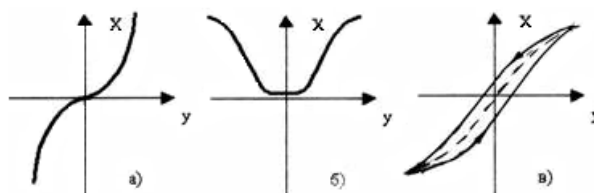


Рис. 5.1. Нелинейные элементы с гладкими нелинейными характеристиками

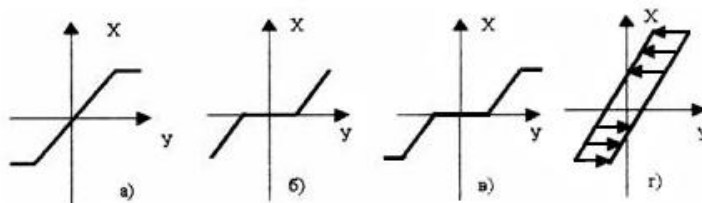


Рис.5.2. Нелинейные элементы с кусочно-линейными характеристиками

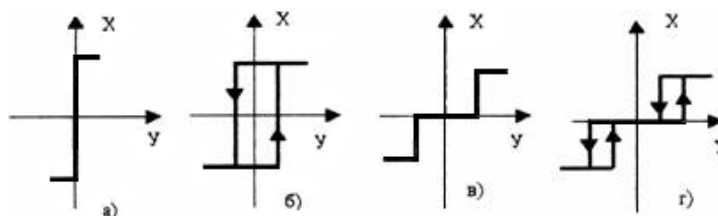


Рис.5.3. Нелинейные элементы с релейными характеристиками

- Возможность нескольких равновесных состояний, часть которых устойчива, часть – неустойчива.
- 2. Возможность режима устойчивых незатухающих колебаний (автоколебаний).
- 3. Зависимость характера переходного процесса от величины внешнего (входного, возмущающего) воздействия. Это обстоятельство весьма примечательно. При малых внешних воздействиях переходный процесс может быть сходящимся, т.е. система устойчива. При больших воздействиях переходный процесс может стать расходящимся, т.е. система неустойчива (говорят, что эта система устойчива «в малом», но неустойчива «в большом»).

В линейных системах статические преобразования в функциональных схемах (к примеру, определение суммарных коэффициентов или ошибок) проводились аналитически (п.2.3). В нелинейных системах статические расчёты выполняются графически. В результате работы с нелинейными характеристиками (их геометрического сложения, перемножения) получают статическую характеристику нелинейной системы  $x=f(z)$  при  $y=\text{const}$ , из которой выносят суждения о статической точности системы при действии на неё возмущений.

#### Тема 4.2. Динамика нелинейных систем

В отличие от линейных систем, которые имеют единственное состояние равновесия, нелинейные могут иметь несколько возможных состояний. При этом часть состояний равновесия может быть устойчивой, часть – неустойчивой. Система может перейти под действием внешних возмущений из устойчивого состояния равновесия в неустойчивое. Тогда говорят, что данная система *устойчива в малом, но неустойчива в большом*. Нелинейные системы могут обладать состоянием, совершенно несвойственным линейным системам, так называемым состоянием *автоколебаний*. Такое состояние системы также является состоянием равновесия, но *динамического*.

Особенности процессов в нелинейных системах определяют задачи исследования динамики:

- 1) отыскание возможных состояний равновесия систем и исследование их устойчивости;
- 2) исследование перехода от одного состояния равновесия к другому, зависимость этих переходов от величины внешних воздействий на систему;
- 3) анализ возможности режима автоколебаний и их устойчивости.

В целом методы анализа разделяют на приближённые и точные. *Приближённые методы* основаны на линеаризации систем и использовании классических методов линейных систем. *Точные методы* предполагают специфические исследования нелинейных уравнений и систем.

Ниже рассмотрены некоторые специфические методы, нашедшие наиболее широкое и универсальное применение при исследовании нелинейных систем. Естественно, они дают лишь самое общее знакомство с вопросами нелинейных систем, теория которых в настоящее время получила весьма широкое развитие.

### Тема 4.3. Метод фазовой плоскости

Метод изображения переходных процессов в фазовом пространстве (метод А.А. Андропова) даёт возможность получить наглядную и точную картину всей совокупности переходных процессов при любых начальных условиях для свободных колебаний в системах, содержащих нелинейные элементы.

Если для системы  $n$ -го порядка в некотором  $n$ -мерном пространстве, содержащем  $n$  осей координат, отложить по указанным осям значения переменной  $x$  и  $n-1$  её производных, то в этом пространстве будет получена точка, изображающая состояние системы. Указанное пространство получило название *фазового*, а точка, соответствующая состоянию системы в фазовом пространстве, – *изображающей*. В установившемся состоянии системы точка находится в состоянии покоя. При возникновении переходного процесса такая точка будет перемещаться и описывать определённые траектории. Начальное положение изображающей точки в фазовом пространстве определяется начальными условиями. Совокупность фазовых траекторий для всевозможных начальных условий называется *фазовым портретом системы*.

Метод фазового пространства применим для систем, содержащих нелинейности любого типа. Однако достаточно хорошо этот метод разработан лишь для систем 2-го порядка. В этом случае фазовые траектории изображаются в прямоугольной системе координат, где по оси абсцисс откладывается выходной сигнал –  $x$ , а по оси ординат  $\frac{dx}{dt}$ . Метод получил название **метода фазовой плоскости**.

Пусть имеется нелинейное уравнение 2-го порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = f\left(x, \frac{dx}{dt}, \dots\right). \quad (5.1)$$

Обозначим  $\frac{dx}{dt} = y$ . Тогда уравнение (5.1) можно записать в виде системы из 2-х уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(x, y), & (5.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y. & (5.3) \end{cases}$$

Чтобы изобразить процесс на фазовой плоскости, исключают из этой системы уравнений время, поделив выражение (5.2) на (5.3):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f(x, y)}{y}. \quad (5.4)$$

Решение этого уравнения  $y=f(x)$  и является уравнением фазовой траектории. Для каждой совокупности начальных условий  $x_0, y_0$  имеет место своё решение уравнения (5.4), т.е. своя фазовая траектория. Решение  $y=f(x)$  может быть получено аналитически, графически, при помощи вычислительной техники. Универсального метода на все случаи не существует, однако имеют место определённые свойства фазовых траекторий, которые облегчают их построение. Эти свойства помогают графическому построению фазовых траекторий системы, т.к. известен характер перемещения изображающей точки на фазовой плоскости (рис.5.4).

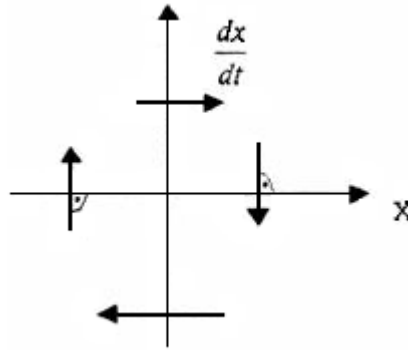


Рис. 5.4. Характер движения изображающей точки в фазовой плоскости

1. Из выражения (5.3) следует, что при  $y < 0$ ,  $x$  – всегда убывает, а при  $y > 0$ ,  $x$  – всегда возрастает.
2. Из выражения (5.4) видно, что при  $y = 0$   $\frac{dy}{dx} = \infty$ , т.е. в точках пересечения с осью  $x$  касательная к фазовой траектории имеет угол наклона к оси  $x$ , равный  $90^\circ$  ( $\operatorname{tg} \alpha = \infty$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ).

#### Тема 4.4. Фазовые портреты нелинейных систем

Ещё большим разнообразием отличаются фазовые портреты нелинейных систем. В общем случае нелинейное уравнение 2-го порядка может быть записано в следующем виде:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \varphi\left(x, \frac{dx}{dt}\right), \quad (5.6)$$

где  $\varphi\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$  – нелинейная функция, выражение (5.6) можно переписать следующим образом

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \varphi(x, y) \\ \frac{dx}{dt} = y \end{cases}.$$

Поделив первое уравнение на второе, получим выражение, связывающее  $x$  и  $y$ ,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\varphi(x, y)}{y}.$$

Решение этого уравнения – фазовая траектория.

Вид и расположение фазовых траекторий, а также направление движения по ним изображающей точки даёт возможность судить о характере переходных процессов в системах, а также об устойчивости при различных начальных условиях (внешних воздействиях). На рисунках 5.7 – 5.9 несколько фазовых портретов, характерных для нелинейных систем.

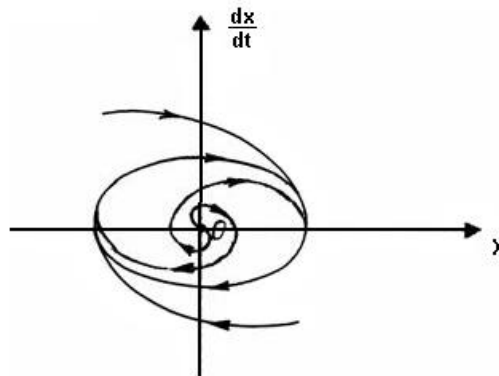


Рис. 5.7. Фазовый портрет системы, обладающей режимом автоколебаний

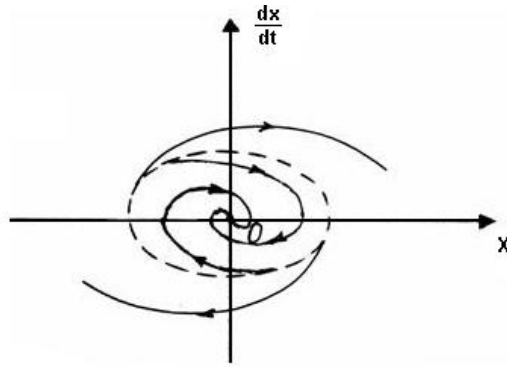


Рис. 5.8. Фазовый портрет системы устойчивой «в малом», но неустойчивой «в большом»

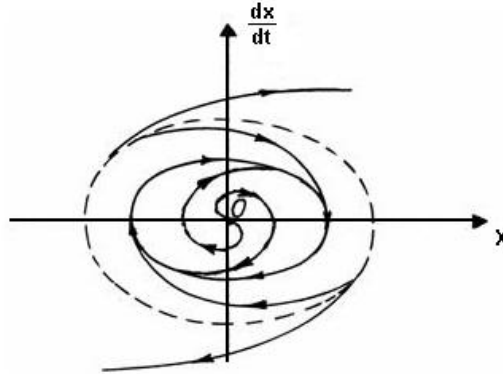


Рис. 5.9. Фазовый портрет системы, имеющей режим автоколебаний при малых возмущениях и неустойчивой при больших возмущениях

#### Тема 4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы

Как уже отмечалось, нелинейные системы могут быть устойчивы «в малом» и неустойчивы «в большом». С этим можно мириться, ставя систему в такие условия работы, чтобы внешние возмущения не превышали критических по условиям устойчивости величин.

Но желательно проектировать такую систему, которая обладала бы устойчивостью как при малых, так и при больших возмущениях.

*Системы, которые остаются устойчивыми при неограниченно больших возмущениях, называются абсолютно устойчивыми.*

Важно проанализировать, будет ли данная система обладать таким свойством, т.е. иметь соответствующий критерий. К такому критерию абсолютной устойчивости нелинейных систем относится критерий Попова. Он выводится на основании методов Ляпунова, и хотя вывод весьма сложен, конечный результат прост и нагляден.

Пусть имеется нелинейная система (рис. 5.10).

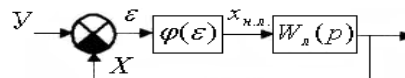


Рис. 5.10. Структурная схема нелинейной системы

Часть системы линейна и обладает передаточной функцией  $W_{л}(p)$ , другая часть – нелинейна и обладает какой-то характеристикой  $x_{н.л.} = \varphi(\varepsilon)$ . Эта характеристика имеет максимальный угол наклона касательной  $\alpha_{\max}$ , т.е. нелинейная часть системы обладает максимально возможным передаточным коэффициентом  $K_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_{\max}$ . На всех других участках характеристики коэффициент меньше  $K_{\max}$ .

Если имеются такие данные и известно, что линейная часть системы устойчива, то критерий абсолютной устойчивости Попова можно сформулировать следующим образом.

