МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ЮЖНО-КАЗАХСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.О.АУЕЗОВА
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ, ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

Инков А.М.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Методические указания для самостоятельной работы и конспект лекций для студентов специальности 37.01.40 1 часть

Шымкент 2007

УДК 658.012.011
ББК 6П7.1

Инков А.М. **Автоматизированные системы управления технологическими процессами**. Методические указания для самостоятельной работы и конспект лекций для студентов специальности 37.01.40 1 часть. Шымкент, Южно-Казахстанский Государственный Университет (ЮКГУ). 2007 г. - 40 стр., 2 таб., ил.
Даются методические указания к самостоятельной подготовке к аудиторным занятиям по дисциплине. Содержатся вопросы для подготовки к экзамену, содержание практических занятий и лабораторных занятий, основная рекомендуемая литература, иллюстративно-справочный материал по темам модулей дисциплины № 1-3.

Рецензенты:
д.т.н., профессор кафедры ПАОС ЮКГУ Ескендиров Ш.З.

к.т.н., доцент Казахско-турецкого университета им. А.Ясауви
Каланов С.М.

Рассмотрены и рекомендованы к печати научно - методическим центром ЮКГУ, протокол № __ от___ ____ 2007 г.

© Южно-Казахстанский Государственный Университет (ЮКГУ), 2007 г.
© Инков А.М., 2007 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 4
Выписка из учебного плана дисциплины 4
Содержание лекционного материала (Вопросы для подготовки к аттестации) 5
Содержание практических занятий (15 часов) 10
Содержание лабораторных занятий (15часов) 10
Основная рекомендуемая литература 11
Условные обозначения 13
Рекомендуемые и использованные сокращения. 15
Иллюстративно-справочный материал по темам модуля №1. 16
Приложение 1. Рисунки 31
Приложение 2. Пример построения переходного процесса 32
Приложение 3. Пример проверки адекватности 33
Приложение 4. Пример вывода выражений РАФЧХ 34
Приложение 5. Пример расчета настроек методом РАФХ 35
Приложение 6. Пример использования алгоритма фильтрации 36
Приложение 7. Структура лабораторного практикума по дисциплине 37

Введение

Целью преподавания дисциплины «**Автоматизированные системы управления технологическими процессами**» (АСУТП), является подготовка студента к самостоятельному решению теоретических и прикладных задач разработки и расчета систем автоматизации и управления. В данных методических указаниях содержится материал к темам модулей 1-3 - излагаются принципы и методы расчета, исследования и построения в основном локальных автоматических систем регулирования на основе современных технических средств автоматизации, включая микропроцессорную технику и управляющие промышленные компьютеры.

Приведенное ниже первой части **содержание лекционного материала** является основной для самостоятельной работы по изучению материала дисциплины при подготовке к лекции. **В процессе прослушивания лекции студент должен иметь при себе эти методические указания, используя их для пометок.** Это позволяет значительно сократить время на конспектирование материала.

Выписка из учебного плана дисциплины

Семестры	количество недель	Распределение часов по семестрам и видам занятий						Курсовой проект (работа)	Всего часов	Итоговый контроль
		лекции	практические занятия	семинары	лабораторные	СРС	Индивидуальная работа со студентами (ИРС)			
8	15	45	15		30	30			120	Зач,Экз
9	15	45	15		30	64		К/П	154	Зач,Экз
Итого		90	30		60	94		К/П	274	

Содержание лекционного материала (Вопросы для подготовки к аттестации)

Модуль 1 Введение в расчет и исследование систем автоматизации

1 Введение.

1.1 Цели, задачи и содержание дисциплины АСУТП.

1.2 Современный уровень АСУТП и перспективы развития. Роль автоматизации процессов и установок.

1.3. Объекты управления (функционирование объектов, входы, выходы, возмущения). Цели и критерии управления. Управляющие устройства. Автоматические и автоматизированные системы управления. Оптимальное управление. Адаптивное управление.

1.4 Общие сведения о системах автоматизации (основная терминология и классификация: ОУ, ТОУ, ЛСА, АСК, АСС, АСБ, АСЗ, АСР, АСУ, АСУТП, АСУП, ОАСУ, ИАСУ, РАСУ; ГАП, КТС, ТО, ПО, ЧМИ, априорная информация, текущая информация; выработка управляющей информации в соответствии с заданным алгоритмом, ее преобразование в управляющее воздействие).

1.5 Этапы содержание работ по созданию систем автоматизации.

1.6 Автоматизация учережденческой деятельности.

1.7 Автоматизированные рабочие места.

2 Основы расчета и исследования АСР.

2.1 Критерии качества переходных процессов в АСР, используемые при расчете настроек.

2.1.1 Прямые показатели качества.

2.1.2 Корневые показатели качества.

2.1.3 Постановка задачи расчета настроек АСР. Исходные данные для решения задачи.

2.2 Математические модели автоматических регуляторов, используемые при расчете АСР.

2.2.1 Законы регулирования аналоговых регуляторов и принципы их выбора.

2.2.2 Качественная картина переходных процессов при разных законах регулирования.

2.2.3 Математические модели реальных промышленных регуляторов.

2.3 Математические модели объектов, используемые при расчете АСР и связь между ними.

2.3.1 Дифференциальные уравнения.

2.3.2 Передаточные функции.

2.3.3 Частотные характеристики.

Модуль 2. Расчет и исследование одноконтурных АСР

2.4 Имитационное моделирование переходных процессов в замкнутых АСР.

2.4.1 Математические модели замкнутых АСР.

2.4.2 Обзор методов построения переходных процессов в АСР.

2.4.3 Алгоритм построения переходных процессов в АСР на основе метода Акульшина.

2.4.3 Использование средств MATLAB, VisSim для моделирования динамики систем.

3 Расчет одноконтурных АСР.

3.1 Примеры одноконтурных АСР (замкнутые и разомкнутые; непрерывные и пози-

ционные; стабилизирующие; программные; соотношения; следящие).
3.2 Расчет настроек регуляторов в одноконтурной АСР методом незатухающих колебаний.
3.2.1 Теоретические основы метода.
3.2.2 Методика экспериментального определения настроек
3.2.3 Методика аналитического определения настроек.
3.3 Расчет настроек в одноконтурной АСР методом, основанном на использование РАФХ.
3.3.1Теоретические основы метода РАФХ.
3.3.2 Методика определения настроек.
4 Цифровые системы управления.
4.1 Особенности и структура цифровой системы управления.
4.2 Математические модели объектов в цифровых системах.
4.3 Математические модели регуляторов в цифровых системах.
4.4 Расчет настроек регуляторов в цифровых одноконтурных АСР.
4.5 Алгоритм цифрового управления для одноконтурной АСР.

Модуль 3. Расчет специальных и многоконтурных АСР

5 Каскадные АСР.
5.1 Примеры и анализ промышленных каскадных АСР.
5.2 Теоретические основы метода.
5.3 Методика определения настроек.
5.4 Алгоритм цифрового управления для каскадной АСР
6 Комбинированные АСР.
6.1 Пример объекта с АСР, реагирующей на отклонение и ее анализ.
6.2 Пример объекта с АСР, реагирующей на возмущение и ее анализ.
6.3 Пример объекта с комбинированной АСР и ее анализ.
6.4 Вывод математической модели идеального компенсатора.
6.5 Анализ реализуемости идеального компенсатора.
6.6 Выбор математической модели реального компенсатора.
6.7 Методика ручного расчета.
6.8 Алгоритм цифрового управления для комбинированной АСР.
7. Взаимосвязанные системы регулирования.
7.1 Пример промышленной взаимосвязанной АСР.
7.2 Системы несвязанного регулирования.
7.3 Расчет настроек взаимосвязанных систем регулирования
8. Принципы технической реализации АСР на базе современной МП техники.
8.1 Структуры АСР и их место в АСУТП.
8.2 Источники информации.
8.3 Виды сигналов - носителей информации.
8.4 Устройства воздействия на объект.
8.5 Устройства выработки воздействия на процесс.
8.6 Устройства отображения информации.
8.7 SCADA - системы.

Модуль 4. Основные понятия об АСУТП

9 АСУТП
9.1.Основные положения об АСУТП.
9.1.1.Основная терминология (ТОУ, АСУ, АТК).

9.1.2. Критерии управления в АСУТП.
9.1.3.Подсистемы АСУТП, РАСУТП, ИАСУ.
9.2.Функции АСУТП.
9.2.1 Цели и задачи создания АСУТП.
9.2.2 Информационные функции АСУТП.
9.2.3 Управляющие функции АСУТП.
9.2.4 Вспомогательные функции АСУТП.
9.2.5 Режимы реализации функций АСУТП.
9.2.6 Разработка функциональной схемы АСУТП
9.3. Состав АСУТП (ТО, ПО, ОО, ИО, обслуживающий персонал).
9.3.1 Техническое обеспечение (ТО) АСУТП и его краткая характеристика.
9.3.2 Программное обеспечение (ПО) АСУТП и его краткая характеристика.
9.3.3 Информационное обеспечение (ИО) АСУТП и его краткая характеристика.
9.3.4 Организационное обеспечение (ОО) АСУТП.
9.3.5 Оперативный персонал АСУТП.
9.4 Разработка информационного обеспечения АСУТП
9.4.1 Разработка системы классификации и кодирования.
9.4.1.1.Система классификации и кодирования ТОУ.
9.4.1.2.Кодировка источников текущей информации о ТОУ.
9.4.1.3.Кодировка задач АСУТП.
9.4.2.Разработка паспорта измеряемых параметров.
9.4.3.Разработка форм видеограмм и выходных документов
9.4.3.1.Разработка интерактивного интерфейса оператора
9.4.3.2.Разработка форм основных выходных документов
9.5 Классификация и особенности АСУТП.
9.5.1 Многоуровневость АСУТП.
9.5.2 Непрерывность АСУТП.
9.5.3 Информационная мощность АСУТП.
9.5.4 Надежность АСУТП и меры для ее повышения.
9.5.5.Тип функционирования АСУТП.
10 Современное техническое обеспечение АСУТП.
10.1 Состав и структура УВК.
10.2 Состав и характеристики современного вычислительного комплекса.
10.3 Процессор, материнская плата.
10.4 Оперативная память.
10.5 Память на магнитных и оптических носителях.
10.6 Средства резервного копирования информации.
10.7 Порты и слоты расширения.
10.8 Средства мультимедиа.
10.9 Сетевое оборудование.
10.10 Устройства связи с объектом.
10.11 Устройства связи с оперативным персоналом
10.12 Архитектура УВК и компьютерных сетей.
10.13 Использование Internet/Intranet технологий в организации процессов управления;
10.14 Системы непосредственного цифрового управления.
10.15 Обзор современных управляющих компьютеров, используемых в АСУТП.

Модуль 5. Схемы автоматизации технологических процессов

11 Схемы автоматизации технологических процессов

11.1 Методика анализа объектов автоматизации. Особенности

12 Выбор схем автоматического регулирования технологических переменных.

12.1 Типовые схемы регулирования расхода

12.2 Типовые схемы регулирования уровня.

12.3 Типовые схемы регулирования давления

12.4.Типовые схемы регулирования температуры.

12.5 Типовые схемы регулирования состава и качества

13 Схемы автоматизации типовых технологических процессов.

13.1 Автоматическое регулирование печей.

13.2 Автоматическое регулирование теплообменников смешения

13.3 Автоматическое регулирование кожухотрубных теплообменников.

13.4 Автоматизация испарителей и конденсаторов.

13.5 Устойчивость реакторов с перемешивающими устройствами.

13.6 Регулирование процессов в химических реакторах с перемешивающим устройством.

13.7 Автоматическое регулирование трубчатых реакторов.

13.8 Автоматизация ректификационных установок

13.9 Автоматизация абсорбционных и выпарных установок.

13.10 Особенности систем автоматизации периодических и дискретных процессов.

Модуль 6 Задачи и алгоритмы обработки информации и оптимального управления в АСУТП.

14 Задачи и алгоритмы обработки информации

14.1.Задачи первичной обработки информации

14.2.Основные статистические характеристики времянных рядов и их оценка

14.3.Выбор разрядности представления информации в компьютере.

14.4.Выбор частоты опроса измерительных преобразователей.

14.5.Функции и алгоритмы восстановления сигналов в АСУТП

14.6.Функции и алгоритмы фильтрации измерительной информации от помех

14.7.Функц. и алгоритмы сглаживания сигналов

14.8.Функции и алгоритмы аналитической градуировки измерительных преобразователей

14.9.Функции и алгоритмы коррекции результатов измерения

14.10.Алгоритмы контроля и повышения достоверности исходной информации.

14.11.Вычисление интегральных и усредненных значений измеряемых величин

14.13.Алгоритмы вычисления неизмеряемых величин по уравнениям регрессии.

14.14.Алгоритмы расшифровки хроматограмм.

15. Задачи и алгоритмы оптимального управления ХТП.

15.1. Формирование критериев оптимальности в условиях АСУТП

15.2. Типовая постановка задачи оптимального управления пуском и остановом агрегата.

15.3. Типовая постановка задачи оптимального управления пуском системы агрегатов.

15.4. Типовая постановка задачи оптимизации статического установившегося режима.

15.5. Типовая постановка задачи оптимизации циклического режима ТОУ.

15.6. Оптимизация режима в аппарате периодического действия
15.7. Оптимизация календарного планирования работы аппаратов.
15.8. Оптимизация режима работы параллельно работающих агрегатов.
15.9. Оптимизация режима работы последовательно работающих агрегатов.

16.Заключительная лекция.

