

На правах рукописи



Скороспешкин Максим Владимирович

**АДАПТИВНЫЕ ПСЕВДОЛИНЕЙНЫЕ КОРРЕКТИРУЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(по отраслям: промышленность)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Томский политехнический университет".

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Цапко Геннадий Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Малышенко Александр Максимович

кандидат технических наук, доцент
Бойченко Иван Валентинович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет", г. Новосибирск

Защита состоится 16 декабря 2009 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «13» ноября 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций
Д 212.269.06

к. т. н., доцент



М. А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Существенной практической проблемой автоматического управления является нестационарность параметров объекта управления. В условиях, когда происходит изменение свойств управляемого объекта, первоначальные настройки регулятора не обеспечивают требуемого качества, а в некоторых случаях и устойчивости систем управления. Большую чувствительность по устойчивости и качеству управления к изменению свойств объекта управления имеют параметрически оптимизируемые регуляторы. В таких случаях применяются адаптивные системы управления.

Проблеме адаптивного управления посвящено достаточно много работ. Известными работами в теории адаптивного управления являются труды Фельдбаума А.А., Цыпкина Я.З., Солодовникова В.В., Красовского А.А., Фрадкова А.Л., Ядыкина И.Б., Егупова Н.Д., Рутковского В.Ю. Но интерес к этой проблеме лишь усиливается, что объясняется постоянным повышением требований к качеству систем управления, а так же наличием на рынке средств автоматизации свободно программируемых контроллеров и их относительно невысокой стоимостью. Использование таких контроллеров в системах управления позволяет обеспечить эффективное управление объектами с нестационарными параметрами при наличии соответствующих законов управления и методов коррекции динамических свойств.

Большинство промышленных адаптивных систем управления построено на базе ПИД-регуляторов, параметры которых подстраиваются в процессе работы. Однако возможности адаптивных ПИД-регуляторов весьма ограничены. Они не всегда гарантируют требуемое качество управления при изменении свойств объекта управления в широких пределах. В то же время известна эффективность нелинейных и псевдолинейных корректирующих устройств (КУ). Такие устройства рассмотрены в работах Топчиева Ю.И., Попова Е.П., Хлыпало Е.И., Шарова С.Н. Они позволяют корректировать амплитудно-частотную (АЧХ) и фазо-частотную (ФЧХ) характеристики в широких пределах независимо друг от друга.

Поэтому перспективной структурой адаптивной системы управления можно считать такую, в состав которой входит ПИД-регулятор, имеющий постоянные настройки, и корректирующее устройство, параметры которого подстраиваются в процессе работы. Применение систем управления с адаптивными корректирующими устройствами позволяет сохранить устойчивость и требуемое качество управления объектами, параметры которых в процессе работы претерпевают существенные изменения.

Целью работы является разработка и программная реализация адаптивных корректирующих устройств на базе промышленных микропроцессорных контроллеров.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор корректирующих устройств, обеспечивающих независимое изменение амплитудной и фазовой частотных характеристик, и исследование их свойств и возможности использования в составе адаптивной системы.
2. Разработка псевдолинейных корректирующих устройств с фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 0 до 175 градусов, и разработка псевдолинейного корректирующего устройства, обладающего форсирующим свойством.
3. Разработка способов подстройки корректирующих устройств, основанных на оценке интегрального критерия на заданном временном интервале и текущей оценке значений АЧХ и ФЧХ объекта управления.
4. Разработка структуры и проведение исследований свойств систем управления с псевдолинейными корректирующими устройствами с амплитудным подавлением и фазовым опережением, корректирующими устройствами с запоминанием экстремума, а так же псевдолинейным корректирующим устройством с отдельными каналами для амплитуды и фазы.
5. Разработка способа реализации псевдолинейной коррекции, основанного на выборе типа адаптивного корректирующего устройства с помощью аппарата нечеткой логики.
6. Разработка программного обеспечения для промышленных контроллеров КРОСС–500 и Ремиконт Р–130, реализующего адаптивное управление на основе подстройки корректирующих устройств.
7. Разработка инженерной методики синтеза систем автоматического регулирования (САР) с адаптивными корректирующими устройствами.