*Нелинейная система обладает абсолютной устойчивостью, если видоизмененная АФХ линейной части системы в комплексной плоскости расположена так, что через точку с координатами*

*$-\frac{1}{K_{\max}}; j0$  можно провести прямую без пересечения с этой характеристикой.*

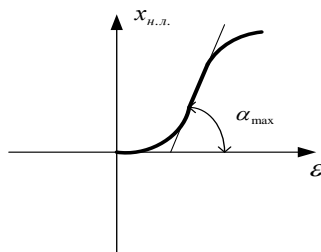


Рис. 5.11. Характеристика нелинейной части системы

По аналогии с критерием Найквиста характеристики строятся для системы разомкнутого состояния. Суждение об устойчивости выносится для замкнутой системы. Известно, что АФХ – градиент вектора комплексного передаточного коэффициента. В данном случае АФХ линейной части системы

$$W_{л}(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

Видоизменённая характеристика имеет вид

$$W_{л}^*(j\omega) = U^*(\omega) + jV^*(\omega),$$

где  $U^*(\omega) = U(\omega)$ ;  $V^*(\omega) = \omega \cdot V(\omega)$ .

Кривые  $W_{л}^*(j\omega)$  для двух характерных случаев изображены на рис. 5.12, а, б.

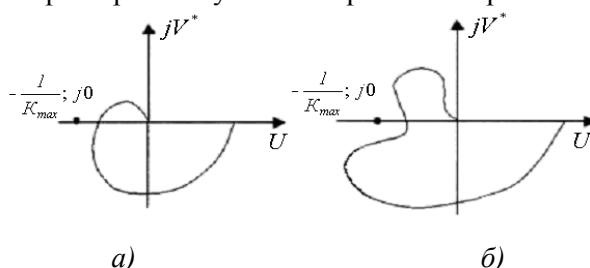


Рис. 5.12. Видоизменённые АФХ линейной части системы:

а) система обладает абсолютной устойчивостью; б) система не обладает абсолютной устойчивостью.

## Раздел 5. Нечёткие системы автоматического управления

### Тема 5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств

Занятие проводится в интерактивной форме (2 часа).

Теория нечётких множеств, основные идеи которой были предложены американским математиком Лотфи Заде в 1965 году, позволяет описывать неточные понятия и наши знания об окружающем мире, оперировать этими знаниями, создавать на их основе различные модели с целью получения новой информации. Нечёткое моделирование оказывается особенно полезным, когда в описании технических систем присутствует неопределённость, которая затрудняет или даже исключает применение точных количественных методов и подходов. Основанные на этой теории методы управления в настоящее время являются передовыми, определяющими перспективные направления научно-прикладных исследований в области автоматического управления.

Использование нечётких САУ позволяет повысить качество продукции при уменьшении ресурсов и энергозатрат и обеспечивает более высокую устойчивость к воздействию мешающих факторов по сравнению с традиционными системами автоматического управления. Другими словами, новые подходы позволяют расширить сферу приложения систем автоматизации за пределы применимости классической теории.

Нечеткая логика основана на использовании таких оборотов естественного языка, как «больше», «меньше», «далеко», «близко». Такая логика по своей характеристике более близка к человеческим мыслям, чем традиционные логические системы. Существенную часть её занимают правила нечёткого условного вывода называемого F-Conditional Rules Inference.

Концептуальной основой формализации правил условного логического вывода является правило отделения. Представим себе проводник, по которому протекает электрический ток. В соответствии с законом Джоуля – Ленца протекающий ток будет нагревать проводник. Обозначим ток через А, а результат его воздействия на проводник – выделение теплоты – через В, тогда

**ЕСЛИ (А→В) истинно и А истинно, то В также истинно.**



И действительно, наши предпосылки о том, что ток стремится вызвать выделение теплоты и что ток в проводнике вообще присутствует, истинны. В итоге, процесс выделения теплоты будет существовать, и это утверждение также истинно.

Диапазон применения нечёткой логики очень широк – от бытовых приборов до управления сложными промышленными процессами. Многие современные задачи управления не могут быть решены классическими методами из-за очень большой сложности описывающих их математических моделей. Такие методы управления хорошо работают при полностью детерминированном объекте управления и детерминированной среде, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта управления оптимальными являются нечеткие методы управления. Вместе с тем, чтобы использовать теорию нечеткости на цифровых компьютерах, необходимы математические преобразования, позволяющие перейти от лингвистических переменных к их числовым аналогам в ЭВМ.

В классической постановке **нечёткая система** – это множество нечётких правил, преобразующих входные данные в выходные. В простейшем варианте такие правила устанавливает инженер-эксперт.

В ассоциативной памяти нечёткой системы на каждый входной пример исходных данных в определённой степени откликаются все правила. Чем ближе сходство входного примера с частью «ЕСЛИ» нечёткого правила, тем больше отклик части «ТО». В нечёткой системе все эти отклики (или множества) «ТО» складываются и берётся их среднее, которое и является входным результатом нечёткой системы.

Теорема о нечёткой аппроксимации утверждает, что нечёткая система может моделировать любую непрерывную систему. Каждое правило нечёткой системы действует как нечёткое «пятно», которое система ставит таким образом, чтобы имитировать отклик непрерывной системы на всевозможные стимулы.

Подобное понятие основывается на предположении о том, что любой элемент лишь в некоторой степени принадлежит данному множеству. Поэтому одним из основных способов математического описания нечёткого множества является определение **степени принадлежности (функции принадлежности)**  $\mu_A$  некоторого числа, например из интервала  $[0,1]$ . Причём границы интервала  $[0,1]$  означают соответственно «принадлежит» или «не принадлежит».

Математически это можно описать следующим образом. Пусть  $E$  – универсальное множество,  $x$  – элемент  $E$ , а  $R$  – определённое свойство. Обычное (чёткое) подмножество  $A$  универсального множества  $E$ , элементам которого удовлетворяет свойство  $R$ , определяется как множество упорядоченной пары  $A = \{\mu_A(x)/x\}$ , где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция, принимающая значение 1, когда  $x$  удовлетворяет свойству  $R$ , и 0 – в противном случае.

Нечёткое подмножество отличается от обычного тем, что для элементов  $x$  из  $E$  не существует однозначного ответа «нет» относительно свойства  $R$ . В связи с этим нечёткое подмножество  $A$  универсального подмножества  $E$  определяется как множество упорядоченной пары  $A = \{\mu_A(x)/x\}$ . При этом  $\mu_A(x)$  – функция принадлежности, принимающая значение в некотором упорядоченном множестве  $M$ . Функция принадлежности указывает степень (или уровень) принадлежности элемента  $x$  к подмножеству  $A$ . Множество  $M$  называют множеством принадлежностей.

При описании объектов и явлений с помощью нечётких множеств используются понятия **нечёткой** и **лингвистической переменных**.

Вводятся 3 нечёткие переменные, представленные тремя символами  $\langle A, X, C_A \rangle$ , где

- $A$  – наименование нечёткой переменной;
- $X = \{x\}$  – универсальное множество (область определения  $A$ );
- $C_A = \{ \langle \mu_A(x)/x \rangle \}$  – нечёткое множество на  $X$ , которое описывает ограничения на возможные значения нечёткой переменной  $A$ .

Лингвистической переменной называется набор  $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ , где

- $\beta$  – имя лингвистической переменной;
- $T$  – множество его значений (терм-множество), представляющих имена нечётких переменных, область определения каждой из которых является множеством  $X$ ;
- $G$  – синтаксическая процедура (грамматика), позволяющая оперировать элементами терм-множества  $T$ , в частности генерировать осмысленные термы;
- $M$  – семантическая процедура, позволяющая преобразовывать новое значение лингвистической переменной, образованной процедурой  $G$ , в нечёткую переменную, т.е. формировать соответствующее нечёткое множество.

К примеру, пусть инженер определяет напряжение в электрической сети с помощью понятий "очень низкое" "низкое", "среднее", "высокое" и т.д. При этом, предположим, минимальное напряжение составляет 10 кВ, максимальное – 121 кВ. Формализация этого описания может быть проведе-

на с помощью лингвистической переменной:  $\beta$  – величина напряжения, терм - множество  $T$  (напряжение) = {"очень низкое", "низкое", "среднее", "более или менее высокое", "высокое", ... }, где каждый терм характеризуется нечётким множеством в универсальном множестве  $X=[10,121]$ . Инженер может интерпретировать понятие "низкое" как "напряжение ниже 40 кВ", "среднее" – как "напряжение, близкое к 55 кВ", "высокое" – как "напряжение выше 70 кВ" и т.д.

Начальное построение функций принадлежности при формировании нечёткой системы может быть выполнено с использованием экспоненциальных функций с дальнейшей их адаптацией по критерию качества управления с помощью полученной модели. Данная модель может быть использована при создании системы автоматического управления функционированием технологического объекта. Это обусловлено тем, что существующие САУ не учитывают сложные нелинейности, погрешность замера параметров и транспортные запаздывания реальных объектов.

## Тема 5.2. Система нечёткого логического вывода

Покажем схематически, как воплощаются в практику рассмотренные ранее теоретические положения нечётких множеств. На рисунке 7.1. изображена основная конфигурация схемы управления на основе нечёткой логики. Она включает в себя четыре основных блока: блок фазификации, база знаний, блок логики принятия решения и блок дефазификации.

**Блок фазификации** выполняет следующие функции:

- измерения значений входных переменных;
- нормализация входных переменных;
- выполнение непосредственно самой функции фазификации, т.е. преобразование входных данных в лингвистические переменные, которые могут быть представлены как нечёткие множества, используя функцию принадлежности.

**База знаний** содержит базу данных и базу лингвистических (нечётких) правил управления.

**Блок логики принятия решения** является как бы сердцевинной схемой. Он обладает способностью принимать решение, основанное на использовании правил нечёткого условного вывода.

**Блок дефазификации** выполняет следующие функции:

- преобразование нормализованных выходных значений в реальные;
- дефазификация, которая из нечёткого действия делает чёткое.

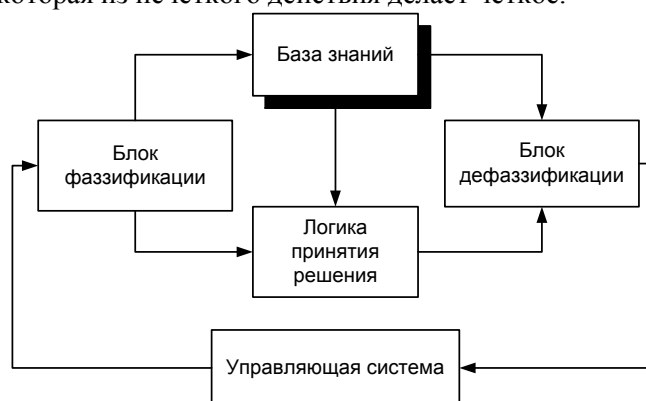


Рис. 7.1. Конфигурация схемы управления на основе нечёткой логики

Таким образом, общая схема обработки нечёткой информации выглядит следующим образом. Точные исходные данные с датчиков, контролирующих управляемый процесс, переводятся в значения лингвистических переменных в блоке фазификации (рис. 7.1). Далее реализуется процедуры нечёткого вывода на множестве продукционных правил, составляющих базу знаний системы управления, в результате чего формируются выходные лингвистические значения. Последние переводятся в точные значения результатов вычислений в блоке дефазификации. На выходе последнего формируются управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Эта концептуальная схема лежит в основе так называемого **нечёткого контролера**, используемого в интеллектуальных системах обработки неопределённой информации, в частности в системах интеллектуального управления.

Регуляторы с нечеткой логикой обеспечивают повышенную надежность систем, позволяют учитывать ограничения по устойчивости, полученные с помощью теории Ляпунова в применении к дискретным системам. Этот подход **не требует наличия математических моделей объекта управления**.

Важно отметить, что исходя из современного опыта применения нечётких систем регулирования в различных областях техники, можно сказать, что применение нечёткого регулирования во мно-

гих случаях является более предпочтительным, нежели прежние классические способы. Нечёткое управление получается более "мягким", переключения производятся реже, кроме того, в условиях неполноты информации нечёткое управление кажется более естественным и подходящим, нежели существующие численные методы.

### Тема 5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения

В электроэнергетических системах вопрос соответствия напряжения на зажимах электроприёмников номинальному стоит очень остро, т.к. работа электроприёмников ухудшается, при отклонении напряжения на вводах от номинального. Чем больше это отклонение, тем больше ухудшение экономических показателей работы. По этой причине и существует необходимость регулирования напряжения.

