ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

ГОУ ВПО КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра АПП и АСУ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Методические указания по дисциплине «Автоматизация пищевых производств» для студентов, обучающихся по специальности 220301 «Автоматизация пищевых процессов и производств», всех форм обучения

Кемерово 2008

Составители: А.В. Чупин, доцент, канд. техн. наук; С.Г. Пачкин, доцент, канд. техн. наук,

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры АПП и АСУ Протокол № от

> Рекомендовано методической комиссией механического факультета Протокол №____ от _____

Представлен комплекс лабораторных работ по дисциплине «Автоматизация пищевых производств», рекомендуемая литература.

Лабораторная работа №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДОВ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ»

Составил: к.т.н., доцент А.В. Чупин

введение

Позиционные системы автоматического регулирования нашли широкое распространение в отечественной и зарубежной практике ввиду простоты конструкции регуляторов, их надежности, несложным методам их обслуживания и настройки, невысокой стоимости. В последние годы благодаря широкому внедрению в промышленные схемы автоматизации программируемых логических контроллеров (ПЛК) интерес к позиционным системам начал проявляться вновь. Это связано со следующими причинами:

 зачастую на объекте автоматизации уже установлены исполнительные устройства с двумя состояниями (отсечные клапаны, магнитные пускатели и т.д.) и для реализации системы автоматического регулирования (САР) достаточно использовать дискретные выходы и алгоритмы двухпозиционного регулирования, имеющиеся в контроллере;

2) использование дискретных выходов существенно увеличивает число контуров регулирования, реализуемых одним контроллером, что значительно уменьшает стоимость проекта автоматизации;

3) техническая реализация дискретных выходов ПЛК и системы в целом существенно проще, чем в аналоговых или импульсных САР.

Двухпозиционные системы автоматического регулирования имеют существенный недостаток – регулируемая переменная носит колебательный характер, т.е. для данной САР колебательный режим является нормальным режимом работы. Исходя из этого, на всем протяжении применения этих систем в промышленности предпринимались попытки улучшения качества регулирования путем уменьшения частоты и амплитуды колебаний регулируемой переменной. Амплитуда колебаний регулируемой переменной обычно ограничивается требованиями технологического регламента, а частота колебаний – сроком эксплуатации системы, т.к. дискретные контактные элементы САР рассчитаны на ограниченное число включений и выключений. Основным из способов улучшения был способ регулирования неполным притоком энергии или материала, поступающего в объект. Однако для объектов с большим временем запаздывания двухпозиционные САР даже при этом способе улучшения качества регулирования не использовались. С появлением ПЛК и бесконтактных дискретных элементов, появилось ряд методов, которые позволяют использовать двухпозиционные САР для регулирования технологических переменных в объектах с большим временем запаздывания. Однако в промышленной практике данные методы, используются очень редко. Это связано с рядом причин, одной из которых является то, что данным методам мало уделяется внимания в процессе обучения студентов специальности – автоматизация технологических процессов и производств. Исходя из этого, целью данной лабораторной работы является изучение и исследование усовершенствованных методов двухпозиционного регулирования путем имитационного моделирования их в среде пакета SIMULINK системы Matlab.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1 Методы повышения качества регулирования в двухпозиционных САР

Известен целый ряд методов, значительно повышающих качество процесса двухпозиционного регулирования [1, 3]. Однако большинство из них было разработано до появления микропроцессорной техники и реализовано различными способами в основном на электромеханических элементах. С развитием ПЛК задача внедрения усовершенствованных методов позиционного регулирования значительно облегчается. К сожалению, несмотря на эффективность и простоту реализации усовершенствованных методов позиционного регулирования, они отсутствуют в стандартных библиотеках ПЛК и SCADA-системах.

1.1 Прерывистое двухпозиционное регулирование

Одним из методов повышения качества регулирования в двухпозиционных САР является использование в них прерывистых двухпозиционных регуляторов. Структурная схема САР с данным регулятором приведена на рис. 1.

Управляющий генератор формирует импульсы прямоугольной формы, которые управляют работой прерывателя. Частота следования импульсов генератора определяет частоту прерывания выходного сигнала двухпозиционного регулятора.

Процесс прерывистого двухпозиционного регулирования характеризуется частыми включениями регулятора и снижением амплитуды колебаний (рис. 3). При уменьшении периода следования управляющих импульсов мы получим процесс, где средняя амплитуда колебаний регулируемой величины очень мала, но число включений значительно возрастает. Для сравнения показателей качества регулирования в обычной и усовершенствованных двухпозиционных САР использовались графики переходных процессов(рис. 2, 3, 5, 6, 8), полученные для одной и той же модели объекта управления.



Рис. 1. Структурная схема САР с двухпозиционным прерывистым регулятором ОУ – объект управления; ДР – обычный двухпозиционный регулятор; Пр – прерыватель; УГ – управляющий генератор



Рис. 2. Переходные процессы в обычной двухпозиционной САР



Рис. 3. Переходные процессы в двухпозиционной САР с прерывистым регулятором

1.2 Двухпозиционное статическое регулирование

Структурная схема САР с двухпозиционным статическим регулятором приведена на рис. 4. Она включает в себя кроме объекта управления и двухпозиционного регулятора апериодическое звено первого порядка.



Рис. 4. Структурная схема САР с двухпозиционным статическим регулятором

ОУ – объект управления; ДР – обычный двухпозиционный регулятор; АЗ – апериодическое звено первого порядка

Сигнал рассогласования в данной схеме определяется по выражению (1), а передаточная функция звена АЗ по выражению (2).

$$\varepsilon = y - y_{3\text{ZH}} + y_{\text{o.c.}} \tag{1}$$

$$W_{o.c.}(s) = \frac{k}{T \cdot S + 1}$$
(2)

Двухпозиционное статическое регулирование отличается более низким значением амплитуды колебаний регулируемой величины по сравнению с обычным двухпозиционным регулированием с малым числом включений регулирующего органа. Увеличение коэффициента обратной экспоненциальной связи приводит к резкому снижению амплитуды колебаний и, соответственно, к существенному увеличению общего количества включений рабочего органа за время эксперимента. В явном виде проявляются статические свойства такой системы (рис.6). Таким образом, изменяя значения параметров Т и k корректирующего звена, можно значительно уменьшать амплитуду колебаний. При этом увеличивается число включений регулятора. Методика расчета данных систем изложена в работе [5].



Рис. 5. Переходные процессы в САР с двухпозиционным статическим регулятором



Рис. 6. Переходные процессы САР с двухпозиционным статическим регулятором при увеличении коэффициента передачи и уменьшении постоянной времени звена АЗ

1.3 Двухпозиционное регулирование с дополнительным воздействием по первой производной

Структурная схема двухпозиционной САР с дополнительным воздействием по первой производной показана на рис. 7. Кроме элементов, входящих в обычную двухпозиционную систему, в нее входит реальное дифференцирующее звено.





Сигнал рассогласования в схеме (рис. 7) определяется по выражению (3), а передаточная функция реального дифференцирующего звена по выражению (4).

$$\varepsilon = y + y' - y_{3dH} \tag{3}$$

$$W_{PД3}(S) = \frac{k \cdot S}{T \cdot S + 1}$$
(4)

При использовании метода двухпозиционного регулирования с воздействием по первой производной амплитуда колебаний имеет небольшое значение, колебания симметричны относительно задания, при этом, не происходит значительного роста числа включений рабочего органа (рис. 8). Варьирование настроек дифференцирующего элемента в широких пределах не приводит к значительным изменениям качества процесса.

Следует отметить, что при использовании обычного двухпозиционного регулятора (рис. 2) не удается добиться уменьшения амплитуды колебаний до уровня, показанного на рис.8, из-за наличия запаздывания в объекте регулирования.



Рис. 8. Переходные процессы в двухпозиционной САР с дополнительным воздействием по первой производной

2 Исследование двухпозиционных САР

Поиск оптимальных настроек нелинейных систем управления сложной структуры с учетом требований к качеству регулирования, требует проведения громоздких аналитических расчетов, в процессе которых неизбежны многочисленные ошибки. Поэтому на практике при решении сложных задач синтеза данных систем рекомендуется использовать имитационное моделирование на основе интерактивного взаимодействия системы «человек-компьютер» [9].

При этом моделировании компьютер выполняет сложные вычислительные задачи, представляя результаты расчетов в

удобной для человека форме, а человек проводит анализ результатов, меняет ход расчетов, задает новые исходные данные, меняет структуру системы, подключает к решению задачи другие программы. Для имитационного моделирования усовершенствованных двухпозиционных систем автоматического регулирования рекомендуется использовать пакет Simulink системы Matlab.

2.1 Создание модели двухпозиционной САР

Исследование двухпозиционной САР выполняется на модели системы, которая включает в себя:

- объект регулирования, представленный последовательным соединением звена запаздывания (Transport Delay) и апериодического звена первого порядка (Transfer Fcn);
- двухпозиционный регулятор (Relay);
- сумматоры и набор вспомогательных элементов (виртуальные осциллографы (Scope), блоки нанесения возмущений на систему (constant или step)).

Структурная схема модели двухпозиционной САР представлена на рис. 9.



Рис. 9. Структурная схема модели обычной двухпозиционной САР

Построение модели обычной двухпозиционной САР выполняется в следующей последовательности.

1) Запустить систему Matlab двойным щелчком левой клавиши мыши по ярлычку «Matlab». В появившемся окне сис-

темы Matlab найти панель инструментов основного окна, показанного на рис. 13 и одинарным щелчком левой клавиши мыши по кнопке «Simulink» э открыть окно браузера библиотек пакета. Одинарным щелчком левой клавиши мыши по пиктограмме открыть пустое окно модели Simulink.

2) Выделить раздел «Continuous» браузера библиотек, щелкнув по знаку «+» перед разделом.

3) «Перетащить» в окно формирования модели блоки «Transfer Fcn» и «Transport Delay».

4) Выделить раздел «Sinks» браузера библиотек, щелкнув по знаку «+» перед разделом.

5) «Перетащить» в окно формирования модели 2 блока «Scope».

6) Выделить раздел «Math Operation» браузера библиотек, щелкнув по знаку «+» перед разделом.

7) «Перетащить» в окно формирования модели 2 блока «Sum».

8) Выделить раздел «Sours» браузера библиотек, щелкнув по знаку «+» перед разделом.

9) «Перетащить» в окно формирования модели 2 блока Constant».

10) Используя рекомендации п. 6 раздела 2 методического указания, соединить все блоки в соответствии с рис. 9.

2.2 Исследование двухпозиционной САР

1) Установить в модели объекта регулирования следующие значения параметров: коэффициент передачи – 4, постоянная времени – 10, время запаздывания – 2.

2) Установить следующие параметры регулятора: зона неоднозначности (Switch on point – 2, Switch off point – -2), уровень выходного сигнала (Output when on – 2, Output when off – -2).

3) В блоках «Constant» установить ноль.

4) Запустить процесс моделирования, используя кнопки «Simulation» и «Start Simulation» окна модели.

5) По графику переходного процесса в двухпозиционной

САР, показанного на экране виртуального осциллографа, определить показатели качества регулирования (амплитуду и частоту колебаний).

6) Установить в регуляторе зону неоднозначности: 1, -1.

7) Выполнить пункты 4 и 5.

8) Установить в регуляторе уровень выходного сигнала: 4, -4.

9) Выполнить пункты 4 и 5.

10) Установить в регуляторе уровень выходного сигнала: 2, -2 и увеличив время запаздывания в блоке «Transport Delay» до 4 секунд выполнить пункты 4 и 5.

11) Увеличить время запаздывания в блоке «Transport Delay» до 6 секунд и выполнить пункты 4 и 5.

12) Установить время запаздывания в блоке «Transport Delay» равное 2, в блоке «Constant» установить возмущение на входе объекта управления равное 1, выполнить пункты 4 и 5.

13) Установить в блоке «Constant» возмущение на входе объекта управления равное 3 и выполнить пункты 4 и 5.

14) Установить в блоке «Constant1» заданное значение регулируемой переменной равное единице, а блоке «Constant» ноль и выполнить пункты 4 и 5.

15) Установить в блоке «Constant1» заданное значение регулируемой переменной равное 3 и выполнить пункты 4 и 5.

16) Значения параметров настройки и полученные результаты исследования (показатели качества) занести в табл. 1. Сформулировать выводы по результатам исследования (по влиянию параметров системы на показатели качества регулирования).

Таблица 1

№	Параметры ОУ			Параметры регулятора				Pont	204	Качество	
	К	Т	τ	Зн +	Зн -	Bc +	Bc -	Б03М.	Эад.	Амп.	Част.

Результаты исследования двухпозиционной САР

2.3 Исследование двухпозиционной прерывистой САР

Используя рекомендации раздела 3.1, создать модель двухпозиционной прерывистой САР, структурная схема которой показана на рис. 10.



Рис. 10. Структурная схема модели двухпозиционной прерывистой САР

В двухпозиционной прерывистой САР выходной сигнал регулятора подается на прерыватель, который через определенный промежуток времени размыкает цепь обратной связи. При этом, данный промежуток времени, как правило, выбирается меньше периода колебаний регулируемой переменной в обычной двухпозиционной САР. В модели двухпозиционной прерывистой САР для реализации прерывания сигнала взяты два блока – управляемый переключатель «Switch» и источник дискретных импульсов «Pulse Generator». Остальные блоки аналогичны блокам модели, приведенной на рис. 16. Блок «Pulse Generator» находится в разделе «Sources» браузера библиотеки, а блок «Switch» в разделе «Nonlinear»

При исследовании двухпозиционной прерывистой САР параметры модели объекта регулирования и регулятора взять равными соответствующим параметрам двухпозиционной САР ($\tau = 2, T = 10, K = 4, 3H = 2, -2, Bc = 2, -2$). Перед началом моделирования необходимо задать параметры настройки генератора«Pulse Generator», который формирует однополярные

прямоугольные импульсы. Данный блок имеет пять параметров настройки: амплитуду (Ам = 2), период (Тп = 10), остальные параметры (ширину импульсов, фазовую задержку, эталонное время) оставить без изменения. В управляемом переключателе «Switch» единственным параметром является порог управляющего сигнала (2). При исследовании двухпозиционной прерывистой САР в блоке «Pulse Generator» необходимо изменять только период следования импульсов «Period». Остальные параметры оставить без изменения.

Последовательность проведения исследований прерывистой двухпозиционной САР:

1) Установить в блоках модели указанные выше параметры, период появления импульсов на выходе блока «Pulse Generator» установить равным 10 сек.

2) Выполнить пункты 4 и 5, указанные в подразделе 3.2.

3) Изменить период появления импульсов на выходе блока «Pulse Generator» в пределах от 10 до 2 сек. с шагом в 2 сек., выполняя после каждого изменения пункт 2.

4) Установить время запаздывания объекта в блоке «Transport Delay» равным 6 с и повторить пункт 3.

5) Результаты исследования занести в таблицу с параметрами настройки системы и показателями качества регулирования (амплитудой и периодом колебаний регулируемой переменной).

6) Сравнить полученные показатели качества регулирования с результатами, полученными в двухпозиционной САР и сформулировать выводы.

2.4 Исследование двухпозиционной статической САР

Используя рекомендации раздела 3.1, создать модель двухпозиционной статической САР, структурная схема которой показана на рис. 11.



Рис. 11. Структурная схема модели двухпозиционной статической САР

В структуру данной САР входит апериодическое звено первого порядка, которое включено в цепь отрицательной обратной связи, которой охвачен двухпозиционный регулятор. При исследовании работы двухпозиционной статической САР параметры модели объекта регулирования и регулятора взять равными значениям параметров обычной двухпозиционной САР ($\tau = 2, T = 10, K = 4, 3H = 2, -2, Bc = 2, -2$).

Последовательность проведения исследований двухпозиционной статической САР:

1) Установить в блоках модели указанные выше параметры, а в звене отрицательной обратной связи (блок «Transfer Fcn1») коэффициент передачи и постоянную времени оставить без изменения (K=1, T=1).

2) Выполнить пункты 4 и 5, указанные в подразделе 2.2.

3) В звене отрицательной обратной связи, блок «Transfer Fcn1», коэффициент передачи установить равным 2 и выполнить пункт 2.

4) В звене отрицательной обратной связи, блок «Transfer Fcn1», коэффициент передачи установить равным 4 и выполнить пункт 2.

5) В звене отрицательной обратной связи, блок «Transfer Fcn1», коэффициент передачи установить равным 1, а постоянную времени – 2 и выполнить пункт 2.

6) В звене отрицательной обратной связи, блок «Transfer Fcn1», установить постоянную времени равную 0,5 и выполнить пункт 2.

7) Результаты исследования занести в таблицу с параметрами настройки системы и показателями качества регулирования (амплитудой и периодом колебаний регулируемой переменной).

8) Сравнить полученные показатели качества регулирования с результатами, полученными в двухпозиционной САР и сформулировать выводы.

контрольные вопросы

1) Структурная схема двухпозиционной САР и ее модификаций.

2) Статическая характеристика двухпозиционного регулятора и параметры его настройки.

3) Показатели качества автоколебательного режима работы САР и влияние на них параметров настройки регулятора.

4) Способы улучшения показателей качества регулирования.

5) Структура модели объекта управления, его передаточная функция и параметры.

6) Структурная схема двухпозиционной прерывистой САР.

7) Показать по результатам исследования двухпозиционной прерывистой САР, как период следования импульсов (период прерывания сигнала регулятора) влияет на показатели качества регулирования.

8) Структурная схема двухпозиционной статической САР.

9) Показать по результатам исследования двухпозиционной статической САР, как постоянная времени апериодического звена первого порядка влияет на показатели качества регулирования.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- структурные схемы моделей двухпозиционных САР;
- результаты исследования САР в виде таблиц;
- выводы по полученным результатам исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / Ф.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов; Под ред. А.С. Клюева. – 2е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
- 2. *Кампе-Нелш А.А.* Автоматическое двухпозиционное регулирование. М.: Наука, 1967.
- 3. *Клюев А.С.* Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. М.: Энергия, 1967.
- 4. Бодров В.И., Фролов С.В., Печерский А.Е. Синтез многоконтурных систем автоматического регулирования // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т.6., №3.
- 5. Матвейкин В.Г., Фролов С.В., Елизаров И.А. Расчет двухпозиционных статических систем регулирования // Приборы и системы управления. - 1997. - №6.
- 6. Фролов С.В., Елизаров И.А., Лоскутов С.А. Лабораторный комплекс для исследования позиционных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. №4.
- 7. Фролов С.В., Елизаров И.А., Лоскутов С.А. Сравнительный анализ систем двухпозиционного регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2005. №9.
- 8. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 528 с.
- Дьяконов В. МАТLAВ. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

Лабораторная работа №2 «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ В ОДНОКОНТУРНОЙ САР»

Составил: к.т.н., доц. С.Г.Пачкин, к.т.н., доц. А.В. Чупин

введение

В процессе эксплуатации систем автоматизированного регулирования периодически приходится проводить настройки регулятора. По ряду причин теоретические методы расчета параметров настройки регулятора, которые применяются при синтезе САР, используются сравнительно редко. Чаще находят применение экспериментальные методы, которые просты и позволяют достаточно быстро определить значения параметров настройки регулятора, при которых достигается желаемый переходный процесс в системе. Одним из таких методов является метод, при котором критическое значения коэффициента передачи регулятора и критическое значение частоты колебаний регулируемой переменной находятся экспериментальным путем, а оптимальные значения параметров регулятора определяются по формулам метода незатухающих колебаний.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В результате выполнения лабораторной работы студент должен:

1) Изучить структуру автоматической системы регулирования.

2) Освоить экспериментальный метод определения параметров настройки регулятора, базирующийся на методе незатухающих колебаний.

3) Исследовать влияние параметров настройки ПИДрегулятора на качественные показатели процесса регулирования.

4) Исследовать влияния параметров объекта на качественные показатели переходного процесса.

1 Структура и классификация систем регулирования

Системы регулирования предназначены для поддержания требуемого значения переменных процесса. При этом регулированием считается целенаправленное воздействие на объект для достижения требуемого задания. Типы воздействия и требования могут быть очень различны, но прежде чем их классифицировать, рассмотрим в общих чертах, в чём же именно заключается регулирование:

 вначале происходит наблюдение за объектом и оценка его состояния по технологическим переменным, которые принято считать выходными;

– затем фиксируется факт отклонения какой-либо переменной от требуемого значения;

 после этого определяется тип воздействия на какой либо вход объекта, которое может вернуть отклонившуюся переменную до требуемого значения;

определяется величина входного воздействия;

 и только потом производится непосредственно воздействие на объект.

То есть, для регулирования объекта необходимо, что бы объект был <u>наблюдаем</u>, и что бы существовал <u>способ воздействия</u> на этот объект. Технически это решается путём установки на выходе объекта измерительного устройства (*ИУ*), а на входе объекта – регулирующего органа (*PO*). Схематически это показано на рис. 1. В автоматизированных и автоматических системах для изменения положения регулирующего органа используется исполнительный механизм (*ИМ*) и устройства управления им, находящиеся на пунктах управления объектом.

Регулируемая переменная y(t) является выходной величиной объекта и зависит от двух типов входных воздействий: управляющего u(t) и возмущающих $\overline{Z(t)}$. Управляющее воздействие формируется регулирующим органом (**PO**) на который подаётся управляющий сигнал от исполнительного механизма

X_{ИМ}(*t*). Возмущающие воздействие оказывает влияние непосредственно на объект регулирования.



Рис. 1. Структурная схема регулируемого объекта *O* - объект управления; *PO* - регулирующий орган; *ИV* - измерительное устройство; *ИМ* - исполнительный механизм; *y*(*t*) - регулируемая переменная; *u*(*t*) - управляющее воздействие; *x*(*t*) - входная переменная (материальный или энергетический поток, поступающий в объект регулирования и изменяемый *PO*); *X*_{*um*}(*t*) - управляющий сигнал от исполнительного механизма.

Если производить наблюдения, определять воздействие и изменять положение регулирующего органа будет человек, то такое регулирование является ручным. При этом человек может находится непосредственно около объекта, тогда регулирование называется *местным ручным*, либо в диспетчерском пункте (ДП), на расстоянии, тогда регулирование называется *дистанционным ручным*.

Если изменение положения регулирующего органа будут производиться без участия человека, то система регулирования будет автоматической. В такой системе управляющее воздействие будет подаваться от какого-либо управляющего устройства (*УУ*). Упрощённо структура системы автоматического регулирования (САР) показана на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема САР y'(t) - измеренное значение регулируемой переменной

САР обладают большим разнообразием. При этом классификация САР может производиться по самым различным принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, вид применяемой энергии, используемые алгоритмы управления и функционирования и т.д.

Рассмотрим классификацию систем регулирования по наиболее важным для теории управления признакам, которые характеризуют алгоритм функционирования и алгоритм управления системы. Этими признаками являются:

1) конфигурация цепи воздействий;

 цель управления и связанный с ней характер изменения задающего воздействия (и соответственно управляемой величины);

3) способ выработки управляющих воздействий.

В зависимости от конфигурации цепи воздействий, различают три вида систем регулирования: а) с разомкнутой цепью воздействий (разомкнутая САР); б) с замкнутой цепью (замкнутая САР) и в) комбинированные.