Методы исследования. При решении задач, поставленных в диссертации, использовались методы теории автоматического управления, нечеткой логики, методы цифровой обработки информации, теория идентификации, методы математического имитационного моделирования с использованием инструментальных средств автоматизации математических и инженерных вычислений MatLab (Simulink), MathCAD.

Научную новизну работы определяют:

1. Способ адаптивного управления, основанный на применении ПИД–регулятора с постоянными параметрами и подстраиваемым корректирующим устройством.
2. Способ адаптивного управления, основанный на применении ПИД–регулятора с постоянными параметрами и псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы с подстройкой его параметров на основе стабилизации значения АЧХ

и ФЧХ на заданной частоте.

3. Адаптивные псевдолинейные корректирующие устройства с запоминанием экстремума производной входного сигнала, обеспечивающие фазовое опережение, меняющееся в диапазоне от 0 до 175 градусов, и форсирующее псевдолинейное корректирующее устройство.
4. Адаптивное псевдолинейное корректирующее устройство с подстройкой параметров на основе аппарата нечеткой логики.
5. Реконфигурируемое псевдолинейное корректирующее устройство.

Практическую ценность работы составляют:

1. Структуры систем управления с адаптивными корректирующими устройствами.
2. Модели систем управления с адаптивными корректирующими устройствами, разработанные в среде MatLab (Simulink).
3. Программные модули адаптивной коррекции динамических свойств САР, разработанные для контроллеров КРОСС–500 и Ремиконт Р–130.
4. Инженерная методика синтеза системы управления с адаптивным корректирующим устройством.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов и зависимостей обеспечивается их соответствием теоретическим положениям теории автоматического управления и теории адаптации, соответствием результатов, определенных теоретическим путем, результатам, полученным экспериментально на основе программной реализации алгоритмов адаптации на базе промышленных микропроцессорных контроллеров КРОСС–500 и Ремиконт Р–130, и проверкой работоспособности на лабораторном комплексе в режиме реального времени. А так же согласованием результатов экспериментов, полученных с помощью разработанного программного обеспечения, с результатами расчетов с помощью широко распространенных программных продуктов MathCAD и MatLab (Simulink).

Внедрение работы. Программные модули и методика синтеза систем управления с адаптивными корректирующими устройствами используются на ООО "Томскнефтехим" (г. Томск), ООО "Кавенит" (г. Томск). Результаты исследований и разработок, полученные в диссертационной работе, использованы так же в учебном процессе кафедры автоматики и компьютерных систем Томского политехнического университета при выполнении студентами лабораторной работы "Адаптивные псевдолинейные корректирующие устройства" при изучении курса "Автоматизированное управление в технических системах" и в процессе дипломного проектирования.

Практическое использование результатов диссертационных исследований подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийских научных конференциях молодых ученых: «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ», г. Новосибирск, 2003-2006 гг.
2. II Международной научно–практической конференции «Составляющие научно–технического прогресса», г. Тамбов, 2006 г.
3. IV международной научной конференции «Инновации в науке и образовании – 2006», г. Калининград, 2006 г.
4. IV, V и VI Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии», г. Томск, 2006-2008 гг.
5. XII, XIII, XIV и XV Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 2006-2009 гг.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 28 работ, включая 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований, содержит 205 печатных страниц основного текста, 136 рисунков и 6 таблиц.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Структура адаптивной системы управления с ПИД–регулятором, имеющим постоянные настройки, и адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством.
2. Способ адаптивного управления, основанный на подстройке параметра псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением.
3. Способ адаптивного управления, основанный на подстройке параметров псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением.
4. Способ адаптивного управления, основанный на подстройке параметров псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным и фазовым каналами.
5. Методика определения значения ФЧХ разомкнутой системы на фиксированной частоте по значениям АЧХ разомкнутой и замкнутой систем.
6. Методика синтеза систем управления с ПИД–регулятором и адаптивным реконфигурируемым корректирующим устройством.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы разработки адаптивных

корректирующих устройств систем автоматического управления, сформулированы цель и задачи исследований, обозначены основные пункты научной новизны и практической ценности результатов исследований, представлена структура диссертационной работы.

В первой главе приводится анализ принципов построения адаптивных систем управления, на основании которого предложена структура и принципы построения адаптивных систем с подстраиваемым корректирующим устройством. Обобщенная структура такой системы представлена на рисунке 1.