Как известно, основными причинами отклонения напряжения от номинального являются: переменный характер работы потребителей, переключения в системе, короткие замыкания, обрывы и набросы на провода, изменение режимов работы энергосистемы и т.д. При этом изменяются и потери напряжения в электрических сетях. Соответственно изменяется и напряжение на зажимах электроприёмников. Таким образом, регулирование напряжения необходимо производить автоматически в зависимости от параметров нагрузки и состояния системы, что осуществляется, в частности, с помощью регуляторов напряжения под нагрузкой (РПН), устанавливаемых на силовых трансформаторах.

К РПН силовых трансформаторов предъявляются следующие основные требования:

- поддержание напряжения у потребителей в пределах, регламентируемых ГОСТ;
- снижение количества переключений регулятора настолько возможно, поскольку, чем большее количество переключений совершает РПН, тем быстрее он выходит из строя, тем меньше его срок службы.

Существующие на сегодняшний день регуляторы либо не обеспечивают всех перечисленных выше требований, либо обеспечивают их, но не в полной мере. В связи с этим, был предложен следующий метод решения:

Для решения задачи моделируется простейшая электрическая сеть, состоящая из нагрузки, энергосистемы, линий высокого и низкого напряжений и самого трансформатора с нечётким РПН.

Как было отмечено выше, работа нечёткого контроллера состоит из нескольких этапов:

- **приведение к нечёткости** (фаззификация);
- **логический вывод**;
- **композиция** – нечёткие подмножества, назначенные для каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы сформулировать одно нечёткое подмножество для каждой переменной вывода.

- **приведение к чёткости** (дефаззификация)

Вводятся следующие лингвистические переменные:

1. На входе:

- **напряжение U**. Его значения: «очень низкое» – «very low» (VL); «низкое» – «low» (L); «нормальное» – «normal» (N); «высокое» – high (H); «очень высокое» – «very high» (VH); «аварийное» – «fault» (F);
- **текущее положение РПН**. Его значения: «отрицательное» – «negative» (N); «немного отрицательное» – «little negative» (LN); «нуль» – «zero» (Z); «немного положительное» – «little positive» (LP); «положительное» – «positive» (P).

2. На выходе:

- **направление переключения** – **Direct**. Значения переменной: «вверх» – «Up»; «вниз» – «Down»; «не переключать» – «None»;
- **задержка времени перед переключением** – **Time**. Нечёткие значения переменной: «очень малое» – «very small» (VS); «малое» – «small» (S); «долгое» – «long» (L); «очень долгое» – «very long» (VL).

Таким образом, нечёткий вывод в данной системе состоит из 30 правил.

Зависимость времени переключения (переменная Time) целесообразно выбирать с учётом того факта, что в случае, когда напряжение сильно отличается от нормального («очень низкое» или очень высокое), то время переключения должно быть коротким («малое», либо «очень малое»). Если же напряжение близко к нормальному, то время переключения большое («долгое» или «очень долгое»).

Правила определения значения нечёткой выходной переменной (Direct) могут быть определены следующим образом: при напряжении ниже номинального («очень низкое», «низкое»), направление переключения РПН должно соответствовать значению «вниз» («Down»). И, наоборот, при повышенном напряжении («высокое», «очень высокое») направление переключения РПН принимает значение

«вверх» («Up»). В тех случаях же, когда напряжение примерно равно номинальному («нормальное»), РПН не переключается («None»).

Отдельно необходимо рассмотреть действия контроллера при аварийных ситуациях, а именно – при коротких замыканиях. В этих случаях необходимо заблокировать работу РПН. В таких ситуациях лингвистическая переменная «напряжение» принимает значение «аварийное» («F»), и с выхода контроллера снимается сигнал «не переключать» («None»). Однако, если РПН находится не в крайнем нижнем положении, то есть возможность исправить сложившуюся ситуацию и поднять напряжение до номинального, то в этом случае на выход контроллера подаётся сигнал вниз («Down»).

Для краткости сформулированные правила сведены в таблицы 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1.

Зависимость нечёткой выходной переменной LTC от нечётких входных переменных

Time		Текущее положение РПН - LTC				
		N	LN	Z	LP	P
U	F	VL	VL	L	L	L
	VL	L	S	VS	VS	VS
	L	VL	VL	L	S	S
	N	VL	VL	SL	VL	VL
	H	S	S	L	VL	VL
	VH	VS	VS	VS	S	L

Таблица 7.2.

Зависимость нечёткой выходной переменной Direct от нечётких входных переменных

Direct		Текущее положение РПН - LTC				
		N	LN	Z	LP	P
U	F	None	Down	Down	Down	Down
	VL	Down	Down	Down	Down	Down
	L	Down	Down	Down	Down	Down
	N	None	None	None	None	None
	H	Up	Up	Up	Up	Up
	VH	Up	Up	Up	Up	Up

На этапе композиции производится объединение найденных усечённых функций принадлежности с использованием операции максимизации (max), что приводит к получению итогового нечёткого множества для переменных выхода («Time» и «Direct»). Далее, на последнем этапе нечёткого алгоритма производится приведение к четкости (дефазификация).

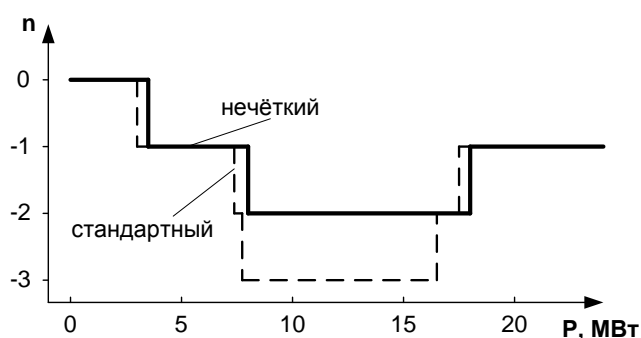


Рис. 7.2. Управляющие сигналы РПН от нечёткого контроллера и от классического

Необходимо отметить, что стандартный контроллер работает, как правило, согласно обратной времятоковой характеристике, когда время переключения находится как обратно пропорциональная значению тока величина.

Как показывают исследования, при сравнении работ двух контроллеров – классического и нечёткого, регулирование напряжения последним является более эффективным. На графике 7.2. показаны управляющие сигналы, поступающих к РПН. Хорошо видно, что нечёткий контроллер производит меньшее количество коммутаций. В данном случае – 3 переключения против 5 у классического.

### 5.3.1. Нечёткие системы АРВ синхронных генераторов

Синхронный генератор (СГ) и его система возбуждения характеризуются нелинейностями, которые в свою очередь зависят от режима работы энергосистемы. При этом зачастую информация о ха-

рактуре изменения этих нелинейностей отсутствует. Для решения этой задачи управления СГ возможно построение систем возбуждения на основе методов теории нечётких систем управления.

Хорошие перспективы нечётких регуляторов объясняются достоинствами, присущими данному классу устройств: высокой робастностью, простотой конструкции и возможностью использовать накопленные знания.

Наиболее интенсивные работы по применению нечётких регуляторов для регулирования возбуждения синхронных генераторов и наиболее значительные результаты получены в зарубежных странах (особенно в Японии). Кроме того исследования по применению АРВ на основе нечёткой логики (АРВ-НЛ) активно ведутся и в России. При этом испытания на физических и математических моделях сложных ЭЭС показывают, что АРВ-НЛ обеспечивают лучшее подавление помех по сравнению с традиционными регуляторами возбуждения (АРВ-СД и АРВ-М).

Структурная схема замкнутой системы автоматического управления – объекта регулирования (синхронного генератора) и регулятора (АРВ-НЛ) показана на рисунке 7.3. В качестве входных сигналов регулирования по каналам стабилизации АРВ-НЛ использованы: отклонение напряжения генератора от заданной уставки  $\Delta U$  и отклонение частоты вращения ротора  $\Delta \omega$  (частота напряжения  $\Delta f = \Delta \omega / 2\pi$ ).

В рассматриваемой схеме АРВ-НЛ в роли метода дефазификации бумем использовать механизм принятия решения по принципу Мамдани и метод центра тяжести. На этапе фаззификации для входных и выходных переменных будем использовать функции принадлежности (MF) треугольного вида (trimf) [6]. На рис.7.4 представлены сформированные функции принадлежности термов входных переменных  $\Delta \omega$  и  $\Delta U$ .

Принимаются следующие термы лингвистических переменных:

NB (Negative Big) – отрицательное большое;

NS (Negative Small) – отрицательное малое;

ZR (Zero) – нуль, близкое к нулю;

PS (Positive Small) – положительное малое;

PB (Positive Big) – положительное большое.

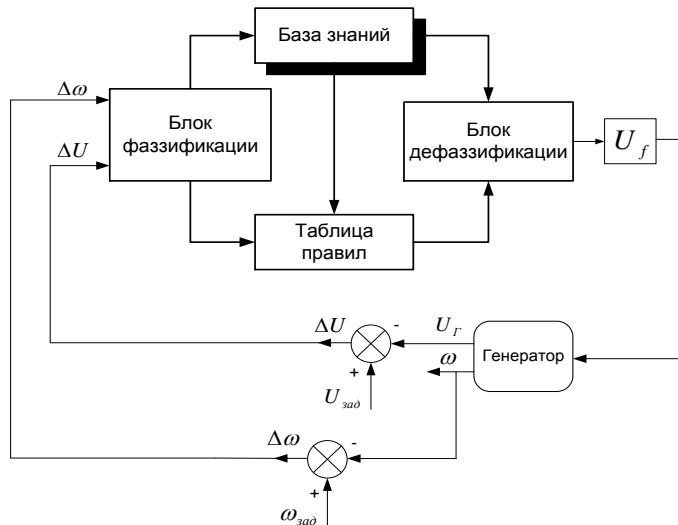


Рис. 7.3. Замкнутая система управления возбуждением синхронного генератора через АРВ-НЛ

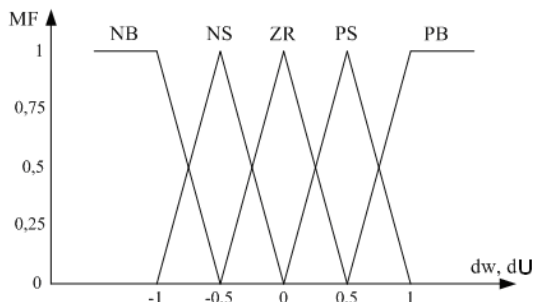


Рис.7.4. Вид функций принадлежности для входных переменных

При составлении таблицы правил возникает некоторая неоднозначность в оценке терма выходной переменной, что иллюстрируется таблицей 7.3.

Зависимость нечёткой выходной переменной  $U_f$  от нечётких входных переменных  $\Delta\omega$  и  $\Delta U$

$\Delta U$	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>ZR</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
$\Delta\omega$					
<b>NB</b>	NB*	NB/NS	NS	NS/ZR	ZR
<b>NS</b>	NB/NS	NS	NS/ZR	ZR	ZR/PS
<b>ZR</b>	NS	NS/ZR	ZR	ZR/PS	PS
<b>PS</b>	NS/ZR	ZR	ZR/PS	PS	PS/PB
<b>PB</b>	ZR	ZR/PS	PS	PS/PB	PB

\* закрашенные ячейки характеризуют термы выходной переменной, которые однозначно определяются.

Опишем систему правил для некоторых случаев значений входных переменных:

- 1) IF  $\Delta\omega$  is **NB** AND IF  $\Delta U$  is **NB** THEN  $U_f = \mathbf{NB}$
- 2) IF  $\Delta\omega$  is **NB** AND IF  $\Delta U$  is **NS** THEN  $U_f = \mathbf{NB}$
- 3) IF  $\Delta\omega$  is **NB** AND IF  $\Delta U$  is **ZR** THEN  $U_f = \mathbf{NS}$
- 4) IF  $\Delta\omega$  is **NB** AND IF  $\Delta U$  is **PS** THEN  $U_f = \mathbf{NS}$

Все остальные значения по тому же принципу сведены в табл. 7.3

В итоге, как показали проведённые испытания, нечёткие регуляторы обеспечили высокоэффективное демпфирование электромеханических колебаний синхронного генератора, сокращение времени переходных процессов, улучшение стабилизации параметров вырабатываемой электроэнергии, повысив в значительной степени эффективность работы энергосистемы по сравнению со стандартными регуляторами базовых систем возбуждения, сократив при этом на 10% энергозатраты на управление СГ.