В <u>разомкнутой</u> системе автоматического регулирования входными воздействиями управляющего устройства являются только внешние (задающие и возмущающие) воздействия. Разомкнутыми они называются потому, что в них отсутствует связь между выходом объекта и входом управляющего устройства. Возможны варианты, в которых *УУ* измеряет только задающее воздействие, либо задающее и возмущающее воздействие. В первом варианте принято говорить, что управление осуществляется *по задающему* воздействию, во втором - *по возмущающему*.

Структурная схема разомкнутой САР *по задающему* воздействию показана на рис. 3. Регулирующее устройство (*PV*) в данной системе в зависимости от требуемого задания формирует сигнал для исполнительного механизма. Такой сигнал принято называть управляющим, обозначим его как u'(t).

$$u'(t) = f(y'_{3a\partial}(t)) \tag{1}$$

где *у*'_{зад} - задающий сигнал;

u'(t) - управляющий сигнал.



Рис. 3. Структурная схема разомкнутой САР по задающему воздействию

Измерительное устройство необходимо только для наблюдения за величиной y(t) и не участвует в процессе регулирования. Пунктиром на рисунке 3 выделено устройство управления (УУ) с входным задающим сигналом y'_{3ad} . Данный сигнал имеет вид энергии, используемой регулирующим устройством и пропорционален требуемому значению регулируемой переменной. Управляющий сигнал u'(t) имеет вид энергии, используемой исполнительным механизмом и пропорционален требуемому значению положения регулирующего органа. Разомкнутая САР по задающему работает с достаточной эффективностью только в том случае, когда влияние возмущений на регулируемую переменную невелико и если все элементы разомкнутой цепи обладают достаточно стабильными характеристиками.

Если же на регулируемую переменную оказывает существенное влияние какое-либо измеряемое возмущающее воздействие, то используется разомкнутая САР *по возмущающему воздействию*. В такой системе (рис. 4) измеренное значение возмущающего воздействия подаётся непосредственно на регулирующее устройство.



Рис. 4. Структурная схема разомкнутой САР по возмущению

Таким образом, выходной управляющий сигнал u'(t) зависит и от возмущающего воздействия и от задающего сигнала:

$$u'(t) = f(y'_{3a\partial}(t)) + f(z'_1(t))$$
(2)

где $z_1^{/}(t)$ - измеренное значение возмущающего воздействия

В САР с управлением по возмущающему воздействию управляющее воздействие u(t) формируется таким, чтобы скомпенсировать отклонение регулируемой переменной (выходной величины), вызванное измеряемым возмущением $z_1(t)$.

Преимуществом разомкнутых САР по возмущению является их быстродействие, так как они компенсируют влияние

возмущения ещё до того, как оно появится на выходе объекта. Но для повышения точности необходимо учитывать все возможные возмущения.

Практически большинство возмущений трудно измерить и преобразовать в нужный тип сигнала. Кроме того, измерение нескольких возмущений усложняет схему САУ. Поэтому на практике самостоятельно такие системы применяются редко.

В <u>замкнутой</u> системе автоматического регулирования (система с обратной связью) на вход управляющего устройства поступают два сигнала :

а) внешний (задающий) y'_{3ad} , как и в разомкнутых системах;

б) внутренний (контрольный), в качестве которого используется измеренное значение регулируемой переменной v'(t).

Для более детального рассмотрения из управляющего устройства *УУ* выделим отдельно регулирующее устройство *РУ*, а все вспомогательные средства автоматизации объединим в отдельную группу. Модернизированная таким образом структурная схема замкнутой САР представлена на рис. 5. Точки входа и выхода регулирующего устройства обозначим соответственно 1 и 2.



Рисунок 5 – Структурная схема замкнутой САР P - регулятор; $\mathcal{P}C$ - элемент сравнения; PB - ручное воздействие; Π переключатель режима (ручн. или автом.); $\varepsilon(t)$ - сигнал рассогласования.

Управляющий сигнал u'(t) в замкнутой САР формируется в зависимости от величины и знака отклонения истинного значения управляемой величины от заданного значения:

$$u'(t) = f(\varepsilon(t)) \tag{3}$$

где $\varepsilon(t) = y'(t) - y'_{3a\partial}$ - сигнал рассогласования (сигнал ошибки).

В регулирующее устройство (PY) помимо регулятора (P) и элемента сравнения ($\Im C$) включено ручное воздействие (PB) с переключателем (Π). $\Im C$ необходим для формирования сигнала рассогласования, подаваемого на регулятор. Включение ручного воздействия показывает каким образом можно переключаться из автоматического регулирования к ручному и обратно.

В замкнутой САР управляющее устройство стремится ликвидировать все отклонения регулируемой переменной y(t) от предписанного y_{3ad} независимо от причин, вызывающих эти отклонения, включая любые возмущения и внутренние помехи.

САУ такого типа представляют собой замкнутый контур, образованный О и УУ. Управляющее устройство создает обратную связь вокруг объекта, связывая его выход со входом (см. рисунок 2). Замкнутые САУ называют поэтому еще системами с обратной связью или системами, реализующими принцип управления по отклонению (САР по отклонению). Именно системы с обратной связью представляют основной тип САУ.

Так как в замкнутой системе, представленной на рисунке 5 реализуется один контур, то такую систему регулирования называют <u>одноконтурной.</u>

В <u>комбинированных</u> системах автоматического регулирования реализуется одновременно две цели, по заданию и по возмущению. Управляющий сигнал при этом формируется по следующей зависимости:

$$u'(t) = f(\varepsilon(t)) + f(z_1'(t))$$
(4)

Эффективность работы комбинированной САР всегда больше, чем порознь функционирующих замкнутой или разомкнутой систем.

В зависимости от характера изменения задающего воздействия системы регулирования делят на три класса: a) стабилизирующие; б) программные и в) следящие системы. <u>Стабилизирующая</u> система автоматического регулирования (система стабилизации) – это система, алгоритм функционирования которой содержит предписание поддерживать значение регулируемой переменной постоянным:

$$y'_{3a\partial}(t) = const \tag{5}$$

Системы стабилизации – самые распространённые в промышленной автоматике. Их применяют для стабилизации различных физических величин, характеризующих состояние технологических объектов.

<u>Программная</u> система автоматического регулирования содержит предписания изменять регулируемую переменную в соответствии с заранее заданной функцией времени:

$$v'_{3a\partial}(t) = f(t) \tag{6}$$

<u>Следящая</u> система автоматического регулирования предназначена для изменения регулируемой переменной в соответствии с изменениями другой величины:

$$y'_{3a\partial}(t) = f\left(y'_i(t)\right) \tag{7}$$

где $y_i^{/}(t)$ - измеренное значение какой-либо другой технологической переменной.

По виду сигналов, действующих в системе (в частности по виду управляющего сигнала u'(t)), системы регулирования делятся на: а) непрерывные и б) дискретные.

В <u>непрерывных</u> системах автоматического регулирования регулирующее устройство выдаёт равномерный, плавноизменяющийся сигнал. В качестве регулирующих устройств в таких системах выступают различные аналоговые регуляторы.

<u>Дискретные</u> системы автоматического регулирования подразделяются на:

- <u>импульсные</u> – примером такой системы является САР в которой исполнительный механизм реализован в виде реверсивного двигателя, способного только призакрывать или приоткрывать регулирующий орган;

- <u>релейные</u> – в которых в качестве регулятора выступает нелинейный элемент;

- <u>цифровые</u> – в который входной и выходной сигналы квантованы по времени и по уровню.

2 Типы и формы записи уравнений преобразования сигнала в регуляторах одноконтурных САР

Одноконтурные системы автоматического регулирования, структурная схема которого показана на рис. 5, широко применяется во всех отраслях промышленности. Основное назначение таких систем – обеспечение равенства измеренного значения регулируемой переменной y'(t) его заданному значению y'_{3ao} .

Чаще всего приходится стабилизировать значение какойлибо технологической переменной, при чём в современных диспетчерских системах широко применяется супервизорное изменение задание с пульта оператора с последующей стабилизацией регулируемой переменной с помощью САР, реализованной на базе микропроцессорного контроллера. На рис. 5 в нижней части выделены средства автоматизации, размещающиеся в диспетчерском пункте. При этом в качестве регулирующего устройства чаще всего выступает микропроцессорный контроллер, получающий сигнал y'(t) от измерительного устройства (UY) и подающий сигнал управления u'(t) на исполнительный механизм. В точках сопряжения 1 и 2' происходит аналогово-цифровое и цифро-аналоговое преобразование соответственно.

В верхней части рис. 5 помимо непосредственно объекта сгруппированы технические средства, позволяющие из какого либо аппарата реализовать управляемый объект. К ним относятся: - MY - измерительное устройство; - MM - исполнительный механизм; - PO - регулирующий орган (аналогично рисунку 1). Так как при идентификации объекта регулирования сигнал подаётся непосредственно на исполнительный механизм, а фиксируется измеренное значение регулируемой переменной y'(t), то в качестве передаточной функции объекта выступают характеристики всех, вышеуказанных элементов, находящихся между точками сопряжения 2 и 1.

В микропроцессорном контроллере при формировании управляющего сигнала u'(t) к непосредственному выходному сигналу регулятора $X_P(t)$ можно добавить дополнительное регулирующее воздействие $X_p^{\text{доп}}(t)$ и тогда управляющий сигнал равен:

$$u'(t) = X_p^{\text{AOII}}(t) - X_p(t)$$
(8)

Таким образом, можно перерисовать структурную схему САР в параметрической форме, показную на рис. 6.



Рис. 6. Параметрическая схема одноконтурной САР $W'_{u}(S)$ - передаточная функция объекта по каналу управления; $W_{p}(S)$ - передаточная функция регулятора

Преобразование сигнала рассогласования ($\varepsilon = y' - y'_{aad}$) в выходной сигнал регулятора осуществляется регулятором (*P*) по одному из типовых законов регулирования [2, с. 97-100]:

1) <u>По пропорциональному закону регулирования</u> (Пзакону) по уравнению

$$X_p(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \tag{9}$$

$$W_p(S) = K_p \tag{10}$$

2) <u>По пропорционально-интегральному</u> (ПИ-закону):

a) для регуляторов с независимой настройкой интегральной части по уравнению

$$X_p(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \int_0^t \varepsilon(t) \cdot dt$$
(11)

$$W_p(S) = K_p + \frac{1}{T_u \cdot S} \tag{12}$$

б) для регуляторов с зависимой настройкой интегральной части по уравнению

$$X_{p}(t) = K_{p} \cdot \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{u3}} \cdot \int_{0}^{t} \varepsilon(t) \cdot dt\right)$$
(13)

$$W_p(S) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{u3} \cdot S}\right) \tag{14}$$

3) <u>По пропорционально-интегрально-дифференциально-</u><u>му</u> (ПИД-закону):

a) для регуляторов с независимой настройкой интегральной и дифференциальной части по уравнению

$$X_{p}(t) = K_{p} \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_{u}} \cdot \int_{0}^{t} \varepsilon(t) \cdot dt + T_{\partial} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$
(15)

$$W_p(S) = K_p + \frac{1}{T_u \cdot S} + T_{\partial} \cdot S \tag{16}$$

б) для регуляторов с зависимой настройкой интегральной и дифференциальной части по уравнению

$$X_{p}(t) = K_{p} \cdot \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_{u3}} \cdot \int_{0}^{t} \varepsilon(t) \cdot dt + T_{np} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right) \quad (17)$$

$$W_p(S) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{u3} \cdot S} + T_{np} \cdot S\right)$$
(18)

где K_p - коэффициент передачи регулятора (вместо K_p в ряде регуляторов используется зона пропорциональности $\delta = 100 \, \%/K_p$);

 T_u - время интегрирования;

*Т*_{из} - время удвоения (изодрома);

- Т_∂ время дифференцирования;
- *T_{пр}* время предварения.

Одной из основных задач, которые приходится решать при синтезе САР при их настройке в процессе эксплуатации, является определение численных значений постоянных, входящих в уравнения (9)÷(18), которые называют параметрами настройки регулятора. При этом часто уравнение ПИД-регулятора записывается в виде:

$$X_{p}(t) = C_{1} \cdot \varepsilon(t) + C_{0} \cdot \int_{0}^{t} \varepsilon(t) \cdot dt + C_{2} \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$
(19)

где
$$C_1 = K_p$$
, $C_0 = \frac{K_p}{T_{u3}} = \frac{1}{T_u}$,
 $C_2 = K_p \cdot T_{np} = T_d$ (20)

Передаточная функция ПИД-регулятора при этом запишется как:

$$W_p(S) = C_1 + C_0 \cdot \frac{1}{S} + C_2 \cdot S$$
(21)

Данная форма записи удобна тем, что все составляющие уравнения регулятора настраиваются с помощью обычных коэффициентов. Это удобно при использовании в вычислительных системах, а так же при моделировании систем регулирования в различных интегрированных пакетах. В частности, такая форма записи используется в системе Simulink пакета MatLAB и в SCADA-системе TRACE MODE 6.0 (5.0).

Для П- и ПИ-регуляторов можно воспользоваться так же формулой (19), приравнивая нулю C_0 и C_2 для П-регулятора или только C_2 для ПИ-регулятора.

3 Показатели качества регулирования в одноконтурной САР

Как уже говорилось, одноконтурная система автоматического регулирования является САР по отклонению, то есть входным сигналом регулятора является отклонение (он же сигнал рассогласования). Следовательно действие системы начинается только тогда, когда возмущающее воздействие уже начало оказывать влияние на регулируемую переменную.

Рассмотрим последовательность возникновения сигналов в узлах замкнутой САР. Схематически данные узлы показаны на рис. 7.

За основу возьмём параметрическую схему, показанную на рис. 6, в которой помимо отмеченных узлов добавлена пере-

даточная функция объекта управления по возмущающему каналу $W_{Zi}(S)$.



Рис. 7. Схема прохождения сигналов в одноконтурной САР *W*_{Zi}(*S*) - передаточная функция объекта по каналу возмущения

Графически все сигналы представлены на рисунке 8, где на оси времени отмечены моменты возникновения сигналов во всех перечисленных узлах.



Рис. 8. Сигналы, возникающие в выделенных узлах замкнутой САР

По оси ординат все графики смещены таким образом, что бы начало их изменения находилось на оси времени.

Последовательность возникновения сигналов в выделенных узлах замкнутой САР:

 $1 - При возникновении возмущающего воздействия <math>\Delta z_i$, которым может быть какое-либо изменение технологической переменной, первоначально сигнал возникает в узле (1).

2 – Так как канал возмущения $W_{Zi}(S)$, располагаемый между узлами (1) и (2), обладает инерционными свойствами, то в узле (2) сигнал появится через время транспортного запаздывания τ_{Zi} . Данный сигнал $y_{Zi}(t)$ принято называть влиянием возмущающего воздействия на регулируемую переменную.

3 – Между узлами (2) и (3) располагается измерительное устройство UV (см. Рисунок 5), поэтому сигнал в узле (3) будет отставать и на время транспортного запаздывания этого измерительного устройства. Так как при идентификации объекта первичный преобразователь входит в общую передаточную функцию, то сигнал в узле (3) появится через время общего запаздывания объекта по каналу возмущения τ'_{Zi} и будет являться измеренным значением регулируемой переменной y'(t).

4 - B узле (4) сигнал появится <u>одновременно с сигналом в</u> <u>узле (3)</u>, так как они располагаются в микропроцессорном контроллере. В узле (4) будет фиксироваться сигнал рассогласования $\varepsilon(t)$.

5 – Сигнал в узле (5) появится после преобразования сигнала рассогласования $\varepsilon(t)$ в выходной сигнал регулятора $X_p(t)$ по одному из выражений (9÷18). При чём, так как в регуляторе почти всегда присутствует П-составляющая, а иногда и Д-составляющая, то данный сигнал (в узле (5)) появится <u>одновременно с сигналом в узле (4)</u>. Отставание может быть только на время цикла контроллера, но так как оно несравнимо мало по сравнению с временем запаздывания, тог им можно пренебречь.

6 – Сигнал в узле (6), являющийся управляющим сигналом для исполнительного механизма u'(t), будет равен разности дополнительного сигнала регулирования $X_p^{\text{лоп}}(t)$ и сигнал регулятора $X_p(t)$. Появится он одновременно с сигналом (5), так как данное действие производится единой программой в микропроцессорном контроллере. Если дополнительный сигнал регулирования отсутствует, то управляющий сигнал противоположен сигналу регулятора.

7 – Между узлами (6) и (7) располагается исполнительный механизм UM (см. Рисунок 5), поэтому сигнал в узле (7) будет отставать на время транспортного запаздывания этого исполнительного механизма и будет являться управляющим воздействием u(t).

8 – Так как канал управления $W_u(S)$, располагаемый между узлами (7) и (8), обладает инерционными свойствами, то в узле (8) сигнал появится через время транспортного запаздывания τ_U . Данный сигнал $y_U(t)$ принято называть влиянием регулирующего воздействия на регулируемую переменную.

9 – Как только начнётся влияние регулирующего воздействия на регулируемую переменную, график измеренного значения регулируемой переменной y'(t) начнет отклоняться от графика измеренного значения влияния возмущающего воздействия на регулируемую переменную $y'_{zi}(t)$.

10 – Как уже говорилось в пункте 3, между узлами (8) и (3) располагается измерительное устройство *ИУ*. Так как при идентификации объекта по каналу управления *ИМ* и *ИУ* входят в общую передаточную функцию, то сигнал в узле (3) появится немного позднее, чем начнёт компенсироваться регулируемая переменная. Назовем этот сигнал (3'). Величина запаздывания $\tau'_U \kappa$ меньше величины τ'_U на время транспортного запаздывания измерительного устройства.

Как видно, даже при использовании хорошо настроенного регулятора будет наблюдаться отклонение регулируемой переменной от заданного значения. При чём со временем, за счёт отрицательной обратной связи, действие регулятора начинает компенсировать данное влияние и значение регулируемой переменной возвращается к заданному значению. В момент завершения регулирования влияние регулирующеего воздействия равно влиянию возмущающего воздействия с противоположным знаком. Вид переходного процесса в замкнутой САР определяется динамическими характеристиками объекта регулирования, законом регулирования, значениями параметров настройки регулятора, формой и местом приложения возмущающих воздействий. Качество процесса регулирования оценивают, чаще всего используя следующие показатели [2 с.249, 3 с.286]:

- динамическую ошибку (y_1) ;
- статическую ошибку (y_{cm}) ;
- время регулирования (t_p) ;

- перерегулирование
$$\varphi = \frac{y_2}{y_1} 100\%;$$
 (22)

- степень затухания
$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1}$$
 (23)

интегральную квадратическую ошибку

$$I = \int_{0}^{\infty} \varepsilon^2 dt \tag{24}$$

<u>Динамическая ошибка</u> ($y_{дин} = y_1$) регулирования представляет собой максимальное отклонение регулируемой величины от его заданного значения в переходного режиме.

<u>Статическая ошибка</u> – отклонение регулируемой величины от его заданного значения после окончания переходного процесса (в статическом режиме).

<u>Время регулирования</u> – время, в течении которого, начиная с момента нанесения воздействия на САР, регулируемая переменная достигнет заданного или нового установившегося значения с заранее установленной точностью $\pm y_{cm}^{\partial}$. Величина зоны $\pm y_{cm}^{\partial}$, как правило, определяется величиной статической ошибки регулирования (допустимое отклонение регулируемой переменной, определяемое технологическим регламентом процесса).

<u>Перерегулирование переходного процесса</u> представляет собой выраженное в процентах отношение второй y_2 и первой y_1

амплитуд колебаний, направленных в противоположные стороны.

<u>Интегральная</u> квадратическая ошибка регулирования представляет собой квадрат площади между кривой переходного процесса и заданным или новым установившимся значением регулируемой переменной. Чем меньше её величина, тем выше качество процесса регулирования. Из графика (рис. 9) видно, что данный интегральный показатель однозначно связан и с другими показателями. Чем меньше динамическая и статическая ошибка, время регулирования, перерегулирование, чем меньше I, тем лучше качество регулирования. Более подробно теоретический материал по выполняемой работе изложен в источниках [1, 2, 3, 4]. Данные показатели находятся из графиков переходного процесса (рис. 9).

К качеству регулирования каждого технологического процесса предъявляют конкретные требования. В одних случаях оптимальным может быть процесс, обеспечивающий минимальное значение $y_{дин}$, в других случаях – минимальное значение t_p . В зависимости от требования, задаваемых в технологических регламентах, различают несколько видов переходных процессов:

1) Апериодический вид переходного процесса (рис. 9, *a*) обладает <u>минимальным временем регулирования</u> <u>удин</u>, но максимальной динамической ошибкой. Характеризуется он отсутствием перерегулирования.

2) Переходный процесс с 20-% перерегулированием (рис. 9, б) обладает используется в тех случаях, когда требование предъявляются и к времени регулирования и динамической ошибки. По другому этот вид переходного процесса принято называть **процессом с умеренными колебаниями**.

3) Переходный процесс с минимальной интегральной квадратической ошибкой (рис. 9, *в*) обладает <u>минимальной</u> динамической ошибкой, но максимальным временем регулирования. По другому этот вид переходного процесса принято называть колебателным процессом.


Рис. 9. Виды переходных процессов одноконтурной САР а) апериодический вид переходного процесса; б) переходный процесс с 20-% перерегулированием; в) переходный процесс с минимальной интегральной квадратической ошибкой

Большое влияние на вид переходного процесса оказывают динамические свойства объекта регулирования. При чём самым негативным является наличие транспортного запаздывания, влияние которого можно увидеть на рисунке 7. Как видно, измеренное значение влияния регулирующего воздействия $y'_U(t)$ отстаёт от измеренного значения регулируемой переменной y'(t)как раз на время запаздывания. Таким образом, на интервале τ'_U , пока регулирующее воздействие ещё не сказывается на выходе объекта, процесс регулирования совпадает с переходной функцией объекта [4, с.58]. При этом динамическая ошибка регулирования не может быть меньше, чем значение выхода апериодического звена при времени равном сумме времени запаздывания по каналу управления и каналу возмущения ($\tau_{zi}^{\prime} + \tau_{U}^{\prime}$) (рис. 10).



Рис. 10. Влияние запаздывания на величину динамической ошибки в одноконтурной САР при нанесении возмущения на входе $z_i(t)$ $y_{\text{дин}}^{\text{min}}$ – минимально возможное значение динамической ошибки; T'_{Zi} – постоянная времени объекта регулирования по каналу возмущения; $y'_{Zi}(t)$ – кривая разгона объекта по каналу возмущения; – участок совпадения переходного процесса и кривой разгона.

При настройке систем регулирования в моделируемой системе наносить реальное возмущение не представляется возможным, поэтому во всех источниках предполагается нанесение эквивалентного возмущающего воздействия ($U^{3\kappa 6}(t)$). При этом входом системы является дополнительный сигнал регулирования $X_p^{\text{доп}}(t)$, и возмущение регулируемой переменной происходит по каналу регулирования. Такое предположение позволяет анализировать систему при самых жёстких условиях, так как в качестве канала управления обычно выбирается самый быстродействующий канал (т.е. обладающий меньшим запаздыванием и меньшей инерционностью). Таким образом, при определении влияния запаздывания на величину динамической ошибки и при определении динамических свойств объекта будут использо-

ваться параметры объекта только по каналу регулирования (рис. 11).