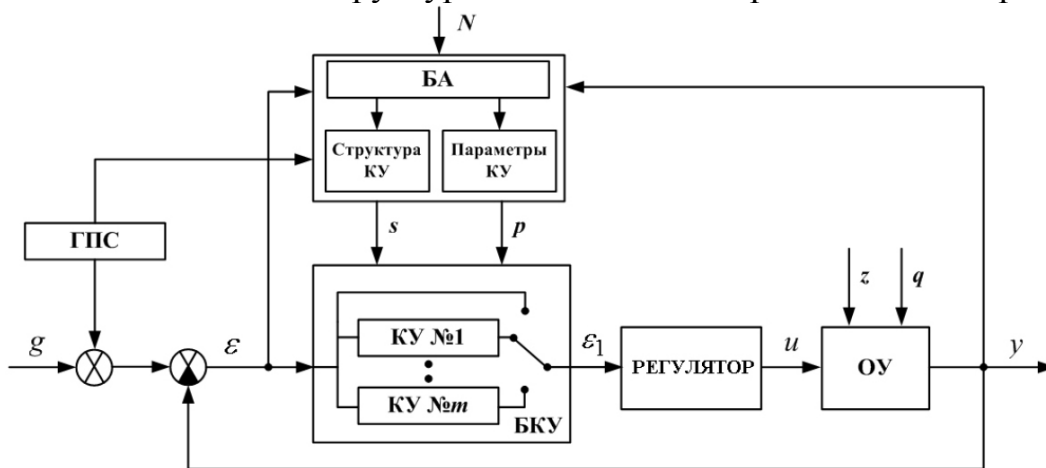


Рисунок 1 – Обобщенная структура адаптивной системы управления с подстраиваемым корректирующим устройством

На рисунке 1 введены следующие обозначения: БА–блок адаптации; БКУ–блок корректирующих устройств; КУ–корректирующее устройство определенного типа; ГПС–генератор пробных сигналов; g –задающее воздействие, y –выходной сигнал системы управления; z –возмущающее воздействие; q –параметр, характеризующий изменение свойств объекта управления; s –сигнал, определяющий текущую структуру корректирующего устройства; p –сигнал, определяющий текущие параметры корректирующего устройства; N –параметр, определяющий разновидность адаптивного корректирующего устройства. Значение данного параметра определяет типы корректирующих устройств, участвующих в работе системы, и способы подстройки корректирующего устройства.

Работает данная система следующим образом. На основании реакции системы управления на пробный сигнал осуществляется оценка качества системы управления в текущий момент времени. Критериями качества могут выступать интегральный критерий, перерегулирование и затухание. В качестве пробного сигнала может использоваться прямоугольный, пилообразный импульс или синусоидальный сигнал, который складывается с задающим воздействием. Суммарный сигнал поступает на вход корректирующего устройства.

В том случае, когда качество обработки пробного сигнала является

неудовлетворительным, осуществляется либо оценка параметров системы управления, с последующей подстройкой корректирующего устройства, либо прямая подстройка корректирующего устройства, осуществляемая с помощью поисковой процедуры. Оценка параметров системы управления осуществляется частотным методом и реализуется путем подачи гармонического сигнала фиксированной частоты, который суммируется с задающим воздействием. После определения значения амплитудно-частотной характеристики системы на данной частоте осуществляется определение структуры и параметров корректирующего устройства. При использовании прямой подстройки используется итерационная процедура на основе градиентного метода.

Реализация процедуры выбора типа корректирующего устройства, используемого в текущий момент времени, основана на применении аппарата нечеткой логики.

В основу построения адаптивной системы с подстраиваемым корректирующим устройством положены следующие принципы:

- принцип подстройки КУ с постоянной настройкой регулятора;
- принцип многорежимности работы блока адаптации;
- принцип оценки качества регулирования по векторному критерию;
- принцип структурной и параметрической адаптации.

Проводится обзор линейных и нелинейных корректирующих устройств, в результате которого для коррекции выбраны псевдолинейные корректирующие устройства, характеризующиеся тем, что их частотные характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала и обеспечивают независимое изменение АЧХ и ФЧХ.