Примеры автоматизированных систем и комплексов по отраслям применения и перспективы развития АСУТП

Содержание практических занятий (15 часов)

Номер и содержание занятия	Час
Модуль 1	
1.Изучение методов имитационного моделирования переходных процессов в АСР	2
Модуль 2	
2 Методика расчета настроек одноконтурной АСР по методу Циглера-Никольса	2
Модуль3	
3 Методика расчета настроек одноконтурной АСР по методу РАФХ	2
Модуль 4	
4 Методика расчета настроек цифровой АСР	2
Модуль 5	
5 Методика расчета настроек комбинированной	4
Модуль 6	
6 Методика расчета настроек каскадной АСР	3
ВСЕГО	15

Содержание лабораторных занятий (15часов)

Номер и содержание занятия	Час
Модуль 1	
1.Введение в лабораторный практикум по дисциплине [7].	2
Модуль 2	
2. Исследование на ЭВМ качества переходных процессов в одноконтурной АСР при настройках регулятора по методу Циглера-Никольса(экспериментальный метод)[9].	2
Модуль 3	
4.Исследование на ЭВМ качества переходных процессов в одноконтурной АСР при настройках регулятора по методу Циглера-Никольса (аналитический метод) [9].	2
Модуль 4	
5.Исследование и компьютерное моделирование переходных процессов в одноконтурной автоматической системе регулирования при настройках регулятора по методу расширенных АФЧХ [10].	2
Модуль 5	
6 Исследование и компьютерное моделирование цифровой АСР6	3
Модуль 6	
7 Исследование и компьютерное моделирование переходных процессов в каскадной автоматической системе регулирования [11]..	4
ВСЕГО	15

Основная рекомендуемая литература

1. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник для вузов. Под ред. Дудникова Е.Г. -М.: Химия, 1987. -368с.
2. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. И.М. Масленникова. -М.: Химия, 1986. -336с.
3. Борисов В.В., Плютто В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Аналоговые системы: -2-е изд. -М.: Химия, 1987, -152с.
4. Инков А.М. Методические указания по курсовому проектированию по дисциплине САУ Шымкент, ЮКТУ, 2001 г.
5. Плютто В.П. Практикум по теории автоматического управления химико - технологическими процессами. Цифровые системы. -М.: Химия, 1989, -168с.
6. Инков А.М. Рабочая программа дисциплины «Системы автоматизации и управления» для студентов специальности 36.03. Шымкент, ЮКГУ, 2004 г. - 29 стр.,
7. Инков А.М. Системы автоматизации и управления. «Введение в лабораторный практикум». Методические указания к лабораторной работе № 1 для студентов специальности 36.03. Шымкент, ЮКГУ, 2002 г. - 29 стр.
8. Инков А.М. Системы автоматизации и управления. Определение динамических характеристик объектов управления методом площадей. Методические указания к лабораторной работе № 1А для студентов специальности 36.03. Шымкент, ЮКГУ, 2002 г. - 20 стр.
9. Инков А.М. Системы автоматизации и управления. Исследование на ЭВМ качества переходных процессов в одноконтурной АСР при настройках регулятора по методу Циглера-Никольса. Методические указания к лабораторным работам № 2 и №3 для студентов специальности 36.03. Шымкент, ЮКГУ, 2002 г. - 14 стр., 1таб., ил.
10. Инков А.М. Системы автоматизации и управления. Исследование и компьютерное моделирование переходных процессов в одноконтурной автоматической системе регулирования при настройках регулятора по методу расширенных АФЧХ. Методические указания к лабораторной работе № 4 для студентов специальности 36.03. Шымкент, ЮКГУ, 2002 г. - 13 с.
11. Инков А.М. Системы автоматизации и управления. Исследование и компьютерное моделирование переходных процессов в каскадных автоматических системах регулирования. Методические указания к лабораторной работе №5 для студентов специальности 36.03. ("Автоматизация технологических процессов и производств") Южно-Казахстанский Государственный Университет (ЮКГУ). 2002 г. -12 стр., 1таб., ил.
12. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления: Перевод с английского. Лаборатория базовых знаний, СПб, 2002, 832 с.
13. Номенклатурные справочники и прайс-листы фирм производителей современных технических средств автоматизации (СНГ и дальнее зарубежье, 2000-2004 г, имеются на кафедре АКИ, в том числе в электронном варианте).
14. Перов В.Л. Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов. –М: Химия, 1970, 352с
15. Голубятников В.А., Шувалов В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. - 2-е изд. перераб. и доп. -М.: Химия, 1985. -

352с. .Шувалов В.В .и др. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности.-3-е изд. перераб. и доп. -М.: Химия, 1991, -478с.

16. Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. Технические средства и лабораторные работы. Изд. 3-е. –М.: Химия, 1988, 288 с.

Примечание: в методических указаниях [7] приведен перечень и описание компьютерных программ, используемых в дисциплине.

Условные обозначения

Объекты, регуляторы и системы в целом.

U- вход (или вектор входов) объекта или системы, параметры управления;

$U_Р$- выход (или вектор выходов) регулятора, регулирующие воздействия;

X- выход (или вектор выходов) объекта или системы, параметры состояния;

$x^{(1)} = \frac{dx}{dt}$, $u^{(1)} = \frac{du}{dt}$ - производные по времени X и U;

V- возмущения (или вектор возмущений);

X^*- задания;

E, ε - ошибка, рассогласование (ε = E = X – X^*)

W, W(p) - передаточная функция (ПФ) объекта;

W^*, W^*(p) - ПФ объекта без учета запаздывания;

W_1, W_1(p) и т.д. - ПФ объекта в многоконтурных АСР;

$W_{зам}$, $W_{зам}$(p) - ПФ замкнутой АСР;

i - порядковый номер W, R, элементов векторов U, X, V;

m - порядок полинома в знаменателе W(p) вида (3.1)-(3.3), (3.6);

n - порядок полинома в числителе W(p) вида (3.1)-(3.3), (3.6), (n>m);

a_i - коэффициенты полинома в числителе W(p) вида (3.1)-(3.3), (3.6), i=1,2,…n;

b_i - коэффициенты полинома в знаменателе W(p) вида (3.1)-(3.3), (3.6), i=1,2,…m;

R, R(p), R_1, R_1(p)- передаточная функция регулятора;

$S_П$; $S_И$; $S_Д$ - П, И, Д параметры настройки аналогового регулятора;

S_1; S_0; S_2 - П, И, Д параметры настройки регулятора, используемые в (4.4);

$К_П$ - коэффициент передачи;

$Т_И$ - постоянная времени интегрирования (время изодрома);

$Т_Д$ - постоянная времени дифференцирования (время предварения);

$Т_Ф$ - постоянная времени демпфера (фильтра);

C - коэффициент усиления объекта;

D - коэффициент усиления интегральной составляющей для W(p) вида (3.6)

T - постоянная времени для уравнения вида (3.5), (3.7);

T_1, T_2, T_3 - постоянные времени для уравнения вида (3.4);

$Т_Б$ - постоянная времени для W(p) без самовыравнивания вида (3.7);

τ - время запаздывания;

Частотные характеристики.

ω; ω*; $ω_{раб}$ - частота; критическая частота; рабочая частота;

$ω_1$; $ω_к$; $Δ_ω$ - начальная, конечная частота; шаг по частоте;

N - количество точек по частоте;

φ ; $φ_{об}$; $φ_{рег}$ - фаза (ФЧХ); ФЧХ объекта; ФЧХ регулятора;

A ; $A_{об}$; $A_{рег}$ - амплитуда (АЧХ); АЧХ объекта; АЧХ регулятора;

j - мнимая единица ($\sqrt{-1}$); p, s - оператор Лапласа;

W(jω) ; R(jω) - АФЧХ объекта; АФЧХ регулятора;

ImW ; ReW- мнимая ; действительная часть АФЧХ объекта;

ImR; ReR - мнимая ; действительная часть АФЧХ регулятора;

$Im_{Зн}$; $Re_{Зн}$ - мнимая ; действительная часть АФЧХ знаменателя ПФ;

$Im_{Чис}$; $Re_{Чис}$ - мнимая ; действительная часть АФЧХ числителя ПФ;

$φ_{зн}$; $A_{зн}$ - ФЧХ ; АЧХ знаменателя ПФ;

$φ_{чис}$; $A_{чис}$ - ФЧХ; АЧХ числителя ПФ;

$\varphi_{зс}$; $A_{зс}$ - ФЧХ; АЧХ замкнутой АСР;

m - степень колебательности для расширенной АФЧХ (РАФХ);

Цифровые модели и системы.

j - номер точки по времени;

N - количество точек по времени;

$X_j; \widetilde{X}_j; U_j; E_j$ -выход, отфильтрованный выход, вход, ошибка в момент времени j;

T_o- период опроса датчика; шаг (такт) квантирования по времени ($T=2\pi/\omega$);

ω_o - частота опроса датчика ($\omega=2\pi/T$);

D - запаздывание, равное целому числу тактов квантирования по времени ($d=\tau/T_o$);

$Q_П$, $Q_И$, $Q_Д$ - П, И, Д параметры настройки цифрового регулятора;

Переходные процессы и их качество.

T, t - текущее время;

T_1 ; $T_к$; ΔT - начальное время; конечное время; шаг по времени;

N - количество точек по времени;

$N_Ф$ - макс. номер члена разложения в ряд Фурье в методе Акульшина;

ΔU - амплитуда ступенчатого возмущения на входе;

$x_{д1}$, $x_{д1}$, $x_{д1}$ - динамические ошибки;

$x_{ст}$ - статическая (установившаяся) ошибка;

ψ - степень затухания ($\psi = \frac{x_{д1} - x_{д3}}{x_{д1}}$);

$T_Р$, $t_р$ - время регулирования при заданном $x_{ст}$;

η - перерегулирование ($\eta = \frac{x_{д2}}{x_{д1}} \cdot 100\%$).

$S_E^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M} \varepsilon_j^2}{N}$ - средний квадрат ошибки управления

$S_U^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M} \Delta U_j^2}{N}$ - квадратичное отклонение управляющей переменной (средняя входная мощность)

Рекомендуемые и использованные сокращения.

АК - агрегатный комплекс; АР - автоматический регулятор; АС - автоматическая система; АСБ - АС блокировки; АСЗ - АС защиты; АСК - АС контроля; АСР - АС регулирования; АСС - АС сигнализации; АСУ - автоматизированная система управления; АСУП - АСУ предприятием; АСУТП- АСУ технологическим процессом (CIM -*Computer Integrated Manufacturing)*; АУ - адаптивное управление; АФЧХ - амплитудно-фазовая частотная характеристика; АЦП - (ADC, A/C - *Analog/Digital converter)*- аналого-цифровой преобразователь БРУ - блок ручного управления; ДУ - дифференциальное уравнение; ЗАСР - замкнутая АСР; ИМ - исполнительный механизм ; ИП - измерительный преобразователь; КТС - комплекс технических средств; КУ - критерий управления; ЛВС - локальная вычислительная сеть (LAN); ЛС - локальная система; ЛСА - ЛС автоматизации; МК - микроконтроллер; ММ - математическая модель;	ММД - ММ динамики; ММС - математическая модель статики; МП - микропроцессор; НЦУ - непосредственное цифровое управление (то же, что ПЦУ) ОУ - оптимальное управление; ПЛК - программируемый логический контроллер (PLC) ПФ - передаточная функция; ПК – персональный компьютер; ПрК промышленный компьютер; ПЦУ - прямое цифровое управление (DDC- *Direct Digital Control)*; ПЭВМ - персональная ЭВМ (ПК); РАСУ - распределенная АСУ; РАФЧХ- расширенная амплитудно-фазовая частотная характеристика; РО - регулирующий орган; СО - спецификация оборудования; ТАУ – теория автоматического управления ТОУ - технологический объект управления; УВК - управляющий вычислительный комплекс; УОИ - устройства отображения информации; УСО - устройство связи с объектом; ФЧХ - фазо-частотная характеристика; ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь (DAC, D/A -*Digital Analog Converter)* ЧМИ – человеко-машинный интерфейс

Иллюстративно-справочный материал по темам модуля №1.

Ниже приводится иллюстративно-справочный материал к **некоторым** лекциям, *нумерация разделов соответствует приведенному выше содержание лекционного материала,* для тем с пропущенными номерами см. рекомендуемую литературу.

2. Задачи расчета и исследования САУ.

Структурная схема АСР показана на рис.1, а ***одноконтурной стабилизирующей*** АСР (САУ) на рис.2, где U – вход системы (управляющий параметр, обычно это потоки вещества или энергии); X – выход системы (параметр состояния, результат измерения, обычно это тот параметр, значение которого надо поддерживать); X*- задание регулятору (уставка, это то значение X, которое надо поддерживать постоянным); S- настройки регулятора ($S_П$; $S_И$; $S_Д$); РО - регулирующий орган; Д- датчик.

Если X* является функцией времени, то такая АСР называется ***программной***, если X* зависит от других параметров, то такая АСР называется ***следящей***. Если система имеет несколько входов, то она ***многоконтурная***, а если несколько входов и несколько выходов – ***многосвязанная***.

Примером реальной АСР, соответствующей показанной на рис.2 может служить САУ теплообменника (рис. 3). Примеры других АСР показаны на рисунках в приложении 1 и в [1, 14-16]

Основная задача расчета САУ – расчет значений параметров настройки регуляторов (см. раздел 4), которые позволяют получить устойчивый переходный процесс с требуемым характером процесса регулирования (степень затухания, степень колебательности и т.д.).

Исходными данными для расчета являются математические модели динамики объектов (см. раздел 3) и требования к качеству регулирования (см. раздел 6). Цель исследования САУ – проверка результатов расчета САУ – имитационное моделирование поведения замкнутой системы регулирования (см. разд.5).

2.1 Критерии качества переходных процессов в АСР,.

2.1.1 Прямые показатели качества.

Подробнее см [2, 3, 16]. В правильно рассчитанной АСР необходимым условием является обеспечение устойчивого переходного процесса. Кроме того, должны выполняться требования (критерии) качества регулирования. Конкретные числовые значения критериев выбираются исходя их требований технологического регламента. На рисунке 2.1 показаны некоторые из них (прямые критерии качества).

Настройки регулятора надо выбирать так, чтобы обеспечить минимально возможное значение tp, либо минимальное значение $x_{д1}$. В непрерывных системах с типовыми регуляторами это время бывает минимальным при оптимальных апериодических переходных процессах (см. рис. 2.1-а). Дальнейшего уменьшения времени регулирования до абсолютного минимума можно достичь при использовании специальных оптимальных по быстродействию САУ. В некоторых САУ наблюдается ошибка, которая не исчезает даже по истечении длительного интервала времени - это статическая ошибка регулирования хст рег, она всегда есть у П – регулятора и не должна превышать некоторой заданной величины хст.