#### 4.3. Лабораторные работы

Учебным планом не предусмотрено.

#### 4.4. Практические занятия

<i>№ п/п</i>	<i>Номер раздела дисциплины</i>	<i>Тема практического занятия</i>	<i>Объем (час.)</i>	<i>Вид занятия в интерактивной, активной, инновационной формах, (час.)</i>
1	1.	Преобразование функциональных схем	1	-
2	2.	Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	1	-
3	2.	Астатическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	1	-
4	3.	Построение переходной и частотных характеристик в MATLAB	0,5	Работа с малой группой (0,5 часа)
5	3.	Исследование апериодического звена первого порядка	0.5	Работа с малой группой (0,5 часа)
6	3.	Исследование апериодического (колебательного) звена второго порядка	1	Работа с малой группой (1 часа)
7	3.	Исследование реального дифференцирующего звена	1	Работа с малой группой (1 часа)

8	3.	Исследование замкнутой системы автоматического управления	1	Работа с малой группой (1 часа)
9	3.	Коррекция системы автоматического управления	1	
10	3.	Исследование скорректированной системы автоматического управления	1	
<b>ИТОГО</b>			<b>9</b>	<b>4</b>

#### 4.5. Контрольные мероприятия: курсовой проект (курсовая работа), контрольная работа, РГР, реферат

Учебным планом не предусмотрено.

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

<i>Компетенции</i>  <i>№, наименование разделов дисциплины</i>	<i>Кол-во часов</i>	<i>Компетенция</i>		<i>Σ комп.</i>	<i>t<sub>ср</sub> час</i>	<i>Вид учебных занятий</i>	<i>Оценка результатов</i>
		<i>ОПК-2</i>	<i>ПК-8</i>				
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Принципы построения систем автоматического управления	13	+	-	1	13	Лк, ПЗ, СР	зачет
2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия	13	+	+	2	6,5	Лк, ПЗ, СР	зачет
3. Динамика линейных систем автоматического управления	37	+	+	2	18,5	Лк, ПЗ, СР	зачет
4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления	21	+	+	2	10,5	Лк, СР	зачет
5. Нечёткие системы автоматического управления	20	+	+	2	10	Лк, СР	зачет
<i>Всего часов</i>	<b>104</b>	<b>58,5</b>	<b>45,5</b>	<b>2</b>	<b>52</b>		

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

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.

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

№	<i>Наименование издания</i>	<i>Вид занятия</i>	<i>Количество экземпляров в библиотеке, шт.</i>	<i>Обеспеченность, (экз./ чел.)</i>
1	2	3	4	5
<b>Основная литература</b>				
1.	Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.	Лк, ПЗ, СР	14	0.7
2.	Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.	Лк, ПЗ, СР	26	1
<b>Дополнительная литература</b>				
3.	Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.: ил.	Лк, СР	10	0.5
4.	Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.	Лк, ПЗ, СР	198	1
5.	Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.	ПЗ, СР	70	1
6.	Цветкова О.Л. Теория автоматического управления: учебник. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 207 с. ( <a href="http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=443415&amp;sr=1">http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&amp;id=443415&amp;sr=1</a> )	Лк, ПЗ, СР	ЭР	1
7.	Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. [Электронный ресурс] / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. – Электрон. Дан. – СПб.: Лань, 2017. – 464 с. – Режим доступа: <a href="http://e.lanbook.com/book/90161">http://e.lanbook.com/book/90161</a>	ПЗ, СР	ЭР	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=.](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 практических занятий

#### **Практическое занятие №1** **Преобразование функциональных схем**

##### Цель работы:

Овладение навыками преобразования функциональных схем и получением обобщенных передаточных коэффициентов системы.

##### Задание:

1. Для системы, функциональная схема которой приведена на рис.1, определить передаточные коэффициенты по входному сигналу ( $Y$ ) и по возмущению ( $Z$ ), т.е. обобщенные коэффициенты  $K_y$  и  $K_z$ .

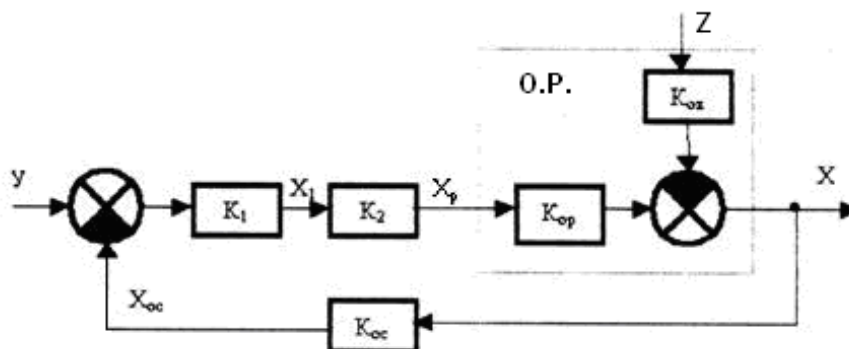


Рис. 1. Функциональная схема системы

2. Найти обобщённый передаточный коэффициент системы, функциональная схема которой представлен на рис.2.

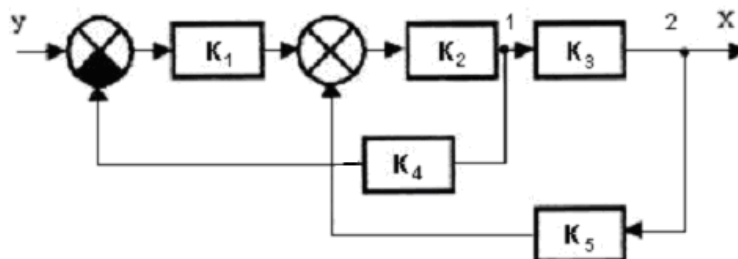


Рис. 2. Исходная схема САР

##### Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Произвести расчеты и преобразования схем, указанные в задании.
3. Проанализировать полученные результаты.

### Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Конечные и промежуточные результаты преобразования схем;
3. Вывод и анализ полученных результатов.

### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

#### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

#### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое функциональная схема системы автоматического управления?
2. Какие существуют способы преобразования функциональных схем?
3. Что такое обобщенный передаточный коэффициент системы автоматического управления?

## Практическое занятие №2

### Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.

#### Цель работы:

Овладеть навыками статического расчета статической системы автоматического управления и построения статической характеристики.

#### Задание:

Для системы АРВ генератора, схема которой показана на рис.3, составить функциональную схему, выполнить статический расчет и построить статическую характеристику. Для статического расчёта системы АРВ полагать, что данная система должна обеспечивать поддержание напряжения на зажимах генератора с точностью  $\Delta U = 3,8\% U_{ном}$  при колебаниях нагрузки  $\Delta I = 120\% I_{ном}$ . Исходные данные представлены в таблице 1. Варианты выбирать по указанию преподавателя.

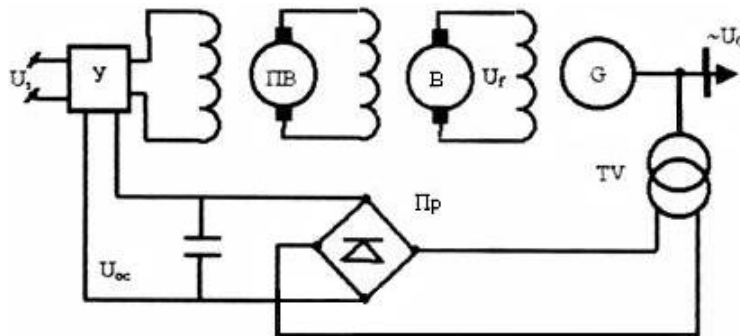


Рис.3. Схема системы АРВ генератора

Исходные данные для расчета

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_d$ (о.е.)	2,3	2,11	2,32	1,67	2,56	1,84	1,9	2,19	1,9	2,04
$T_f$ (с)	5,9	7,0	7,0	5,9	9,2	6,9	6,5	7,0	6,5	6,7
$S_{ном}$ (МВА)	188	235	260	353	588	235	235	353	125	188
$U_{ном}$ (кВ)	18	15,75	15,75	20	20	15,75	15,75	20	10,5	10,5
$U_{фном}$ (кВ)	0,267	0,22	0,24	0,33	0,353	0,327	0,327	0,32	0,2	0,22
$K_B$	1,7	1,2	1,8	2	3	2	3	3	4	2
$K_{ПВ}$	7,1	10	10	9	7	5,5	6	7	5	5
$K_{ПВ}$	0,6	0,8	0,4	0,3	0,8	0,7	0,6	0,85	0,65	0,4
$T_{ПВ}$ (с)	0,2	0,3	0,3	0,25	0,3	0,15	0,2	0,28	0,31	0,19
$T_{ПР}$ (с)	0,09	0,1	0,08	0,1	0,05	0,06	0,08	0,07	0,1	0,05
$T_B$ (с)	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,85	0,95	1,2	1,05	1,3

Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Составить функциональную схему заданной системы АРВ генератора.
3. Выполнить статический расчет заданной системы АРВ генератора.
4. Построить статические характеристики для системы в разомкнутом и замкнутом состояниях.

Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Исходная схема и исходные данные в соответствии с вариантом;
3. Составленная функциональная схема;
4. Статический расчет заданной системы;
5. Статические характеристики системы.
6. Выводы.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

## Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

## Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Цветкова О.Л. Теория автоматического управления: учебник. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 207 с. ([http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=443415&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=443415&sr=1))

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое «статический расчёт» системы?
2. Каково назначение «статического расчёта»?
3. Как выглядят статические характеристики в статических системах?

**Практическое занятие №3**  
**Астатическая система автоматического управления.**  
**Вывод и построение статической характеристики.**

Цель работы:

Овладеть навыками статического расчета астатической системы автоматического управления и построения статической характеристики.

Задание:

Для системы АРВ генератора, схема которой показана на рис.4, составить функциональную схему, выполнить статический расчет и построить статическую характеристику. Тиристорный регулятор возбуждения считать астатическим элементом (интегрирующим звеном), имеющим порог нечувствительности –  $\varepsilon_{\text{ПР}}$ . Для статического расчёта полагать, что система должна обеспечивать поддержание напряжения на зажимах генератора с точностью  $\Delta U = 2\% U_{\text{ном}}$ . Исходные данные представлены в таблице 2. Варианты выбирать по указанию преподавателя.

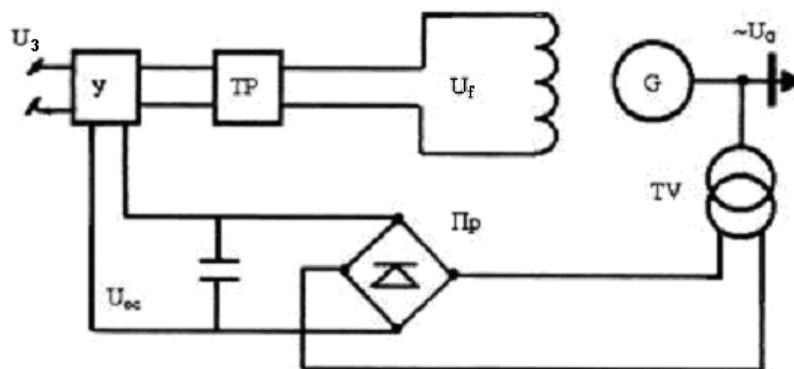


Рис.4. Схема системы АРВ генератора

Таблица 2

Исходные данные для расчета

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_d$ (о.е.)	1,9	2,18	1,9	2,04	2,3	2,11	2,32	1,84	1,9	2,19
$T_f$ (с)	6,2	8,9	6,5	6,7	5,9	7,0	7,0	6,9	6,5	7,0
$S_{\text{ном}}$ (МВА)	79	79	125	167	188	235	260	235	235	353
$U_{\text{ном}}$ (кВ)	6,3	10,5	10,5	10,5	18	15,75	15,75	15,75	15,75	20
$U_{f\text{ном}}$ (кВ)	0,155	0,14	0,2	0,22	0,267	0,22	0,24	0,327	0,327	0,32
$K_{\text{ПР}}$	10	12	15	8	18	14	16	17	21	19
$K_{\text{ТР}}$	0,6	0,87	0,64	0,9	0,77	0,81	0,74	0,68	0,6	0,65
$T_{\text{ПР}}$ (с)	0,4	0,3	0,5	0,6	0,4	0,45	0,39	0,41	0,3	0,29
$T_y$ (с)	0,1	0,08	0,05	0,07	0,1	0,04	0,08	0,07	0,05	0,04
$\varepsilon_{\text{ПР}}$ (В)	1,0	1,5	1,2	2,0	1,6	1,1	1,3	0,9	1,2	1,05

Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Составить функциональную схему заданной системы АРВ генератора.
3. Выполнить статический расчет заданной системы АРВ генератора.
4. Построить статические характеристики для системы в разомкнутом и замкнутом состояниях.

Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;

2. Исходная схема и исходные данные в соответствии с вариантом;
3. Составленная функциональная схема;
4. Статический расчет заданной системы;
5. Статические характеристики системы;
6. Выводы.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

**Основная литература**

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

**Дополнительная литература**

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Цветкова О.Л. Теория автоматического управления: учебник. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 207 с. ([http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=443415&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=443415&sr=1))

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое астатические системы автоматического управления?
2. Каково назначение «статического расчёта»?
3. Как выглядят статические характеристики в астатических системах?

**Практическое занятие №4**

**Построение переходной и частотных характеристик в MATLAB**

Цель работы:

Получение основных навыков работы в системе MATLAB для построения переходной и частотных характеристик.

Задание:

1. Изучить основные математические операции и встроенные элементарные функции системы MATLAB.
2. Изучить способы построения графиков в MATLAB.
3. Сформировать следующую передаточную функцию в MATLAB:

$$W1 = \frac{12}{s^3 + 2s^2 + 3s + 1}.$$

4. Построить переходную характеристику, ЛАЧХ и ЛФЧХ по сформированной передаточной функции.
5. Построить АЧХ, ФЧХ и АФХ по заданной передаточной функции в MATLAB.

Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Получить навык работы в системе MATLAB.
3. Выполнить построение заданных характеристик в MATLAB.

Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Скриншот рабочей области MATLAB при формировании передаточной функции;
3. Переходная характеристика по заданной передаточной функции в MATLAB;
4. Частотные характеристики по заданной передаточной функции в MATLAB;
5. Выводы.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
3. Гайдук А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. [Электронный ресурс] / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. – Электрон. Дан. – СПб.: Лань, 2017. – 464 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/90161>

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое переходная характеристика?
2. Как построить частотные характеристики системы в MATLAB?

### Практическое занятие №5

### Исследование апериодического звена первого порядка

#### Цель работы:

Ознакомление с математическим описанием звена первого порядка и его физической интерпретацией, выводы передаточной функции и аналитических выражений для построения основных частотных характеристик, освоение методики построения частотных характеристик и переходных характеристик в системе MATLAB.

#### Задание:

Необходимо осуществить анализ генератора постоянного тока с независимым возбуждением (рис.5). Из теории известно, что зависимость  $U_{\text{я}} = f(U_{\text{в}})$  для генератора постоянного тока при условии вращения якоря с постоянной частотой ( $n=\text{const}$ ) и с учётом пренебрежения насыщенной магнитной системы можно представить следующим уравнением:

$$T_{\text{в}} \frac{dU_{\text{я}}}{dt} + U_{\text{я}} = K \cdot U_{\text{в}},$$

где  $U_{\text{я}}$  – напряжение на якоре (выходной сигнал);  $U_{\text{в}}$  – напряжение на обмотке возбуждения (входной сигнал);  $T_{\text{в}}$  – постоянная времени цепи возбуждения;  $K$  – передаточный коэффициент.

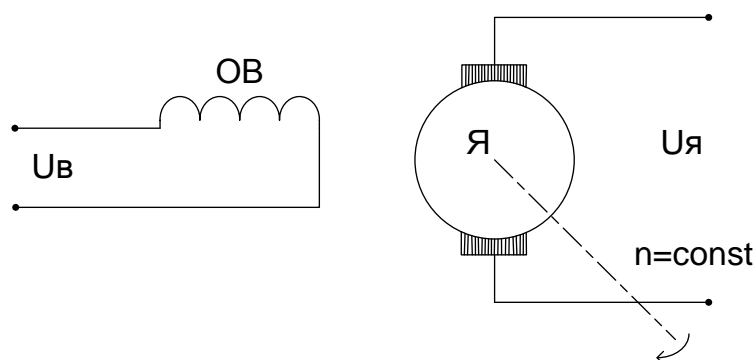


Рис.5. Схема генератора постоянного тока

Переходная характеристика генератора постоянного тока, как звена первого порядка, определяется следующей зависимостью:

$$U_{\text{я}} = K \cdot (1 - e^{-t/T_{\text{в}}}).$$

Исходные данные указаны в таблице 3. Для построения выбирается один из вариантов

по указанию преподавателя. При этом полагать, что  $K = \frac{U_{\text{я ном}}}{U_{\text{в ном}}}$ .

Задаваясь значениями  $t$ , постройте в среде MATLAB характеристику  $U_{\text{я}} = f(t)$ .

Таблица 3

Параметры генератора

Вариант	$U_{\text{я ном}}; \text{В}$	$U_{\text{в ном}}; \text{В}$	$T_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}; \text{сек}$
1	220	220	0,4
2	220	110	0,5
3	380	110	0,3
4	380	50	0,6
5	220	50	0,8

Для построения частотных характеристик необходимо записать выражение для передаточной функции и комплексного передаточного коэффициента звена.

Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Согласно варианту постройте в среде MATLAB характеристику  $U_{\text{я}} = f(t)$ .
3. Постройте переходную и все частотные характеристики в среде MATLAB для звена первого порядка.
4. С помощью пакета Simulink смоделируйте генератор постоянного тока в виде апериодического звена первого порядка и получите его переходную характеристику.

Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Построенная характеристика изменения напряжения якоря  $U_{\text{я}} = f(t)$ ;
3. Построенные характеристики в соответствии с вариантом параметров апериодического звена первого порядка;
4. Результаты моделирования в Simulink;
5. Выводы.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
3. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Что такое переходная характеристика?
2. Передаточная функция апериодического звена первого порядка.
3. Как построить основные частотные характеристики аналитически?
4. Причины использования ПЭВМ для построения характеристик?

**Практическое занятие №6**  
**Исследование апериодического (колебательного) звена второго порядка**

Цель работы:

Ознакомление с математическим описанием звена второго порядка и его физическим смыслом, вывод передаточной функции, построение переходной и частотных характеристик с помощью ПЭВМ.

Задание:

Необходимо изучить математическое описание звена второго порядка и его физический смысл.

Уравнением второго порядка описывается достаточно большое количество технических устройств: линейные цепи, содержащие активное сопротивление, индуктивность и емкость (рис.6); электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением, если входным сигналом считать напряжение на зажимах якоря, а выходным сигналом – угловую частоту вращения якоря (рис. 7).

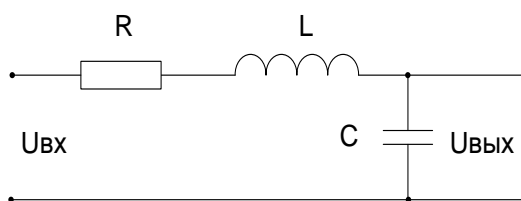


Рис.6. Вариант линейной цепи, описываемой уравнением второго порядка

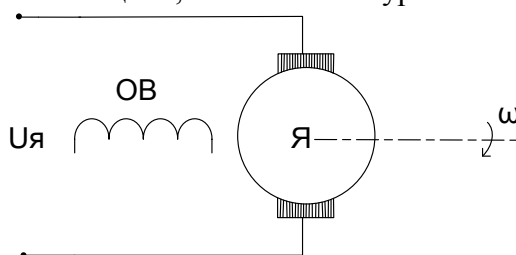


Рис.7. Двигатель постоянного тока как звено второго порядка

Соотношение между входным и выходным сигналами двигателя постоянного тока описывается следующим уравнением:

$$T^2 \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2} + 2\rho \cdot T \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K \cdot U_{\text{я}},$$

где  $T$  – постоянная времени;  $2\rho$  – коэффициент затухания;  $U_{\text{я}}$  – напряжение на зажимах якоря;  $\omega$  – угловая скорость (частота) вращения якоря.

На основании этого выражения можно получить переходные характеристики, которые являются графическим построением решения уравнения, т.е.  $\omega=f(t)$ .

Все основные частотные характеристики получаются из выражения для передаточной функции:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{я}}(p)} = \frac{K}{T^2 \cdot p^2 + 2\rho \cdot T \cdot p + 1}.$$

Аналитически необходимо построить АЧХ и ФЧХ для трёх значений коэффициента затухания. Исходные данные представлены в таблице 4.

Таблица 4

Данные для построения характеристики звена второго порядка

Вариант	$T$	$2\rho$	$K$
1	0,1	0,1	2
2	0,2	0,5	1
3	0,15	2	3
4	0,05	1	4
5	0,12	3	3,5



### Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Постройте аналитически АЧХ и ФЧХ звена второго порядка.
3. Постройте для трёх значений  $2\rho$  переходную и все частотные характеристики в среде MATLAB.
4. С помощью пакета Simulink смоделируйте двигатель постоянного тока в виде апериодического звена второго порядка и получите его переходную характеристику.

### Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Аналитически построенные АЧХ и ФЧХ для трёх значений коэффициента затухания  $2\rho$ ;
3. Построенные в MATLAB характеристики в соответствии с вариантом параметров апериодического звена второго порядка;
4. Результаты моделирования в Simulink;
5. Выводы.

### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

#### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

#### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
3. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Передаточная функция колебательного звена.
2. Влияния коэффициента затухания на характер переходного процесса в апериодическом звене второго порядка.
3. Как получить выражения для построения частотных характеристик?

## **Практическое занятие №7**

### **Исследование реального дифференцирующего звена**

#### Цель работы:

Исследование реального дифференцирующего звена и построение его переходной и частотных характеристик на ПЭВМ.

#### Задание:

Необходимо изучить математическое описание реального дифференцирующего звена и его физический смысл.

Из теории известно, что можно рассматривать три типа дифференцирующих звеньев:

- идеальное дифференцирующее звено с уравнением:

$$X = K \frac{dY}{dt},$$

- реальное дифференцирующее звено с уравнением:

$$T \frac{dX}{dt} + X = K \frac{dY}{dt},$$

- реальное дифференцирующее звено со статизмом с уравнением:

$$T \frac{dX}{dt} + X = K \left( T_0 \frac{dY}{dt} + Y \right),$$

где  $X$  – выходной сигнал;  $Y$  – входной сигнал;  $T$ ,  $T_0$  – постоянные времени;  $K$  – передаточный коэффициент.

В настоящем занятии выполняется исследование наиболее часто встречающегося реального дифференцирующего звена с уравнением. Среди различных технических устройств, описываемых уравнением реального дифференцирующего звена, наиболее типичным является трансформатор.

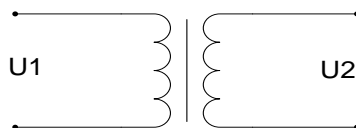


Рис.8. Трансформатор как реальное дифференцирующее звено

Если пренебречь насыщением, то связь между  $U_1$  и  $U_2$  описывается соотношением:

$$T \frac{dU_2}{dt} + U_2 = K \frac{dU_1}{dt}.$$

В соответствии с этим уравнением можно записать передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{K \cdot p}{T \cdot p + 1}.$$

Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Для одного из вариантов параметра звена (табл.5), аналитически построить АЧХ, ФЧХ и АФЧХ.

Таблица 5

Параметры дифференцирующего звена

Вариант	T, с	K
1	0,1	5
2	0,5	10
3	2	15
4	1	1
5	3	20

3. Постройте переходную и частотные характеристики в среде MATLAB.
4. С помощью пакета Simulink смоделируйте трансформатор в виде реального дифференцирующего звена и получите его переходную характеристику.

Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Аналитически построенные АЧХ, ФЧХ и АФЧХ для реального дифференцирующего звена;
3. Построенные в MATLAB характеристики в соответствии с вариантом параметров дифференцирующего звена;
4. Результаты моделирования в Simulink;
5. Выводы.

Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.

2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.

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

### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Типы дифференцирующих звеньев и их уравнения.
2. Передаточная функция реального дифференцирующего звена.
3. Выражения для аналитического построения частотных характеристик реального дифференцирующего звена.

## Практическое занятие №8

### Исследование замкнутой системы автоматического управления

#### Цель работы:

Освоение принципов математического описания замкнутой системы автоматического управления (САУ), исследование её устойчивости аналитически, исследование устойчивости и показателей качества на ПЭВМ.