Рис. 11. Сравнение влияние запаздывания на величину динамической ошибки в одноконтурной САР при нанесении возмущения на входе $U^{\mu\kappa\sigma}(t)$ - кривая разгона объекта регулирования при постоянной времени $T_U^{\prime(1)}$; - переходный процесс в системе с объектом регулирования при постоянной времени $T_U^{\prime(1)}$; - с кривая разгона объекта регулирования вания с постоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования при постоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования при постоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования при постоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования процесс в систоянной времени $T_U^{\prime(2)}$; - с кривая разгона объекта регулирования на входе в систоянной времени на кривая разгона объекта регулирования на кривая разгона на крив

теме с объектом регулирования при постоянной времени $T_U^{/(2)}$.

Как видно из графиков на рис. 10, величина динамической ошибки зависит от того, как круто происходит изменение регулируемой переменной в начале переходного процесса. Крутизна переходного процесса при этом определяется постоянной времени объекта по каналу нанесения возмущения и величиной данного воздействия. Таким образом, даже при оптимальных настройках регулятора, качество переходного процесса регулирования тем хуже, чем больше и само запаздывание и его отношение к постоянной времени объекта τ'_U/T'_{Zi} (τ'_U/T'_U). Опираясь на данное соотношение выбирается тип рекомендуемого регулятора:

- при $\tau_U^{/}/T_U^{/} < 0,2$ – рекомендуется позиционный регулятор;

- при $0.2 < \tau_U^{/} / T_U^{/} < 0.5 (0.7)$ – рекомендуются непрерывные (импульсные, цифровые) регуляторы;

- при $\tau_U^{/}/T_U^{/} > 0,5 (0,7)$ – рекомендуются специальные регуляторы.

Одноконтурная САР, исследуемая в данной лабораторной работе относится к системам с непрерывным регулятором.

4 Методы расчета параметров настройки регулятора в одноконтурной САР

Методов расчета данных параметров сравнительно много [2, 3, 4, 5], однако во всех этих методах используется передаточная функция объекта или численные значения констант, входящих в эту функцию. Все эти методы базируются на аналоговой записи уравнений, так как разрабатывались в то время, когда были распространены непрерывные аналоговые регуляторы. В настоящее время, как уже говорилось, в качестве регуляторов используются микропроцессорные контроллеры, все вычисления в которых проводятся в дискретной форме.

При этом сигналы поступают в систему регулирования в дискретные моменты времени с некоторым интервалом *to*. Но ввиду большой инерционности технологических процессов интервал квантования по времени для них оказывается столь малым, что характеристики системы с дискретным регулятором и с непрерывным регулятором практически не отличаются. Таким образом, сам регулятор является дискретным, и все уравнения записываются в разностной форме. При чём, параметры этих уравнений можно записать на базе параметров, используемых в непрерывных регуляторах, представленных выражениями (9÷18). Среди инженерных методов расчета настроек регуляторов одни являются более точными, но трудоемкими для ручного счета, другие — простыми, но приближенными. Среди них:

1) Метод определения параметров настройки регулятора по переходным или импульсным характеристикам – *простой*, *теоретический*;

2) Метод организованного поиска – простой экспериментальный;

3) Метод незатухающих колебаний - средней сложности, теоретический и эксперементальный;

4) Метод расширенных частотных характеристик – сложный, теоретический;

5) Расчёт оптимальных настроек ПИ-регуляторов при ограничении на корневой (или частотный) показатель колебательности – сложный, теоретический;

Наиболее распространенными способами, отражающими методику точного и приближенного расчета настроек, являются метод расширенных частотных характеристик (РЧХ) и метод незатухающих колебаний.

Определение статических и динамических характеристик объекта регулирования и нахождения по ним передаточных функций объекта в производственных условиях связано с определенными трудностями, поэтому в эксплуатационной практике чаще используются экспериментальные методы поиска параметров настройки регулятора. Одним из таких является метод, базирующийся на методе незатухающих колебаний.

1) В методе незатухающих колебаний расчёт ведётся в два этапа:

1 этап – производится расчёт критической настройки Прегулятора, при котором система находится на границе устойчивости. При этом определяется критическое значение коэффициента передачи $C_1^{\text{кр}}$ и критическую частоту колебаний $\omega_{\kappa p}$.

2 этап – определение по $C_1^{\,\rm kp}$ и $\omega_{\rm kp}$ оптимальных настроек C_1 , C_0 и C_2 обеспечивающих степень затухания $\psi = 0.8 - 0.9$

Определение критических значений $C_1^{\text{кр}}$ и $\omega_{\text{кр}}$ может производится двумя способами, теоретически и экспериментально. При теоретическом методе незатухающих колебаний исследуется разомкнутая система. При этом известно, что если годограф Найквиста проходит через точку (-1, 0), то система находится на границе устойчивости, то есть переходный процесс такой системы имеет незатухающие колебания. Так как ПФ разомкнутой системы при П-регуляторе определяется как $W'_U(S)$ * $C_1^{\text{кр}}$. В полярных координатах указанная точка по Амплитуде равна 1, а по частоте повёрнута на 180°. Поле простейших преобразований имеем два уравнения.

Для определения критическую частоту колебаний:

$$\varphi_U^{\prime}(\omega) + \pi = 0 \tag{24}$$

Для определения критическое значение коэффициента передачи:

$$C_1^{\text{ kp}} = \left[A_U^{\prime}(\omega_{\text{ kp}}) \right]^{-1}$$
(25)

Для примера рассмотрим объект вида АП1 с 3Ч3 с ПФ

$$W_U^{/}(S) = \frac{K_U^{/}}{T_U^{/} \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau_U^{/}}$$
,

то уравнение (24) запишется как

$$\omega \cdot \tau_U^{\prime} + \operatorname{arctg}(\omega \cdot T_U^{\prime}) + \pi = 0,$$

а уравнение (25) запишется как:

$$C_1^{\kappa p} = \left[\frac{K_U^{\prime}}{\sqrt{1 + \left(\omega_{\kappa p} \cdot T_U^{\prime}\right)^2}}\right]^{-1} = \frac{\sqrt{1 + \left(\omega_{\kappa p} \cdot T_U^{\prime}\right)^2}}{K_U^{\prime}}$$

При экспериментальном методе незатухающих колебаний на реальном объекте, с подключенным к нему регулятором проводятся следующие действия:

1) устанавливается на регуляторе время интегрирования (удвоения), равное максимально возможному значению $(T_u(T_{u3}) \approx \infty)$, а время дифференцирования (предварения) равное нулю $(T_d(T_{np}) = 0)$, этим самым получают П-закон регулирования;

 постепенно увеличивая коэффициент передачи регулятора, первоначальное значение которого берется заведомо малым, добиваются незатухающих колебаний (или близких к ним значений) регулируемой переменной;

3) фиксируют значения коэффициента передачи регулятора, и периода колебаний регулируемой переменной. Полученные значения этих величин называют критическими, так как при найденном значении коэффициента передачи регулятора САР находится на границе устойчивости;

Определение оптимальных настроек *C*₁, *C*₀ и *C*₂ производится по следующим формулам:

для П-регулятора

$$C_1 = 0,5 \cdot C_1^{\kappa p} \tag{26}$$

для ПИ- регулятора

$$C_1 = 0.45 \cdot C_1^{\kappa p} \tag{27}$$

$$C_0 = 0,086 \cdot C_1^{\kappa p} \cdot \omega_{\kappa p} \tag{28}$$

для ПИД-регулятора

$$C_1 = 0,6 \cdot C_1^{\kappa p}$$
 (29)

$$C_0 = 0.192 \cdot C_1^{\kappa p} \cdot \omega_{\kappa p} \tag{30}$$

$$C_2 = \frac{0.471 \cdot C_1^{\kappa p}}{\omega_{\kappa p}} \tag{31}$$

2) <u>Метод расширенных частотных характеристик</u> (РЧХ) базируется на 2-х основных требованиях к САР:

- система должна иметь необходимый запас устойчивости;

- система должна обеспечивать необходимые качественные показатели процесса регулирования.

Запас устойчивости в данном методе определяется показателем колебательности системы, который обозначается буквой *m*. При этом степень колебательности связана с показателем колебательности следующей зависимостью:

$$\psi = 1 - e^{-2 \cdot m} \tag{32}$$

Выбор величины *m* носит субъективный характерисходя из следующих соображений:

а) если процесс нестационарный, т.е. в процессе эксплуатации меняются его свойства и если динамические характеристики объекта определялись приближенно (с большой ошибкой), то запас устойчивости нужно взять наибольший (m=0.366);

б) в противоположном случае *m*=0,221.

В данном методе как и в методе незатухающих колебаний, расчетные формулы для определения параметров регулятора выведены из условия устойчивости по критерию Найквиста. Годограф разомкнутой системы при этом:

$$W_{pa3}(S) = W_U^{\prime}(S) \cdot W_p(S)$$
(33)

Для получения расширенных частотных характеристик вместо **S** подставляют ($-m\omega + j\omega$):

$$S \rightarrow (-m\omega + j\omega)$$
 (34)

При этом, если расширенная амлитудно-фазовая характеристика (РАФХ) разомкнутой системы проходит через точку (-1, *j*), то замкнутая система будет обладать заданной степенью колебательности. При этом можно записать:

$$W_{pa3}(m,j\omega) = W_U^{/}(m,j\omega) \cdot W_p(m,j\omega) = 1$$
(35)

Расписав уравнение (35) относительно расширенных амплитудно-частотных (РАЧХ) и фазочастотных (РФЧХ) характеристик объекта и регулятора, получим:

$$\begin{cases} A_U^{\prime}(m,\omega) \cdot A_p(m,\omega) = 1\\ \varphi_U^{\prime}(m,\omega) + \varphi_p(m,\omega) = 0 \end{cases}$$
(36)

Для регуляторов с одним параметром настройки (П, И), РФЧХ которых не зависит от *S*, из второго уравнения системы (36) находится рабочая частота $\omega_{\rm p}$, а из первого – искомый параметр настройки $C_{\rm i}$.

Для регуляторов с двумя параметрами настройки (ПИ, ПД, ИД) по уравнениям системы (35) в плоскости параметров на-

стройки регулятора строятся линию равной степени колебательности в интервале частот:

$$\frac{\pi}{\tau_U^{\prime}} > \omega > \pi / \left(\tau_U^{\prime} + \sum_{i=1}^n T_U^{\prime}(i) \right)$$
(37)

Рассмотрим решение системы уравнений (35) для часто используемого ПИ-регулятора. При этом получаются выражения для двух искомых параметров настройки регулятора, C_1 и C_0 :

$$C_{1} = \left[A_{U}^{/}(m,\omega)\right]^{-1} \cdot \sqrt{1+m^{2}} \cdot \cos\gamma$$

$$C_{0} = \left[A_{U}^{/}(m,\omega)\right]^{-1} \cdot \omega \cdot \sqrt{1+m^{2}} \cdot \left[m \cdot \cos\gamma - \sin\gamma\right],$$
(38)

где $\gamma = \arctan m - \pi - \varphi_U^{\prime}(m, \omega)$

Кривые равной степени колебательности, построенные по уравнениям системы (37) представлены на рис. 12. Внешняя кривая, ограничивающая область настроек регулятора, построена при запасе устойчивости m = 0. Внутри этой области система регулирования будет устойчивой, при чём, чем ближе кривая к центру координат, тем больше запас устойчивости.

На одной кривую равной степени колебательности, например при m = 0,221, разным точкам будут соответствовать различные графики (рис. 12). Как видно, процесс в точке 2 оптимальнее трёх остальных.

Если при определении параметров настройки ПИрегулятора в качестве критерия выбран минимум интегральной квадратичной ошибки, то рабочую частоту рекомендуется выбирать по одному из условий:

$$\omega_{\rm p} = 1,2 \cdot \omega_{\rm max}$$
 или $\omega_{\rm p} = 0,8 \cdot \omega_{\rm m}$ (39)

Если оптимальным является другой критерий, то проводится анализ всех переходных процессов и выбирается более подходящий.



Рис. 12. Линии равной степени колебательности в области настройки ПИ-регулятора



Рис. 13. Графики переходных процессов регулирования при различных настройках ПИ-регулятора

Как видно из рисунка 12, точка 2 близка к точке ω_p с минимальной квадратической ошибкой, точка 1 близка к Ирегулятору, а точка 4 соответствует П-регулятору, так как параметр C_0 равен 0.

Для ПИД-регулятора с тремя параметрами настройки, имеющего передаточную функцию (18), из системы уравнений (36) можно найти настройки C_1 и C_0 как функции от C_2 . При этом в уравнениях системы (38) появляется по одному дополнительному слагаемму

$$C_{1} = \left[A_{U}^{\prime}(m,\omega)\right]^{-1} \cdot \sqrt{1+m^{2}} \cdot \cos \gamma + 2 \cdot C_{2} \cdot m \cdot \omega$$

$$C_{0} = \left[A_{U}^{\prime}(m,\omega)\right]^{-1} \cdot \omega \cdot \sqrt{1+m^{2}} \cdot \left[m \cdot \cos \gamma - \sin \gamma\right] + C_{2} \cdot \omega^{2} \cdot \left(1+m^{2}\right)$$
(40)

При этом, задавая различные значения C_2 , строят различные линии равной степени колебательности в плоскости параметров C_1 и C_0 . Затем находят самый оптимальный переходный процесс для каждой из этих линий при различных C_2 и сравнивают их между собой. Выбирается то значение S_2 , при котором наблюдается самый оптимальный процесс.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ СТЕНДОВ И ПАКЕТОВ ПРОГРАММ

Лабораторная работа выполняться с использованием:

- 1) лаболаторного стенда №1 на базе микропроцессорный контроллер «РЕМИКОНТ Р-110»;
- лаболаторного стенда №2 на базе микропроцессорный контроллер «РЕМИКОНТ Р-130» и SCADA-системы TRACE MODE 6.0;
- 3) среда Simulink системы MathLAB 6.5;
- 4) программы IPC_CAD;
- 5) программы «аа» в среде MathLAB 4.0.

Первый стенд базируется на микропроцессорном контроллере «РЕМИКОНТ Р-110» с подключенным к нему потенциометром КСП-3.

Второй стенд является двухуровневым. На нижнем уровне реализация САР производится на микропроцессорном контроллере «РЕМИКОНТ Р-130». На верхнем уровне располагается

SCADA-система TRACE MODE 6.0, позволяющая как изменять настройки системы и фиксировать графики почти всех выходов алгоблоков.

В системе Simulink пакета MatLAB можно собрать любую систему и произвести фиксацию графиков для любой выбранной точки.

Программа «аа» в среде MathLAB 4.0 позволяет произвести наглядный расчёт параметров настройки ПИ- и ПИДрегуляторов методом расширенных частотных характеристик.

Программа IPC CAD позволяет производить настройку регуляторов при различных видах переходного процесса и при различных видах моделей объекта. Так же возможно производить моделирование переходных процессов при различных входах системы.

1 Описание лабораторного стенда №1

Лабораторный стенд №1 включает в себя:

- 1) микропроцессорный контроллер "РЕМИКОНТ Р-110";
- 2) самопишущий прибор типа КСП 4;
- 3) токовые задатчики типа ЗУ-05;
- 4) миллиамперметры для измерения тока задатчиков.

Принципиальная схема стенда № 1 для выполнения лабораторной работы приведена на рис. 14.



Рис. 14. Принципиальная схема стенда № 1

В первой зоне виртуальной структуры микроконтроллера «РЕМИКОНТ Р-110» размещают модель замкнутой системы автоматического регулирования, построенную на базе четырех алгоблоков. Структурная схема такой системы приведена на рис. 15.



Рис. 15. Структурная схема программы одноконтурной САР в «РЕМИКОНТ Р-110»

В алгоблоке 1.1 находится алгоритм суммирования (код 30), который осуществляет суммирование сигналов регулирующего воздействия $X_p(t)$ поступающего с выхода алгоблока 1.4 и возмущающего воздействия z(t) от задатчика ЗУ-05.

Сигнал с выхода алгоблока 1.1 поступает на вход алгоблока **1.2**, где находится алгоритм з**апаздывания**.

В алгоблоке 1.3 находится алгоритм суммирования, с помощью которого при подаче сигнала на его 2 или 3 вход можно получить инерционное звено первого порядка, так как данный сумматор, как и многие другие алгоблоки в контроллере "РЕМИКОНТ Р-110", позволяет производить фильтрацию высокочастотных помех. Для этого используется экспотенциальный фильтр первого порядка, передаточная функция которого идентична ПФ апериодического звена первого порядка.

Таким образом в алгоблоках 1.2 и 1.3 находится модель объекта регулирования, имеющая передаточную функцию вида:

$$W_{U}^{\prime}(S) = \frac{K_{U}^{\prime}}{T_{U}^{\prime} \cdot S + 1} \cdot e^{-\tau_{U}^{\prime}}$$
(42)

где K'_U - коэф. объекта;

 T_{U}^{\prime} - постоянная времени объекта;

 au_{U}^{\prime} - время запаздывания объекта.

В алгоблоке 1.4 размещается алгоритм стандартного ПИДзакона регулирования, записанный в зависимых настройках. Так как технически реализовать идеальное Д-звено невозможно, то в его составляющей используется фильтр, преобразующий идеальное Д-звено в реальное. ПФ регулятора, используемого в микропроцессорном контроллере «РЕМИКОНТ Р-110» имеет следующий вид [2, с.148]:

$$W_{p}(S) = k_{\pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\mu} \cdot S} + \frac{T_{\pi} \cdot S}{0.125 \cdot T_{\pi} \cdot S + 1} \right)$$
(43)

где $k_{\rm n}$ - коэффициент пропорциональности (аналог K_p из выражений (9÷18));

*T*_и - время удвоения (аналог *T*_{из} из выражений (13 и 14));

 $T_{_{\rm II}}$ - время предварения (аналог $T_{_{\rm ND}}$ из выражений (17 и 18)).

При необходимости модель объекта может быть представлена, как последовательное соединение звена запаздывания с апериодическим звеном 2-го порядка. Для этого между алгоблоком 1.2 и алгоблоком 1.3 включают дополнительный алгоблок (1.5) с инерционным звеном первого порядка реализаванный как и в алгоблоке 1.3 на базе алгоритма суммирования, в результате передаточная функция объекта будет иметь вид:

$$W_U^{\prime}(S) = \frac{K_U^{\prime} \cdot e^{-\tau_U^{\prime} \cdot S}}{(T_{U(3)}^{\prime} \cdot S + 1) \cdot (T_{U(4)}^{\prime} \cdot S + 1)}$$
(44)

где $T'_{U(3)}$, $T'_{U(4)}$ - постоянные времени для двух, соединенных последовательно звеньев АП1.

После раскрытия скобок получим привычную запись АП2:

$$W_U'(S) = \frac{K_U' \cdot e^{-\tau_U' \cdot S}}{T_{U(1)}'^2 \cdot S^2 + T_{U(2)}' \cdot S + 1}$$
(45)

где $T'_{U(1)}$, $T'_{U(2)}$ - постоянные времени для апериодического звена второго порядка.

При этом структурная схема программы примет вид, показанный на рис. 16.



Рис. 16. Структурная схема модернезированной программы одноконтурной САР в «РЕМИКОНТ Р-110» с объектом вида АП2 с 3Ч3

Выходной сигнал с алгоблока 1.3 подается на вход регулятора (алгоблок 1.4) и на аналоговый выход РЕМИКОНТА, а с него через цифро-аналоговый преобразователь на самопишущий прибор КСП 4. Возмущения в системе создаются с помощью токового задатчика ЗУ-05, сигнал которого через гальванический разделитель РГ 12, аналогово-цифровой преобразователь АЦП-2 поступает на 1-й вход алгоблока 1.1. Параметры настройки алгоритмов P-110 сведены в табл. 1.

Таблица 1

№ алгоб лока	Код алго- ритма	Обозначение параметра алгоритма	Наименование или численное значение устанавливаемого параметра
1.1	30 СУМ	H1	-102 %
		H2	102 %
		К2	1
1.2	26 ЗАП	T1	Время запаздывания объекта управления $\tau_U'/_5$

Параметры настройки алгоритмов контроллера Р-110

Продолжение табл. 1

N⁰	Код	Обозначение	Наименование или численное

ал- гобло ка	алго- ритма	параметра алгоритма	значение устанавливаемого параметра	
1.3	30 СУМ	К2	Коэффициент передачи объекта управления K_U^{\prime}	
		Т3	Постоянная времени объекта управления $T'_U(T'_{U(3)})$	
		H1	-102 %	
		H2	102 %	
		3ДН	-50%	
1.4	01 РАН	$k_{_{ m III}}$	Коэффициент передачи регулятора	
		Ти	Время интегрирования (изодрома)	
		$T_{_{ m I\!I}}$	Время дифференцирования (предварения)	
		H1	-102 %	
		H2	102 %	
		ЗДН	50%	
1.5	30 СУМ	T 2	Постоянная времени объекта управле-	
		13	ния $T_{U(4)}^{\prime}$	
		H1	-102 %	
		H2	102 %	

Структура, настройки и последовательность программирования микропроцессорного контроллера "РЕМИКОНТ Р-110" подробно представлена в [2, с.144-158].

2 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА №2

Лабораторный стенд №2 включает в себя:

- 1) микропроцессорный контроллер «РЕМИКОНТ Р-130»;
- 2) четыре токовых задающих устройства «ЗУ-05»;
- 3) четыре миллиамперметра;
- 4) блоков «ШЛЮЗ».
- 5) ПК типа «IBM PC».

Четыре задатчика «ЗУ-05» подключены к первым четырем аналоговым входам устройства связи с объектом (УСО) группы А. Внутри виртуальной структуры «РЕМИКОНТА Р-130» находится модель замкнутой САР, структурная схема которой приведена на рис. 17.

В соответствии с данной схемой алгоблоки 11, 12 и 13 выполняют роль модели объекта регулирования. В алгоблоке 11 размещен алгоритм чистого запаздывания (код 39). В алгоблоках 12 и 13 размещены алгоритмы динамического преобразования (код 36). Таким образом, передаточная функция объекта имеет вид, показанный в выражении (44).

В алгоблоке 07 находится алгоритм стандартного ПИДзакона регулирования (код 20), с передаточной функцией вида (43).

Алгоритм задания (код 24) находится в алгоблоке 06 и соединен с первым входом алгоритма ПИД-закона регулирования.

С помощью алгоритма ручного управления (код 26), размещенного в алгоблоке 08 можно при необходимости переключать алгоритм ПИД-закона регулирования в режим ручного управления.

В алгоблоке 10 находится алгоритм суммирования (код 42), в котором осуществляется суммирование сигналов, поступающих с выхода регулятора (алгоблоки 08 и 07) и со входа «РЕМИКОНТА Р-130» от задатчика ЗУ-05 (алгоблок 05).