У регуляторов с интегральной составляющей ошибки в установившемся состоянии теоретически равны нулю, но практически незначительные ошибки могут существовать из-за наличия зон нечувствительности в элементах системы.

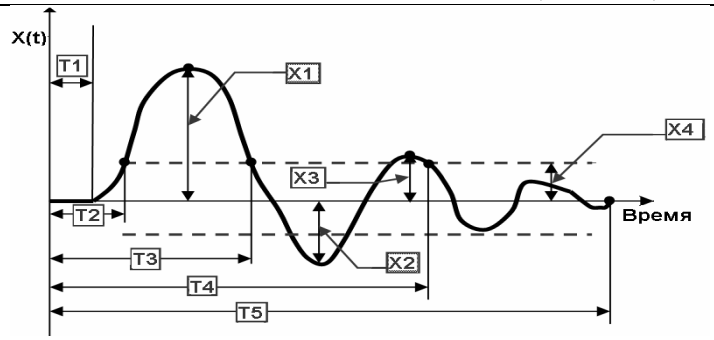


Рис. 2.1. X1=$x_{\partial 1}$, X2=$x_{\partial 2}$, X3=$x_{\partial 3}$ – динамические ошибки регулирования; T4 = tp - время регулирования при заданном значении статической ошибки хст=X4, tp - это время, за которое регулируемая величина в переходном процессе начинает отличаться от установившегося значения менее, чем на значение хст. Обычно принимается, что хст = 3%□5% от величины скачка сигнала задания.

Часто используются показатели качества:

$\psi = \frac{x_{\partial 1} - x_{\partial 3}}{x_{\partial 1}}$ - степень затухания; $\eta = \frac{x_{\partial 2}}{x_{\partial 1}} \cdot 100\%$ - перерегулирование;

Показатель качества $R_Д = (Y_1/Y_0) \cdot 100\%$ - динамический коэффициент регулирования, где смысл величин RД и Y1 ясен из рис. 2.2. Величина RД характеризует степень воздействия регулятора на процесс, т.е. степень понижения динамического отклонения в системе с регулятором и без него.



Рис. 2.2. К понятию динамического коэффициента регулирования

$I_1 = \int_0^{t_p} \varepsilon dt$, $I_2 = \int_0^{t_p} \varepsilon^2 dt$, $I_3 = \int_0^{t_p} |\varepsilon| dt$ - интегральные критерии качества.

В цифровых системах используются аналоги интегральных критериев качества регулирования - суммарное значение ошибки регулирования за время завершения переходного процесса при заданном значении x_{cm} (средний квадрат ошибки управления (накопленная ошибка за N шагов переходного процесса):

$$S_E^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M} E_j^2}{M} \qquad (2.1)$$

или усредненное квадратичное отклонение управляющей переменной (средняя входная мощность):

$$S_U^2 = \frac{\sum_{j=1}^{M} U_j^2}{M}, \qquad (2.2)$$

где M – общее количество переходного процесса шагов за время t_p. этот показатель позволяет оценить усредненную интенсивность перемещения исполнительного механизма за N шагов, если значение S_U^2 велико, то исполнительный механизм подвержен большему износу.

2.1.2 .Корневые показатели качества.

Подробнее см. [2, 10]. Эти критерии связаны со значениями и знаками корней характеристического уравнения замкнутой АСР. По определению система устойчива, если корни характеристического уравнения «левые», т.е. расположенные в левой комплексной полуплоскости. Система обладает определенным запасом колебательности $m < \frac{\mathrm{Re}\, p_i}{\mathrm{Im}\, p_i}$, см. график и пояснения на стр. 61 в [2]. Приближенно значение m связано с ψ соотношениями:

$$\psi = 1 - \exp(-2 \cdot \pi \cdot m) \text{ и } m = -\ln(1-\psi)/(2 \cdot \pi).$$

Использование корневых критериев качества лежит в основе расчета настроек с использованием РАФХ (см. [1, 2, 10]. РАФХ можно получить из передаточной функции объекта подстановкой:

$$p = -m\omega + j\omega \qquad (2.3)$$

2.2 Математические модели автоматических регуляторов, используемые при расчете АСР.

2.2.1 Законы регулирования аналоговых регуляторов и принципы их выбора.

Автоматический регулятор является устройством, которое реагирует на сигнал (ошибку) рассогласования $\varepsilon = E = X - X^*$ и осуществляет воздействие на регулирующий орган по определенному закону (правилу). Существуют несколько основных законов, по которым возможно осуществление перемещения регулирующего органа, например: позиционный; интегральный; пропорциональный, дифференциальный и ряд сочетаний (комбинаций) из трех последних.

Двухпозиционное регулирование - это простейший вид регулирования, широко распространенный в промышленности и быту. Эти регуляторы просты, дешевы и могут быть легко настроены для большинства процессов. Как следует из самого названия регулятора возможно два положения регулирующего органа: полное закрытие или, полное открытие. Если весь ход регулирующего органа обозначить за 100%, то регулятор скачком переводит регулирующий орган из положения. 0 в положение 100% и наоборот. Очевидно, что закон регулирования двухпозиционного регулятора не является пропорциональным, и, следовательно, система регулирования с таким регулятором не является непрерывной. Регулятор оказывает максимально возможное воздействие на объект, полностью открывая приток (или сток) энергии (или вещества) в процессе или полностью закрывая его. В связи с этим, процесс регулирования в системе с двухпозиционным регулятором имеет колебательный, незатухающий характер. Это обстоятельство является значительным недостатком двухпозиционных регуляторов, а также причиной того, что такой способ регулирования применяется на малоответственных процессах, где допустимы значительные колебания регулируемого параметра (установки кондиционирования, холодильники и т. п.).

Условно закон регулирования двухпозиционного регулятора может быть записан в виде:

$$U_p(t) = 0 \quad \text{при } \varepsilon < 0 \qquad (2.4)$$

$$U_p(t) = U_p^{\max} \text{ при } \varepsilon > 0.$$

В регуляторов П, ПИ, ПИД, ПИДД и т.п. обеспечивается непрерывное изменение выходного сигналя в зависимости от величины ошибки рассогласования.

Уравнение ПИД - регулятора как функции ошибки:

$$U_р(t) = S_П \cdot \varepsilon(t) + S_И \cdot \int_0^{T_р} \varepsilon(t) \cdot dt + S_Д \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \qquad (2.5)$$

что соответствует передаточной функции:

$$R(p) = S_П + S_И / p + S_Д \cdot p\ . \qquad (2.6)$$

Иногда (см. [1, 2]) используют другие обозначения, например:

$$R(p) = -(S_1 + S_0 / p + S_2 \cdot p) \qquad (2.7)$$

Знак минус в (2.7) подчеркивает то, что регулятор воздействует по принципу отрицательной обратной связи. Удобнее использовать вид *R(p)* со знаком плюс, тогда не надо изменять общепринятые выражения для передаточных функций замкнутых систем с обратной связью (см. радел 2.4.1).

Так называемый стандартный «учебный» аналоговый ПИД - регулятор:

$$R(p) = K_П \cdot (1 + \frac{1}{T_И \cdot p} + \frac{T_Д \cdot p}{1 + T_Ф \cdot p}) \qquad (2.8)$$

где $T_Ф = T_Д / N_Ф$, где $T_Ф$=3..10.

Значение $T_Ф$ обычно находят специальными методами методом или путем подбора. Необходимость ввода в R(p) фильтра, например с передаточной функцией в виде апериодического звена:

$$W_Ф(p) = \frac{1}{1 + T_Ф \cdot p} \qquad (2.9)$$

вызвано тем, что операция дифференцирования очень чувствительна к помехам.

Применяются регуляторы и с другими передаточными функциями, например ПИД – регулятор с компенсацией запаздывания:

$$R(p) = (S_П + S_И / p + S_Д \cdot p) \cdot (1 - \exp(-p\tau)) \qquad (2.10)$$

ПИДД – регулятор:

$$R(p) = S_П + S_И / p + S_Д \cdot p + S_{Д1} \cdot p^2\ . \qquad (2.11)$$

2.2.2 Сравнительная качественная картина переходных процессов при разных законах регулирования.

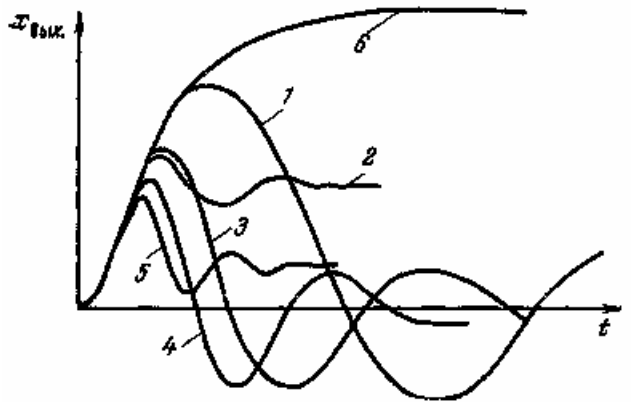


Рис. 2.3. Переходные процессы в АСР при различных законах регулирования:1-И-регулятор; 2 П-регулятор; 3 - ПИ-регулятор; 4- ПИД-регулятор; 5- ПД-регулятор; 6 - кривая разгона (без регулятора).

2.2.3 Математические модели реальных промышленных регуляторов.

Ниже приведены передаточные функции регуляторов некоторых промышленных систем.

$$R(p) = K_П + \frac{K_П}{T_И \cdot p} + \frac{T_Д \cdot p}{1 + T_Ф p} \text{ (регулятор РБА системы АКЭСР-М)} \qquad (2.12)$$

$$R(p) = K_П + \frac{1}{T_И \cdot p} + K_П \cdot T_Д \cdot p \quad \text{(регулятор СТАРТ-2)} \qquad (2.13)$$

$$R(p)=\frac{K_{П}}{1+T_{ф}\cdot p}\cdot\left[1+\frac{1}{T_{И}\cdot p}+T_{Д}\cdot p\right]$$ (регулятор КАСКАД-2) (2.14)

Некоторые микроконтроллеры используют типовые алгоритмы регулирования:

$$R(p)=K_{П}\cdot\left[1+\frac{1}{T_{И}\cdot p}+\frac{T_{Д}\cdot p}{\left((T_{Д}\cdot p)/8+1\right)\cdot\left((T_{Д}\cdot p)/4+1\right)}\right],$$

$$R(p)=K_{П}\cdot\left[1+\frac{1}{T_{И}\cdot p}+\frac{T_{Д}\cdot p}{\left((T_{Д}\cdot p)/8+1\right)^{2}}\right]$$ и др. (2.15)

В цифровых АСР регулятор работает в соответствии с моделью (8.6).

2.3 Математические модели динамики (ММД) ТОУ, используемые при расчете АСР и связь между ними.

2.3.2 Передаточные функции (ПФ).

Наиболее общий вид ММД:

$$a_{n+1}\frac{d^{n}x}{dt^{n}}+\ldots+a_{2}\frac{dx}{dt}+a_{1}x=b_{m+1}\frac{d^{m}u}{dt^{m}}+\ldots+b_{2}\frac{du}{dt}+b_{1}u$$ (ДУ).

В инженерной практике часто используются ММД в виде ПФ. Для объектов с самовыравниванием ПФ в общем виде:

$$W(p)=C\cdot\frac{b_{1}+b_{2}\cdot p+\ldots+b_{m+1}\cdot p^{m}}{a_{1}+a_{2}\cdot p+\ldots+a_{n+1}\cdot p^{n}}\cdot\exp(-p\cdot\tau).$$ (2.16)

При использовании «метода площадей» (b1=a1=1):

$$W(p)=C\cdot\frac{b_{1}+b_{2}\cdot p}{a_{1}+a_{2}\cdot p+a_{3}\cdot p^{2}}\cdot\exp(-p\cdot\tau),$$ или (2.17)

$$W(p)=C\cdot\frac{b_{1}}{a_{1}+a_{2}\cdot p+a_{3}\cdot p^{2}+a_{4}\cdot p^{3}}\cdot\exp(-p\cdot\tau)$$ (2.18)

Другие виды, например:

$$W(p)=\frac{C\cdot\exp(-p\cdot\tau)}{\prod_{i=1}^{n}(1+T_{i}\cdot p)}$$ и т.п. (2.19)

Часто применяют упрощенное выражение ПФ в виде апериодического звена с запаздыванием:

$$W(p)=\frac{C}{1+T\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau)$$ (2.20)

Для объектов без самовыравнивания W(p) в общем случае:

$$W(p)=\left[\frac{D}{p}-C\cdot\frac{b_{1}+b_{2}\cdot p+\ldots+b_{m+1}\cdot p^{m}}{a_{1}+a_{2}\cdot p+\ldots+a_{n+1}\cdot p^{n}}\right]\cdot\exp(-p\cdot t)$$ (2.21)

или упрощенные выражения:

$$W(p)=\frac{C}{p\cdot T_{Б}\cdot(1+T\cdot p)}\cdot\exp(-p\cdot\tau)$$ или: (2.22)

$$W(p)=\frac{C}{T\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau)$$ (2.23)

Конкретный вид *W(p)* выбирается из условия обеспечения адекватности и удобства вычислений.

Для уравнения вида (2.20) выход определяется аналитически по формуле:

$$\hat{X}(t)=C\cdot\Delta U\cdot\left[1-\exp(-\frac{t-\tau}{T})\right]$$ (при $t\geq\tau$) (2.24)

(**см. пример в приложении 3**), а для *W(p)* вида (2.19) при n=2:

$$\hat{X}(t)=C\cdot\Delta U\cdot\left(1-\frac{T_{1}}{T_{1}-T_{2}}\cdot\exp(-\frac{t-\tau}{T_{1}})+\frac{T_{2}}{T_{1}-T_{2}}\cdot\exp(-\frac{t-\tau}{T_{2}})\right)$$ (2.25)

Если значение δ, найденное по следующей формуле, не превышает 3-7%, то модель считается адекватной: $\delta = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i}$ (2.26)

2.3.3Частотные характеристики (ЧХ).