#### Задание:

Для исследования предлагается система поддержания напряжения синхронного генератора (рис.9).

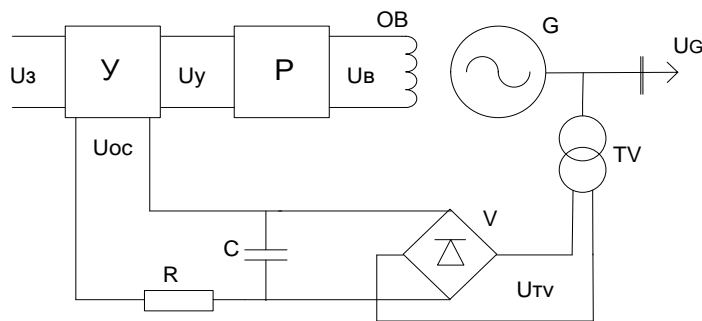


Рис.9. Схема системы поддержания напряжения синхронного генератора:

$U_G$  – напряжения на зажимах генератора;  $U_B$  – напряжение на обмотке возбуждения генератора;  $U_Y$  – напряжение на выходе усилителя;  $U_3$  – задающее напряжение;  $U_{OC}$  – напряжение на выходе цепи обратной связи;  $U_{TV}$  – напряжение на выходе трансформатора напряжения;  $G$  – синхронный генератор;  $OB$  – обмотка возбуждения;  $P$  – регулятор;  $Y$  – усилитель;  $TV$  – трансформатор напряжения;  $V$  – выпрямитель (преобразовательное устройство);  $C$  – конденсатор сглаживающий;  $R$  – сопротивление.

При определённых допущениях генератор, регулятор, выпрямительное устройство со сглаживающим конденсатором можно считать аperiodическими звеньями первого порядка, остальные – безынерционными. Тогда структурную схему с соответствующими передаточными функциями можно представить так, как показано на рисунке 10.

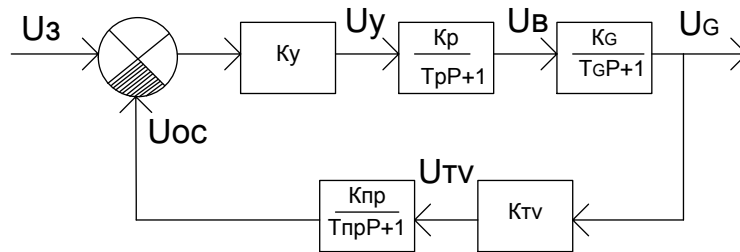


Рис.10. Структурная схема САУ

Для исследования системы на устойчивость и качество переходного процесса необходимо записать её передаточную функцию в разомкнутом и замкнутом состоянии.

Для системы в разомкнутом состоянии все звенья оказываются соединенными между собой последовательно, поэтому передаточная функция получается как произведение передаточных функций звеньев, составляющих структурную схему системы:

$$W_{p.c.}(p) = \frac{K_G \cdot K_p \cdot K_y \cdot K_{пр} \cdot K_{TV}}{(T_G p + 1)(T_p p + 1)(T_{пр} p + 1)}.$$

Для замкнутой системы передаточная функция определяется на основании формулы:

$$W_{з.с.}(p) = \frac{W_{охв}(p)}{1 + W_{охв}(p) \cdot W_{oc}(p)},$$

где  $W_{охв}(p)$  – передаточная функция охваченной обратной связью части системы;  $W_{oc}(p)$  – передаточная функция обратной связи:

$$W_{охв}(p) = \frac{K_G \cdot K_p \cdot K_y}{(T_G p + 1)(T_p p + 1)}; \quad W_{oc}(p) = \frac{K_{пр} \cdot K_{TV}}{(T_{пр} p + 1)}.$$

Таким образом, можно получить передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_{з.с.}(p) = \frac{\frac{K_G \cdot K_p \cdot K_y}{(T_G p + 1)(T_p p + 1)}}{1 + \frac{K_G \cdot K_p \cdot K_y \cdot K_{пр} \cdot K_{TV}}{(T_G p + 1)(T_p p + 1)(T_{пр} p + 1)}} = \frac{K_G \cdot K_p \cdot K_y (T_{пр} p + 1)}{(T_G p + 1)(T_p p + 1)(T_{пр} p + 1) + K_{p.c.}},$$

где  $K_{p.c.} = K_G \cdot K_p \cdot K_y \cdot K_{пр} \cdot K_{TV}$  – передаточный коэффициент разомкнутой системы.

Передаточная функция замкнутой системы является основным выражением для исследования свойств системы. Наиболее важным свойством системы является её устойчивость.

В работе предлагается исследовать систему на устойчивость классическими способами по критериям Гурвица и Михайлова. Для использования критериев Гурвица и Михайлова передаточную функцию следует записать в форме полиномов:

$$W(p) = \frac{b_0 p + b_1}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}.$$

#### Порядок выполнения:

1. Изучить теоретический материал.
2. Используя функции MATLAB, постройте переходную характеристику замкнутой системы поддержания напряжения синхронного генератора. Оцените показатели качества переходного процесса. Параметры звеньев (передаточные коэффициенты и постоянные времени) представлены в таблице 6.

Таблица 6

Варианты параметров системы

Вариант	$K_G$	$K_p$	$K_y$	$K_{пр}$	$K_{TV}$	$T_G, c$	$T_p, c$	$T_{пр}, c$
1	60	12	8	0,4	0,0095	7	0,1	0,7
2	68	10	16	0,4	0,0095	7	0,3	0,7
3	65	5	10	0,1	0,0095	8	0,2	0,7
4	63	1	5	0,1	0,0095	8	1	0,7
5	62	10	12	0,2	0,0095	9	1,2	0,7

3. Используя функции MATLAB, оцените на устойчивость по критерию Гурвица замкнутую систему поддержания напряжения синхронного генератора.
4. Для оценки на устойчивость постройте кривую Михайлова в MATLAB.
5. С помощью пакета Simulink смоделируйте замкнутую систему поддержания напряжения синхронного генератора. Получите осциллограмму изменения напряжения синхронного генератора.

#### Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Принципиальная и структурная схема исследуемой системы;
3. Вывод передаточной функции системы в разомкнутом и замкнутом состоянии;
4. Переходная характеристика замкнутой системы, полученная в MATLAB. Оценка показателей качества переходного процесса;
5. Оценка устойчивости по критерию Гурвица и Михайлова;
6. Результаты моделирования в Simulink;
7. Выводы.

#### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

#### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

#### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
3. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Поясните принципы получения передаточной функции системы в разомкнутом и замкнутом состоянии.
2. Принципы практического применения критериев Гурвица и Михайлова.
3. Основные показатели качества переходного процесса, их количественное определение по переходной характеристике.

### **Практическое занятие №9**

#### **Коррекция системы автоматического управления**

#### Цель работы:

Освоение принципов последовательной коррекции САУ по заданным показателям качества с использованием логарифмических амплитудно-частотных характеристик.

#### Задание:

Наиболее распространенным и простым методом синтеза корректирующего звена является метод с использованием логарифмических характеристик. Необходимо выполнить коррекцию САУ, используя следующую последовательность решения задачи:

1. Строится логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) исходной, некорректированной системы –  $L_{НС}$ .

- По заданным показателям качества строится ЛАЧХ желаемой системы –  $L_{\text{ж}}$ .
- Путём графического вычитания из желаемой ЛАЧХ характеристики нескорректированной системы находится ЛАЧХ последовательного корректирующего звена:

$$L_{\text{к}} = L_{\text{ж}} - L_{\text{нс}}.$$

- По ЛАЧХ корректирующего звена определяется его передаточная функция и подбирается физический аналог (схема или конструкция).

На данном занятии рассматривается синтез последовательного корректирующего звена на примере системы поддержания напряжения синхронного генератора, схема которой приведена на рис.9. Синтез ограничивается получением передаточной функции корректирующего звена. Параметры системы указаны в таблице 7. Синтез звена выполняется для одного из вариантов по указанию преподавателя.

Таблица 7

Варианты параметров системы

Вариант	$K_G$	$K_p$	$K_y$	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{тв}}$	$T_G, \text{с}$	$T_p, \text{с}$	$T_{\text{пр}}, \text{с}$
1	8,7	1,5	110	0,7	0,03	3	0,1	0,5
2	15	1,2	90	0,7	0,03	3,8	0,15	0,8
3	16,5	1,4	85	0,7	0,016	4	0,12	0,6
4	28,6	2	48	0,7	0,016	5,5	0,2	0,4
5	40,8	2,5	80	0,7	0,006	7	0,2	0,7

#### Порядок выполнения:

- Изучить теоретический материал.
- На одних осях построить ЛАЧХ исходной системы и желаемой системы.
- Определить ЛАЧХ корректирующего звена и записать по характеристике его передаточную функцию.

#### Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

- Краткие теоретические сведения;
- Схема исходной системы и её математическое описание;
- Синтез последовательного корректирующего звена с пояснением построения логарифмических характеристик;
- Вывод передаточной функции корректирующего звена;
- Вывод передаточной функции скорректированной системы в замкнутом состоянии;
- Выводы.

#### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

#### Основная литература

- Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

#### Дополнительная литература

- Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
- Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
- Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.

#### Контрольные вопросы для самопроверки

- Как записать передаточную функцию системы в разомкнутом состоянии?
- Как построить ЛАЧХ нескорректированной системы,  $L_{\text{нс}}$ ?
- Основные требования для построения ЛАЧХ желаемой системы,  $L_{\text{ж}}$ .

4. Как построить ЛАЧХ корректирующего звена,  $L_K$ ?
5. Как записать передаточную функцию корректирующего звена,  $W_K(p)$ .

### Практическое занятие №10

#### Исследование скорректированной системы автоматического управления

##### Цель работы:

Исследование влияния корректирующего звена на устойчивость и качество переходного процесса в замкнутой системе автоматического управления.

##### Задание:

Используя передаточную функцию корректирующего звена, полученную при выполнении предыдущего занятия, необходимо исследовать на устойчивость и качество переходного процесса замкнутую систему поддержания напряжения генератора, структурная схема которой представлена на рис.10.

##### Порядок выполнения:

1. В соответствии с вариантом, заданным преподавателем (таблица 7), изобразить принципиальную и структурную схемы системы.
2. Записать передаточные функции в разомкнутом и замкнутом состояниях системы.
3. Используя функции MATLAB, проверить систему на устойчивость по критерию Гурвица.
4. На основании выполненного занятия №9, записать передаточную функцию скорректированной системы. С помощью MATLAB получить переходную характеристику скорректированной системы.
5. Сделать выводы об устойчивости и показателях качества скорректированной системы.

##### Форма отчетности:

В отчет по практическому занятию вносится:

1. Принципиальная схема и структурная схема исходной системы;
2. Передаточная функция нескорректированной системы;
3. Передаточная функция корректирующего звена;
4. Передаточная функция скорректированной замкнутой системы;
5. Переходные характеристики, полученные в MATLAB, с соответствующими показателями качества;
6. Выводы.

##### Рекомендации по выполнению заданий и подготовке к практическому занятию:

При подготовке к практическому занятию и для его выполнения необходимо изучить литературу, указанную ниже.

##### Основная литература

1. Востриков А.С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 365 с.: ил.

##### Дополнительная литература

1. Попик В.А., Томин Н.В., Булатов Ю.Н. Основы теории автоматического управления: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 176 с.
2. Попик В.А., Булатов Ю.Н. Исследование звеньев и систем автоматического управления в MATLAB: методические указания к практическим занятиям. – Братск: БрГУ, 2014. – 43 с.
3. Коновалов Б.И. Теория автоматического управления: учебное пособие / Б.И. Коновалов, Ю.М. Лебедев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 224 с.

##### Контрольные вопросы для самопроверки

1. Виды коррекции.
2. Показатели качества переходного процесса.
3. Влияние коррекции на работу системы.

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

- ОС Windows 7 Professional;
- Microsoft Office 2007 Russian Academic OPEN No Level;
- Антивирусное программное обеспечение Kaspersky Security;
- Ай-Логос Система дистанционного обучения;
- MATLAB Academic new Product Concurrent Licenses;
- Simulink Academic new Product Concurrent Licenses.