Рис. 17. Структурная схема программы одноконтурной САР в «РЕМИКОНТ Р-130»

Параметры настройки алгоритмов микропроцессорного контроллера «РЕМИКОНТА Р-130» сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры настройки алгоритмов контроллера Р-130

№ алгоблока	Код алгорит- ма	№ входа	Харак- тери- стика входа	Харак- теристи- ка уста- навли- ваемого парамет- ра	Наименова- ние устанав- ливаемого параметра	Значение устанавли- ваемого па- раметра	
Параметры объекта управления							
11	ЗАП 39-12-00	05	Свобод- ный	Коэф- фициент	Время запаздыва- ния	$\frac{\tau_U'}{m}, \\ m = 12$	
10	ДИН	02	бод- ій	Коэф- фициент	Коэффици- ент передачи	K_U^{\prime}	
12	36-00	03	Cboć hbj	Коэф- фициент	Постоянная времени	$T^{\prime}_{U(3)}$	
Продолжение табл. 2							
№ алгоблока	Код алгорит- ма	№ входа	Харак- тери- стика входа	Харак- теристи- ка уста- навли- ваемого парамет- ра	Наименова- ние устанав- ливаемого параметра	Значение устанавли- ваемого па- раметра	

12	ДИН 36-00	04	Свободный	Кон- станта	Постоянная времени числителя	<i>T</i> ₂ = 0		
13	ДИН 36-00	02	Свободный	Коэф- фициент	Коэффици- ент передачи	1		
		03		Коэф- фициент	Постоянная времени	$T^{\prime}_{U(4)}$		
		04		Кон- станта	Постоянная времени числителя	$T_2 = 0$		
Параметры настройки регулятора								
7	PAH 20-00	06	Свободный	Коэф- фициент	Коэффици- ент пропор- ционально- сти	K _p		
		07		Коэф- фициент	Время ин- тегрирования	T _u		
		08		Коэф- фициент	Коэффици- ент диффе- ренцирова- ния	$K_{\partial} = \frac{T_{\partial}}{T_u}$		

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данном разделе будет описано последовательность проведения нескольких исследований, которые помогут углубить и расширить знания по работе непрерывных систем регулирования и по методам настройки параметров регуляторов.

Исследования подобраны таким образом, чтобы можно было эффективно использовать и существующие на кафедре лабораторные стенды и имеющиеся программные продукты.

Во всех предлагаемых исследованиях требуется проводить различные экспериментальные исследования. В некоторых заданиях таких исследований может быть несколько. Для эффективной обработки результатов эксперимента в процессе его проведения следует соблюдать ряд рекомендаций и производить каждый эксперимент в чёткой последовательности, не пропуская этапы.

Последовательность проведения каждого опыта:

Этап 1 – записать в отчёт номер опыта.

Этап 2 – зафиксировать в отчёте цель эксперимента.

Этап 3 – зафиксировать в отчёте исходные данные.

Этап 4 – введите в систему все указанные исходные данные.

Этап 5 – если опыт базируется на исходных данных одного из предыдущих опытов, т.е. производится для сравнительной цели, необходимо:

а) сослаться на номер опыта, который является базовым;

б) в исходных данных отметить отличие от базового (обычно такое отличие <u>одно</u>).

Этап 6 – проведите эксперимент, введя возмущение или запустив программу на выполнение.

Этап 7 – чётко отметьте на графике (диаграммной бумаге) <u>номер опыта</u>. Если результат фиксируется в электронной форме, то под рисунком напечатайте его номер и цель.

Этап 8 – оставьте место в отчёте для наклейки графика и для написания вывода и приступайте к следующему опыту.

После проведения экспериментов и снятия диаграммной ленты необходимо сопоставить записанные данные с полученными графиками и <u>обработать</u> полученные результаты.

<u>Обработка</u> результатов опыта может заключаться в следующем

1) наклейка графиков в правильной ориентации;

2) расчёт необходимых значений по полученным графикам или по указанным формулам;

3) табулирование график на диаграммной бумаге;

4) построение графика по полученной таблице с учётом масштаба;

5) совмещение нескольких графиков на одной координатной сетке;

6) формирование выводов по виду графиков и по рассчитанным значениям

<u>В результате для каждого опыта в отчёте должна быть</u> видна следующая структура:

1. Исходные данные со всеми необходимыми значениями и ссылками.

2. График с необходимыми разметками.

3. Вывод, раскрывающий поставленную для опыта цель.

ИССЛЕДОВАНИЕ 1: Экспериментальное определение параметров настройки регулятора в одноконтурной САР методом незатухающих колебаний

Данное задание рекомендуется выполнять на стенде №1 или стенде №2, так как они эмитируют технические средства автоматизации реального промышленного объекта. Для продвинутых пользователей допустимо исследование сразу в системе Simulink или в программе IPC CAD.

Задание 1.1. Выполнение лабораторной работы на стен*де №1* необходимо проводить в следующей последовательности:

1.1.1) Получить у преподавателя исходные данные для работы:

- значения параметров объекта (K'_U, τ'_U, T'_U) или $(K'_U, \tau'_U, T'_{U(3)}, T'_{U(4)})$

исходное значение коэффициента передачи регулятора.

- 1.1.2) Установить заданные исходные данные в соответствующих алгоблоках РЕМИКОНТА Р-110 используя рисунок 15 или 16 и таблицу 1 (стр. 20-23).
- 1.1.3) Установить в алгоблоке 1.4 с алгоритмом ПИДзакона регулирования $T_{\rm u} = \max$, $T_{\rm g} = 0$, $K_{\rm p} = 0$. Приравнивая $K_{\rm p} = 0$ система размыкается.
- 1.1.4) Включить соответствующий самопишущий прибор.
- 1.1.5) Нанести возмущающее воздействие с помощью задатчика ЗУ-05, установив на нем сигнал равный 1 мА (20%).
- 1.1.6) Зафиксируйте полученную разгонную характеристику смоделированного в контроллере объекта.
- 1.1.7) Установить в алгоблоке 1.4 с алгоритмом ПИДзакона регулирования заданное преподавателем значение $K_{\rm p}$. $T_{\rm u}$ и $T_{\rm d}$ при этом не изменяются.
- 1.1.8) Нанести возмущающее воздействие с помощью задатчика ЗУ-05, установив на нем сигнал равный -20% (0 мА).
- 1.1.9) Проанализировать кривую переходного процесса и, если процесс затухающий, увеличить коэффициент передачи регулятора K_p в 1,5÷2 раза.
- 1.1.10) Нанести возмущающее воздействие с помощью задатчика ЗУ-05, установив на нем сигнал равный +20% (1 мА).
- 1.1.11) Проанализировать переходный процесс и, если процесс затухающий, продолжить выполнение операций, описанных в пунктах 1.1.9 и 1.1.10, до тех пор, пока не получатся незатухающие колебания.

- 1.1.12) После окончательного уточнения коэффициента передачи запишите его значение в отчёт. Данное значение называется критическим и обозначается как K^{кр}_n
- 1.1.13) Снимите диаграмму с самопишущего прибора и определить из последнего графика переходного процесса критическую частоту колебаний системы *ω_{кp}*,

при чем $\omega_{\kappa p} = 2\pi/T_{\kappa p}$, где $T_{\kappa p}$ - период незатухающих колебаний. Полученные значения частоты называют критической, так как система находится на границе устойчивости.

- 1.1.14) По известным формулам (27) (32) (см. стр. 16) определить параметры регулятора. Для П-закона (C₁). Для ПИ-закона (C₁, C₀). Для ПИД-закона (C₁, C₀ и C₂).
- 1.1.15) Воспользовавшись зависимостями (20) (см. стр. 8), пересчитать найденные выше значения в используемые в регуляторе. (См. зависимость (43) на стр.20)
- 1.1.16) Установить полученные параметры настройки Прегулятора в алгоблоке 1.4.
- 1.1.17) Когда значение выходной переменной стабилизируется, то с помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие +20% (или -20%) и зафиксируйте переходный процесс.
- 1.1.18) Установить полученные параметры настройки ПИрегулятора в алгоблоке 1.4.
- 1.1.19) С помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие +20% (или -20%) и зафиксируйте переходный процесс в САР.
- 1.1.20) Установить полученные параметры настройки ПИДрегулятора в алгоблоке 1.4 .
- 1.1.21) С помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие +20% (или -20%) и зафиксируйте переходный процесс в САР.

- 1.1.22) Для каждого из графиков, полученных в пунктах 1.1.17, 1.1.19 и 1.1.21 определите показатели качества переходного процесса (см. стр. 11).
- 1.1.23) Протабулируйте графики, полученные в пунктах 1.1.6, 1.1.17, 1.1.19 и 1.1.21.
- 1.1.24) Совместите на одной координатной сетке протабулированные в пункте 1.1.23 графики и сравните работу регуляторов с различными законами.
- По результатам выполненного задания оформить отчёт. Основную часть отчёта по лабораторной работе №2 смотри в разделе 5. Оформление экспериментальной части исследования 1.1 смотри ниже.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА по экспериментальной части задания 1.1

- Схема реализации САР на контроллере Р-110 показанная на рисунке 15 или 16;
- Таблица с параметрами настройки алгоритмов контроллера P-110 (таблица 1);
- Передаточная функция регулятора, используемая в контроллере P-110 (выражение 43);
- Передаточная функция моделируемого объекта (выражение 42 или 44 и 45);
- 5) Численные значения параметров объекта, выданные преподавателем;
- Результаты опыта по снятию разгонной характеристики в пункте 1.1.6;
- Результаты опыта по определению критического значения K_p;
- 8) Численное значение $K_{p}^{\kappa p}$ и порядок расчёта $\omega_{\kappa D}$;
- Результаты расчёта параметров регуляторов для П-, ПИ- и ПИД-законов регулирования;
- 10) Результаты опыта по снятию переходного процесса с П-регулятором (оформление опыта смот-

61

ри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;

- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИ-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИД-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результат совмещения протабулированных графиков на одной координатной сетке, реализованное в пункте 1.1.24;
- 14) Сформулируйте вывод по сравнению работы регуляторов с П-, ПИ- и ПИД-законами регулирования.

Задание 1.2. Выполнение лабораторной работы на стен*де №2* необходимо проводить в следующей последовательности:

1.2.1) Получить у преподавателя исходные данные для работы:

- значения параметров объекта $K'_{U}, \, \tau'_{U}, \, T'_{U(3)}, T'_{U(4)}$

- исходное значение коэффициента передачи регулятора.

- 1.2.2) Установить заданные исходные данные в соответствующих алгоблоках РЕМИКОНТА Р-130 используя рисунок 17 и таблицу 2 (стр. 22-23).
- 1.2.3) Установить в алгоблоке 07 с алгоритмом ПИД-закона регулирования $T_u = \max$, $K_{\pi} = 0$, $k_{\pi} = 0$. Приравнивая $k_{\pi} = 0$ система размыкается.
- 1.2.4) Включить соответствующий самопишущий прибор.

- 1.2.5) Нанести возмущающее воздействие с помощью задатчика ЗУ-05, установив на нем сигнал равный 1 мА (20%).
- 1.2.6) Зафиксируйте полученную разгонную характеристику смоделированного в контроллере объекта.
- 1.2.7) Установить в алгоблоке 07 с алгоритмом ПИД-закона регулирования заданное преподавателем значение k_п. *T_µ* и *K_π* при этом не изменяются.
- 1.2.8) Нанести возмущающее воздействие с помощью задатчика ЗУ-05, установив на нем сигнал равный -20% (0 мА).
- 1.2.9) Проанализировать кривую переходного процесса и, если процесс затухающий, увеличить коэффициент передачи регулятора k_п в 1,5÷2 раза.
- 1.2.10) Нанести возмущающее воздействие, установив на задатчике ЗУ-05 величину сигнала +20% (1 мА).
- 1.2.11) Проанализировать переходный процесс и, если процесс затухающий, продолжить выполнение операций, описанных в пунктах 1.2.9 и 1.2.10, до тех пор, пока не получатся незатухающие колебания.
- 1.2.12) После окончательного уточнения коэффициента передачи запишите его значение в отчёт. Данное значение называется критическим и обозначается как $k_n^{\kappa p}$
- 1.2.13) Снимите диаграмму с самопишущего прибора и определить из последнего графика переходного процесса критическую частоту колебаний системы *ω_{кp}*,

при чем $\omega_{\kappa p} = 2\pi/T_{\kappa p}$, где $T_{\kappa p}$ - период незатухающих колебаний. Полученные значения частоты называют критической, так как система находится на границе устойчивости.

1.2.14) По известным формулам (27) - (32) (см. стр. 16) определить параметры регулятора. Для П-

закона (C_1). Для ПИ-закона - (C_1 , C_0). Для ПИДзакона - (C_1 , C_0 и C_2).

- 1.2.15) Воспользовавшись зависимостями (20) (см. стр. 8), пересчитать найденные выше значения в используемые в регуляторе. (См. зависимость (43) на стр.20)
- 1.2.16) Установить полученные параметры настройки Прегулятора в алгоблоке 07.
- 1.2.17) Когда значение выходной переменной стабилизируется, то с помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие 20% (1 мА) и зафиксируйте переходный процесс.
- 1.2.18) Установить полученные параметры настройки ПИрегулятора в алгоблоке 07.
- 1.2.19) С помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие +20% (2 мА) и зафиксируйте переходный процесс в САР.
- 1.2.20) Установить полученные параметры настройки ПИДрегулятора в алгоблоке 07.
- 1.2.21) С помощью задатчика ЗУ-05 нанести возмущающее воздействие +20% (3 мА) и зафиксируйте переходный процесс в САР.
- 1.2.22) Для каждого из графиков, полученных в пунктах 1.2.17, 1.2.19 и 1.2.21 определите показатели качества переходного процесса (см. стр. 11).
- 1.2.23) Протабулируйте графики, полученные в пунктах 1.2.6, 1.2.17, 1.2.19 и 1.2.21.
- 1.2.24) Совместите на одной координатной сетке протабулированные в пункте 1.2.23 графики и сравните работу регуляторов с различными законами.
- По результатам выполненного задания оформить отчёт. Основную часть отчёта по лабораторной работе №2 смотри в разделе 5. Оформление экспериментальной части исследования 1.2 смотри ниже.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА по экспериментальной части задания 1.2

- 1) Схема реализации САР на контроллере P-130 показанная на рисунке 17;
- Таблица с параметрами настройки алгоритмов контроллера P-130 (таблица 2);
- Передаточная функция регулятора, используемая в контроллере Р-130 (выражение 43), но коэффициент T_д заменяется коэффициентом K_a;
- Передаточная функция моделируемого объекта (44 и 45);
- 5) Численные значения параметров объекта, выданные преподавателем;
- Результаты опыта по снятию разгонной характеристики в пункте 1.2.6;
- Результаты опыта по определению критического значения k_n;
- 8) Численное значение $k_{\pi}^{\kappa p}$ и порядок расчёта $\omega_{\kappa p}$;
- Результаты расчёта параметров регуляторов для П-, ПИ- и ПИД-законов регулирования;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с П-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИ-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИД-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;

- Результат совмещения протабулированных графиков на одной координатной сетке, реализованное в пункте 1.2.24;
- 14) Сформулируйте вывод по сравнению работы регуляторов с П-, ПИ- и ПИД-законами регулирования.

Задание 1.3. Выполнение лабораторной работы в системе «Simulink» необходимо проводить в следующей последовательности:

- 1.3.1) Получить у преподавателя исходные данные для работы:
 - значения параметров объекта (K'_U, τ'_U, T'_U) или $(K'_U, \tau'_U, T'_{U(3)}, T'_{U(4)})$

- исходное значение коэффициента передачи регулятора.

- 1.3.2) Изучить параметрическую схему одноконтурной САР, представленную на рисунке 6 (стр.7). Выделить основные сигналы и элементы этой схемы.
- 1.3.3) Запустить пакет "Simulink" системы "Matlab" (см. пункты 1-3 раздела 3.3)
- 1.3.4) Используя рекомендации раздела 3.3, создать модель одноконтурной замкнутой САР, представленную на рис. 21.



Рис. 21. Структурная схема модели одноконтурной САР

- 1.3.5) Выделите в структурной схеме собранной модели основные элементы и сопоставьте их с рассмотренной ранее параметрической схемой одноконтурной САР.
- 1.3.6) При использовании модели со звеном АП2 модернизируйте собранную схему, добавив второй модуль "Transfer Fcn".
- 1.3.7) Установить заданные значения параметров объекта используя рекомендации раздела 3.3 по настройке модулей "Transfer Fcn" и "Transport Delay".
- 1.3.8) Установить в модуле "PID Controller" коэффициенты при И- и Д-составляющих равными 0.
- Установить в модуле "PID Controller" заданное преподавателем значение K_p (коэффициент при Псостовляющей).
- 1.3.10) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели.
- 1.3.11) Проанализировать кривую переходного процесса, построенную в модуле "Scope" и, если процесс затухающий, увеличить коэффициент передачи регулятора K_p в 1,5÷2 раза.
- 1.3.12) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели.
- 1.3.13) Проанализировать переходный процесс и, если процесс затухающий, продолжить выполнение операций, описанных в пунктах 1.3.11 и 1.3.12, до тех пор, пока не получатся незатухающие колебания.
- 1.3.14) После окончательного уточнения коэффициента передачи записать его значение в отчёт. Данное значение называется критическим и обозначается как *К*^{кр}_p.
- 1.3.15) Увеличить масштаб графика и определите период незатухающих колебаний, *Т_{кр.}*

- 1.3.16) По полученному значению периода незатухающих колебаний определить критическую частоту колебаний системы $\omega_{_{KD}}$, при чем $\omega_{_{KD}} = 2\pi/T_{_{KD}}$.
- 1.3.17) По известным формулам (27) (32) (см. стр. 16) определить параметры регулятора. Для П-закона (C₁). Для ПИ-закона (C₁, C₀). Для ПИД-закона (C₁, C₀ и C₂).
- 1.3.18) Установить полученные параметры настройки Прегулятора в модуле "PID Controller".
- 1.3.19) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели. Скопировать полученный график в отчёт.
- 1.3.20) Установить полученные параметры настройки ПИрег. в модуле "PID Controller".
- 1.3.21) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели. Скопировать полученный график в отчёт.
- 1.3.22) Установить полученные параметры настройки ПИДрег. в модуле "PID Controller".
- 1.3.23) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели. Скопировать полученный график в отчёт.
- 1.3.24) Для каждого из графиков, полученных в пунктах 1.1.19, 1.1.21 и 1.1.23 определите показатели качества переходного процесса (см. стр. 11) и запишите их в отчёт после каждого из графиков.
- 1.3.25) Разорвите обратную связь, удалив линию связи с выхода модуля "PID Controller".
- 1.3.26) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню "Simulation" "Start Simulation" или нажав на кнопку в окне модели. Скопировать полученный график разгонной характеристики объекта в отчёт.

- 1.3.27) Совместите на одной координатной сетке, соблюдая масштаб, графики, полученные в пуктах 1.3.19, 1.3.21, 1.3.23 и 1.3.26.
- 1.3.28) Сравните работу регуляторов с различными законами регулирования.
- 1.3.29) По результатам выполненного задания оформить отчёт. Основную часть отчёта по лабораторной работе №2 смотри в разделе 5. Оформление экспериментальной части исследования 1.3 смотри ниже.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА по экспериментальной части задания 1.3

- Структурная схема моделируемой САР представленная на рисунке 21 с расставленными на ней обозначениями сигналов и выделением основных элементов (сопоставьте с элементами в параметрической схеме на рисунке 6);
- Передаточная функция регулятора, записанная в модуле "PID Controller";
- Передаточная функция моделируемого объекта (выражение 42 или 44 и 45);
- 4) Численные значения параметров объекта, выданные преподавателем;
- 5) Результаты опыта по определению критического значения *К*_{*P*};
- 6) Численное значение $K_{p}^{\kappa p}$, $T_{\kappa p}$ и порядок расчёта $\omega_{\kappa p}$;
- Результаты расчёта параметров регуляторов для П-, ПИ- и ПИД-законов регулирования;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с П-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- 9) Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИ-регулятором (оформление опыта

смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;

- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИД-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результат совмещения графиков на одной координатной сетке, реализованное в пункте 1.3.27;
- 12) Сформулируйте вывод по сравнению работы регуляторов с П-, ПИ- и ПИД-законами регулирования.

Задание 1.4. Выполнение лабораторной работы в системе «*IPC_CAD*» необходимо проводить в следующей последовательности:

- 1.4.1) Получить у преподавателя исходные данные для работы:
 - значения параметров объекта $(K_U^{\prime}, \tau_U^{\prime}, T_U^{\prime})$ или $(K_U^{\prime}, \tau_U^{\prime}, T_U^{\prime}, T_{U(3)}^{\prime}, T_{U(4)}^{\prime})$

- исходное значение коэффициента передачи регулятора.

- 1.4.2) Изучить параметрическую схему одноконтурной САР, представленную на рисунке 6 (стр.7). Выделить основные сигналы и элементы этой схемы.
- 1.4.3) Ознакомиться с системой "IPC-CAD" (раздел 3.4), и схемой постой одноконтурной САР, реализованной в этой системе (см. рисунок 20).
- 1.4.4) Выделите в представленной схеме основные элементы и сопоставьте их с рассмотренной ранее параметрической схемой одноконтурной САР.
- 1.4.5) Запустить программу "IPC-CAD".
- 1.4.6) Выбрать пункт меню « 1. Одноконтурная САР».
- 1.4.7) Задать характеристику объекта в форме передаточной функции с самовыравниванием и с выданными численными значениями параметров объекта (для

проверки правильности ввода вывести передаточную функцию объекта на экран).

1.4.8) Ввести параметры регулятора перемещаясь в меню в следующей последовательности: « 4. Настройка CAP » - « 6. Произвольный ввод параметров регулятора » -

- « 4. Ввод параметров регулятора » - « 1. П – регулятор Wp(s)=Kp ».

- 1.4.9) В появившейся строке ввести значение коэффициента передачи регулятора,
- 1.4.10) В следующем окне нажать клавишу "Enter" и проанализировать получившийся график переходного процесса.
- 1.4.11) Если процесс затухающий, то увеличить коэффициент передачи регулятора K_p в 1,5÷2 раза и повторить ввод параметров П – регулятора.
- 1.4.12) Проанализировать получившийся график переходного процесса, выведенный желтой пунктирной линией (красной линией выводится предыдущий график). Если процесс затухающий, продолжить изменение коэффициента передачи регулятора аналогично пункту 1.4.11 до тех пор, пока не получатся незатухающие колебания.
- 1.4.13) При приближении переходного процесса к колебательному режиму после вывода графика, при выводе показателей качества переходного процесса выводится: а) период колебаний и б) отношение соседних максимумов. При достижении колебательного режима последнее отношение должно стремиться к 1.
- 1.4.14) После окончательного уточнения коэффициента передачи записать его значение и частоту колебаний в отчёт. Данные значения называются критическими и обозначается как K^{кр}_n и T_{кp}.
- 1.4.15) По полученному значению периода незатухающих колебаний определить критическую частоту колебаний системы $\omega_{\kappa p}$, при чем $\omega_{\kappa p} = 2\pi/T_{\kappa p}$.