При подаче на вход линейной системы сигнала

$U(t) = A_u \sin(\omega t) = A_u \cdot \exp(j\omega t)$ (2.27)

на выходе будет сигнал

$X(t) = A_x \sin(\omega t + \varphi) = A_x \cdot \exp(j\omega t + \varphi)$, (2.28)

а АФЧХ имеет вид:

$$W(j\omega) = C \cdot \frac{b_1 + b_2 \cdot j\omega + \ldots + b_{m+1} \cdot j\omega^m}{a_1 + a_2 \cdot j\omega + \ldots + a_{n+1} \cdot j\omega^n} \cdot \exp(-j\omega \cdot \tau) =$$

$$= A(\omega) \cdot \exp(j\phi(\omega)) = \mathrm{Re}\,W(\omega) + \mathrm{Im}\,W(\omega) \quad (2.29),$$

где

$A(\omega) = \sqrt{[\mathrm{Re}\,W(\omega)]^2 + [\mathrm{Im}\,W(\omega)]^2}$ (2.30)

$\varphi(\omega) = \arctan \frac{[\mathrm{Im}\,W(\omega)]}{[\mathrm{Re}\,W(\omega)]}$ (2.31)

2.4 Имитационное моделирование переходных процессов в замкнутых АСР.

2.4.1 Математические модели замкнутых АСР.

ММ Замкнутых АСР находятся по правилам преобразования структурных схем [14].

Для одноконтурных замкнутых АСР по каналу возмущения:

$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p) \cdot R(p)}$, (2.32)

здесь вход U, выход X (т.е. возмущение нанесено со стороны РО, а регулятор должен обеспечить возвращение выхода X к заданию X*).

По каналу задания:

$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W(p) \cdot R(p)}{1 + W(p) \cdot R(p)}$, (2.33)

здесь вход X*, выход X, (т.е. изменено задание X* регулятору и он должен обеспечить достижение значения выхода X равного новому значению X*).

Для каскадных замкнутых АСР по каналу возмущения:

$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p) \cdot R(p) \cdot R_1(p) + W_1(p) \cdot R_1(p)}$ (2.34)

и по каналу задания:

$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W(p) \cdot R(p) \cdot R_1(p)}{1 + W(p) \cdot R(p) \cdot R_1(p) + W_1(p) \cdot R_1(p)}$. (2.35)

Для комбинированных замкнутых АСР по каналу возмущения:

$W_{ЗАМ}(p) = \left[\frac{1}{1 + W(p) \cdot R(p)}\right] \cdot [W_1(p) + W(p) \cdot R_1(p)]$ (2.36)

Для АСР с регулятором Смита:

$W_{ЗАМ}(p) = \frac{W(p)}{1 + W^*(p) \cdot R(p)}$ (2.37)

2.4.3 Алгоритм построения переходных процессов на основе метода Акульшина.

Подробнее см. [7, 2 стр. 93]. Метод Акульшина требует знания АФХ и ФЧХ замкнутой АСР и основан на использования разложения в ряд Фурье входного и выходного сигналов системы. Известно, что периодическая функция может быть разложена в ряд Фурье. Выходную величину *x(t)* условно рассматривают как периодическую

функцию с периодом T_o. в 4..6 раз большим времени переходного процесса в системе. При этом считают, что в течении времени меньшего, чем $T_o/2$ амплитуда возмущения $+\Delta U$, а в течении времени большего, чем $T_o/2$ амплитуда возмущения $-\Delta U$. Разложим такое входное воздействие в ряд Фурье:

$$u(t) = \frac{2 \cdot \Delta U}{\pi} \cdot \sum_{i=1,3,5,\ldots}^{N_\phi} \frac{\sin(i \cdot \omega_0 \cdot t)}{2 \cdot i - 1} \qquad (2.38)$$

где $i=1, 3, 5, \ldots, N_\phi$ – возрастающий рад нечётных цифр ($N_\phi=19\ldots23$).

Так как рассматриваемую систему полагаем линейной, то выход можно представить отрезком ряда:

$$x(t) = \frac{2 \cdot \Delta U}{\pi} \cdot \sum_{i=1,3,5,\ldots}^{N_\phi} \frac{A_{ЗС}(\omega_0) \cdot \sin(i \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_{ЗС}(\omega_0))}{2 \cdot i - 1}, \qquad (2.39)$$

Расчет переходного процесса производят, используя формулу (5.7). $\varphi_{ЗС}$ - ФЧХ и $A_{ЗС}$ - АЧХ замкнутой АСР должны быть вычислены для частот $\omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0$ и т. д., например до $21\omega_0$. Значение ω_0 определяется как $\omega_{раб}/6$, где $\omega_{раб}$ определяется при расчете настроек.

Алгоритм построения переходных процессов на основе метода ВЧХ.

Подробнее см. [7]. В основу этого метода положено известное из курса ТАУ выражение, применяемое, например, в «методе трапеций» для определения переходной характеристики устойчивой системы:

$$X(t) = \frac{2 \cdot \Delta U}{\pi} \cdot \int_0^{\omega_S} \frac{\mathrm{Re} W_{ЗАМ}(j \cdot \omega) \sin(\omega \cdot t)}{\omega} d\omega \qquad (2.40)$$

Основные трудности использования этого метода при расчете вручную: сложность аналитического вывода $\mathrm{ReW_{ЗАМ}}$ - вещественной частотной характеристики (ВЧХ) замкнутой системы; сложность вычисления интеграла при различных t и ω; проблема определения значения ω_S.

Если воспользоваться, например, системой Mathcad, то эти сложности не существенны (**см. приложение 2**). Верхний предел интегрирования по частоте ω_S должен выбираться таким, чтобы при частоте ω_S график ВЧХ затухал после 2-4 периодов колебаний. Это хорошо видно из графика ВЧХ в приложении 2. Напомним, что свойства ВЧХ таковы, что начальная часть ее графика определяет конечную часть («хвост») графика переходного процесса, а часть ВЧХ при больших частотах начальную часть графика x(t). Поэтому, если взято малое значение ωS, то в начале графика x(t) могу появиться искажения и неточности. Хорошо работает этот метод и при определении x(t) объекта, например, при проверке адекватности (**см. приложение 2**).

Типовые процессы регулирования.

Подробнее см [16, стр.249]Характер переходного процесса, а следовательно, качество регулирования определяются в данных условиях (при данных динамических свойствах агрегата и возмущениях) как выбранным законом регулирования, так и настройками регулятора. При разных настройках одного и того же регулятора можно получить различные переходные процессы, отличающиеся величиной перерегулирования и другими показателями качества. Оптимальный характер процесса регулирований и необходимые для этого настройки регулятора - понятия относительные. В зависимости от условий регулируемого технологического процесса (требований к его протеканию и качеству продукции), характера возмущений и устройства аппаратуры регулирования наилучшими могут быть признаны различные по своему характеру процессы регулирования.

В общем случае рекомендуются три основных типовых процесса регулирования (рис. 2.4):

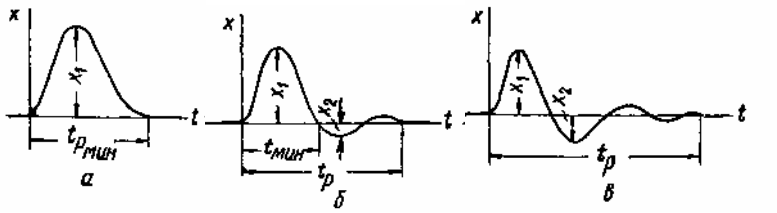


Рис. 2.4 Типовые оптимальные процессы регулирования:
а - апериодический с минимальным t_p; ***б*** - процесс с 20%-ным перерегулированием и минимальным временем $x_{д1}$, ***в*** - процесс с минимальной квадратичной площадью отклонения ($\min\int_0^\infty x^2 dx$).

Апериодический процесс (граничный) характеризуется, помимо минимального общего времени регулирования, отсутствием перерегулирования и минимальным регулирующим воздействием, т. е. минимальным изменением подачи регулирующей среды. Это целесообразно в тех случаях, когда регулирующее воздействие для рассматриваемой регулируемой величины может оказывать влияние и на другие регулируемые величины.

Процесс с 20%-ным перерегулированием рекомендуется в тех случаях, когда допустима известная величина перерегулирования, которое снижает максимальное динамическое отклонение. Минимальное время первого полупериода колебаний, в котором имеет место наибольшее отклонение от задания, является преимуществом, если остальная часть переходного процесса, где отклонения от задания сравнительно невелики, менее существенна или несущественна вовсе.

Процесс с $\min\int_0^\infty x^2 dx$ характеризуется наибольшим перерегулированием (порядка 40—45%) и временем регулирования, наибольшим регулирующим воздействием. Однако ему свойственна наименьшая величина максимального динамического отклонения.

Выбор закона регулирования.

Подробнее см. [1, стр. 68-82, 16]. Основным условием при выборе регулятора и его настроек является качество регулирования, которое определяет точность поддержания автоматикой технологического режима, ее экономическую эффективность. Под выбором регулятора понимают выбор закона регулирования.

Чтобы получить требуемый характер процесса регулирования, что и определяет качество регулирования, необходимо обеспечить определенные динамические свойства системы регулирования. Объект регулирования является обычно неизменяемой частью системы, поэтому необходимые динамические свойства системы регулирования можно получить только путем выбора соответствующего закона регулирования регулятора. Создавать для каждого промышленного объекта регулятор особой конструкции практически невозможно, да и не вызывается необходимостью. Вместо этого выпускаются стандартные регуляторы с несколькими типовыми и наиболее необходимыми законами регулирования (см. раздел 1.4). При проектировании системы автоматического регулирования из числа этих промышленных регуляторов и выбирают простейший по закону регулирования, а следовательно, наиболее деше-

вый и простой в эксплуатации, который позволит обеспечить на данном объекте необходимое качество регулирования.

Для того чтобы выбрать регулятор (и его настройки), необходимо знать:

- динамические характеристики ТОУ (иметь ММ динамики);
- условия работы регулятора - требования к качеству регулирования и возмущения технологического процесса;
- показатели качества регулирования, которые могут быть получены при установке серийных регуляторов различных типов на объектах с разными динамическими свойствами.

Выбор типа регулятора обычно начинается с простейших двухпозиционных регуляторов и может заканчиваться самонастраивающимися микропроцессорными регуляторами. Часто по требованиям технологического регламента многие объекты не допускают применения релейного управляющего воздействия.

Теоретически, с усложнением закона регулирования качество работы системы улучшается. Известно, что на динамику регулирования наибольшее влияние оказывает величина отношения запаздывания к постоянной времени объекта $R_d = \tau / T$.Эффективность компенсации ступенчатого возмущения регулятором достаточно точно может характеризоваться величиной динамического коэффициента регулирования R_d, а быстродействие - величиной времени регулирования. Минимально возможное время регулирования для различных типов регуляторов при оптимальной их настройке определяется следующей таблицей:

Закон регулирования	П	ПИ	ПИД
t_p / τ	6.5	12	7

где - t_p время регулирования, τ - запаздывание в объекте. Теоретически, в системе с запаздыванием, минимальное время регулирования $t_{p\min} = 2\tau$. Руководствуясь таблицей можно утверждать, что наибольшее быстродействие обеспечивает П-закон управления. Однако, если коэффициент усиления П-регулятора $S_П$ мал (чаще всего это наблюдается в системах с запаздыванием), то такой регулятор не обеспечивает высокой точности регулирования, т.к. в этом случае велика величина статической ошибки. Если $S_П$ имеет величину равную 10 и более, то П-регулятор приемлем, а если $S_П < 10$, то требуется введение в закон управления интегральной составляющей. Наиболее распространенным на практике является ПИ-регулятор, который обладает следующими достоинствами:

1. Обеспечивает нулевую статическую ошибку регулирования.
2. Достаточно прост в настройке, т.к. настраиваются только коэффициент усиления $K_П$ и постоянная интегрирования $T_И$. В таком регуляторе имеется возможность оптимизации $K_П / T_u = S_П \cdot S_И \to \max$, что обеспечивает управление с минимально возможной среднеквадратичной ошибкой регулирования.
3. Малая чувствительность к шумам в канале измерения (в отличии от ПИД - регулятора).

Для наиболее ответственных контуров можно рекомендовать использование ПИД - регулятора, обеспечивающего наиболее высокое быстродействие в системе. Однако следует учитывать, что это условие выполняется только при его оптимальных настройках (настраиваются три параметра). С увеличением запаздывания в системе резко возрастают отрицательные фазовые сдвиги, что снижает эффект действия дифференциальной составляющей регулятора. Поэтому качество работы ПИД - ре-

гулятора для систем с большим запаздыванием становится сравнимо с качеством работы ПИ - регулятора. Кроме этого, наличие шумов в канале измерения в системе с ПИД - регулятором приводит к значительным случайным колебаниям управляющего сигнала регулятора, что увеличивает дисперсию ошибки регулирования и износ исполнительного механизма. Таким образом, ПИД - регулятор следует выбирать для систем регулирования, с относительно малым уровнем шумов и величиной запаздывания в объекте управления. Примерами таких систем является системы регулирования температуры.

При выборе типа регулятора рекомендуется ориентироваться на величину отношения запаздывания к постоянной времени в объекте $R_d = \tau / T < 0.2$. Если $R_d < 0.2$, то можно выбрать релейный, непрерывный или цифровой регуляторы. Если $0.2 < R_d < 1$, то должен быть выбран непрерывный или цифровой, ПИ- или ПИД - регулятор. Если $R_d > 1$, то выбирают специальный цифровой регулятор с упредителем (регулятор Смита), который компенсирует запаздывание в контуре управления. Однако этот же регулятор рекомендуется применять и при меньших значениях R_d.

3 Расчет одноконтурных АСР.

3.2 Расчет настроек регуляторов в одноконтурной АСР методом незатухающих колебаний (метод Циглера-Никольса).

3.2.1 Теоретические основы метода.