## 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>№ ПЗ, №Лк</i>
1	2	3	4
Лк	Лекционный кабинет/ дисплейный класс (1344)	Интерактивная доска SMART Board 680I со встроенным XGA проектором Unifi 35 (77"/195,6 см);	№№ 1÷29
ПЗ	дисплейный класс (1344)	18-ПК: CPU 5000/RAM 2Gb/HDD; Монитор TFT 19 LG1953S-SF; Принтер: HP LaserJet Pro 400M 401dne; Сканер: Canon LiDE 220	№№ 4÷10
СР	ЧЗЗ	Оборудование 15 ПК- CPU 5000/RAM 2Gb/HDD (Монитор TFT 19 LG 1953S-SF);принтер HP LaserJet P3005	-



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

**1. Описание фонда оценочных средств (паспорт)**

№ компетенции	Элемент компетенции	Раздел	Тема	ФОС
1	2	3	4	5
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Принципы построения систем автоматического управления	1.1. Управление техническими процессами. Разомкнутые системы.	Вопросы к зачету (1.1.)
			1.2. Замкнутые системы автоматического управления. Основные элементы системы автоматического управления.	Вопросы к зачету (1.2.-1.3.)
			1.3. Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта).	Вопросы к зачету (1.4.)
			1.4. Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе).	Вопросы к зачету (1.5.)
			1.5. Понятия о функциональных схемах.	Вопросы к зачету (1.6.-1.7.)
			1.6. Преобразование функциональных схем.	Вопросы к зачету (1.8.)
			1.7. Классификация систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (1.9.)
		2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия	2.1. Общие понятия о статических системах.	Вопросы к зачету (2.1.)
			2.2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	Вопросы к зачету (2.2.)
			2.3. Статическая система с комбинированным регулированием.	Вопросы к зачету (2.3.)
			2.4. Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.	Вопросы к зачету (2.4.)
		3. Динамика линейных систем автоматического управления	3.1. Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы.	Вопросы к зачету (3.1.)
			3.2. Применение операторных методов в теории автоматиче-	Вопросы к зачету (3.2.)

			ского управления.	
			3.3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.	Вопросы к зачету (3.3.)
			3.4. Понятие о переходных и частотных характеристиках.	Вопросы к зачету (3.4.)
			3.5. Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.5.-3.10)
			3.6. Особые звенья в системах автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.11.)
			3.7. Частотные характеристики систем.	Вопросы к зачету (3.12.)
			3.8. Устойчивость систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.13.-3.19, 3.21)
			3.9. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.	Вопросы к зачету (3.20)
			3.10. Синтез систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.22.-3.23)
		<b>4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</b>	4.1. Статика нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.1.)
			4.2. Динамика нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.2.)
			4.3. Метод фазовой плоскости.	Вопросы к зачету (4.3.)
			4.4. Фазовые портреты нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.4.)
			4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.	Вопросы к зачету (4.5.)
		<b>5. Нечёткие системы автоматического управления</b>	5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.	Вопросы к зачету (5.1.)
			5.2. Система нечёткого логического вывода.	Вопросы к зачету (5.2.)
			5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.	Вопросы к зачету (5.3.)
<i>ПК-8</i>	способность использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологич-	<b>2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия</b>	2.1. Общие понятия о статических системах.	Вопросы к зачету (2.1.)
			2.2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	Вопросы к зачету (2.2.)
			2.3. Статическая система с комбинированным регулированием.	Вопросы к зачету (2.3.)
			2.4. Астатическая система. Вывод и построение статиче-	Вопросы к зачету (2.4.)

ческого процесса		ской характеристики.	
	<b>3. Динамика линейных систем автоматического управления</b>	3.1. Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы.	Вопросы к зачету (3.1.)
		3.2. Применение операторных методов в теории автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.2.)
		3.3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.	Вопросы к зачету (3.3.)
		3.4. Понятие о переходных и частотных характеристиках.	Вопросы к зачету (3.4.)
		3.5. Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.5.-3.10)
		3.6. Особые звенья в системах автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.11.)
		3.7. Частотные характеристики систем.	Вопросы к зачету (3.12.)
		3.8. Устойчивость систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.13.-3.19, 3.21)
		3.9. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.	Вопросы к зачету (3.20)
		3.10. Синтез систем автоматического управления.	Вопросы к зачету (3.22.-3.23)
	<b>4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</b>	4.1. Статика нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.1.)
		4.2. Динамика нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.2.)
		4.3. Метод фазовой плоскости.	Вопросы к зачету (4.3.)
		4.4. Фазовые портреты нелинейных систем.	Вопросы к зачету (4.4.)
		4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.	Вопросы к зачету (4.5.)
	<b>5. Нечёткие системы автоматического управления</b>	5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.	Вопросы к зачету (5.1.)
		5.2. Система нечёткого логического вывода.	Вопросы к зачету (5.2.)
		5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.	Вопросы к зачету (5.3.)

## 2. Вопросы к зачету

№ п/п	Компетенции		ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ	№ и наименование раздела
	Код	Определение		
1	2	3	4	5
1.	ОПК-2	способность применять соответствующих физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	<p><b>1.1.</b> Принципы построения автоматических систем.</p> <p><b>1.2.</b> Система автоматического управления и её основные элементы.</p> <p><b>1.3.</b> Понятие о функциональной схеме.</p> <p><b>1.4.</b> Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта).</p> <p><b>1.5.</b> Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе).</p> <p><b>1.6.</b> Принцип комбинированного регулирования.</p> <p><b>1.7.</b> Основные виды соединений элементов в функциональной схеме САУ.</p> <p><b>1.8.</b> Преобразование функциональных схем.</p> <p><b>1.9.</b> Классификация систем автоматического управления.</p>	<p><b>1.</b> Принципы построения систем автоматического управления</p>
			<p><b>2.1.</b> Общие понятия о статических системах.</p> <p><b>2.2.</b> Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.</p> <p><b>2.3.</b> Статическая система с комбинированным регулированием.</p> <p><b>2.4.</b> Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.</p>	<p><b>2.</b> Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия</p>
			<p><b>3.1.</b> Исследование САУ в динамическом режиме.</p> <p><b>3.2.</b> Применение операторных методов в теории автоматического управления.</p> <p><b>3.3.</b> Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.</p> <p><b>3.4.</b> Понятие о переходных и частотных характеристиках.</p> <p><b>3.5.</b> Понятие о структурных схемах САУ.</p> <p><b>3.6.</b> Безынерционное звено.</p> <p><b>3.7.</b> Аперiodическое звено 1 порядка.</p> <p><b>3.8.</b> Интегрирующее звено.</p> <p><b>3.9.</b> Дифференцирующие звенья.</p> <p><b>3.10.</b> Аперiodическое (колебательное) звено 2-го порядка.</p> <p><b>3.11.</b> Особые звенья в САУ.</p> <p><b>3.12.</b> Построение частотных характери-</p>	<p><b>3.</b> Динамика линейных систем автоматического управления</p>

			<p>стик САУ.  <b>3.13.</b> Понятие об устойчивости САУ.  <b>3.14.</b> Исследование устойчивости по корням характеристического уравнения системы.  <b>3.15.</b> Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.  <b>3.16.</b> Критерий устойчивости Михайлова.  <b>3.17.</b> Логарифмический критерий устойчивости.  <b>3.18.</b> Запас устойчивости САУ.  <b>3.19.</b> Построение областей устойчивости в пространстве параметров систем (областей D-разбиения).  <b>3.20.</b> Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.  <b>3.21.</b> Особенности оценки устойчивости систем с запаздыванием.  <b>3.22.</b> Коррекция САУ.  <b>3.23.</b> Синтез последовательного корректирующего звена методом ЛАЧХ.</p>	
			<p><b>4.1.</b> Статика нелинейных систем.  <b>4.2.</b> Динамика нелинейных систем.  <b>4.3.</b> Метод фазовой плоскости.  <b>4.4.</b> Фазовые портреты нелинейных систем.  <b>4.5.</b> Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.</p>	<p><b>4.</b> Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</p>
			<p><b>5.1.</b> Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.  <b>5.2.</b> Система нечёткого логического вывода.  <b>5.3.</b> Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.</p>	<p><b>5.</b> Нечёткие системы автоматического управления</p>
<p><b>2.</b></p>	<p><i>ПК-8</i></p>	<p>способность использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса</p>	<p><b>2.1.</b> Общие понятия о статических системах.  <b>2.2.</b> Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.  <b>2.3.</b> Статическая система с комбинированным регулированием.  <b>2.4.</b> Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.</p>	<p><b>2.</b> Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия</p>
			<p><b>3.1.</b> Исследование САУ в динамическом режиме.  <b>3.2.</b> Применение операторных методов в теории автоматического управления.  <b>3.3.</b> Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.  <b>3.4.</b> Понятие о переходных и частотных характеристиках.</p>	<p><b>3.</b> Динамика линейных систем автоматического управления</p>

		<p>3.5. Понятие о структурных схемах САУ.</p> <p>3.6. Безынерционное звено.</p> <p>3.7. Аperiodическое звено 1 порядка.</p> <p>3.8. Интегрирующее звено.</p> <p>3.9. Дифференцирующие звенья.</p> <p>3.10. Аperiodическое (колебательное) звено 2-го порядка.</p> <p>3.11. Особые звенья в САУ.</p> <p>3.12. Построение частотных характеристик САУ.</p> <p>3.13. Понятие об устойчивости САУ.</p> <p>3.14. Исследование устойчивости по корням характеристического уравнения системы.</p> <p>3.15. Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.</p> <p>3.16. Критерий устойчивости Михайлова.</p> <p>3.17. Логарифмический критерий устойчивости.</p> <p>3.18. Запас устойчивости САУ.</p> <p>3.19. Построение областей устойчивости в пространстве параметров систем (областей D-разбиения).</p> <p>3.20. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.</p> <p>3.21. Особенности оценки устойчивости систем с запаздыванием.</p> <p>3.22. Коррекция САУ.</p> <p>3.23. Синтез последовательного корректирующего звена методом ЛАЧХ.</p>	
		<p>4.1. Статика нелинейных систем.</p> <p>4.2. Динамика нелинейных систем.</p> <p>4.3. Метод фазовой плоскости.</p> <p>4.4. Фазовые портреты нелинейных систем.</p> <p>4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.</p>	<p>4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</p>
		<p>5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.</p> <p>5.2. Система нечёткого логического вывода.</p> <p>5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.</p>	<p>5. Нечёткие системы автоматического управления</p>

### 3. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b> (ОПК-2): – теоретические основы и принцип дей-</p>	<p><b>зачтено</b></p>	<p>Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, <b>знает</b>: теоретические основы и принцип действия современных систем авто-</p>

<p>ствия современных систем автоматического управления;</p> <p>– особенности протекающих процессов в системах автоматического управления; (ПК-8):</p> <p>– методы представления и измерения параметров систем автоматического управления.</p> <p><b>Уметь</b> (ОПК-2):</p> <p>– применять полученную в результате обучения теоретическую и практическую базу для получения математического описания объектов и систем в виде дифференциальных уравнений, структурных схем с целью построения их динамических и статических характеристик, а также моделирования;</p> <p>(ПК-8):</p> <p>– применять технические средства для контроля параметров систем автоматического управления.</p> <p><b>Владеть</b> (ОПК-2):</p> <p>– навыками решения практических задач по расчету, анализу устойчивости и качества при проектировании систем автоматического управления с использованием компьютерного моделирования;</p> <p>(ПК-8):</p> <p>– навыками моделирования систем автоматического управления.</p>		<p>математического управления и особенно протекающих в них процессов; <b>умеет</b> математически описывать объекты и системы в виде дифференциальных уравнений, структурных схем с целью построения их динамических и статических характеристик, а также моделирования; <b>владеет</b> навыками решения практических задач по расчету, анализу устойчивости и качества переходных процессов при проектировании систем автоматического управления с использованием компьютерного моделирования.</p>
	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>Обучающийся допустил существенные ошибки при ответе на вопросы, на дополнительные вопросы давал неправильные ответы; все вышеуказанные разделы не усвоены</p>

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

Дисциплина Теория автоматического управления направлена на изучение теоретических основ и принципов работы систем автоматического управления (САУ), а также на развитие навыков применения программных систем для моделирования САУ, оценки устойчивости и показателей качества при переходных процессах в системе, вызванных внешними возмущениями.

Изучение дисциплины Теория автоматического управления предусматривает:

- лекции,
- практические занятия,
- зачет.

В ходе освоения раздела 1 «Принципы построения систем автоматического управления» студенты должны уяснить:

- что такое система автоматического управления;
- какие существуют принципы регулирования в САУ;
- как осуществляется преобразование функциональных схем САУ.