- 1.4.16) По известным формулам (27) (32) (см. стр. 16) определить параметры регулятора. Для П-закона (C₁). Для ПИ-закона (C₁, C₀). Для ПИД-закона (C₁, C₀ и C₂).
- 1.4.17) Воспользовавшись зависимостями (20) (см. стр. 8), пересчитать найденные выше значения в используемые в регуляторе. (См. зависимость (48) на стр.30)
- 1.4.18) Ввести рассчитанные параметры П-регулятора, аналогично пункту 1.4.8.
- 1.4.19) Скопировать полученный график в отчёт и записать полученные после моделирования показатели качества процесса регулирования.
- 1.4.20) Ввести рассчитанные параметры ПИ-регулятора, аналогично пункту 1.4.8.
- 1.4.21) Скопировать полученный график в отчёт и записать полученные после моделирования показатели качества процесса регулирования.
- 1.4.22) Ввести рассчитанные параметры ПИД-регулятора, аналогично пункту 1.4.8.
- 1.4.23) Скопировать полученный график в отчёт и записать полученные после моделирования показатели качества процесса регулирования.
- 1.4.24) Выйти из раздела «Выбор типа регулятора» (нажатием клавишы «Esc»), перейдя в окно «Произвольный ввод параметров регулятора».
- 1.4.25) Войти в пункт меню «1.Вывод кривой разгона объекта на экран » и скопируйте полученный график в отчёт.
- 1.4.26) Совместите на одной координатной сетке, соблюдая масштаб, графики, полученные в пуктах 1.4.19, 1.4.21, 1.3.23 и 1.3.25.
- 1.4.27) Сравните работу регуляторов с различными законами регулирования.
- 1.4.28) По результатам выполненного задания оформить отчёт. Основную часть отчёта по лабораторной работе №2 смотри в разделе 5. Оформление экспериментальной части исследования 1.4 смотри ниже.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА по экспериментальной части задания 1.4

- Схема простой одноконтурной САР, реализованной в системе "IPC-CAD" представленная на рисунке 20 с расставленными на ней обозначениями сигналов и выделением основных элементов (сопоставьте с элементами в параметрической схеме на рисунке 6);
- Передаточная функция регулятора, реализуемая в системе "IPC-CAD" представленная в выражении (48);
- Передаточная функция моделируемого объекта (выражение 42 или 44 и 45);
- 4) Численные значения параметров объекта, выданные преподавателем;
- 5) Результаты опыта по определению критического значения *K_P*;
- 6) Численное значение $K_{p}^{\kappa p}$, $T_{\kappa p}$ и порядок расчёта $\omega_{\kappa p}$;
- Результаты расчёта параметров регуляторов для П-, ПИ- и ПИД-законов регулирования;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с П-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИ-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- Результаты опыта по снятию переходного процесса с ПИД-регулятором (оформление опыта смотри в начале раздела 4), с численными значениями показателей качества переходного процесса;
- 11) Результат совмещения графиков на одной координатной сетке, реализованное в пункте 1.4.26;
- 12) Сформулируйте вывод по сравнению работы регуляторов с П-, ПИ- и ПИД-законами регулирования.
ИССЛЕДОВАНИЕ 2: Исследование влияния параметров настройки регулятора на качественные показатели процесса регулирования

На первом этапе данное задание рекомендуется выполнять на том стенде, на котором было выполнено первое задание. Более полное исследование рекомендуется проводить в системе «Simulink».

1) Из полученного графика переходного процесса определить прямые показатели качества процесса регулирования (рис. 2).

2) Уменьшить значение коэффициента передачи регулятора K_p в 2 раза. Нанести возмущение и снять переходный процесс. Установить прежнее значение K_p .

3) Уменьшить время интегрирования в 1,5÷2 раза. Нанести возмущение и снять переходный процесс. Сравнить полученные графики переходных процессов и сделать вывод о влиянии параметров настройки регулятора (ПНР) на форму и качество процесса регулирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ 3: Определения параметров настройки регулятора методом расширенных частотных характеристик

ИССЛЕДОВАНИЕ 4: Исследование изменения сигналов в одноконтурной САР

В опытах на Ремиконте P-110 (да и в Simulink) необходимо построить график (выхода регулятора) влияния регулирующего воздействия по двум определённым графикам, при отключенном и при включенном регуляторе.

ИССЛЕДОВАНИЕ 5: Исследование времени действия составляющих ПИД-регулятора в зависимости от типа сигнала рассогласования

Описать структуру системы для Simulink (схемы должно быть две – простая и с развёрнутым видом регулятора)

ИССЛЕДОВАНИЕ 6 - Исследование влияния параметров объекта на качественные показатели переходного процесса

В опытах по исследованию влияния запаздывания сделать 4 варианта (1 - изменять запаздывание при АП1, 2 - изменять постоянную времени при АП1, 3 - изменять запаздывание при АП2, 2 - изменять постоянную времени при АП2). Сравнить с АП2, для чего приложить формулы пересчёта параметров по То.

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется в тетради или на листах формата A4 в соответствии с общими требованиями к оформлению текстовых документов. <u>В общей части отчет должен содержать:</u>

- 1) Наименование и цель работы;
- Общую структуру замкнутой САР, представленную на рисунке 5;
- Параметрическую схему одноконтурной САР, представленную на рисунке 6;
- 4) Основные записи передаточной функции ПИДрегулятора (зависимость 16, 18 и 21).
- 5) Экспериментальная часть исследования 1.
- 6) Экспериментальная часть исследования 2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1) Какие исходные данные используются при выборе закона регулирования?

2) Назовите типовые переходные процессы САР и охарактеризуйте их.

3) В чем заключается метод расчета параметров настройки регулятора (ПНР) по переходным и импульсным характеристикам объекта управления? Назовите его достоинства и недостатки.

4) В чем заключается метод незатухающих колебаний расчета ПНР? Назовите его достоинства и недостатки.

5) В чем заключается метод расширенных частотных характеристик расчета ПНР? Назовите его достоинства и недостатки.

6) Объясните, как влияют параметры настройки регулятора на форму переходного процесса в одноконтурных САР.

7) Как определяют прямые показатели качества процесса регулирования?

Дополнительные вопросы

1) Перечислите типовые звенья автоматики.

2) Перечислите и поясните способы соединения звеньев автоматики.

3) Что такое регулирование?

4) Каково назначение автоматического регулятора?

5) По каким признакам можно классифицировать САР?

6) В чём отличие разомкнутых и замкнутых систем регулирования.

7) В каком случае эффективна разомкнутая САР по заданию?

8) В каком случае рекомендуется использовать разомкнутую САР по возмущению?

9) В чём преимущества и недостатки разомкнутой САР по возмущению?

10) Какие составляющие ПФ входят в состав идентифицируемой ПФ объекта регулирования ?

11) В чём отличие $W_u^{j}(S)$ от $W_u(S)$?

12) От чего зависит вид переходного процесса?

13) От чего зависит крутизна начального участка переходного процесса?

14) Перечислите методы расчета настроек регуляторов.

15) В чём преимущество экспериментальных методов расчета настроек регуляторов?

16) Сколько этапов в методе незатухающих колебаний? Перечислите их.

17) Поясните последовательность определения настроек регулятора в методе расширенных частотных характеристик.

18) Опишите последовательность проведения экспериментального исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лукас В.А. Теория управления техническими системами: Компактный учеб. курс для вузов. – 3-е издание, перераб. и дополн. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА. 2002. – 675 с.: ил. 214.
- Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. Технические средства и лабораторные работы. М.,: Химия, 1988. 288 с.
- Практикум по автоматике и систем управления производственными процессами. Под ред. И.М. Масленникова, М.,: Химия, 1985. – 336 с.
- Автоматическое управление в химической промышленности. Учебник для вузов. Под ред. Е.Г. Дудникова, М.,: Химия, 1987. – 318 с.
- 5) *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления: Учебник для вузов. 3-е изд., стереот. М.: Издательство МЭИ, 2005. 400 с., ил.
- 6) Борисов В.В., Плютто В.П. Практикум по теории автоматического управления химико-технологическими процессами. Аналоговые системы. – М.: Химия, 1987. – 152 с.

Лабораторная работа №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА»

Составил: к.т.н., доцент А.В. Чупин

введение

Импульсные системы автоматического регулирования получили широкое распространение при автоматизации объектов, позволяющих использовать на нижнем уровне системы управления электрические исполнительные механизмы и устройства. Настройка данных САР обладает рядом особенностей, связанных с тем, что выбранные законы регулирования в них реализуются приближенно с помощью импульсного регулятора и электрического исполнительного механизма.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение и исследование импульсных САР расхода воздуха, приобретение навыков настройки импульсных регуляторов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Импульсными называют системы регулирования, в состав которых входит хотя бы один импульсный элемент, у которого непрерывному изменению входной величины соответствует изменение выходной величины в виде последовательности импульсов. Процесс преобразования непрерывного сигнала в последовательность импульсов, параметры которых зависят от значений этого сигнала в дискретные моменты времени, называют импульсной модуляцией. В зависимости от того, какой параметр импульса (амплитуда, длительность, фаза) модулируется непрерывным сигналом различают амплитудно-импульсную, широтно-импульсную и фазоимпульсную модуляцию. В промышленных регуляторах и контроллерах в основном используется широтно-импульсная модуляция. Импульсные САР с амплитудной модуляцией встречаются существенно реже и в тех случаях, когда в качестве датчиков используются устройства периодического действия (хроматографы, масс-спектрометры и т.д.). Структурная схема импульсной САР показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема импульсной САР Р – регулятор, РМП – реверсивный магнитный пускатель; МЭО – исполнительный механизм электрический однооборотный; РО – регулирующий орган; ПП – первичный преобразователь

Регулятор осуществляет преобразование сигнала рассогласования в последовательность импульсов. При этом длительность (ширина) импульсов зависит от величины сигнала рассогласования, выбранного закона преобразования и величины параметров настройки. Чаще всего, при этом используется ПДпреобразование (пропорционально-дифференциальное) или ПДД²–преобразование. Импульсный механизм типа МЭО по своим динамическим характеристикам представляет собой идеальное интегрирующее звено с передаточной функцией вида (1).

$$W_{\rm HM}(S) = \frac{1}{T_{\rm HM} \cdot S}; \tag{1}$$

где T_{им} – постоянная времени исполнительного механизма – время перехода выходного вала исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое крайнее положение, с.

Так как сигнал рассогласования последовательно преобразуется регулятором и исполнительным механизмом, передаточная функция этих двух элементов системы будет определяться как произведение их передаточных функций. То есть приближенно в них будут реализованы типовые законы регулирования (ПИ и ПИД). Данное положение можно проиллюстрировать графиками изменения выходных сигналов импульсного ПИрегулятора (x_p), исполнительного механизма ($x_{им}$) при ступенчатом характере изменения входного сигнала регулятора (ϵ), рис. 2.



Рис. 2. Графики изменения сигналов $\epsilon(t)$, $X_p(t)$, $X_{им}(t)$ κ_n – коэффициент передачи; $T_{и3}$ – время удвоения – изодрома

На графике (рис. 2) пунктиром показана переходная характеристика непрерывного ПИ-регулятора.

В настоящее время выпускается достаточно большое ко-

личество импульсных регуляторов, программное обеспечение практически всех регулирующих контроллеров включает в себя алгоритмы импульсного регулирования. На многих отечественных предприятиях в схемах автоматизации широко используются импульсные регуляторы РС25, РС29 (МЗТА), регуляторы комплексов технических средств АКЭСР – 2, «Контур» и т.д.

В лабораторной работе исследуется САР расхода воздуха, в которой ТОУ является участок трубопровода от места установки измерительного устройства до места установки регулирующего органа. Подобные объекты характеризуются малой инерционностью, наличием высокочастотных составляющих в сигнале измерения расхода, обусловленных пульсациями давления газа или жидкости в трубопроводе. В САР расхода газа или жидкости отсутствие инерционности объекта приводит к тому, что на работу САР начинают оказывать влияние статические и динамические свойства остальных элементов системы. Поэтому при расчете данных систем необходимо учитывать параметры этих элементов (коэффициенты передачи, постоянную времени и время запаздывания). Выбор закона регулирования обычно диктуется требуемым качеством регулирования, но в промышленных условиях ПД и ПИД законы применять не рекомендуется, так как их использование может привести к неустойчивой работе системы при высокочастотных помехах в измерительном сигнале. Вследствие малой инерционности элементов, входящих в систему, ее рабочая частота будет достаточно большой. Исходя из этого, при выборе регулирующего устройства необходимо проверять, укладывается ли данная частота в диапазон рабочих частот регулятора. При использовании многоканальных контроллеров необходимо проверять обеспечит ли выбранное время цикла контроллера (T_u) выполнение условия теоремы Котельникова-Шеннона (2), при котором искажение сигнала измерительной информации сводится к минимуму.

$$T_{II} \le \frac{1}{(2 \div 8) \cdot f_{max}};$$
⁽²⁾

где f_{max} – максимальная частота спектральной плотности сигнала, поступающего на вход контроллера.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИМПУЛЬСНЫХ САР РАСХОДА ВОЗДУХА

Принципиальная электрическая схема стенда по исследованию импульсных САР расхода воздуха показана на рис. 3. Она включает в себя:

- 1) Регулятор РС29;
- 2) Пускатель бесконтактный реверсивный ПБР-3А;
- Электрический исполнительный механизм МЭО-250/63-0,25;
- Преобразователь перепада давления САПФИР-22МТ мод. 2410;
- Блок питания преобразователя САПФИР-22 МР-БПД-40-2К;
- 6) Регистрирующий прибор РП-160;
- 7) Переключатель режима работы SA-3;
- 8) Нагнетатель воздуха с двигателем М;
- 9) Блок питания БП-10;
- 10) Клемные колодки ХТ1 и ХТ2;
- 11) Электрический автомат SF1.

Кроме этого, в схему входят ряд устройств, которые не используются в лабораторной работе (контроллер Simatic S7-300, термометр сопротивления ТСП, тиристорная схема питания тэнов).

В лабораторной работе по исследованию импульсной САР используется регулятор PC29.1.12M, который включает в себя регулирующий модуль – Р 029, измерительный модуль – ИУ 012, источник питания ИПС 011. Функциональная схема регулятора представлена на рис. 4.

Измерительный модуль осуществляет:

- формирование сигнала задания;
- формирование сигнала рассогласования путем суммирование со своими знаками входных сигналов и сигнала задания;
- динамическое преобразование сигналов по дифференциальному или апериодическому закону;
- аналого-релейное преобразование сигнала по двум независимым каналам.



Рис. 3. Принципиальная электрическая схема стенда по исследованию импульсных САР расхода воздуха



Рис. 4. Функциональная схема регулятора РС29. ТТ – трехпозиционный триггер; УМ – усилитель мощности (бесконтактные ключи); БОС – блок обратной связи

В узле формирования задания модуля ИУ012 суммарный сигнал задания определяется по следующему выражению (3).

$$y_{3\Pi} = \pm x_{K} \pm x_{3\Pi} + x_{3}, \qquad (3)$$

где x_{κ} – сигнал корректора (широкодиапазонного задатчика), используется для балансировки модуля; $x_{3\pi}$ – сигнал оперативного задатчика; x_3 – сигнал внешнего задатчика, при его отсутствии $x_3 = 0$.

На узел формирования сигнала рассогласования (ϵ), кроме задания (y_{3n}) может поступать от одного до четырех входных сигналов. При этом возможны следующие сочетания датчиков входных сигналов:

- три сигнала от дифференциально-трансформаторных преобразователей и один унифицированный сигнал постоянного тока;
- два сигнала от дифференциально-трансформаторных преобразователей и два унифицированных токовых сигнала;
- два сигнала от дифференциально-трансформаторных преобразователей, один унифицированный токовый сигнал и один сигнал постоянного напряжения (0±10В).

Сигналы, подаваемые на два входа (x_6, x_8) умножаются на масштабные коэффициенты κ_1 и κ_2 , которые могут изменяться от 0 до 1.

Для первого сочетания датчиков величина сигнала рассогласования будет определяться по выражению (4).

$$\varepsilon(t) = \pm x_1 \pm \kappa_1 \cdot x_6 \pm \kappa_2 \cdot x_8 - y_{3\mathcal{I}}, \qquad (4)$$

где x₁ – унифицированный токовый сигнал; x₄, x₆, x₈ – сигналы от дифференциально-трансформаторных датчиков.

В зависимости от реализуемого закона регулирования (ПИ или ПИД) сигнал рассогласования может подаваться на блок апериодического (ПИ) или динамического (ПИД) преобразования. Блок апериодического преобразования может быть описан передаточной функцией вида (5), а динамического (6).

$$W_{a\Pi}(S) = \frac{1}{T \cdot S + 1},$$
(5)

$$W_{\Pi}(S) = \frac{T \cdot S}{T \cdot S + 1}.$$
 (6)

Аналого-релейный преобразователь (АРП) состоит из двух независимых каналов и позволяет реализовать двух или трехпозиционное регулирование. Каждый канал имеет пороговое устройство с неизменяемой зоной неоднозначности и настраиваемой уставкой β_B ÷ β_H . На выходе АРП установлены магнитоуправляемые контакты. Для перевода регулятора в режим

позиционного регулирования необходимо переключатель рода работы установить в положение «Г"».

Регулирующий модуль осуществляет:

- демпфирование входного сигнала;
- формирование выходных импульсных сигналов в соответствии с одним из законов регулирования ПИ (совместно с исполнительным механизмом), ПИД (совместно с исполнительным механизмом и узлом динамического преобразования), П (совместно с датчиком положения выходного вала исполнительного механизма), трехпозиционное регулирование с ИМ постоянной скорости;
- формирование сигнала для индикатора положения выходного органа ИМ.

Регулирующий модуль включает в себя демпфер, сумматор прямого канала, трехпозиционный триггер, блок обратной связи. Демпфер представляет собой фильтр экспоненциального сглаживания первого порядка с передаточной функцией вида:

$$W_{\rm dfl}(S) = \frac{1}{T_{\rm d}\phi \cdot S + 1},$$
(7)

где $T_{D\Phi}$ ($\tau_{D\Phi}$) – постоянная времени демпфера, которую можно изменять в процессе настройки регулятора, с.

Трехпозиционный триггер имеет нелинейную статическую характеристику с неизменяемой зоной неоднозначности и изменяемой зоной нечувствительности – Δ . Блок обратной связи включает в себя цепи отрицательной и положительной обратной связи, которые охватывают данный триггер, т.е. на сумматор прямого канала подается два сигнала – сигнал рассогласования (є) и сигнал обратной связи (х_{ос}). Блок обратной связи включает в себя два параметра настройки регулятора: коэффициент передачи – к_п, время интегрирования – Т_и. С помощью данных параметров меняется длительность импульсов и пауз на выходе трехпозиционного триггера. Импульсы с данного триггера поступают на усилитель мощности, который представляет собой два бесконтактных ключевых элемента, срабатывающих при определенной полярности входного сигнала (импульса). В зависимости от полярности импульсов (и открытия соответствующих ключей) меняется направление вращения двигателя исполнительного механизма (МЭО). Время перехода исполнительного механизма из одного крайнего положения выходного вала редуктора в другое крайнее положение (Т_{им}) оказывает влияние на работу импульсной САР. Данное время входит в уравнение, формирующее приближенно закон регулирования (8). При наладке САР, изменяя положение конечных выключателей, ограничивающих верхний и нижний пределы хода выходного вала ИМ, изменяют не только диапазон перемещения регулирующего органа (заслонки), но и данное время.

$$W_{p}(S) = \frac{100 \cdot \kappa_{\Pi}}{T_{\mu M}} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{\mu} \cdot S}\right)$$
(8)

Для реализации ПИД-закона регулирования сигнал рассогласования предварительно преобразуется динамическим преобразователем модуля ИУ012.

Режимы работы регулятора, его параметры и величина задания меняются и оцениваются с помощью органов управления и индикации, расположенных на двух его панелях.

На передней панели регулятора расположены:

- переключатель рода управления ([∪] автоматическое, ^Ψ ручное);
- ключ ручного управления (▲ больше, ▼ меньше);
- орган изменения сигнала оперативного задатчика;
- световые индикаторы срабатывания каналов аналогорелейного преобразователя («/¬», «-/»);
- световые индикаторы выхода (▲ больше, ▼ меньше);
- стрелочные индикаторы рассогласования и положения исполнительного механизма.

На панели настройки расположены:

- потенциометры изменения масштабных коэффициентов входных сигналов (α₁ и α₂);
- корректор (широкодиапазонный задатчик) для балансировки прибора (К) и гнезда для изменения знака сигнала корректора;
- потенциометры 0 100% для настройки указателя положения ИМ;

- тумблер рода работы (ПИ "");
- потенциометр для изменения коэффициента передачи регулятора (α_n);
- потенциометр для изменения длительности включений в пульсирующем режиме (t_и);
- потенциометр и гнезда для плавного и дискретного изменения величины постоянной времени интегрирования (т_и);
- потенциометр для изменения постоянной времени демпфирования (т_{аф});
- потенциометр для изменения зоны нечувствительности (Δ).

В импульсной САР используется электрический исполнительный механизм. Его обозначение - МЭО-250/63-0,25 расшифровывается следующим образом: механизм электрический однооборотный с номинальным моментом на валу 250 Н·м, временем одного оборота выходного вала 63 сек, номинальным полным ходом выходного вала 0, 25 оборота. В качестве привода в ИМ используется трехфазный асинхронный электродвигатель 2ДСР, реверсирование двигателя достигается переключением фаз в обмотках электродвигателя. Кроме этого в состав ИМ входят:

- понижающий шестеренчатый редуктор;
- электромагнитный тормоз;
- блок датчиков положения выходного вала ИМ;
- упоры и конечные выключатели.

Измерение расхода воздуха осуществляется с помощью камерной диафрагмы, установленной на трубопроводе. Кроме этого на трубопроводе установлен регулирующий орган (заслонка), соединенная системой рычагов с выходным валом ИМ и ручной кран для нанесения возмущающих воздействий на систему.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 1. Исследовать особенности САР расхода воздуха. Для этого:
 - включить нагнетатель;
 - перевести регулятор в режим ручного управления (^(W));
 - используя ключ ручного управления (♥, ▲), перевести регулирующий орган в открытое состояние (рычаг заслонки при этом должен находиться в крайнем левом положении ≦);
 - открывая и закрывая выходное отверстие крана убедиться в том, что ТОУ и измерительная система (диафрагма – дифманометр – регистрирующий прибор) пропускает высокочастотные возмущающие воздействия (пульсации расхода воздуха), т.е. ТОУ и измерительная система имеют очень малую инерционность.
- В режиме ручного управления определить время перевода исполнительного механизма из одного крайнего положения в другое. При этом «закрытое» крайнее положение регулирующего органа зафиксировать по показаниям прибора РП-160, в момент, когда он покажет 0%.
- 3. Установить параметры настройки регулятора РС-29 в следующее положение:
 - время демпфирования (τ_{дф}) max (повернуть движок потенциометра вправо до упора);
 - зона нечувствительности (Δ) 2%;
 - коэффициент передачи регулятора (*a*_n) 5%;
 - постоянная времени интегрирования(**т**_и) 25 с.
- 4. Включить кнопкой нагнетатель воздуха с помощью переключателя рода управления, перевести регулятор в режим «Автоматическое» ⁽⁾. С помощью корректора широкодиапазонного задатчика (К) и потенциометра оперативного задатчика, расположенного на лицевой панели регулятора, установить перепад давления на отметке 40% шкалы прибора РП-160.
- 5. Включить двигатель диаграммной бумаги на приборе РП-160 и нанести возмущающее воздействие на САР с помощью

«красного» крана, установленного на трубопроводе объекта управления (открыть кран, примерно, на 30 угловых градусов).