Подробнее см. [1, 9]. Идея метода заключается в том, что сначала считают, что использован только П - регулятор, который, меняя значение $S_П$ настраивают так, чтобы замкнутая АСР находилась на границе устойчивости. Настройки рассчитывают с использованием эмпирических формул. Таким образом: принимают $S_И$=0 и $S_Д$=0, после чего рассчитывают или определяют экспериментально критическое значение настройки $S_П$* и соответствующее ему значения критической частоты ω*, обеспечивающих вывод системы на границу устойчивости (т.е. определяют то значение $S_П$= $S_П$*, когда на выходе АСР будут возникать незатухающие колебания X), а затем рассчитывают $S_П$; $S_И$; $S_Д$ на основе значений $S_П$* и ω* по формулам в таблице 3.1:

Табл.3.1

Регулятор	$S_П$	$S_И$	$S_Д$
ПИД	$0.60 \cdot S_П^*$	$0.192 \cdot S_П^* \cdot \omega^*$	$0.471 \cdot S_П^* / \omega^*$
ПИ	$0.45 \cdot S_П^*$	$0.086 \cdot S_П^* \cdot \omega^*$	---
П	$0.50 \cdot S_П^*$	---	---

3.2.3 Методика аналитического определения настроек методом Циглера-Никольса.

При аналитическом методе расчета для определения значений критической частоты ·ω* и критической настройки $S_П$* используют условия:

$$\varphi_{об}(\omega) = -\pi \qquad (3.1)$$

$$S_П^* = 1 / A_{Об}(\omega^*) \qquad (3.2)$$

где $\varphi_{об}$ и $A_{об}$ соответственно фаза (ФЧХ) и амплитуда (АЧХ) частотных характеристик объекта, они получаются аналитически путем подстановки выражения $p = j \cdot \omega$ в W(p) и последующих преобразований. Для контрольного примера:

$$W(p) = \frac{0.7}{1 + 6 \cdot p} \cdot \exp(-5 \cdot \tau) \qquad (3.3)$$

$$\varphi_{об}(\omega) = -arctg(6 \cdot \omega) - 5 \cdot \omega \qquad (3.4)$$

$$A_{ОБ} = \frac{0.7}{\sqrt{1+(6\cdot\omega^*)^2}} \qquad (3.5)$$

Ход расчета настроек следующий. Воспользовавшись равенством (3.1) и построенным графиком ФЧХ объекта, находим значение критической частоты ω*, как частоту, соответствующую углу -π (см. рис. 3.1).

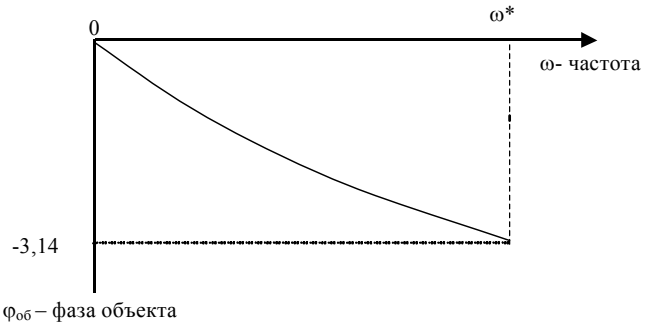


Рис. 3.1.График ФЧХ, построенный по уравнению(3.1).

Найденное значение частоты (для примера (3.3), это ω*=0.394) подставляют в (3.2) и определяют $S_П$* (для примера (3.3), это $S_П$* =3.668). Далее по формулам из табл. 3.1 определяют настройки П, ПИ, ПИД - регуляторов (в примере (7.3): $S_П$=2.2009; $S_И$=0.2777; $S_Д$=4.3832).

3.3 Расчет настроек в одноконтурной АСР методом, основанном на использование РАФХ.

3.3.1 Теоретические основы метода.

Подробное описание, см. методические указания к лабораторной работе №4.[10]. Между m и одним из прямых показателей качества переходного процесса ψ - степенью затухания имеется приблизительная связь вида:

$\psi = 1 - \exp(-2\cdot\pi\cdot m)$ откуда: (3.6)

$m = -\log(1-\psi)/(2\cdot\pi)$. (3.7)

Основные уравнения для расчета ($\gamma = \omega\cdot(1+m^2)$):

$S_И = S_Д\cdot\omega\cdot\gamma - IM(W)\cdot\gamma / A^2(W)$ и (3.8)

$S_П = 2\cdot S_Д\cdot m\cdot\omega - (\mathrm{Re}(W) + m\cdot\mathrm{Im}(W))/A^2(W)$. (3.9)

Другой вид этих уравнений:

$S_И = S_Д\cdot\omega\cdot\gamma - \sin(F(W))\cdot\gamma / A(W)$ и (3.8А)

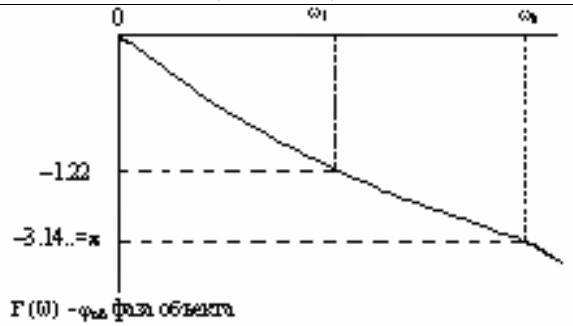
$S_П = 2\cdot S_Д\cdot m\cdot\omega - (m\cdot\sin(F(W)) + \cos(F(W))/A(W)$ (3.9А)

3.3.2 Методика аналитического определения настроек методом, основанном на использование РАФХ[10, 2].

Подробно см.[10, 2]. **См приложения 4 и 5**.

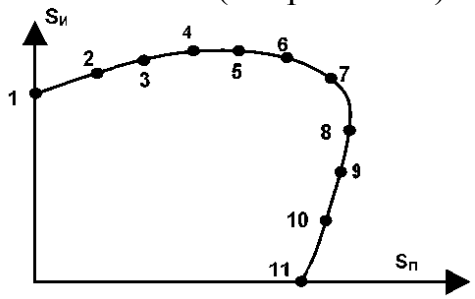
Краткое описание методики для ПИ и ПИД регулятора:

1).вывести аналитические выражения для РАФЧХ объекта: (фаза и модуль); **(См приложение 5)** построить график РФЧХ; (см. рис.ниже), при помощи которого определить значения ω_1 и $\omega_к$, как частоты соответствующие F(W)= −70 и F(W)= −180 град.



2).рассчитать по выведенному аналитическому выражению РАЧХ численные значения для 10-15 значений F(W) и A(W);

3).по формулам (3.8-3.9) или (3.8А-3.9А) рассчитать значения $S_п$ и $S_и$ и построить график равный степени колебательности (см. рис.ниже). Принимаем $S_д$=0;



4).из полученного графика определить значения $S_п$, $S_и$ и рабочей частоты $\omega_{раб}$ для нескольких точек (3-5), лежащих правее экстремума;

5).провести моделирование переходных процессов в замкнутой АСР;

6).по результатам моделирования построить графики переходных процессов;

7).для заданного значения статической ошибки $x_{ст}$ определить время регулирования $t_р$ для каждого из полученных переходных процессов. Значения $S_п$, $S_и$ и $\omega_{раб}$ соответствующее графику с минимальным временем регулирования принять за оптимальные для ПИ - регулятора;

8).начинаем расчет настроек ПИД - регулятора; для этого надо при найденном оптимальном значении рабочей частоты $\omega_{раб}$ пересчитать по формулам (3.8-3.9) или (3.8А-3.9А) значения $S_п$ и $S_и$.после последовательной подстановки $S_д$=1; $S_д$=5; $S_д$=50 и т.п. (обычно необходимы пробы для выбора $S_д$)

9).повторить этап 2, но уже для ПИД - регулятора, после нахождения переходного процесса с минимальным временем регулирования расчет заканчиваем;

10).построить графики для всех полученных переходных процессов в одном масштабе, нанести на него заданное значения $x_{ст}$ и $t_р$;

4 Цифровые системы управления.

4.1 Особенности и структура цифровой системы управления.

Подробнее см. [4, 5]. Для обработки в компьютерных системах управления (см. рис 9-10) данные должны быть представлены в дискретном виде. Это происходит в результате квантирования по времени в результате периодического опроса датчиков с периодом T_O и аналого-цифрового преобразования (АЦП). При АЦП производится квантирование по уровню, в результате чего значение сигнала для момента времени j представляется числовым кодом – целым числом шагов квантирования размера:

$$\Delta = \frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{2^N - 1} \qquad (4.1)$$

где X_{MAX} и X_{MIN} соответственно наибольшее наименьшее значения диапазона измерения датчика, N - разрядность АЦП (обычно 8..16). При правильно выбранном N

влияние квантирования по уровню на точность представления XJ практически незаметно. Если исходное значение переменной XJ, то после АЦП это: $X_j^{Ц} = \mathrm{int}\left[\frac{X_j}{\Delta}\right]\cdot\Delta$, (4.2)

$\mathrm{int}[..]$ означает взятие целой части от выражения в квадратных скобках, например $\mathrm{int}[7.589]=7$.

4.2 Математические модели объектов в цифровых системах.

Математические модели в цифровых системах управления записываются в виде рекуррентных разностных уравнений (см. 4.4; 4.6).

Если математическая модель ТОУ представлена передаточной функцией вида (3.5) и использован фиксатор нулевого порядка, то выход объекта в цифровом виде для момента времени T_j определяется как:

$X_j = A\cdot X_{j-1} + B\cdot U_{j-D}$ (4.4)

где $A=\exp(-T_O/T)$, $B=(1-A)\cdot C$, $D=[\tau/T_O]$ (4.5)

Уравнение (4.4) является разностным эквивалентом непрерывного уравнения объекта (4.9) для дискретных моментов времени j = 1, 2, 3, ….

4.3.Алгоритмы цифрового управления и их реализация.

Из выражения (4.2), применяя операции численного интегрирования и дифференцирования можно получить выражение для цифрового ПИД - регулятора:

$U_j = U_{j-1} + Q_П\cdot E_j + Q_И\cdot E_{j-1} + Q_Д\cdot E_{j-2}$, (4.6)

где $E_j = X_j - X^*$. (4.7)

В цифровых регуляторах часто используют подключение экспоненциального фильтра с передаточной функцией (4.6), это в цифровом виде соответствует выражению:

$\widetilde{X}_j = \gamma\cdot X_j + (1-\gamma)\cdot\widetilde{X}_{j-1}$, (4.8)

где $\widetilde{X}_j$ и X_j - отфильтрованное и измеренное значения выхода объекта для текущего шага j; $\widetilde{X}_{j-1}$ - результат фильтрации на предыдущем шаге; γ – постоянный коэффициент (настройка фильтра, $0\le\gamma\le1$, $\gamma=\frac{1}{T_ф}$). См. приложение 6

Фрагмент алгоритма ПИД - регулятора с фильтром для *j*-ого шага управления можно представить в виде:

- **опрос датчика: получение** X_j
- **фильтрация от помех:** $\widetilde{X}_j = \gamma\cdot X_j + (1-\gamma)\cdot\widetilde{X}_{j-1}$
- **расчет ошибки:** $E_j = \widetilde{X}_j - X^*$
- **расчет выхода:** $U_j = U_{j-1} + Q_П\cdot E_j + Q_И\cdot E_{j-1} + Q_Д\cdot E_{j-2}$

  (только для самого первого шага $U_j = U_{j-1} + Q_П\cdot E_j$**)**

4.4.Расчет настроек регуляторов цифровых одноконтурных АСР.

Подробнее см. [4, 5]. Настройки $Q_П$, $Q_И$, $Q_Д$ можно, например, приближенно определить по формулам:

$Q_Д = 3/C$

$$Q_П = Q_Д \cdot (1 + 0.22 \cdot T / \tau) \qquad (4.9)$$
$$Q_И = -2 \cdot Q_Д \cdot (1 + 0.1 \cdot T / \tau)$$

Или исходя из известных настроек $S_п$, $S_и$, $S_д$ по формулам:

$$\left.\begin{aligned} Q_Д &= S_Д / T_O \\ Q_П &= S_П + S_И \cdot T_O / 2 + Q_Д \\ Q_И &= -(S_П - S_И \cdot T_O / 2 + 2 \cdot Q_Д) \end{aligned}\right\} \qquad (4.10)$$

4.5.Алгоритм цифрового упр. для одноконтурной АСР.

Алгоритм реализации цифровой одноконтурной АСР для ПИ регулятора без накопления всех значений X_j, E_j и U_j, № - это шаг алгоритма:

№0. Только для самого первого шага опроса: *U1=0; E1=0*
№1. Опрос датчика входного сигнала – получение *X*
№2. Определение ошибки рассогласования: $E=X-X^*$
№3. Расчет выхода регулятора: $U=U1+Q_П E+Q_И E1$
№4. Запоминание e для использования на следующем шаге: E1=E
№5. Запоминание u для использования на следующем шаге: U1=U
№6. Воздействие на исполнительный механизм
№7. Переход к №1

Здесь исходными данными являются X, X^*, $Q_П$, $Q_И$.

5.Каскадные АСР.

5.2 Теоретические основы расчета настроек в каскадных АСР.

Основным отличием каскадной АСР является наличие двух регуляторов – основного (внешнего) регулятора, служащего для стабилизации основного выхода объекта X, и вспомогательного (внутреннего) регулятора, предназначенного для регулирования вспомогательного параметра X_1. Заданием для вспомогательного регулятора служит выходной сигнал основного регулятора. При этом вспомогательный регулятор поддерживает значение вспомогательного параметра на определенном уровне, необходимом для стабилизации основного параметра.

Таким образом, расчёт каскадной АСР сводится к определению настроек основного и вспомогательного регуляторов при заданных значениях динамических характеристиках объекта управления по основному и вспомогательному каналам. Поскольку настройки основного и вспомогательного регуляторов взаимозависимы, расчёт настроек проводят методом итераций.