В ходе освоения раздела 2 «Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия» студенты должны уяснить:

- различия между статической и астатической системами;
- методику статического расчета САУ и построения статических характеристик.

В ходе освоения раздела 3 «Динамика линейных систем автоматического управления» студенты должны уяснить:

- как применяется операторный метод при описании САУ в динамическом режиме;
- как строится переходная характеристика и частотные характеристики отдельных звеньев и системы в целом;
- основные динамические звенья, применяемые в САУ, и их математическое описание;
- методы оценки устойчивости САУ;
- способы оценки показателей качества переходного процесса;
- что такое запас устойчивости и для чего он необходим;
- как выполнить коррекцию САУ.

В ходе освоения раздела 4 «Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления» студенты должны уяснить:

- как описываются нелинейные системы в статическом и динамическом режимах;
- методы оценки устойчивости нелинейных систем.

В ходе освоения раздела 5 «Нечёткие системы автоматического управления» студенты должны изучить:

- теорию нечетких множеств и нечёткой логики;
- принцип работы системы нечёткого логического вывода и способы его применения для регулирования параметров технических систем.

В процессе изучения дисциплины рекомендуется особо обратить внимание на способы описания САУ функциональными и структурными схемами и методами их преобразования, а также на методы оценки устойчивости и показателей качества переходных процессов в САУ.

При подготовке к зачету рекомендуется особое внимание уделить следующим вопросам: основные элементы системы автоматического управления; принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения; принцип регулирования по возмущению; понятия о функциональных схемах; преобразование функциональных схем; статическая система автоматического управления; астатическая система; уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы; применение операторных методов в теории автоматического управления; понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте; понятие о переходных и частотных характеристиках; понятие о структурных схемах; типовые звенья систем автоматического управления; устойчивость систем автоматического управления; качество переходного процесса в системах и методы его исследования; синтез систем автоматического управления; статика нелинейных систем; динамика нелинейных систем; условия абсолютной устойчивости нелинейной системы; нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств; система нечёткого логического вывода.

В процессе проведения практических занятий происходит закрепление навыков преобразования функциональных схем, вывода и построения статических характеристик систем, а также исследования звеньев и систем автоматического управления на ПЭВМ.

Самостоятельную работу необходимо начинать с изучения теоретического материала.

В процессе консультации с преподавателем необходимо выяснить все непонятные моменты.

Работа с литературой является важнейшим элементом в получении знаний по дисциплине. Прежде всего, необходимо воспользоваться списком рекомендуемой по данной дисциплине литературы.

Предусмотрено проведение аудиторных занятий в интерактивной форме (в виде «работа с малой группой» при выполнении практических занятий) в сочетании с внеаудиторной работой.



## **АННОТАЦИЯ** **рабочей программы дисциплины**

### **Теория автоматического управления**

#### **1. Цель и задачи дисциплины**

Целью изучения дисциплины является формирование знаний классической теории автоматического управления, а также современных методов исследования систем автоматического управления.

Задачами изучения дисциплины являются: изучение способов представления и преобразования структурных и функциональных схем, а также методов исследования систем автоматического управления.

#### **2. Структура дисциплины**

2.1 Распределение трудоемкости по отдельным видам учебных занятий, включая самостоятельную работу: Лк 4 ч; ПЗ 9 ч; СР 91 ч.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 108 часа, 3 зачетных единиц

2.2 Основные разделы дисциплины:

1. Принципы построения систем автоматического управления.
2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия.
3. Динамика линейных систем автоматического управления.
4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления.
5. Нечёткие системы автоматического управления.

#### **3. Планируемые результаты обучения (перечень компетенций)**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

ОПК-2 - способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач;

ПК-8 - способность использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса.

#### **4. Вид промежуточной аттестации: зачет**

*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
1	2	3	4	5
ОПК-2	способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении экспериментальных задач	1. Принципы построения систем автоматического управления	1.1. Управление техническими процессами. Разомкнутые системы.	Собеседование
			1.2. Замкнутые системы автоматического управления. Основные элементы системы автоматического управления.	Собеседование
			1.3. Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта).	Собеседование
			1.4. Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе).	Собеседование
			1.5. Понятия о функциональных схемах.	Собеседование
			1.6. Преобразование функциональных схем.	Собеседование
			1.7. Классификация систем автоматического управления.	Собеседование
		2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия	2.1. Общие понятия о статических системах.	Собеседование
			2.2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	Собеседование
			2.3. Статическая система с комбинированным регулированием.	Собеседование
			2.4. Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.	Собеседование
		3. Динамика линейных систем автоматического управления	3.1. Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы.	Собеседование

			3.2. Применение операторных методов в теории автоматического управления.	Собеседование		
			3.3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.	Собеседование		
			3.4. Понятие о переходных и частотных характеристиках.	Собеседование		
			3.5. Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления.	Собеседование		
			3.6. Особые звенья в системах автоматического управления.	Собеседование		
			3.7. Частотные характеристики систем.	Собеседование		
			3.8. Устойчивость систем автоматического управления.	Собеседование		
			3.9. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.	Собеседование		
			3.10. Синтез систем автоматического управления.	Собеседование		
			<b>4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</b>	4.1. Статика нелинейных систем.	Собеседование	
		4.2. Динамика нелинейных систем.		Собеседование		
		4.3. Метод фазовой плоскости.		Собеседование		
		4.4. Фазовые портреты нелинейных систем.		Собеседование		
		4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.		Собеседование		
		<b>5. Нечёткие системы автоматического управления</b>	5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.	Собеседование		
			5.2. Система нечёткого логического вывода.	Собеседование		
			5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.	Собеседование		
		<i>ПК-8</i>	способность использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологич-	<b>2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия</b>	2.1. Общие понятия о статических системах.	Собеседование
					2.2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.	Собеседование
					2.3. Статическая система с комбинированным регулированием.	Собеседование
2.4. Астатическая система. Вывод и построение статиче-	Собеседование					

ческого процесса		ской характеристики.	
	<b>3. Динамика линейных систем автоматического управления</b>	3.1. Общие понятия о динамике. Уравнения систем автоматического управления, описывающие динамические процессы.	Собеседование
		3.2. Применение операторных методов в теории автоматического управления.	Собеседование
		3.3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.	Собеседование
		3.4. Понятие о переходных и частотных характеристиках.	Собеседование
		3.5. Понятие о структурных схемах. Типовые звенья систем автоматического управления.	Собеседование
		3.6. Особые звенья в системах автоматического управления.	Собеседование
		3.7. Частотные характеристики систем.	Собеседование
		3.8. Устойчивость систем автоматического управления.	Собеседование
		3.9. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.	Собеседование
		3.10. Синтез систем автоматического управления.	Собеседование
	<b>4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления</b>	4.1. Статика нелинейных систем.	Собеседование
		4.2. Динамика нелинейных систем.	Собеседование
		4.3. Метод фазовой плоскости.	Собеседование
		4.4. Фазовые портреты нелинейных систем.	Собеседование
		4.5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.	Собеседование
	<b>5. Нечёткие системы автоматического управления</b>	5.1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.	Собеседование
		5.2. Система нечёткого логического вывода.	Собеседование
		5.3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.	Собеседование

## **Вопросы для собеседования**

### **Раздел 1. Принципы построения систем автоматического управления**

1. Принципы построения автоматических систем.
2. Система автоматического управления и её основные элементы.
3. Понятие о функциональной схеме.
4. Принцип регулирования по отклонению регулируемой величины от заданного значения (принцип Ползунова-Уатта).
5. Принцип регулирования по возмущению (принцип Понселе).
6. Принцип комбинированного регулирования.
7. Основные виды соединений элементов в функциональной схеме САУ.
8. Преобразование функциональных схем.
9. Классификация систем автоматического управления.

### **Раздел 2. Статика линейных систем автоматического управления непрерывного действия**

1. Общие понятия о статических системах.
2. Статическая система автоматического управления. Вывод и построение статической характеристики.
3. Статическая система с комбинированным регулированием.
4. Астатическая система. Вывод и построение статической характеристики.

### **Раздел 3. Динамика линейных систем автоматического управления**

1. Исследование САУ в динамическом режиме.
2. Применение операторных методов в теории автоматического управления.
3. Понятие о передаточной функции и комплексном передаточном коэффициенте.
4. Понятие о переходных и частотных характеристиках.
5. Понятие о структурных схемах САУ.
6. Безынерционное звено.
7. Апериодическое звено 1 порядка.
8. Интегрирующее звено.
9. Дифференцирующие звенья.
10. Апериодическое (колебательное) звено 2-го порядка.
11. Особые звенья в САУ.
12. Построение частотных характеристик САУ.
13. Понятие об устойчивости САУ.
14. Исследование устойчивости по корням характеристического уравнения системы.
15. Алгебраический критерий устойчивости Гурвица.
16. Критерий устойчивости Михайлова.
17. Логарифмический критерий устойчивости.
18. Запас устойчивости САУ.
19. Построение областей устойчивости в пространстве параметров систем.
20. Качество переходного процесса в системах и методы его исследования.
21. Особенности оценки устойчивости систем с запаздыванием.
22. Коррекция САУ.
23. Синтез последовательного корректирующего звена методом ЛАЧХ.

### **Раздел 4. Особенности и методы исследования нелинейных систем автоматического управления**

1. Статика нелинейных систем.
2. Динамика нелинейных систем.
3. Метод фазовой плоскости.
4. Фазовые портреты нелинейных систем.
5. Условия абсолютной устойчивости нелинейной системы.

## Раздел 5. Нечёткие системы автоматического управления

1. Нечёткая логика и основные понятия теории нечётких множеств.
2. Система нечёткого логического вывода.
3. Системы поддержки принятия решений на основе нечёткой логики для регулирования напряжения.

### 2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций

Показатели	Оценка	Критерии
<p><b>Знать</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– теоретические основы и принцип действия современных систем автоматического управления;</li> <li>– особенности протекающих процессов в системах автоматического управления;</li> </ul> <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– методы представления и измерения параметров систем автоматического управления.</li> </ul> <p><b>Уметь</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять полученную в результате обучения теоретическую и практическую базу для получения математического описания объектов и систем в виде дифференциальных уравнений, структурных схем с целью построения их динамических и статических характеристик, а также моделирования;</li> </ul>	<p><b>зачтено</b></p>	<p>Обучающийся глубоко и прочно усвоил программный материал, <b>знает</b>: теоретические основы и принцип действия современных систем автоматического управления и особенно протекающих в них процессов; <b>умеет</b> математически описывать объекты и системы в виде дифференциальных уравнений, структурных схем с целью построения их динамических и статических характеристик, а также моделирования; <b>владеет</b> навыками решения практических задач по расчету, анализу устойчивости и качества переходных процессов при проектировании систем автоматического управления с использованием компьютерного моделирования.</p>
<p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– применять технические средства для контроля параметров систем автоматического управления.</li> </ul> <p><b>Владеть</b> (ОПК-2):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками решения практических задач по расчету, анализу устойчивости и качества при проектировании систем автоматического управления с использованием компьютерного моделирования;</li> </ul> <p>(ПК-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками моделирования систем автоматического управления.</li> </ul>	<p><b>не зачтено</b></p>	<p>Обучающийся допустил существенные ошибки при ответе на вопросы, на дополнительные вопросы давал неправильные ответы; все вышеуказанные разделы не усвоены</p>

Программа составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) от «3» сентября 2015 г. №955

для набора 2014 года: и учебным планом ФГБОУ ВО «БрГУ» для заочной формы обучения от «3» июля 2018г. №413

**Программу составил:**

Булатов Ю.Н., зав. кафедрой, доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_

Рабочая программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры ЭиЭ

от «\_\_» \_\_декабря\_\_ 2018 г., протокол №\_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой ЭиЭ \_\_\_\_\_

Ю.Н. Булатов

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий выпускающей кафедрой \_\_\_\_\_

Ю.Н. Булатов

Директор библиотеки \_\_\_\_\_

Т.Ф. Сотник

Рабочая программа одобрена методической комиссией ФЭиА

от «\_\_» \_\_декабря\_\_ 2018 г., протокол №\_\_\_\_\_

Председатель методической комиссии ФЭиА \_\_\_\_\_

А.Д. Ульянов

СОГЛАСОВАНО:

Начальник

учебно-методического управления \_\_\_\_\_

Г.П. Нежевец

Регистрационный №\_\_\_\_\_