- 6. После завершения переходного процесса в САР (стрелка прибора РП-160 устанавливается на 40% шкалы) установить коэффициент передачи регулятора на 1% и нанести возмущающее воздействие на САР путем закрытия «красного» крана на трубопроводе.
- 7. После завершения переходного процесса в САР установить коэффициент передачи регулятора на 5%, а время интегрирования на 5 сек. и повторить пункт №5.
- Не меняя параметров настройки регулятора оценить влияние на качество регулирования зоны нечувствительности регулятора (Δ). Для этого установить зону нечувствительности: Δ = 0; Δ = max.
- 9. Оценить влияние на качество регулирования постоянной времени демпфера. Для этого установить $T_{D\Phi} = 0$; $T_{D\Phi} = \max$ и, открывая и закрывая выходное отверстие крана нанесения возмущающего воздействия приближенно оценить частоту колебания возмущения, которое не пропускается демпфером при $T_{D\Phi} = \max$.
- По полученным графикам переходных процессов в САР определить время регулирования при допустимой статической ошибке 1%, длительность импульсов и пауз, статическую ошибку для различных значений зоны нечувствительности.
- Установить параметры настройки регулятора, указанные в пункте 3. Постепенно увеличивая коэффициент передачи регулятора (α_n), найти его критическое значение, т.е. состояние САР, при котором возникают незатухающие колебания.
- Установить параметры настройки регулятора, указанные в пункте 3.Постепенно изменяя время интегрирования (т_н), определить ее критическое значение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Назовите основные особенности САР расхода жидкостей и газов.
- 2. Какие рекомендации необходимо использовать при расчете параметров настройки САР расхода?
- Приведите передаточную функцию электрического исполнительного механизма МЭО.
- 4. Какая передаточная функция должна быть у импульсного регулятора, чтобы совместно с ИМ типа МЭО обеспечить в САР приближенную реализацию ПИ-закона регулирования?
- 5. Какое сочетание типовых звеньев автоматики рекомендуется использовать для описания импульсных линий, связывающих диафрагму с преобразователем САПФИР 22МТ?
- 6. Какие элементы входят в состав ИМ типа МЭО?
- 7. Назовите основные функции регулирующего модуля регулятора РС29.
- 8. Назовите основные функции измерительного модуля регулятора PC29.
- 9. С помощью какого параметра настройки регулятора РС29 можно изменить длительность импульсов?
- 10. С помощью какого параметра настройки регулятора РС29 можно изменить длительность пауз между импульсами?
- 11. Для какой цели в схему регулятора включен демпфер?
- 12. На какие показатели качества регулирования повлияет зона нечувствительности регулятора?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен включать в себя:

1. Титульный лист с наименованием лабораторной работы и Ф.И.О. студента.

- 2. Цель работы.
- 3. Функциональную схему регулятора.
- 4. Результаты исследования САР расхода воздуха.
- 5. Результаты исследования импульсной САР в форме

табл. 1. При определении времени регулирования допустимая статическая ошибка будет равна 2 % от диапазона шкалы прибора ПП-160.

6. Выводы по работе.

Таблица 1

№ п/п	Параметры настройки				Показатели качества				
	регулятора				регулирования				
	Кп	Ти	T _{дφ}	Δ	Уст	Уд	t _p	Ψ	
1									
2									
3									
4									
5									

Результаты исследования импульсной САР

Лабораторная работа №4 «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И НАСТРОЙКИ КАСКАДНЫХ САР»

Составил: к.т.н., доцент А.В. Чупин

введение

Каскадные системы применяют в схемах автоматизации технологических объектов, обладающих большой инерционностью и запаздыванием управляющих каналов, если можно выбрать менее инерционную промежуточную переменную по отношению к основным возмущающим воздействиям и использовать для нее то же управляющее воздействие, что и для регулируемой переменной. Использование каскадных САР для таких объектов позволяет существенно повысить качество регулирования.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение и исследование методов расчета и экспериментальной настройки регуляторов в каскадных САР с односторонней автономностью.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Каскадные САР рекомендуется использовать для управления объектами, обладающими следующими особенностями:

1) управляющий канал объекта обладает большим запаздыванием и инерционностью;

 в объекте можно выбрать промежуточную переменную менее инерционную к основным возмущающим воздействиям;

 для управления выбранной промежуточной переменной можно использовать то же регулирующее воздействие (регулирующий орган), что и для основной управляемой переменной; 4) для выбранной промежуточной переменной существуют методы и средства измерения.

В настоящее время известны три типа каскадных САР:

- обычная каскадная САР;

- каскадная САР с сигналом из промежуточной точки управляющего канала;

- каскадная САР с односторонней автономностью.

Условия использования (возможность разбивки управляющего канала на два участка) двух последних САР совпадают. Реализация их в микропроцессорных контроллерах не вызывает затруднений. При этом, экспериментальная настройка каскадной САР с односторонней автономностью существенно проще, чем каскадной САР с импульсом из промежуточной точки. Поэтому в производственных условиях, где широко используются экспериментальные методы настройки регуляторов, рекомендуется использовать каскадные САР с односторонней автономностью.

Обычная каскадная САР используется в тех случаях, когда канал управления промежуточной переменной не входит в состав канала управления регулируемой переменной. Структурная схема такого объекта управления показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема объекта управления в обычной каскадной САР

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

W, W_1 - передаточные функции каналов управления регулируемой (y) и промежуточной (y') переменной;

 F_1 - основное возмущающее воздействие, оказывающее влияние на *y* и *y*';

 F_2 - возмущающее воздействие, влияние которого на регулируемую переменную не изменяется при переходе от одноконтурной к каскадной САР;

U - управляющее воздействие.

Примером объекта, для управления которым можно использовать обычную каскадную САР, является кожухотрубный теплообменник, рис. 2.



Рис. 2. Схема управления кожухотрубным теплообменником

Для показанного на рис. 2 объекта основным возмущающим воздействием F_1 будет колебание давления пара, а возмущающим воздействием F_2 - колебание температуры и расхода жидкости, поступающей в теплообменник. Регулируемая переменная y - температура жидкости на выходе из теплообменника, а промежуточная переменная y' - расход пара.

Каскадные САР с сигналом из промежуточной точки и с односторонней автономностью используются в тех случаях, ко-

гда управляющий канал регулируемой переменной разбивается на два участка: опережающий (W_{on}) и инерционный (W_u) . Структурная схема такого объекта показана на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема объекта в каскадных САР с сигналом из промежуточной точки и с односторонней автономностью

Примером объекта, для управления которым можно использовать данные каскадные САР, может служить технологическая схема, включающая в себя реактор (Х.Р) и кожухотрубный теплообменник (КТ), рис. 4.



Рис. 4. Схема регулирования температуры в химическом реакторе

В каскадной САР с односторонней автономностью используется динамический компенсатор, представляющий собой математическую модель опережающего участка управляющего канала объекта. Его применение в САР позволяет осуществить динамическую развязку основного и вспомогательного контура, и, как следствие, дает возможность независимой настройки регуляторов. Другим достоинством данной САР является её более высокая эксплуатационная надежность, так как при отказе вспомогательного контура, САР продолжает работать, как одноконтурная система.

Структурная схема объекта регулирования (химический реактор) показана на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема ТОУ

U – управляющее воздействие – положение регулирующего клапана на трубопроводе подачи пара в кожухотрубный теплообменник, % x.p.o.; T_p – peryлируемая переменная (температура в химическом реакторе), °C ; T_c – промежуточная переменная (температура реакционной смеси после кожухотрубного теплообменника), °C. Возмущающие воздействия: Р – давление пара в трубопроводе перед регулирующим клапаном, КПА; Т₂ – температура смеси, поступающей в кожухотрубный теплообменник, °C; f₂ – расход реакционной смеси, поступающей в кожухотрубный теплообменник, т/ч; Т₁ – температура реагента, поступающего непосредственно в химический реактор, $^{\circ}C$.

Расход реагента f_1 принимаем постоянным (неизменным в процессе работы реактора), поэтому его в состав возмущающих воздействий можно не включать. Структурная схема каскадной САР с односторонней автономностью приведена на рис. 6.



Рис. 6. Схема каскадной САР с односторонней автономностью W_{on} , W_{H} - опережающий и инерционный участки объекта управления; R_1 , R_2 - основной и вспомогательный регулятор САР; Wк – динамический компенсатор; F_1 - возмущения, которые оказывают влияние на вспомогательную переменную Y_2 ; F_2 - возмущения, которые не оказывают влияние на вспомогательную переменную Y_2

РАСЧЕТ КАСКАДНОЙ САР С ОДНОСТОРОННЕЙ АВТОНОМНОСТЬЮ

1. Получить у преподавателя параметры моделей опережающего и инерционного участков управляющего канала объекта.

Передаточные функции опережающего (1) и инерционного (2) участка управляющего канала объекта имеют следующий вид:

$$W_{on}(P) = \frac{K_{on}}{T_{on}P+1} \cdot e^{-\tau_{on}P}; \qquad (1)$$

$$W_{II}(P) = \frac{K_{II}}{T_{II}P+1} \cdot e^{\tau_{II}P}; \qquad (2)$$

2. Вычислить параметры управляющего канала объекта по выражению (3).

$$W_0(P) = W_{on}(P) \cdot W_H(P) = \frac{K_0}{(T_{on}P + 1)(T_HP + 1)} \cdot e^{-\tau_0 P}, \quad (3)$$

где $K_0 = K_{on} \cdot K_H$; $\tau_0 = \tau_{on} + \tau_H$.

3. Запустить программу IPC CAD.

4. Выбрать в меню каскадную САР с односторонней автономностью.

5. Ввести передаточные функции опережающего и инерционного участка управляющего канала и на экране монитора проверить правильность введенных параметров.

6. Выполнить расчет регулятора одноконтурной САР, для этого последовательно выбрать пункты меню: «Расчет регулятора» → «Расчет параметров регулятора» → «ПИД-регулятор» → «С умеренным затуханием».

7. Записать полученные значения параметров настройки регулятора.

8. Построить график переходного процесса в одноконтурной САР, для этого последовательно выбрать пункты меню: «Выбор воздействий» \rightarrow «Возмущение на входе объекта (по нагрузке)» \rightarrow «Единичный скачок» \rightarrow «Моделирование переходного процесса в САР».

9. Записать полученные значения показателей качества регулирования.

10. Проверить САР «На грубость», записать показатели качества регулирования, полученные в режиме проверки САР «На грубость».

11. Нажав клавишу «ESC» вернуться в меню «Режим работы» и выбрать пункт меню: «Настройка САР с односторонней автономностью».

12. Провести настройку каскадной САР, для этого выбрать пункты меню: «Настройка регулятора R2 каскадной САР» \rightarrow «Расчет параметров регулятора» \rightarrow «ПИ-регулятор» \rightarrow «С умеренным затуханием».

13. Нажав клавишу «ESC» вернуться в меню «Режим настройки САР с односторонней автономностью» и рассчитать параметры настройки регулятора R1 и компенсатора последовательно выбрав пункты меню: «Настройка регулятора R1 и компенсатора» \rightarrow «Расчет параметров регулятора» \rightarrow «ПИДрегулятор» \rightarrow «С умеренным затуханием» \rightarrow «Расчет параметров компенсатора» \rightarrow «Компенсатор первого порядка с запаздыванием».

14. Записать параметры настройки регуляторов и компенсатора.

15. Построить график переходного процесса в каскадной САР, для этой цели выбрать следующие пункты меню: «Выбор воздействий» \rightarrow «Возмущение на входе объекта (по нагрузке)» \rightarrow «Единичный скачок» \rightarrow «Моделирование переходного процесса в САР»;

16. Записать прямые показатели качества в каскадной САР, проверить её «На грубость» и записать полученные при этом показатели качества регулирования.

17. Построить график переходного процесса в САР при нанесении возмущающего воздействия на входе инерционного участка, для этого вернуться к пункту меню «Выбор воздействий» \rightarrow «Возмущение на входе инерционного участка $F_2 \gg \rightarrow$ «Единичный скачок» \rightarrow «Моделирование переходного процесса в САР».

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НАСТРОЙКИ КАСКАДНОЙ САР С ОДНОСТОРОННЕЙ АВТОНОМНОСТЬЮ

В производственных условиях проведение активного экспериментального исследования объекта управления с целью получения его разгонных, импульсных или частотных характеристик, в большинстве случаев, приводит к нарушению установившихся режимов работы оборудования, что вызывает негативное отношение к данным исследованиям у производственного персонала. Использование пассивных методов исследования объекта связано с большими затратами труда и времени, поэтому данные исследования проводятся довольно редко. В этих условиях получение математической модели объекта управления и расчет параметров настройки регулирующих и корректирующих устройств на основе данной модели не представляется возможным. Поэтому в производственных условиях настройка регуляторов осуществляется экспериментальным путем.

Экспериментальная настройка каскадной САР с импульсом из промежуточной точки вызывает определенные затруднения в связи с тем, что в процессе настройки основного регулятора, реакция вспомогательного регулятора вносит дополнительные изменения в переходные процессы каскадной САР, что не всегда позволяет специалисту, выполняющему настройку регулятора, адекватно оценить реакцию системы на изменение параметров настройки основного регулятора. Появление каскадной САР с односторонней автономностью позволило устранить данную проблему и для настройки каскадной САР стало возможным использование метода незатухающих колебаний и ряда других экспериментальных методов. Для приобретения навыков экспериментальной настройки каскадных САР с односторонней автономностью методом незатухающих колебаний можно использовать модель данной САР, реализованную в среде пакета «SIMULINK» системы Matlab 6.5, рис. 7.



Рис. 7. Модель каскадной САР с односторонней автономностью

Последовательность выполнения работы

При выполнении данного раздела лабораторной работы используется метод незатухающих колебаний, в котором поиск критических значений коэффициента передачи регулятора и критической частоты колебаний регулируемой переменной осуществляется экспериментально.

1. Создать модель каскадной САР с односторонней автономностью.

1.1. Запустить систему Matlab двойным щелчком левой клавиши мыши по ярлычку "Matlab" и в появившемся окне на панели инструментов одинарным щелчком левой клавиши мыши по кнопке "Simulink" э открыть окно браузера библиотек пакета. Построение исследуемой модели системы осуществляется в пустом окне модели Simulink, которое открывается одинарным щелчком левой клавиши мыши по пиктограмме (

1.2. Блоки библиотеки, которые будут использованы для построения модели каскадной САР с односторонней автономностью "перетащить" в пустое окно модели Simulink. Это блоки: «Transfer Fcn» (3), «Transport Delay» (3) – Continuous, "Sum" (4) - "Math Operation", "Scope"(2) - Sinks (регистраторы сигналов), "Constant"(2) - Sourses (источники сигналов), Sinks (регистраторы сигналов), PID Controller (2) – Simulink Extras –Additional Linear.

1.3 Установить связи между блоками. Для этой цели маркер мыши подводится к входу или выходу блока. При превращении маркера в перекрещивающиеся линии необходимо нажать на левую клавишу мыши и не отпуская клавиши переместить "крест" к выходу или входу блока, с которым исходный блок должен иметь связь. Если необходимо повернуть блок, установите курсор на изображение блока и нажмите правую клавишу, в появившемся меню выделите строку «Format» и далее «Rotate block».

1.4 Установить параметры в опережающем, инерционном участках объекта управления и динамическом компенсаторе

102

(для этой цели использовать значения параметров, которые использовались при расчете САР в системе IPC CAD).

1.5 Убрать в модели две линии связи «выход компенсатора – сумматор», «выход основного регулятора – сумматор» и выполнить настройку вспомогательного регулятора. Для этого:

- установить в регуляторе П – закон регулирования (C₀= 0, C₂=0);

- установить C1 = 0,5;

- увеличивая C1 и нанося ступенчатые воздействия на опережающий участок ТОУ получить в САР незатухающие колебания;

 определить критические значения коэффициента передачи чи вспомогательного регулятора и критической частоты колебаний регулируемой переменной;

- используя выражения (6) и (7) вычислить параметры настройки ПИ-регулятора;

$$C_1 = 0,45C_1^{\kappa p}; (6)$$

$$C_0 = 0.086C_1^{\text{KP}} \cdot \omega_{\text{KP}} \tag{7}$$

- установить полученные значения параметров вспомогательного регулятора в модели САР.

1.6 Восстановить в модели две линии связи «выход компенсатора – сумматор» и «выход основного регулятора – сумматор», убрать линию связи «выход вспомогательного регулятора – сумматор» и выполнить настройку основного регулятора. Для этого повторить последовательность действий, указанных в пункте 1.5, но только для основного регулятора. Вычислить параметры ПИД - регулятора по выражениям (8-10).

$$C_1 = 0.6C_1^{\kappa p}; (8)$$

$$C_0 = 0.192 C_1^{\kappa p} \cdot \omega_{\kappa p}; \qquad (9)$$

$$C_2 = \frac{0.471 C_1^{\kappa p}}{\omega_{\kappa p}};$$
(10)

где $C_1 = K_p, C_0 = \frac{K_p}{T_{u3}}, C_2 = K_p \cdot T_n.$

1.7 Нанося последовательно ступенчатые воздействия на входе опережающего и инерционного участков ТОУ, получить графики переходных процессов. Убрать линию связи «выход вспомогательного регулятора – сумматор» и получить графики переходного процесса в одноконтурной САР.

1.8 Приближенно определить прямые показатели качества регулирования в одноконтурной и каскадной САР с односторонней автономностью, сравнить их между собой и с аналогичными показателями, полученными при моделировании САР в системе IPC CAD.

ВОПРОСЫ К ДОПУСКУ И ЗАЩИТЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

- 1. При каких особенностях объектов управления рекомендуется использовать каскадные САР?
- 2. Приведите структурные схемы обычной и каскадной САР с односторонней автономностью и объясните назначение элементов, входящих в эти системы.
- 3. Какие сочетания законов регулирования рекомендуется использовать в регуляторах каскадных САР?
- Объясните работу обыкновенной каскадной САР температуры потока жидкости на выходе из кожухотрубного теплообменника.
- Объясните работу каскадной САР с односторонней автономностью, которая используется для регулирования температуры в химическом реакторе.
- 6. Влияние каких возмущающих воздействий на качество работы системы существенно уменьшается при замене одноконтурной САР каскадной системой, при регулировании температуры в химическом реакторе?
- Выполните анализ работы каскадной САР с односторонней автономностью и укажите основные достоинства данного типа системы по сравнению с каскадной САР с сигналом из промежуточной точки.

- При каких соотношениях параметров опережающего и инерционного участков управляющего канала объекта (топ, т_и, Топ, Ти, Коп, Ки) существенно улучшаются показатели качества регулирования в каскадных САР по сравнению с одноконтурными системами?
- 9. Какую частоту колебаний регулируемой переменной называют критической, а какую рабочей?
- 10. Объясните суть метода незатухающих колебаний.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет по лабораторной работе должен включать в себя

- 1. Структурную схему каскадной САР с односторонней автономностью.
- 2. Передаточные функции управляющего канала объекта, его опережающего и инерционного участков.
- 3. Результаты исследования одноконтурной и каскадной САР в форме табл. 1.
- 4. Модель каскадной САР с односторонней автономностью в среде Simulink.
- Результаты исследования каскадной САР в среде Simulink (параметры настройки регуляторов, графики переходных процессов).
- 6. Выводы по работе.

Таблица 1

Результаты исследования одноконтурной и каскадной САР

Тип САР	Регу- лятор	Параметры настройки регулятора			Режим моде-	Показатели качества		
		Кр	Ти	Тд	лирования	Уд	Ψ	tp
Однокон- турная	R				Настройка			
					Проверка на «грубость»			

Тип САР	Регу- лятор	Параметры настройки регулятора			Режим моде-	Показатели качества		
		Кр	Ти	Тд	трования	Уд	Ψ	tp
Каскадная САР с од- носторон-	R1				Настройка			
ней авто- номностью (IPC CAD)	R2				Проверка на «грубость»			
Каскадная САР с од- носторон-	R1							
ней авто- номностью (Simulink)	R2							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.

Лабораторная работа №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ»

Составил: к.т.н., доцент А.В. Чупин

введение

Сигналы, поступающие от измерительных преобразователей в управляющий вычислительный комплекс АСУ ТП, включает в себя не только полезную составляющую сигнала, но и помехи, которые формируются случайными воздействиями на процессы измерения, передачи и преобразования сигнала. Поэтому одной из основных задач первичной обработки информации в АСУ ТП является задача фильтрации сигнала, то есть частичное или полное отделение полезной составляющей сигнала от помехи. Фильтрация может выполняться аппаратно с помощью PC, LC фильтров или программно с помощью различных алгоритмов фильтрации. Изучению и исследованию методов и наиболее распространенных алгоритмов фильтрации посвящена данная лабораторная работа.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение и исследование методов и широко распространенных в АСУ ТП алгоритмов фильтрации сигналов измерительной информации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Фильтрация является наиболее сложной из операций первичной обработки сигналов измерительной информации. Полностью отделить помеху от полезной составляющей сигнала чаще всего не удается ввиду случайного характера изменения помехи и полезного сигнала. Поэтому эффективность фильтрации во многом зависит от количества полученной информации о характеристиках этих составляющих сигналов. В большинстве

случаев при решении задачи фильтрации предполагается, что полезный сигнал и помеха являются стационарными случайными величинами, для которых необходимо определить математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию, спектральную плотность. Зная эти характеристики можно найти фильтр и определить его параметры, при которых эффективность фильтрации будет максимальна. Кроме этого, при решении задачи фильтрации, как отмечено в источнике [1], необходимо уяснить, что в поступившем сигнале является помехой, а что полезной составляющей. Например, давление пара в коллекторе – быстропеременный параметр, который зависит от работы котельной, от работы множества аппаратов – потребителей пара и других причин. Если сигнал о значении давления используется в цифровой системе стабилизации давления, то важна его высокочастотная составляющая; расчетах если при техникоэкономических показателей работы котельной и агрегатов, то необходима низкочастотная составляющая сигнала и высокочастотную составляющую можно считать помехой. Наконец, этот же сигнал может использоваться в системах сигнализации и блокировки. Здесь требуется компромиссный вариант, так как короткий выброс давления за пределы "срабатывания" системы не опасен, поэтому его целесообразнее отфильтровать во избежание появления ложных и аварийных сигналов, но если высокое или низкое давление пара удерживается относительно долго, то это может означать неисправность агрегата или системы управления им.

Вспомним определения и методы вычисления основных математических понятий (дисперсии, корреляционной функции, спектральной плотности), используемых в задачах фильтрации измерительной информации.