На каждом шаге итерации рассчитывают приведённую одноконтурную АСР, в которой один из регуляторов условно относится к эквивалентному объекту

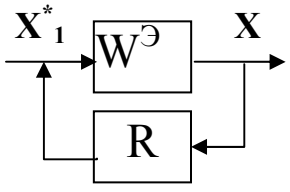


Рис. 5.1

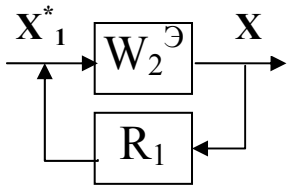


Рис. 5.2

Эквивалентный объект для основного регулятора представляет собой последовательное соединение замкнутого вспомогательного контура и основного регулятора. Передаточная функция эквивалентного объекта имеет следующий вид:

$$W^Э = \frac{R1(p) \cdot W(p)}{1 - W1(p) \cdot R1(p)} \qquad (5.1)$$

Эквивалентный объект для вспомогательного регулятора является параллельным соединением вспомогательного канала и основной разомкнутой системы. Его передаточная функция равна:

$$W1^{Э} = W1(p) - W(p) \cdot R(p) \qquad (5.2)$$

На первом шаге расчётов принимают:

$$W^{Э0} = \frac{W(p)}{W1(p)} \qquad (5.3)$$ или:

$$W1^{Э1} = W1(p) \qquad (5.4)$$

Если расчет начинают с главного регулятора, то, используя метод Циглера-Никольса, последовательно используют:

1а).уравнение (9.3), определяя настройки $S_П^{(1)}$ и $S_И^{(1)}$ подставляя их в (5.2)
1б).уравнение (9.2), определяя настройки $S_{П1}^{(1)}$ и $S_{И1}^{(1)}$ подставляя их в (5.1)
2а).уравнение (9.1), определяя настройки $S_П^{(2)}$ и $S_И^{(2)}$ подставляя их в (5.2)
2б).уравнение (9.2), определяя настройки $S_{П1}^{(2)}$ и $S_{И1}^{(2)}$ подставляя их в (5.1)
3а).уравнение (9.1), определяя настройки $S_П^{(3)}$ и $S_И^{(3)}$ подставляя их в (5.2)
3б).уравнение (9.2), определяя настройки $S_{П1}^{(3)}$ и $S_{И1}^{(3)}$ подставляя их в (5.1)
4а).уравнение (9.1), определяя настройки $S_П^{(4)}$ и $S_И^{(4)}$ подставляя их в (5.2)
4б).уравнение (9.2), определяя настройки $S_{П1}^{(4)}$ и $S_{И1}^{(4)}$ подставляя их в (5.1)
и т.д. пока не будет удовлетворяться условие, когда:

$$\mathbf{S_П^{(i)} \approx S_П^{(i+1)} \quad S_{П1}^{(i)} \approx S_{П1}^{(i+1)} \quad S_И^{(i)} \approx S_{И1}^{(i+1)} \quad S_{И1}^{(i)} \approx S_{И1}^{(i+1)}}$$

Обозначение ≈ означает, примерное равенство, т.е. равенство, когда абсолютная или относительная ошибка становится меньше допустимой. Иначе говоря, расчёт продолжают до тех пор, пока настройки регуляторов, найденные в двух последовательных итерациях, не совпадут с заданной точностью.

5.4 Алгоритм цифрового управления для каскадной АСР.

Алгоритм реализации цифровой каскадной АСР с ПИ регуляторами:

№0. Только для самого первого шага опроса: УГ1=0; ЕГ1=0; UB1=0; ЕВ1=0
№1. Опрос датчика главного входного сигнала – получение ХГ
№2. Определение ошибки рассогласования: ЕГ=ХГ – Х*
№3. Расчет выхода главного регулятора: УГ = УГ1+QПЕГ+QИЕГ1
№4. Опрос датчика вспомогательного входного сигнала – получение ХВ
№5. Определение ошибки рассогласования: ЕВ=ХВ – УГ
№6. Расчет выхода вспомогательного регулятора: UB=UB1+QПЕВ+QИЕВ1
№7. Запоминание ошибок Е: ЕГ1= ЕГ; ЕВ1= ЕВ
№8. Запоминание выходов u: УГ1= УГ; UB1= UB
№9. Воздействие на исполнительный механизм
№10. Переход к №1

Исходными данными являются $X_Г$, $X_В$ X^*, $Q_П$, $Q_И$., $Q_{П1}$, $Q_{И1}$.

Приложение 1. Рисунки

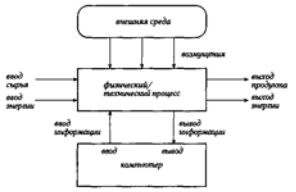


Рис. 1

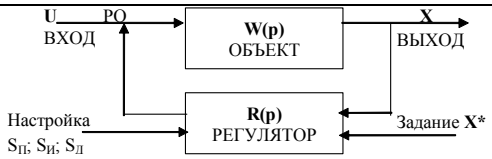


Рис. 2. Структурная схема одноконтурной АСР

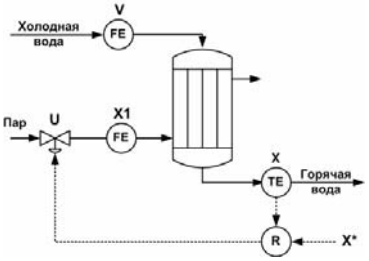


Рис. 3.Одноконтурная АСР (теплообменник)

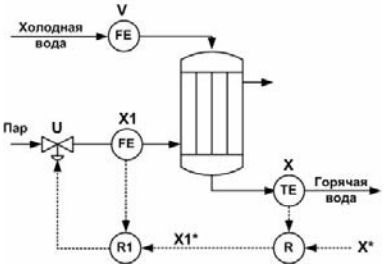


Рис 4. Каскадная АСР (теплообменник)

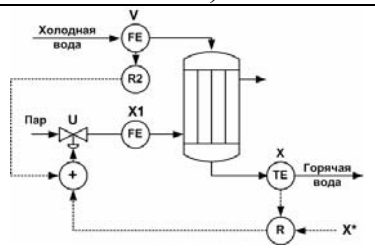


Рис.6. Комбинированная АСР (теплообменник)

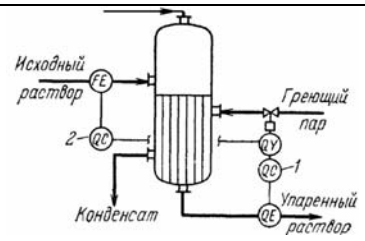
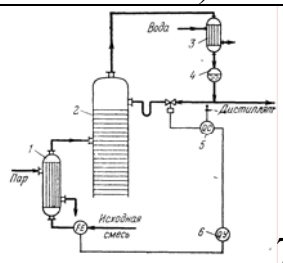


Рис.6. Комбинированная АСР (выпарной аппарат)



7

Рис 7. Комбинированная АСР (ректификация)

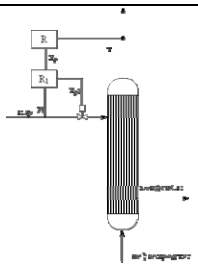


Рис 8. Каскадная АСР

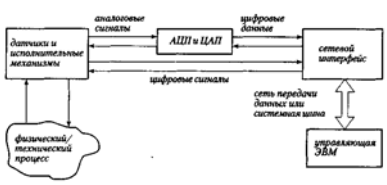


Рис 9.Цифровая система

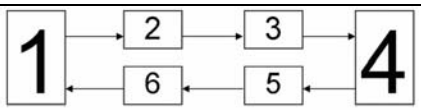


Рис 10. 1- ТОУ; 2- АЦП; 3 - фиксатор и коммутатор; 4 - ПрК и алгоритмы управления; 5 - фиксатор; 6 – коммутатор.

Приложение 2. Пример построения переходного процесса

ПОСТРОЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ МЕТОДОМ ВЧХ

$C := 0.7$ $T := 6$ $\tau := 5$ $\Delta U := 10$

$Sп := 2.2009$ $Sи := 0.2777$ $Sд := 4.3832$

$$W(p) := C \cdot \frac{\exp(-\tau \cdot p)}{1 + T \cdot p} \qquad R(p) := Sп + \frac{Sи}{p} + Sд \cdot p \qquad j := \sqrt{-1}$$

$$Wзам(p) := \frac{W(p)}{1 + W(p) \cdot R(p)}$$

$\omega := 0, 0.01 .. 2$ $\omega S := 1.85$

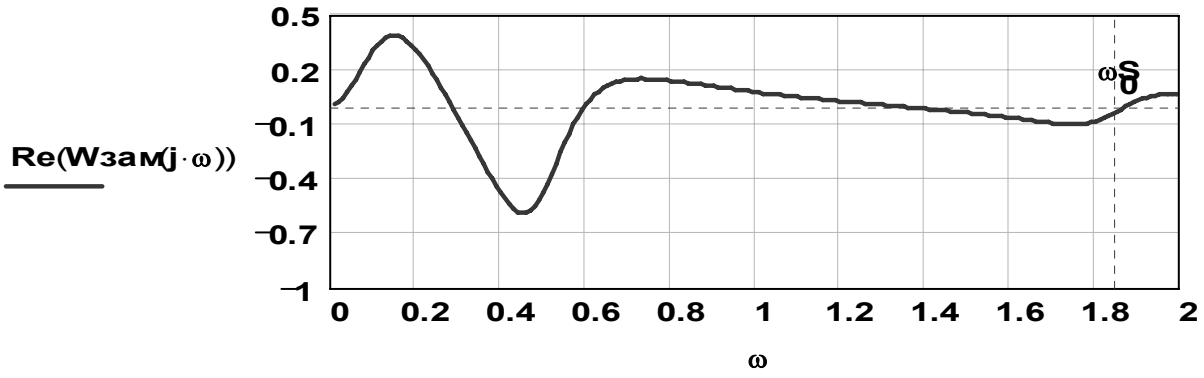
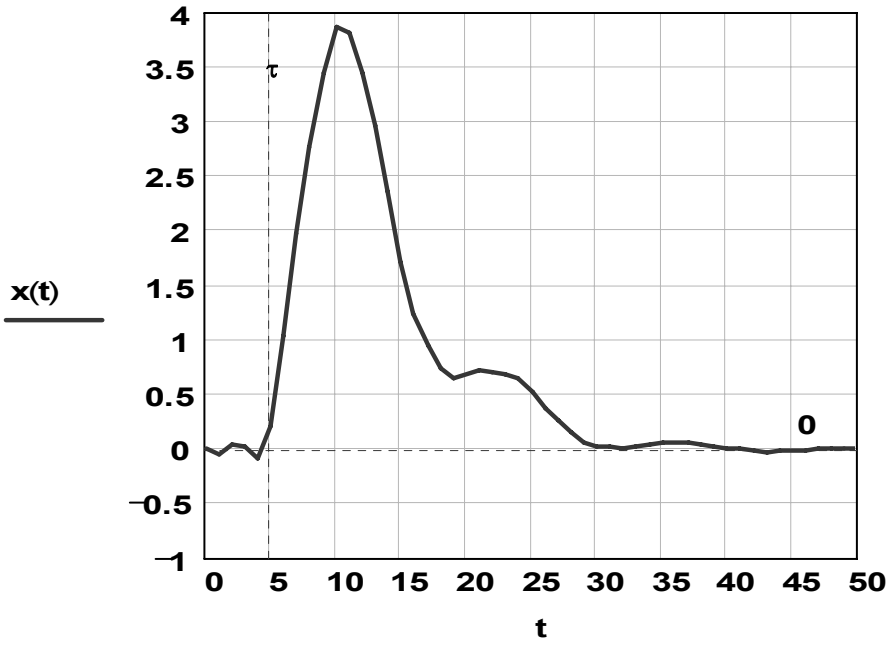


График вещественной АФЧХ системы

$t := 0, 1 .. 50$

$$x(t) := \frac{2 \cdot \Delta U}{\pi} \cdot \left(\int_0^{\omega S} \frac{Re(Wзам(j \cdot \omega))}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t)\, d\omega \right)$$



Переходный процесс в системе

t =	x(t) =
0	0
1	-0.051
2	0.042
3	0.025
4	-0.092
5	0.196
6	1.033
7	1.976
8	2.76
9	3.436
10	3.856
11	3.812
12	3.442
13	2.954
14	2.355
15	1.715

Приложение 3. Пример проверки адекватности

Аппроксимация кривой разгона апериодическим звеном первого порядка Инков А.М. 2-02-2004 ORIGIN:= 1

$\begin{pmatrix} t \\ x \end{pmatrix} :=$

	Исходные данные		
№	t - время		x - выход
1	2,10	88,86	0,00
2	4,80	88,86	0,00
3	7,33	89,17	0,31
4	10,18	89,96	1,10
5	13,22	90,81	1,95
6	16,42	91,57	2,71
7	18,83	92,02	3,16
8	20,86	92,31	3,45
9	23,94	92,68	3,82
10	28,11	93,03	4,17
11	30,10	93,19	4,33
12	32,92	93,27	4,41
13	34,16	93,36	4,50
14	38,20	93,46	4,60
15	42,17	93,53	4,67
16	43,00	93,54	4,68
17	44,00	93,55	4,69
18	45,00	93,56	4,70
19	46,00	93,56	4,70
20	47,00	93,56	4,70

n -количество точек кривой разгона $n := 20$ $i := 1..n$

C - коэффициент усиления объекта $C := \frac{x_n}{10}$ $C = 0.47$

τ - время запаздывания объекта $\tau := 7.5$

T - постоянная времени объекта $T := 10$

Исходная кривая разгона аппроксимируется переходным процессом в апериодическом звене с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{C}{1+T \cdot p} \cdot \exp(-p \cdot \tau)$$

и переходным процессом:

$$\hat{X}(t) = C \cdot \Delta U \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right)\right] \quad \text{для} \quad t \geq \tau \quad \text{или}$$

$$X_i := \text{if}\left[t_i < \tau, 0, C \cdot 10 \cdot \left[1 - \exp\left[\frac{-(t_i - \tau)}{T}\right]\right]\right]$$