Дисперсия (\mathcal{I}_x) является мерой отклонения (разброса дискретных значений) случайной величины от её среднего значения (математического ожидания).

$$\mathcal{I}_{x} = M\left[(x - m_{x})^{2}\right] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_{x})^{2} P(x) dx, \qquad (1)$$

где m_x – математическое ожидание случайной величины x(t);

P(x) – плотность вероятности величины x(t).

В практических расчетах вместо дисперсии часто используют среднее квадратичное отклонение, которое имеет ту же размерность, что и сама случайная величина

$$\sigma_x = \sqrt{\mathcal{A}_x} \,. \tag{2}$$

Для оценки скорости изменения случайной величины применяют автокорреляционную функцию:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau)dt .$$
 (3)

Автокорреляционная функция представляет собой среднюю величину произведения двух значений функции x(t), сдвинутых между собой на время τ (рис. 1, а).



Рис. 1. Получение автокорреляционной функции
В структурной схеме получения автокорреляционной функции (рис. 1, в) сдвиг блоком запаздывания дает функцию $x(t-\tau)$, а не $x(t+\tau)$, что не влияет на вид автокорреляционной функции (рис. 1, б), так как $R_x(\tau) = R_x(-\tau)$; $\lim_{\tau \to \infty} R_x(\tau) = m_x^2$.

Аналогично определяется взаимная корреляционная функция $R_{xv}(\tau)$ для двух различных случайных величин, рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема определения взаимной корреляционной функции

Для описания частотных свойств случайной величины (сигнала) используется спектральная плотность, характеризующая распределение мощности сигнала по его гармоническому спектру, т.е. по синусоидальным и косинусоидальным гармоникам, у которых частота каждой последующей гармоники возрастает в два раза. Необходимо напомнить, что мощность гармонического сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды.

Спектральная плотность и взаимная спектральная плотность представляют собой интегральное преобразование Фурье соответственно $R_x(\tau)$ и $R_{xv}(\tau)$.

$$S_{x}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{x} \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau ; \qquad (4)$$

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy} \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau .$$
 (5)

Для практического определения спектральной плотности можно использовать спектральные анализаторы, структурная схема которых показана на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема спектрального анализатора ПФ – полосовой фильтр, пропускающий только гармоническую составляющую сигнала с частотой ω_i ; КВ – квадратор, позволяющий получить мощность гармонической составляющей сигнала с частотой ω_i ; \int - интегрирование сигнала по всему спектру гармоник ($\omega_1 \rightarrow \omega_{\infty}$).

При высоком уровне шумов в регулируемой переменной y(t) и во входной переменной x(t) амплитудно-фазовую частотную характеристику исследуемого канала объекта управления можно определить по следующему выражению:

$$W_{XY}(j\omega) = \frac{S_{YX}(\omega)}{S_X(\omega)}.$$
(6)

Достаточно часто в практике исследования используют понятие «белого шума», у которого гармонические составляющие имеют одинаковую интенсивность (мощность) сигнала на всем диапазоне частот.

Для математической постановки задачи фильтрации рассмотрим схему, показанную на рис. 4.

Ошибка фильтрации $\varepsilon(t)$ содержит две составляющие. Первая ε_1 связана с тем, что некоторая часть помехи все же пройдет через фильтр Φ , а вторая ε_2 – с тем, что изменится форма полезного сигнала при прохождении через фильтр [2]. Таким образом, поиск типа фильтра и его параметров представляет собой задачу минимизации суммарной погрешности.



Рис. 4. Структурная схема оценки качества фильтрации Ф - фильтр; x(t) - полезный сигнал; z(t) - помеха; y(t) - отфильтрованный сигнал; q(t) = x(t) + y(t); $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$

Для определения минимальной среднеквадратичной ошибки фильтрации σ_{ε} необходимо найти спектральную плотность сигнала ошибки $S_{\varepsilon}(\omega)$, которая может быть рассчитана, если известны спектральные плотности полезного сигнала $S_x(\omega)$ и помехи $S_z(\omega)$ и частотная передаточная функция фильтра $W_{db}(i\omega)$.

Для стационарных случайных процессов спектральная плотность сигнала будет находиться по выражению (4). Спектральная плотность показывает, как распределена интенсивность (мощность) сигнала по его гармоническим составляющим в определенном диапазоне частот (теоретически от $-\infty$ до $+\infty$). Поэтому, имея график спектральной плотности полезного сигнала и помехи можно определить параметры идеального фильтра, при которых эффективность фильтрации будет наибольшей. На рис. 5 показаны спектральные плотности двух сигналов, с не перекрывающимися спектральными плотностями полезного сигнала и помехи (а) и с перекрывающимися спектральными плотностями спектральными плотностями (б) и амплитудно-частотные характеристики идеального фильтра для этих случаев.

Из рис. 5, а видно, что спектральные плотности сигнала $S_x(\omega)$ и помехи $S_z(\omega)$ не перекрываются. Поэтому амплитудно-частотная характеристика идеального фильтра должна иметь вид, показанный на рис. 5, а или аналитически представлена в следующем виде:

$$A_{\phi}(\omega) = \begin{cases} 1, & npu\omega \le \omega_1 \\ 0, & npu\omega > \omega_1 \end{cases}$$
(7)





При этом полезный сигнал, проходя через фильтр, не претерпевает никаких изменений, а помеха полностью задерживается фильтром, то есть обе составляющие ошибки фильтрации ε_1 и ε_2 будут равны нулю. На рис. 5-б показан случай, когда спектральные плотности полезного сигнала и помехи в диапазоне частот от ω_1 до ω_2 перекрываются и обе составляющие ошибки фильтрации ε_1 и ε_2 не будут равны нулю. При амплитудно-фазовой характеристике фильтра, показанной на рисунке, низкочастотные составляющие помехи будут пропускаться фильтром и высокочастотные составляющие полезного сигнала будут им искажаться.

Аналитически амплитудно-фазовая характеристика такого фильтра будет иметь следующий вид:

$$A_{\phi}(\omega) = \begin{cases} 1, & npu \ \omega \le \omega_1 \\ & -\frac{\omega_2 - \omega}{\omega_1 - \omega}, & npu \ \omega_1 < \omega < \omega_2 \\ 0, & npu \ \omega \ge \omega_2 \end{cases}$$
(8)

По формулам, связывающим спектральные плотности случайных процессов на входе и выходе линейной системы с её частотной характеристикой можно определить спектральные плотности каждой из составляющих ошибки фильтрации.

Для ошибки, связанной с пропуском помехи, спектральная плотность будет определяться по выражению (9), а для ошибки, связанной с искажением сигнала, по выражению (10).

$$S_{\varepsilon_1}(\omega) = S_z(\omega) \cdot A_{\phi}^2(\omega) \tag{9}$$

$$S_{\varepsilon_2}(\omega) = S_x(\omega) \cdot \left(1 - W_{\phi}(i\omega)\right) \tag{10}$$

где

$$W_{\phi}(i\omega) = A_{\phi}(\omega) \cdot \exp(i\varphi(\omega)) \tag{11}$$

Сумма спектральных плотностей этих составляющих ошибки даст спектральную плотность ошибки фильтрации фильтра (12).

$$S_{\varepsilon}(\omega) = S_{\varepsilon_1}(\omega) + S_{\varepsilon_2}(\omega)$$
(12)

Имея спектральную плотность ошибки фильтрации, по выражению (13) можно рассчитать дисперсию ошибки [3], а по выражению (14) среднеквадратическую ошибку.

$$D_{\varepsilon} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\varepsilon}(\omega) d\omega$$
 (13)

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{D_{\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} S_{\varepsilon}(\omega) d\omega \right)^{0,5}$$
(14)

Реализация идеального фильтра вызывает существенные затруднения, поэтому в АСУ ТП широко распространение получили экспоненциальные фильтры, фильтр скользящего среднего, робастные и статические фильтры.

Фильтр экспоненциального сглаживания первого порядка представляет собой апериодическое звено с передаточной функцией вида (15).

$$W_{\mathfrak{I}_{1}}(S) = \frac{K_{\mathfrak{I}_{1}}}{T_{\mathfrak{I}_{1}}S + 1}$$
(15)

В большинстве случаев $K_{2} = 1$.

Расчет дискретных значений отфильтрованного сигнала при использовании данного фильтра производится по выражению (16) или (17).

$$y_i = \alpha \cdot (q_i - y_{i-1}) + y_{i-1},$$
 (16)

$$y_i = \alpha \cdot q_i + (1 - \alpha) \cdot y_{i-1}, \qquad (17)$$

где α – коэффициент фильтрации, который рекомендуется выбирать в пределах $0,1 \le \alpha \le 0,8$

$$\alpha = \frac{T}{T_{\mathfrak{I}_1}} \tag{18}$$

где T_э, – постоянная времени фильтра;

T – промежуток времени между тактами обработки сигнала.

Фильтр экспоненциального сглаживания второго порядка имеет передаточную функцию вида (19).

$$W_{\mathfrak{I}_{2}} = \frac{K_{\mathfrak{I}_{2}}}{T_{\mathfrak{I}_{2}}^{2} \cdot S^{2} + 2T_{\mathfrak{I}_{2}} \cdot S + 1}$$
(19)

Расчет дискретных значений отфильтрованного сигнала осуществляется путем повторного использования выражений (16) или (17), то есть на первом такте рассчитывается y_i , а на втором y_i^* .

$$y_{i} = \alpha \cdot (q_{i} - y_{i-1}) + y_{i-1} y_{i}^{*} = \alpha \cdot (y_{i} - y_{i-1}^{*}) + y_{i-1}^{*}$$
(20)

Модификацией фильтра экспоненциального сглаживания первого порядка, имеющего меньшую ошибку фильтрации, является фильтр, в котором при расчете дискретных значений сигнала используется метод трапеций.

$$y_i = \alpha \cdot \left(\frac{q_i + q_{i-1}}{2} - y_{i-1}\right) + y_{i+1}$$
(21)

В последние годы большое внимание при решении задач фильтрации стало уделяться робастным фильтрам, обладающим свойством высокой защищенности от влияния грубых, относительно больших "выбросов" сигналов измерительной информации [4].

Наиболее простым и часто применяемым фильтром является фильтр релейно-экспоненциального сглаживания первого порядка, в котором используется функция "срезки".

$$y_{i} = \begin{cases} \Delta, & ecnu \ \delta \geq \Delta \\ y_{i-1} + \alpha \cdot (q_{i} - y_{i-1}), & ecnu \ |\delta| < \Delta \\ -\Delta, & ecnu \ \delta \leq -\Delta \end{cases}$$
(22)

где Δ – величина "порога", которую не должен превышать отфильтрованный сигнал y(t).

Обычно

$$\Delta = (2 \div 3)\sigma_y + \Delta^* \tag{23}$$

где Δ^* – максимально возможное приращение медленно меняющего полезного сигнала x(t); σ_y – среднеквадратичное отклонение y(t) без учета грубых выбросов.

$$\delta_i = q_i - y_{i-1} \tag{24}$$

Фильтр скользящего среднего имеет передаточную функцию вида (25)

$$W_{\phi}(S) = \frac{1 - e^{-T_{\phi} \cdot S}}{T_{\phi} \cdot S}, \qquad (25)$$

где T_{ϕ} - параметр настройки фильтра.

При реализации фильтра скользящего среднего на УВК расчет отфильтрованного сигнала измерительной информации выполняется по формуле (26).При этом для получения скользящего среднего N значений сигнала суммируются с одинаковыми весами и полученная сумма делится на число N.

$$y_i = \frac{1}{N+1} \sum_{\kappa=0}^{N} q(i-\kappa),$$
 (26)

где $N = \frac{T\phi}{T} - 1$.

Статические фильтры формируют сигнал измерительной информации как взвешенную сумму отсчетов величины q_i [5]. Простейшим из этой группы является статический фильтр нулевого порядка, выходной сигнал которого получается умножением входного сигнала q_i на весовой коэффициент K.

$$y_i = K \cdot q_i \tag{27}$$

При расчете по этой формуле сигнал y_i оказывается смещенным относительно математического ожидания M_y , поэтому расчет рекомендуется выполнять по формуле (28).

$$y_i = B \cdot q_i + M_y (1 - B) \tag{28}$$

Величина *В* является параметром настройки алгоритма и выбирается из условия минимума дисперсии погрешности фильтрации.

Все перечисленные фильтры не позволяют добиться идеальной фильтрации даже при непересекающихся спектрах полезного сигнала и помехи. Поиск оптимальных значений параметров фильтра из условия, получения минимума средней квадратичной ошибки фильтрации σ_{ε} , теоретически может быть выполнен путем подстановки частотных характеристик фильтра и спектральной плотности полезного сигнала и помехи в выражение (29), с последующим вычислением интеграла (14) и поиском его минимума.

$$S_{\varepsilon}(\omega) = S_{Z}(\omega) \cdot A_{\phi}^{2}(\omega) + S_{X}(\omega) \cdot A_{\phi}^{2}(\omega) + S_{X}(\omega) - 2S_{X}(\omega) \cdot A_{\phi}(\omega) \cdot \cos(S_{\phi}(\omega))$$
(29)

Выбор вида алгоритма фильтрации в АСУ ТП проводится не только по величине средней квадратичной ошибки фильтрации. В условиях режима реального времени существенное значение имеет время вычисления отфильтрованного сигнала по выбранному алгоритму и задействованный при этом объем памяти ОЗУ, то есть иногда необходимо «жертвовать» минимальной ошибкой фильтрации для сокращения времени вычисления отфильтрованного сигнала.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ В СРЕДЕ ПАКЕТА SIMULINK

Как было отмечено ранее, при решении различных задач в АСУ ТП достаточно часто необходимо использовать различные частотные составляющие сигналов, поступающих на вход контроллеров или других элементов системы. Для выделения данных составляющих сигнала используются различные типы фильтров. Для выделения низкочастотной составляющей сигнала используются фильтры низкой частоты (ФНЧ), которые пропускают колебания с частотами не выше некоторой граничной частоты. Фильтры высокой частоты (ФВЧ) пропускают колебания с частотами выше граничной частоты. Заграждающие (режекторные) фильтры не пропускают колебания в определенной полосе частот, а колебания с частотами, выходящими за пределы этой полосы, проходят через эти фильтры без изменения. Полосовые фильтры пропускают колебания в конечном интервале частот (полосе частот), подавляя колебания с частотами, выходящими за эти интервалы.

Простейшим фильтром колебаний низкой частоты является апериодическое звено первого порядка (15) с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) показанной на рис. 6.



Рис. 6. ЛАЧХ апериодического звена первого порядка

Постоянная времени (Т) и коэффициент передачи (k) звена (параметры фильтра) позволяют изменять полосу пропускаемых колебаний.

Простейшим фильтром колебаний высокой частоты является реальное дифференцирующее звено, имеющая передаточную функцию (30) и ЛАЧХ, показанную на рис. 7.



Рис. 7. ЛАЧХ реального дифференцирующего звена

Заграждающие и полосовые фильтры можно получить, используя в схеме два фильтра (ФНЧ, ФВЧ). При последовательном включении данных фильтров получают полосовой фильтр, а при параллельном – заграждающий. ЛАЧХ данных фильтров показаны на рис. 8 и 9.







Рис. 9 ЛАЧХ полосового фильтра

Для исследования ФНЧ и ФВЧ в среде пакета Simulink необходимо сформировать схему, показанную на рис. 10. В данной схеме использованы два источника синусоидальных сигна-

лов, два виртуальных осциллографа, сумматор и блок "Transfer Fcn".



Рис. 10. Структурная схема исследования ФНЧ (ФВЧ)

На первом этапе исследования, установив указанные преподавателем параметры фильтра, определить его полосу пропускания. Для этой цели необходимо использовать один источник синусоидальных колебаний и принять, что граничной будет частота, при которой амплитуда колебаний на выходе фильтра будет в 10 раз меньше, чем на его входе (оценку амплитуды можно проводить приближенно).

На втором этапе исследования подключить к сумматору второй источник сигналов и установив на нем сигнал с частотой превышающей частоту колебаний выходного сигнала первого источника в 10 раз, определить при каких параметрах фильтра высокочастотный сигнал (помеха) не проходит через фильтр.

Установить в блоке "Transfer Fcn" передаточную функцию реального дифференцирующего звена (30) и определить полосу пропускания ФВЧ.

Для исследования заграждающего фильтра сформировать схему, показанную на рис. 11. Установить параметры фильтра, указанные преподавателем, и изменяя частоту колебаний от источника синусоидальных сигналов определить частоту сигнала, который не проходит через фильтр.



Рис. 11. Схема исследования заграждающего фильтра

Для исследования полосового фильтра сформировать схему, показанную на рис.12. Установить параметры фильтра, указанные преподавателем, и изменяя частоту колебаний источника синусоидальных сигналов определить частоту сигнала, который проходит через фильтр.



Рис.12 Схема исследования полосового фильтра

Результаты исследования занести в таблицу и сделать выводы по результатам исследования.

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ

Для изучения алгоритмов фильтрации сигналов измерительной информации разработана программа на базе интегрированного пакета программ "MatLAB 5.2". Структурная схема лабораторной работы, реализованная в данной программе, представлена на рис. 13.



Рис. 13 Структурная схема лабораторной работы

На рис.13 показаны основные блоки, входящие в программу исследования алгоритмов фильтрации:

ФЭ1 – фильтр экспоненциального сглаживания первого порядка;

ФЭ2 – фильтр экспоненциального сглаживания второго порядка;

ФЭМ – модифицированный фильтр экспоненциального сглаживания;

ФСС – фильтр скользящего среднего;

ФРЭ – робастный фильтр;

ФС – статический фильтр нулевого порядка.

Все выше перечисленные фильтры последовательно устанавливаются в блок Φ_j для оценки их эффективности и экспериментального определения оптимальных значений их параметров при фильтрации сигнала q(t).

ГСС – алгоритм генерации случайных чисел при равномерном или нормальном законе распределения, в программе для реализации данного блока использованы функции RAND и RANDN [6].

 $\Phi \Phi_z$ – блок формирования помехи z(t), представляет собой фильтр с передаточной функцией вида:

$$W_z(S) = \frac{K_z}{T_z \cdot S + 1} \tag{31}$$

 ΦE_x - блок формирования полезного сигнала X(t);

 σ - блок вычисления среднего квадратичного отклонения сигнала q(t), прошедшего через фильтр, от полезного сигнала x(t)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - y_i)^2}{n}}$$
(32)

где n - размерность массивов чисел полезного сигнала x_i и помехи z_i , которые использовались в задачах оценки эффективности фильтров;

 σ_x^2 , σ_z^2 - дисперсия полезного сигнала и помехи;

В^{опт} - блок расчета оптимального значения параметра настройки статического фильтра.

Расчет проводится по следующей формуле:

$$B = \frac{\sigma_z^2}{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} \tag{33}$$

 σ_{ε} - блок расчета дисперсии ошибки, по выражению:

$$\sigma_{\varepsilon}^{T} = \frac{\sigma_{x} \cdot \sigma_{z}}{\sqrt{\sigma_{x}^{2} + \sigma_{z}^{2}}}$$
(34)

 R_x , R_z - блок расчета корреляционной функции помехи и полезного сигнала;

 S_x, S_z - блок расчета спектральной плотности полезного сигнала и помехи.

В структурной схеме имеется два сумматора, в которых проводится сложение и вычитание двух сигналов по следующим выражениям:

$$q(t) = \frac{x(t) + z(t)}{2};$$
(35)

$$e(t) = x(t) - y(t)$$
. (36)

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Лабораторная работа выполняется на ПК "IBM PC" в следующей последовательности:

1. Запустить программу "MatLAB" двойным щелчком левой кнопки "Мыши".

2. В правом окне набрать код лабораторной работы – f и клавишей «ENTER» запустить программу фильтрации.

3. Прочитать на экране монитора условия задания полезного сигнала и помехи.

4. В пределах заданных условий выбрать частоту полезного сигнала и помехи таким образом, чтобы графики спектральной плотности полезного сигнала и помехи не пересекались (оценить это положение визуально, выведя данные графики на экран монитора).

Для удобства визуального наблюдения графического изображения сигнала на экране монитора необходимо учитывать следующие рекомендации:

- время снятия сигнала (*tt*) определяет временной диапазон изображения сигнала на экране монитора, например, при *tt* = 1, график будет лежать в пределах от 0 до 1 сек.; если задать частоту (*ch*) полезного сигнала синусоидальной формы [$x = 200 sin(2\pi ft)$] равной 5Гц, то на экране монитора Вы увидите 5 полных синусоидальных колебаний (5 периодов) сигнала, если же частоту взять равной 50Гц или более, то на экране будет показано 50 колебаний и их изображения, практически, сольются;
- амплитуду и частоту помехи рекомендуется задавать, используя кнопку «самостоятельное задание», после её выделения из семи предлагаемых функций необходимо выбрать любую функцию и задать её параметры;
- амплитуда помехи должна быть соизмерима с амплитудой полезного сигнала (быть равной амплитуде полезного сигнала, в 2÷4 раза меньше или больше), если амплитуда помехи выбирается в 50÷100 раз меньше, то

её влияние на форму полезного сигнала, практически, отсутствует (на экране монитора изменений не наблюдается),

- параметрами функций помехи являются числа (за исключением числа 2π), например, в функции x = 30 · sin(2π · 3t), 30 – амплитуда помехи,3 – частота помехи;
- частота помехи всегда должна быть больше частоты полезного сигнала (в большинстве случаев для технологических объектов управления это соответствует действительности), для первого случая (спектральные плотности полезного сигнала и помехи не пересекаются) в 3÷10 раз больше, для второго случая – в 1,5÷2,5 раза больше.

5. Исследовать эффективность фильтрации сигнала q(t) алгоритмами, которые включены в меню фильтров лабораторной работы. Исследовать влияние величины параметров фильтров на результаты фильтрации. По полученным графикам отфильтрованного сигнала y(t) визуально оценить искажение его формы путем сравнения с полезным сигналом x(t). Оценку искажения осуществлять, используя следующие термины:

- сильно искажена;
- искажена;
- не сильно искажена;
- не искажена.

6. Изменить параметры полезного сигнала и помехи таким образом, чтобы графики спектральной плотности помехи и полезного сигнала частично перекрывались.

7. Повторить пункт 5.

8. Провести сравнительный анализ эффективности различных алгоритмов фильтрации.

Наименование фильтра	Параметры фильтра	Частота и амплитуда		Форма сигнала
1	2	3	4	5
1. ЭС – 1-го порядка	$\alpha = 0,1$	f _x =	f _{z=}	
	$\alpha = 0,3$	$A_{x=}$	A _z =	
	$\alpha = 0,5$			
	$\alpha = 0,8$			
2. ЭС – 2-го порядка	$\alpha = 0,1$			
	$\alpha = 0,3$			
	$\alpha = 0,5$			
	$\alpha = 0,8$			
3.ФЭМ	$\alpha = 0,1$			
	$\alpha = 0,3$			
	$\alpha = 0,5$			
	$\alpha = 0.8$			

Результаты исследования алгоритмов фильтрации

1. Основные понятия, используемые в работе.