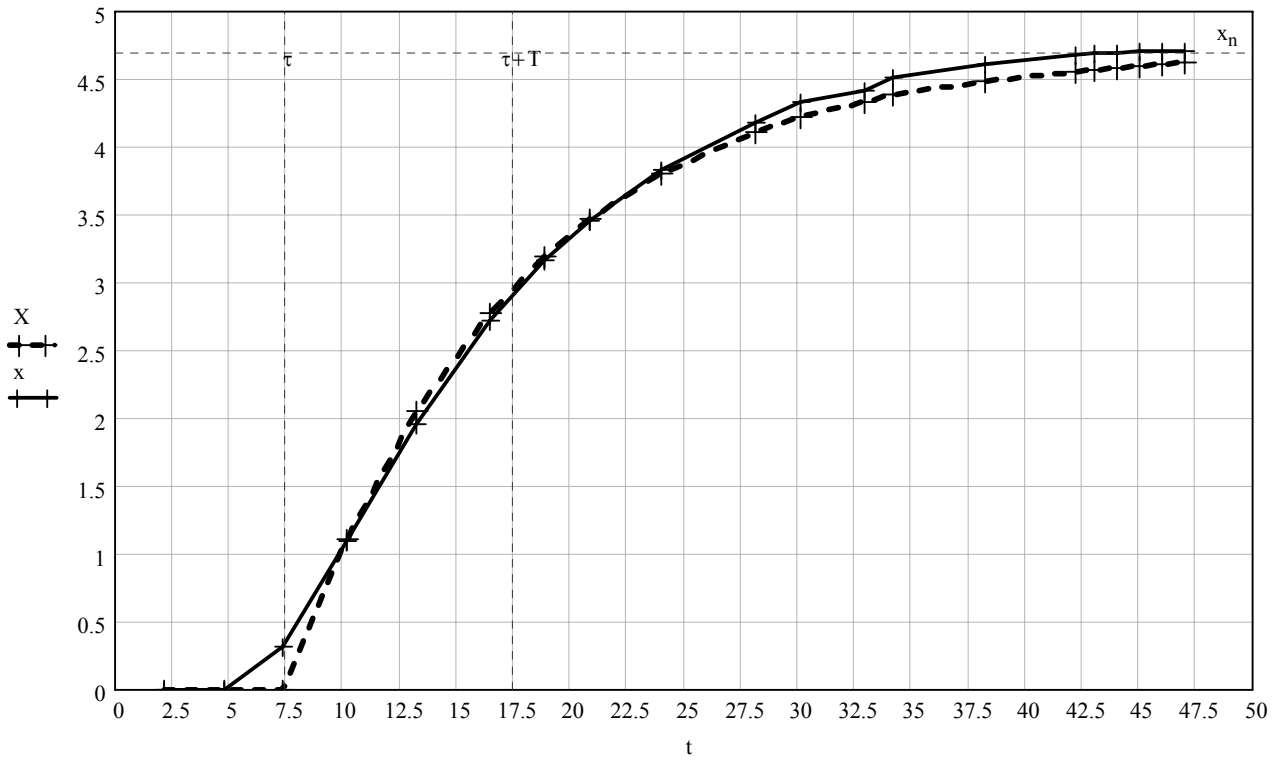
Проверка адекватности:

$$\delta := \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - X_i)}{x_i} \qquad \delta 1 := \left(\frac{100}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} \frac{(|x_i - X_i|)}{x_i}$$

$\delta 1 = 6.773$

$\delta = 5.838$

Сплошная линия - исходная кривая разгона, пунктирная линия - результат аппроксимации



Приложение 4. Пример вывода выражений РАФЧХ

Пусть:

$$W(p) = \frac{0.7}{1 + 6 \cdot p} \cdot \exp(-5 \cdot p)$$

после подстановки в W(p):

$$\mathrm{p} = -\mathrm{m} \cdot \omega + \mathrm{j} \cdot \omega$$

получаем:

$$\mathrm{W}(\mathrm{m}, \mathrm{j}\omega) = \frac{0.7 \cdot \exp(-5 \cdot (-\mathrm{m} \cdot \omega + \mathrm{j} \cdot \omega))}{1 + 6 \cdot (-\mathrm{m} \cdot \omega + \mathrm{j} \cdot \omega)}.$$

Представим знаменатель этого выражения в показательном виде:

$$\mathrm{A}_{\mathrm{ЗН}} \cdot \exp(\mathrm{j} \cdot \mathrm{F}_{\mathrm{ЗН}})$$

где

$$\mathrm{A}_{\mathrm{ЗН}} = \sqrt{\mathrm{Re}_{\mathrm{ЗН}}^2 + \mathrm{Im}_{\mathrm{ЗН}}^2} = \sqrt{(1 - 6 \cdot \mathrm{m} \cdot \omega)^2 + 36 \cdot \omega^2}$$ и

$$\mathrm{F}_{\mathrm{ЗН}} = \mathrm{arctg}\left(\frac{6 \cdot \omega}{(1 - 6 \cdot \mathrm{m} \cdot \omega)}\right)$$

Очевидно, что

$$\exp(5 \cdot \mathrm{m} \cdot \omega - 5 \cdot \mathrm{j} \cdot \omega) = \exp(5 \cdot \mathrm{m} \cdot \omega) \cdot \exp(-\mathrm{j} \cdot \omega)$$

тогда подставляя найденные выражения в W(p), с учетом того, что m=0.3 получим :

$$\mathrm{W}(\mathrm{p}) = \frac{0.7 \cdot \exp(5 \cdot \mathrm{m} \cdot \omega)}{\sqrt{(1 - 1.8 \cdot \omega)^2 + 36 \cdot \omega^2}} \cdot \exp\left(-5 \cdot \omega - \mathrm{arctg}\left(\frac{6 \cdot \omega}{1 - 1.8 \cdot \omega}\right)\right)$$

Таким образом, модуль (амплитуда) и фаза объекта соответственно равны:

$$A(\omega) = \frac{0.7 \cdot \exp(5 \cdot m \cdot \omega)}{\sqrt{(1 - 1.8 \cdot \omega)^2 + 36 \cdot \omega^2}}, ..$$

$$...F(\omega) = -5 \cdot \omega - arctg\left(\frac{6 \cdot \omega}{1 - 1.8 \cdot \omega}\right)$$

Приложение 5. Пример расчета настроек методом РАФХ

ПРИМЕР РАСЧЕТА НАСТРОЕК ПИ РЕГУЛЯТОРА МЕТОДОМ РАФХ

$$W(p) := \frac{0.7 \cdot \exp(-5 \cdot p)}{(1 + 6 \cdot p)} \qquad m := 0.3 \qquad p(\omega) := -m \cdot \omega + \omega \cdot i \qquad \omega := 0, 0.025 \;..\; .4$$

$$R(\omega) := \mathrm{Re}(W(p(\omega))) \qquad I(\omega) := \mathrm{Im}(W(p(\omega))) \qquad A(\omega) := \sqrt{I(\omega)^2 + R(\omega)^2}$$

$$F(\omega) := \mathrm{if}(\arg(W(p(\omega))) > 0, \arg(W(p(\omega))) - 2 \cdot \pi, \arg(W(p(\omega))))$$

$$\omega\omega := 0.3 \qquad \omega 2 := \mathrm{root}(F(\omega\omega) + 3.14, \omega\omega) \qquad \omega 2 = 0.3489$$

$$\omega 1 := \mathrm{root}(F(\omega\omega) + 1.22, \omega\omega) \qquad \omega 1 = 0.1082$$

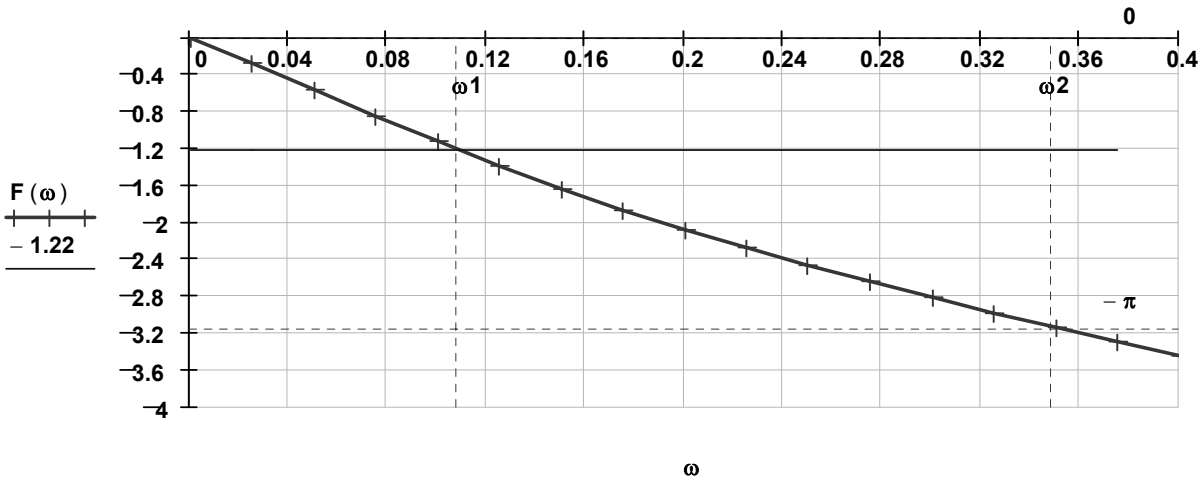


Рис. 2а. График расширенной ФЧХ объекта

$$N := 20 \qquad \Delta\omega := \omega 1 + \frac{(\omega 2 - \omega 1)}{N + 1} \qquad \gamma(\omega) := \omega \cdot (1 + m \cdot m) \qquad \omega := \omega 1, \Delta\omega \;..\; \omega 2$$

$$SI(\omega) := -\left(\sin(F(\omega)) \cdot \frac{\gamma(\omega)}{A(\omega)}\right) \qquad SP(\omega) := \frac{-(m \cdot \sin(F(\omega)) + \cos(F(\omega)))}{A(\omega)}$$

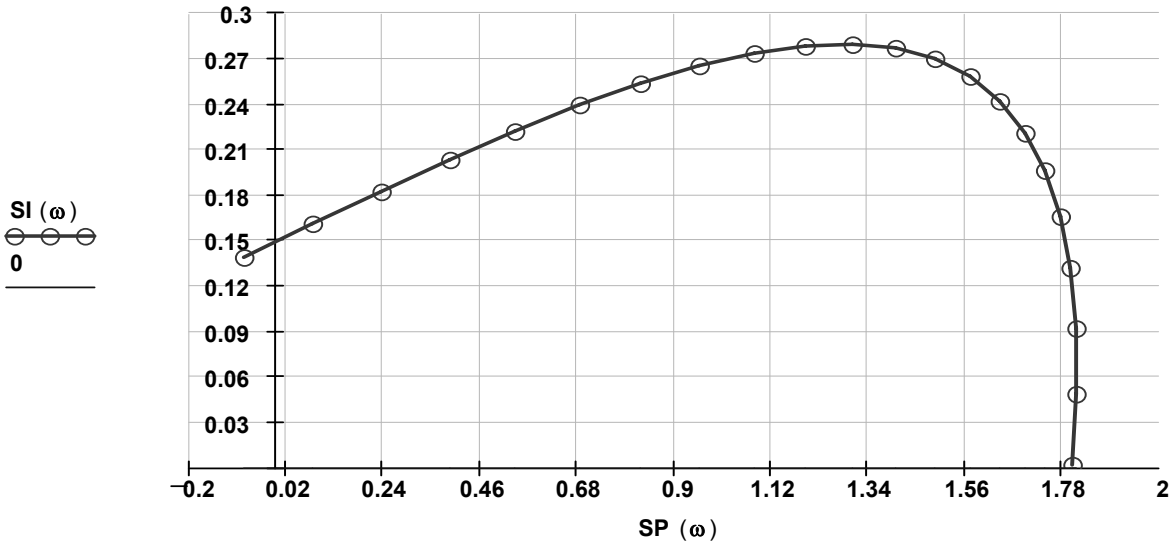


Рис .3а.Линия равной степени колебат-сти

Файл РАФЧХ.MCD Инков А.М.

Приложение 6. Пример использования алгоритма фильтрации

Экспоненциальная фильтрация (Инков А.М. 12.02.2004)

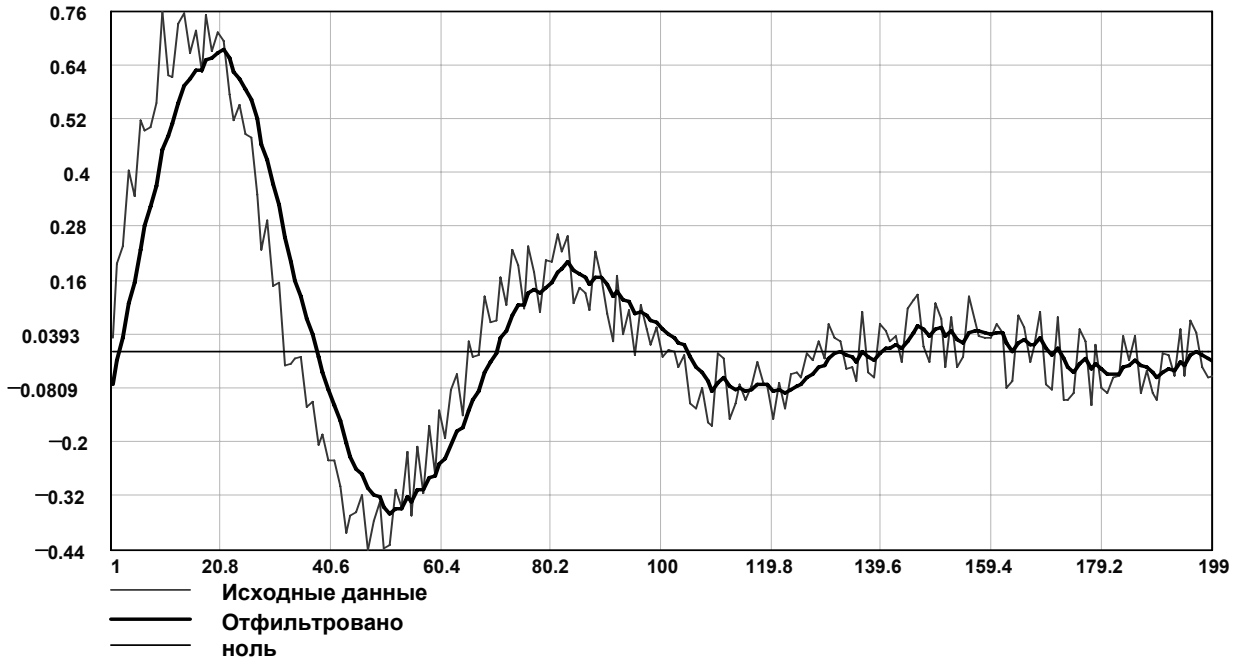
Ввод матрицы да нных: $A := READPRN("mvgavg.prn")$

Сортировк а по возрастанию X: $A := csort(A, 0)$

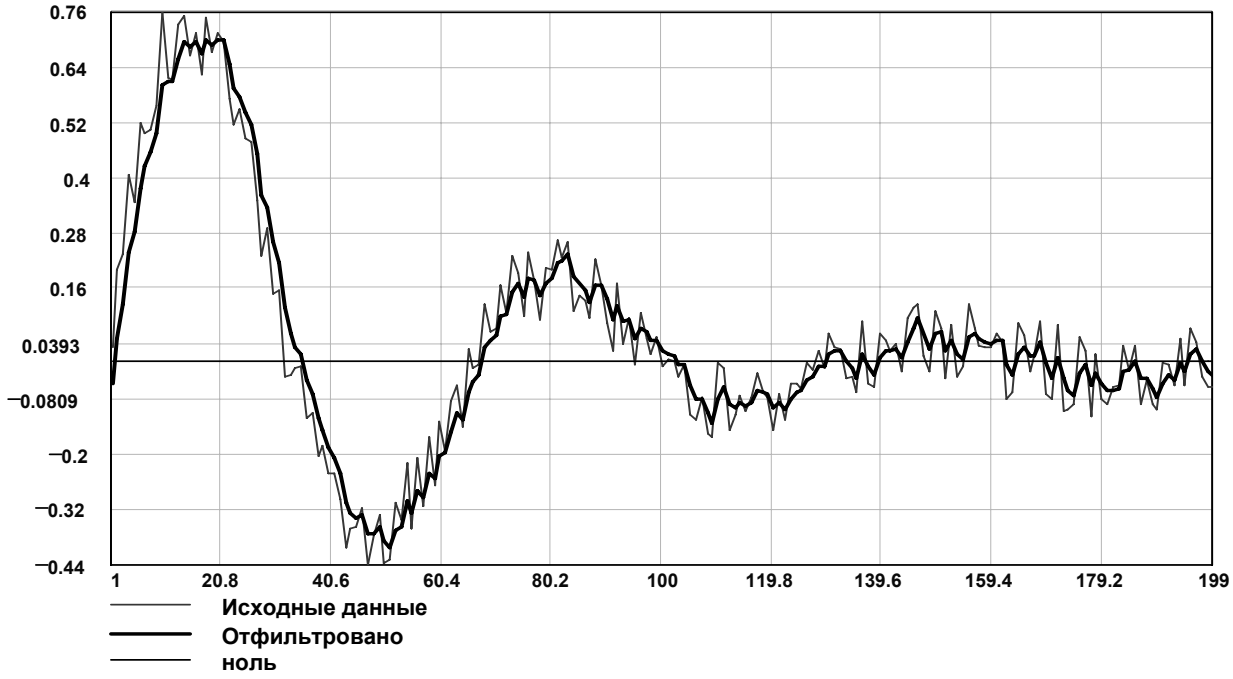
Выборка X и Y из матрицы A: $X := A^{\langle 0 \rangle}$ $Y := A^{\langle 1 \rangle}$

Число данных: $n := rows(A)$ $n = 200$ $i := 1 .. n - 1$ $Yф_0 := Y_0$

Ввод весового коэффициента (0 < $\gamma < 1$ **):** $\gamma := .2$ $Yф_i := \gamma \cdot Y_i + (1 - \gamma) \cdot Yф_{i-1}$



Ввод весового коэффициента (0 < $\gamma < 1$ **):** $\gamma := .4$ $Yф_i := \gamma \cdot Y_i + (1 - \gamma) \cdot Yф_{i-1}$



Приложение 7. Структура лабораторного практикума по дисциплине

Объектом автоматизации в лабораторном практикуме является кожухотрубный теплообменник. Цель автоматизации – поддержание заданной температуры подогреваемой воды. Упрощенная схема объекта показана на рисунке 1, где обозначены:
U - управляющее воздействие (вход) - расход пара;
X – регулируемый параметр (выход) – температура горячей воды;
X1 – промежуточный (вспомогательный) режимный параметр -расход пара;
V – возмущение – расход холодной воды;

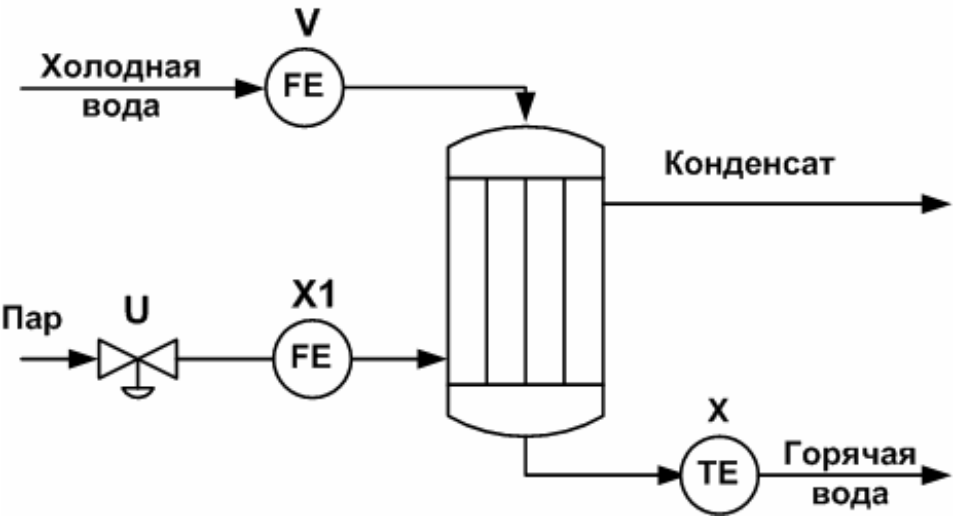


Рис. 1. Объект автоматизации.

Задачей лабораторного практикума по дисциплине является расчет настроек:

1. одноконтурной АСР (см. рис. 2), см. методические указания к лабораторным работам №1, №2, №3 и №4, программы **ALAB5** и **LD049**;
2. каскадной (см. рис. 3), см. методические указания к лабораторным работам №1 и №5; программы **Kask_ASR** и **LD049**;
3. комбинированной АСР (см. рис. 4) , см. методические указания к лабораторным работам №1 и №6; программы **Kombinir** и **LD049**.

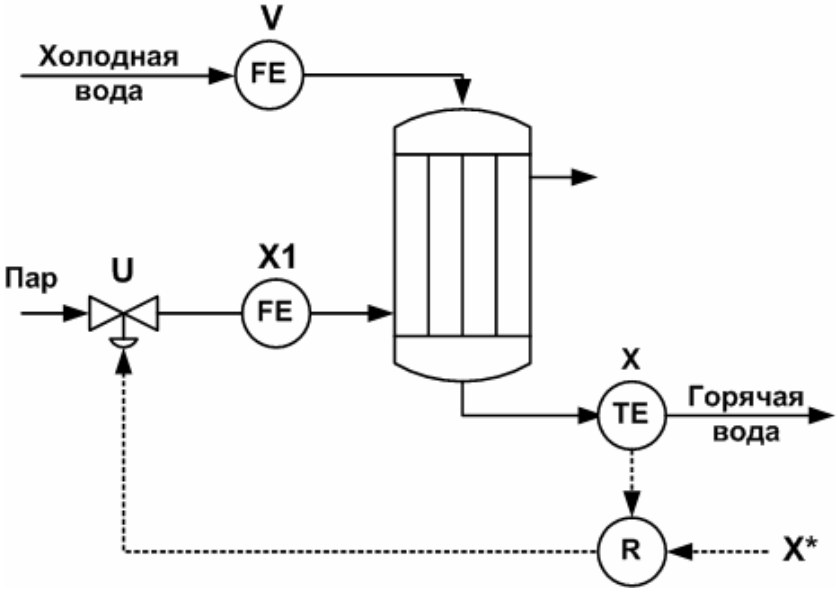


Рис. 2. Одноконтурная АСР теплообменника. X^* - задание (уставка) для главного регулятора, заданное значение выхода.

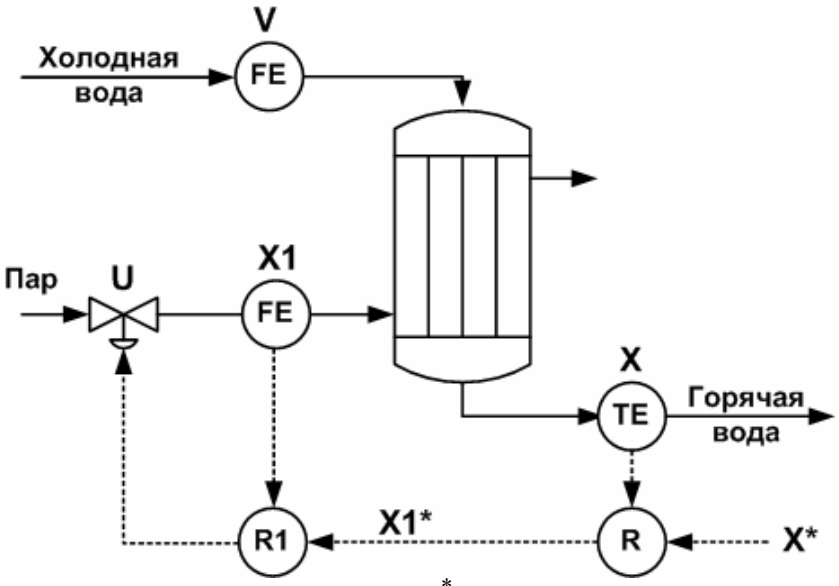


Рис. 3. Каскадная АСР теплообменника. X1* - задание для вспомогательного регулятора R1.

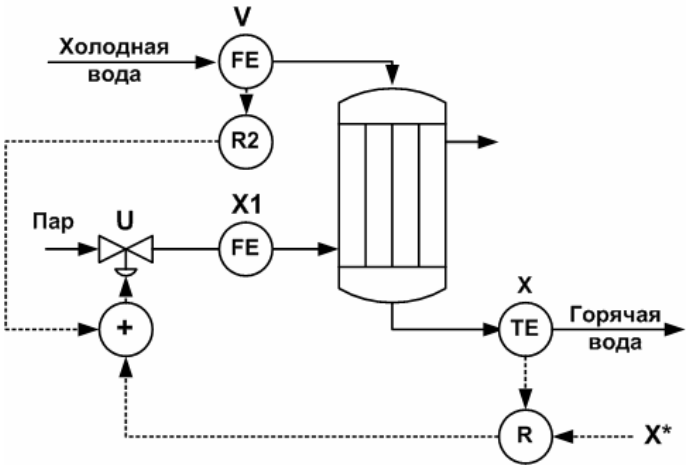


Рис. 3. Комбинированная АСР теплообменника. Выход главного регулятора R и компенсатора R2 после суммирования подаются на регулирующий орган.

Методика расчета настроек приведена в методических указаниях к лабораторному практикуму.

Предварительно с использованием программы **LAB5** требуется определить математические модели объекта автоматизации по следующим каналам:

Канал	Вход	Выход	Передаточная функция	Метод определения параметров передаточной функции объекта	Используются для расчета настроек
1	**U**	**X**	$W(p)=\frac{C}{1+T\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau)$	Графический	Одноконтурной, каскадной и комбинированной АСР
2	**U**	**X1**	$W1(p)=\frac{C1}{1+T1\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau1)$	Графический	Каскадной АСР
3	**V**	**X**	$W2(p)=\frac{C2}{1+T2\cdot p}\cdot\exp(-p\cdot\tau2)$	Графический	Комбинированной АСР

Методика определения параметров передаточной функции объекта и проверки адекватности приведены в конспекте лекций.

Общий порядок выполнения работ:

1. запускаем программу **LAB5**, снимаем кривые разгона по каждому из трех каналов;
2. определяем коэффициенты передаточных функций объекта W(p), W1(p), W2(p);
3. проверяем адекватность полученных математических моделей;
4. определяем настройки П, ПИ и ПИД регуляторов одноконтурной АСР методом Циглера-Никольса (экспериментальный, используем программу **ALAB5**);
5. рассчитываем и строим графики переходных процессов в замкнутой одноконтурной АСР (используем программы **ALAB5** или **LD049**);
6. определяем настройки П, ПИ и ПИД регуляторов одноконтурной АСР методом Циглера-Никольса (аналитический, ручной расчет);
7. рассчитываем и строим графики переходных процессов в замкнутой одноконтурной АСР(используем программы **ALAB5** или **LD049**);
8. определяем настройки П, ПИ и ПИД регуляторов одноконтурной АСР методом расширенных АФХ (используем программу ALAB5 или LD049);
9. рассчитываем и строим графики переходных процессов в замкнутой одноконтурной АСР (используем программы **ALAB5** или **LD049**);
10. определяем настройки каскадной АСР (используем программу **Kask_ASR**);
11. рассчитываем и строим графики переходных процессов в замкнутой каскадной АСР (используем программу **LD049**);
12. определяем настройки комбинированной АСР (используем программу **Kombinir**).
13. рассчитываем и строим графики переходных процессов в замкнутой комбинированной АСР (используем программу **LD049**);
14. анализируем полученные графики переходных процессов и делаем вывод о сравнительном качестве переходных процессов.

Инков А.М., к.т.н., доцент .26 сентября 2007 г. Файл Конспект-АСУТП.DOC Размер файла 4850176