1.1. Дисперсия случайной величины (информационно – измерительного сигнала).

1.2. Средне-квадратичное отклонение случайной величины, что оно показывает?

1.3. Автокорреляционная функция случайной величины. Что она показывает и как определяется?

1.4. Взаимная корреляционная функция.

1.5. Спектральная плотность случайного процесса. Как она определяется и что она показывает?

1.6. Какие случайные процессы называются стационарными.

1.7. Автокорреляционная функция и спектральная плотность «белого шума» и постоянного сигнала.

1.8. В чем отличие аппаратных и алгоритмических способов фильтрации сигналов измерительной информации.

1.9. Укажите назначение фильтров ФНЧ, ФВЧ, ЗФ, ПФ.

1.10.Приведите ЛАЧХ фильтров ФНЧ, ФВЧ, ЗФ, ПФ.

2. Постановка задачи оптимальной фильтрации.

2.1. Что в поступающем в PLC сигнале считать помехой, а что полезной составляющей?

2.2. Покажите принципиальную схему определения эффективности фильтрации сигнала.

2.3. Какие две составляющие включают в себя ошибки фильтрации и от чего они зависят?

2.4. Приведите частотную передаточную характеристику фильтра в общем виде.

2.5. Приведите амплитудно – частотную характеристику идеального фильтра и в каком случае его рекомендуется использовать?

2.6. Какой фильтр рекомендуется использовать, когда спектральные плотности полезного и помехи перекрываются?3. Фильтры используемые а АСУ ТП.

3. Фильтры используемые а АСУ III.

3.1. Фильтр экспоненциального сглаживания 1 порядка. Передаточная функция и выражение для расчета дискретных значений отфильтрованного сигнала.

3.2. Фильтр экспоненциального сглаживания 2 порядка.

3.3. Модификация фильтра экспоненциального сглаживания (трапецеидальная).

3.4. Фильтр релейно-экспоненциального сглаживания.

3.5. Фильтр скользящего среднего.

3.6. Статический фильтр нулевого порядка.

4. Результаты исследования алгоритмов фильтрации.

4.1. Схема исследования алгоритмов исследования.

4.2. Выражение для вычисления среднего квадратичного отклонения.

4.3. Обсуждение полученных результатов (табл. 1).

СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет оформляется на листах формата A4 в соответствии с общими требованиями к оформлению текстовых документов. Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель работы.

- 2. Результаты исследования частотных фильтров.
- 3. Структурную схему системы фильтрации (рис. 3).

4. Таблицу с результатами исследования алгоритмов фильтрации.

5. Выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности. – М.: Агропромиздат, 1991. – 445 с.

2. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами: Учебное пособие для вузов / Под редакцией И.М. Масленникова. – М.: Химия, 1986. – 336 с.

3. *Куропаткин П.В.* Теория автоматического управления: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1973. – 598 с.

4. Восстановительно-прогнозирующие системы управления: Учебное пособие / В.П. Авдеев и др. – КемГУ. – 1984. – 90 с.

5. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Под редакцией Е. Б. Карпина. – М.: Агропроиздат, 1985. – 536 с.

6. Потемкин В.Г. Система MatLAB: Справочное пособие. – М.: Диалог-МИФИ, 1998. – 350 с.

Описание пакета Simulink системы MatLAB

Современные версии системы Matlab (начиная с 5.0) поставляются вместе с пакетом расширения Simulink, предназначенным для моделирования динамических систем . В данном пакете реализованы принципы визуально-ориентированного программирования, что обеспечивает простое построение математических моделей. В данном разделе рассмотрим:

- последовательность действий при создания таких моделей

- перечень основных блоков, используемых при создании моделей замкнутых САР.

Последовательность действий в среде пакета «Simulink 4.0» при создания и запуске моделей:

1) Запустить систему Matlab двойным щелчком левой клавиши мыши по ярлычку «Matlab»;

2) В появившемся окне системы Matlab найти панель инструментов основного окна и одинарным щелчком левой клавиши мыши по пиктограмме «Simulink» открыть окно браузера библиотек пакета.

В окне браузера содержится дерево компонентов библиотек пакета Simulink. Для просмотра того или иного раздела библиотеки достаточно выделить данный раздел щелчком левой клавиши мыши по знаку «+» перед данным разделом. В результате в правой части окна «Simulink Browser Library» появится набор пиктограмм этого раздела библиотеки.

3) Для начала построения исследуемой модели системы необходимо одинарным щелчком левой клавиши мыши по пиктограмме (*создание новой модели*) открыть пустое окно модели Simulink

4) Перед построением новой модели необходимо предварительно определить, какие компоненты библиотеки будут использованы в модели. Подробное описание компонентов (блоков) на английском языке в пункте меню браузера библиотек.

После этого, используемые блоки библиотек необходимо «перетащить» в пустое окно модели Simulink. Для этого следует

установить маркер на пиктограмму блока, нажать левую клавишу мыши и, не отпуская клавиши, переместить блок в окно модели.

5) Исследование моделей во временной области можно проводить с использованием блоков библиотеки Simulink из разделов Sourses (источники сигналов) и Sinks (регистраторы сигналов).

6) После того как в окне формирования модели собраны все необходимые блоки, следует *установить связи между блоками*. Для этой цели маркер мыши подводится к входу или выходу блока. При превращении маркера в перекрещивающиеся линии необходимо нажать на левую клавишу мыши и не отпуская клавиши переместить «крест» к выходу или входу блока, с которым исходный блок должен иметь связь. Отпускать клавишу следует после того как перекрещивающиеся линии станут двойными.

Для удаления линии связи или блока необходимо выделить линию или блок и нажать клавишу «Delete» на клавиатуре ПК. Для выделения линии или блока достаточно навести него маркер мыши и нажать ее левую клавишу. При этом по углам рамки блока и на линии связи появляются небольшие темные прямоугольники, которые и являются признаком того, что блок и линия связи выделены.

Для создания надписей в сформированной модели достаточно установить курсор мыши в нужное место окна и дважды щелкнуть левой кнопкой. В появившемся окне с мигающим маркером можно набрать нужную надпись. После нажатия левой кнопки мыши рамка исчезает. Для удаления надписи установить курсор перед надписью и нажать на левую клавишу мыши, в результате чего надпись окажется в прямоугольной рамке (без маркера). Далее необходимо нажать на клавишу «Delete» клавиатуры ПК.

7) Для задания параметров блоков, входящих в модель, необходимо установить курсор на выбранный блок и дважды щелкнуть левой клавишей мыши. При этом появится окно «Block Parameters» с названием выбранного блока, обозначениями и численными значениями его параметров. Установить необходимые параметры и нажать последовательно кнопки «Арply» и «Ок», находящиеся в нижней части окна. При этом данное окно исчезнет, а внутри выбранного блока появится его модель с новыми значениями параметров.

8) Запустить процесс моделирования, используя пункт меню «Simulation» - «Start Simulation» или нажав на кнопку в окне модели.

9) Для *наблюдения графика* переходного процесса, протекающего в собранной системе, нужно кликнув двойным щелчком левой клавиши мыши на блоке **Scope.**

Отмасштабировать полученный график можно

а) автоматически, нажав на пинтограму 🏙 ;

б) принудительно, нажав правой клавишей мыши в любом месте окна и выбрав строку "Axes properties...". В открывшемся окне установите значения Y-min и Y-max.

10) Если диапазон времени моделирования слишком мал или велик, то изменить его можно в меню окна модели. Пункт меню Simulation" - " Configuration Parameters"

Описание способа доступа и параметров настройки основных блоков, используемых при создании моделей замкнутых САР:

1) модуль Transfer Fcn

- <u>расположение</u> модуля в библиотеке: «Simulmk» - «Continuous»

- <u>назначение</u> - изменяя число элементов векторов коэффициентов числителя и знаменателя блока можно получить передаточные функции некоторых типовых звеньев, например, вида (П1) и (П2).

$$W_{1}(s) = \frac{k}{T_{1} \cdot S^{2} + T_{2} \cdot S + 1} \tag{(11)}$$

$$W_2(s) = \frac{k \cdot S}{T \cdot S + 1} \tag{\Pi2}$$

- <u>настройка</u> параметров блока Transfer Fcn осуществляется в окне, вид которого показан на рис. П1.

Для получения передаточной функции (П1) в строку настройки параметров знаменателя «Denominator» вставить дополнительно цифру 1, отделив ее от остальных цифр пробелом. Для получения передаточной функции (4) в строку числителя «Numerator» установить цифру 0 после цифры 1, отделив ее пробелом. Необходимо заметить, что изменение параметров возможно только в том случае, если параметры находятся в квадратных скобках. После этого нажать на кнопки «Apply» и «Ok» левой кнопкой мыши в окне задания параметров блока. Изменяя описанным способом векторы коэффициентов полиномов числителя и знаменателя, можно получить полиномы более высокого порядка.

Block Parameters: Transfer Fcn	×
Transfer Fon	
Matrix expression for numerator, vector expression for denominator. Dutput width equals the number of rows in the numerator. Coefficients are for descending powers of s.	
Parameters	
Numerator:	
Denominator:	
[1 1]	
OK Cancel Help Apply	

Рис. П1. Окно задания параметров блока Transfer Fcn

2) модуль Transport Delay (транспортное запаздывание) - <u>расположение</u> модуля в библиотеке: «**Simulmk» - «Con**tinuous»

- <u>назначение</u> - обеспечивает временную задержку входного сигнала от входного

- <u>настройка</u> времени запаздывания задается в верхнем окне «Time Delay», остальные параметры блока можно оставить без изменения.

3) модуль PID Controller (автоматический регулятор)

- <u>расположение</u> модуля в библиотеке: «Simulink Extras» - «Additional Linear»

- назначение - обеспечивает реализацию ПИД-закона регулирования

- настройка параметров блока PID Controller осуществляется в окне, вид которого показан на рис. П2.

Как видно из рис. П2, в системе Simulmk используется форма записи передаточной функции регулятора, представленная выражением (20). При этом - в окне «Proportional:» вводится значение C_1 ; в окне «Integral:» вводится значение C_0 ; в окне «Derivative:» вводится значение C_2 ;

🙀 Function Block Parameter	rs: PID Controll	er	
PID Controller (mask) (link)]
Enter expressions for proportional, P+I/s+Ds	integral, and deriva	tive terms.	
Parameters			
Proportional:			
1			
Integral:			
1			
Derivative:			
0			
	-		
<u>0</u> K	<u>C</u> ancel	<u>H</u> elp	Apply

Рис. П2 - Окно задания параметров блока Transfer Fcn

4) модуль Sum (сумматор) - расположение модуля в библиотеке: «Simulink» - «Math

Operations»

- назначение - обеспечивает суммирование или вычитание нескольких сигналов

- настройка сумматора состоит из двух этапов:

1) разворот, необходимый для направления в нужную сторону входов и выходов. Осуществляется в следующей последовательности:

- кликните правой кнопкой мыши на изображении сумматора в окне модели;

- в всплывшем меню подведите курсор к строке «Format ▶»:

- в открывшемся ещё одном подменю «Rotate block». Поворачивать нужно столько раз, пока блок не окажется в нужном направлении.

2) формирование количества и знаков входов, осуществляется в окне, вызываемом двойным нажатием левой клавиши мыши на блоке настраиваемого сумматора. В окне «List of signs:» нужно ввести последовательность из символов «+», «-« или «|». При этом: «+» – положительный вход; «-» – отрицательный вход; «|» – отсутствующий (пропускаемый) вход. Последний символ потребуется при необходимости разместить вход сверху или снизу.

Приложение 2 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ІРС САD

Система IPC_CAD **предназначена** для оперативное решение задач настройки про мышленных CAP, их анализа, синтеза и имитационного моделирования на IBM- совместимых ПЭВМ.

По своему назначению и интеллектуальному наполнению система близка к современным экспертным системам. В ней реализованы различные методы анализа, синтеза и моделирования САР, широко используемые при создании АСУ в различных отраслях народного хозяйства. Особенность этих методов заключается в значительном использовании процедур принятия решений на основе плохо формализуемых мнений специалистов- экспертов. При этом выбор тех или иных методов, особенностей и сценариев их использования в каждом конкретном случае, как правило, осуществляется самой системой на основе заложенных в нее экспертных знаний.

Для удобства пользователей предусмотрена возможность работы в режиме «экспресс-наладки», в котором от пользователя требуется лишь задание информации о динамических свойствах объекта управления и о виде настраиваемой САР, в то время как все необходимые расчеты и моделирование выбранного варианта САР, построение графиков переходных процессов и выдача рекомендаций по настройке САР производится системой автоматически. Система ориентирована на наиболее распространенные стандартные конфигурации промышленных САР, реализуемые с помощью широко используемых специальных технических средств (например, контроллеров семейств РЕМИКОНТ, ЛОМИКОНТ и др.). Кроме того, в состав системы включены также средства для настройки некоторых перспективных видов схем САР.

Система позволяет производить анализ, расчет и имитационное моделирование следующих видов САР:

- простой одноконтурной САР с П, ПИ и ПИД- регуляторами;
- одноконтурной САР с предиктором (упредителем) Смита;
- комбинированной САР (с компенсацией измеряемого возмущения);
- САР с использованием опережающего импульса (с дифференциатором или с упредителем);
- обычной каскадной САР, реализуемой в двух различных модификациях (с независимым заданием каналов объекта и с промежуточным импульсом);
- каскадной САР с односторонней автономностью.

Для каждой из перечисленных типовых схем регулирования система позволяет:

1) оперативно вычислять значения параметров настройки регуляторов и корректирующих устройств, обеспечивающие требуемое качество переходных процессов в САР (в интерактивном режиме или в режиме «экспресс-настройки»). Параметры настройки САР предоставляются пользователю в виде рекомендуемых значений коэффициентов типовых законов регулирования и канонических форм операторов корректирующих устройств, а также могут представляться в терминах конкретных технических средств, выбранных пользователем для реализации САР;

2) проводить имитационное моделирование поведения САР при выбранных воздействиях и получать прямые оценки качества переходных процессов;

3) проверять синтезированную или настроенную САР на грубость (чувствительность по отношению к изменениям или неточностям задания динамики объекта регулирования, а также к неточностям реализации с помощью промышленной регулирующей аппаратуры требуемых динамических характеристик регулятора и корректирующих устройств);

4) проводить параметрическую оптимизацию системы по выбранному критерию качества переходного процесса для достижения управления, близкого к оптимальному при заданной структуре CAP;

5) оформлять результаты расчетов и моделирования в удобном для пользователя виде (графики переходных процессов, возможность сопоставления разных вариантов САР, протокол работы с системой и т.д.).

Запуск программы «IPC-CAD» осуществляется одним из двух способов:

- способ 1

1.1) найдите на рабочем столе ярлык «IPC-CAD»

1.2) кликните по нему двойным щелчком левой клавиши мыши;

- способ 2

2.1) запустите файловый менеджер, например «FAR manager» или «Проводник»

2.2) перейдите каталог IPC_CAD, находящийся в корневок каталоге диска С:

2.3) подведите курсор к файлу «"!IPC-CAD.BAT"» и запустите его, нажав на клавишу «Enter».

Основное окно системы «IPC-CAD» показано на рис. ПЗ.

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe	- 🗆 ×
"Industrial Process Control-Computer Aided Design" 〈 IPC-CAD 1.2 〉	
Перечень работ 2. САР с предиктором Синта 3. Консинированная САР 4. Каскадная САР 5. Каскадная САР с промежуточным импульсом 6. Каскадная САР с односторонней автономностью 7. САР с опережающим импульсом 8. Назначение и область применения	
11 Движение Ent Выбор F1 Понощь F2 С хема <u>Esc</u>	Выход

Рис. ПЗ. Основное окно системы IPC-CAD

При этом пользователь может выполнять следующие элементарные действия:

1) РАБОТАТЬ С МЕНЮ;

2) ВВОДИТЬ ДАННЫЕ ПО ЗАПРОСУ СИСТЕМЫ;

3) ПРОСМАТРИВАТЬ НА ЭКРАНЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕЧАТАТЬ ГРАФИКИ;

4) ПРОСМАТРИВАТЬ НА ЭКРАНЕ СХЕМЫ САР;

5) ПРОСМАТРИВАТЬ НА ЭКРАНЕ И ПЕЧАТАТЬ ПРОТОКОЛЫ РАБОТЫ С СИСТЕМОЙ.

РАБОТА С МЕНЮ системы IPC-CAD включает в себя набор следующих САР и операций:

- 1) Одноконтурная САР.
- 2) САР с предиктором Смита.
- 3) Комбинированная САР.
- 4) Каскадная САР.
- 5) Каскадная САР с промежуточным импульсом.
- 6) Каскадная САР с односторонней автономностью.
- 7) САР опережающим импульсом.
- 8) Назначение и область применения.

Клавишами ↑↓ устанавливается нужная позиция меню и производится ее выбор нажатием клавиши "Enter". Вначале желательно выполнять все задания по порядку, определяемому позициями меню. При этом можно повторять выполнение задания,

выбирая позицию повторно, или возвращаясь назад по меню на любую позицию. Позиции «Вывод схемы САР на экран», «Вывод протокола на экран», «Помощь» можно выбирать в любой последовательности по желанию.

После того, как все необходимые позиции меню пройдены и соответствующие задания выполнены, выбирается позиция меню, предназначенная для ухода из данного меню и продолжения работы. Для возврата из меню на предыдущее меню используется клавиша «Esc». Во время работы с меню в нижней части экрана имеется подсказка.

ВВОД ДАННЫХ ПО ЗАПРОСУ СИСТЕМЫ

Число набирается на клавиатуре и вводится нажатием клавиши «Enter». При вводе действительного числа его целая и дробная части разделяются **точкой**. Если дробной части нет, точка необязательна.

Примеры форм представления действительных чисел:

- число 5 можно представить - в виде 5 или 5.

- число 0.5 можно представить - в виде 0.5 или .5

Целые числа не должны содержать точку.

Параметры объекта, регулятора и компенсатора по запросу системы набираются на клавиатуре и вводятся нажатием клавиши «Enter».

Ошибку в наборе числа до нажатия «Enter» можно исправить, используя для возврата клавишу «←» («Backspase»).

Существует контроль введенных данных. Если при вводе были допущены ошибки, то пользователь получает соответствующее сообщение и должен повторить ввод данных.

Значения постоянных времени объекта, запаздывания, длительностей импульсных возмущений, шага моделирования вводятся в одних и тех же выбранных пользователем единицах времени.

На вопрос системы, предполагающий ответы «да/нет», пользователь должен ввести латинские символы: у - да, n - нет.

ПРОСМОТР НА ЭКРАНЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕ-ЧАТЬ ГРАФИКОВ

Выход из режима просмотра графиков осуществляется по клавише «Enter» (а также по любой другой клавише).

В случае необходимости печать графиков осуществляется нажатием клавиши «Print Screen».

ПРОСМОТР НА ЭКРАНЕ СХЕМЫ САР

Просмотреть схему САР на экране монитора можно в двух режимах, в текстовом виде и в графическом.

Графическое представление схемы можно получить, находясь в основном меню «Перечень работ». При этом необходимо полвести курсор к названию требуемой системы и нажать на клавишу «F2» (Схема).

Текстовое представление схемы совместно с кратким описанием этой схемы можно получить после выбора системы и загрузив соответствующий раздел. При этом открывается меню «Режим работы», в котором необходимо нажать клавишу «F1» (Помощь)

Выход из режима просмотра схемы САР осуществляется по клавише «Esc».

ПРОСМОТР НА ЭКРАНЕ И ПЕЧАТЬ ПРОТОКОЛА РАБОТЫ

Пользователь, находясь в главном меню, имеет возможность вызывать протокол на экран, листая его вперед клавишей ↑. Возврат в главное меню – по клавише «Esc».

В случае необходимости печать протокола работы с системой осуществляется нажатием клавиши «Print Screen».

Так как в представленной лабораторной работе исследуется работа одноконтурной САР, то рассмотрим её реализацию в системе «IPC-CAD» подробно.

Простая одноконтурная САР обеспечивает регулирование одной переменной с помощью стандартного П, ПИ или ПИДрегулятора (рис. П4).



Рис. П
4. Схема простой одноконтурной САР, реализованной в системе «IPC-CAD»

Закон регулирования (в общем случае - ПИД), реализуемый одноконтурной САР (а также и всеми регуляторами более сложных САР), представляется передаточной функцией вида:

$$W_{\text{per}}(s) = Kp * \left[1 + \frac{1}{T_{MS*S}} + \frac{T_{\Pi D}*s}{0.1*T_{\Pi D}*s + 1}\right] (48)$$

Здесь Д - составляющая (как во многих современных контроллерах) реализуется в виде реального дифференцирующего звена. Постоянная времени его инерционной части принята равной 10% от времени предварения Тпр.

Настраиваемыми параметрами САР в общем случае являются значения:

- коэффициента усиления Кр;

- времени изодрома Тиз;

- и времени предварения Тпр.

Данный закон регулирования связывает сигнал рассогласования E = SP - Y на входе регулятора с управляющим воздействием U, которое рассматривается как регулируемый вход объекта управления, т.е. блок "Регулятор" на рис. 20 (а также и во всех остальных схемах САР) учитывает, кроме собственно регулирующего устройства, также и характеристики исполнительного механизма и регулирующего органа. Такая универсальная форма закона регулирования соответствует практике современных промышленных контроллеров, в которых, например, в зависимости от типа исполнительного механизма (пропорционального или с постоянной скоростью перемещения) изменяется лишь внутренняя реализация самого регулятора (в последнем случае его передаточная функция будет ПДД²), а пользовательское задание требуемого закона регулирования остается в виде (48).

При настройке и моделировании САР рассматривается поведение системы при различных возмущениях со стороны регулирующего органа F и (или) при изменении задания регулятору SP.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 «Исследование усовершенствован-	
ных методов двухпозиционного регулирования»	3
Лабораторная работа №2 «Исследование методов настройки	
регуляторов в одноконтурной САР»	19
Лабораторная работа №3 «Исследование импульсной систе-	
мы автоматического регулирования расхода воздуха»	77
Лабораторная работа №4 «Исследование методов расчета и	
настройки каскадных САР»	92
Лабораторная работа №5 «Исследование методов и алгорит-	
мов фильтрации измерительной информации»	106
Приложение 1 Описание пакета Simulink системы MatLAB	131
Приложение 2 Описание системы IPC_CAD	.136
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Методические указания по дисциплине «Автоматизация пищевых производств» для студентов, обучающихся по специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств», всех форм обучения

> Составители: Чупин Александр Васильевич Пачкин Сергей Геннадьевич

Зав. редакцией И.Н. Журина Редактор Н.В. Шишкина Технический редактор Т.В. Васильева Художественный редактор Л.П. Токарева

ЛР № 020524 от 02.06.97 Подписано в печать _____. Формат 60х84^{1/16} Бумага типографская. Гарнитура Times Уч.-изд.л. 5. Тираж ___ экз. Заказ № __

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском отделе Кемеровского технологического института пищевой промышленности 650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

ПЛД № 44-09 от 10.10.99

Отпечатано в лаборатории множительной техники Кемеровского технологического института пищевой промышленности 650010, г. Кемерово, ул. Красноармейская, 52