В состав блока корректирующих устройств включены следующие псевдолинейные корректирующие устройства:

- корректирующее устройство с амплитудным подавлением, характеризующееся подавлением коэффициента усиления с ростом частоты без изменения фазового сдвига;
- корректирующее устройство с фазовым опережением, характеризующееся увеличением фазового опережения с ростом частоты без изменения коэффициента усиления;
- корректирующее устройство с отдельными каналами для амплитуды и фазы, характеризующееся подавлением коэффициента усиления, сопровождаемое увеличением фазового опережения с ростом частоты.

Приводится структура и дается математическое описание свойств этих устройств, полученное на основе метода гармонической линеаризации.

Показывается необходимость разработки корректирующих устройств, обеспечивающих изменение фазового сдвига в диапазоне от 0 до 175 градусов.

Во второй главе проведена разработка и исследование свойств следующих корректирующих устройств:

- псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума производной от входного сигнала и фазовым опережением,

- псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума производной от входного сигнала и фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 0 до 120 градусов;
- псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума входного сигнала с форсирующим свойством.

Структурная схема псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума производной от входного сигнала и фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 90 до 175 градусов, представлена на рисунке 2.

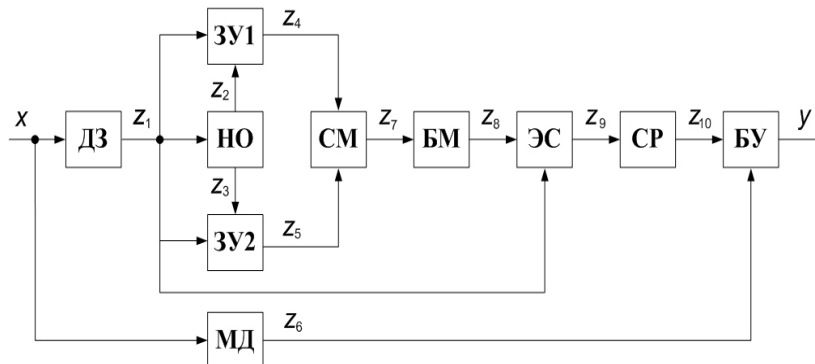


Рисунок 2 – Структурная схема псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума производной от входного сигнала и фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 90 до 175 градусов

Псевдолинейное корректирующее устройство содержит дифференцирующее звено ДЗ; блок определения и запоминания максимального значения ЗУ1; блок определения и запоминания минимального значения ЗУ2; нуль-орган НО, предназначенный для сброса максимального и минимального значений; сумматор СМ; блок масштабирования БМ; элемент сравнения ЭС; сигнал-реле СР; блок умножения БУ; блок определения модуля МД.

Формула зависимости фазового сдвига от коэффициента передачи K блока масштабирования, полученная на основе метода гармонической линеаризации путем аппроксимации методом наименьших квадратов, имеет вид

$$\varphi(K) = 95.072K^3 - 95.396K^2 + 84.531K + 88.339.$$

При изменении коэффициента K корректирующего устройства от 0 до 1, фазовый сдвиг КУ меняется от 0 до 175 градусов.

Данное корректирующее устройство используется в качестве адаптивного в составе САР для получения необходимого фазового сдвига.

Подобную структуру имеет псевдолинейное корректирующее устройство с запоминанием экстремума производной от входного сигнала и фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 0 до 120 градусов.

Отличие его от предыдущего корректирующего устройства состоит в отсутствии блока умножения, что обеспечивает возможность изменения фазового сдвига от нуля градусов и небольшую амплитуду высших гармоник.

Формула зависимости фазового сдвига от коэффициента передачи K блока

масштабирования для такого корректирующего устройства, полученная на основе метода гармонической линеаризации путем аппроксимации методом наименьших квадратов, имеет вид

$$\varphi(K) = -40.774 \cdot K^3 + 113.26 \cdot K^2 - 9.904 \cdot K + 1.671.$$

При изменении коэффициента K корректирующего устройства от 0 до 1.8, фазовый сдвиг КУ меняется от 0 до 120 градусов.

Рассмотренное корректирующее устройство имеет положительный фазовый сдвиг, не зависящий от частоты, и используется в качестве адаптивного в составе САР для коррекции фазового сдвига.

Предложено псевдолинейное корректирующее устройство с запоминанием экстремума входного сигнала, обладающее форсирующим свойством. В основу структуры такого устройства положена структура, представленная на рисунке 2. Данное устройство характеризуется тем, что вносит положительный фазовый сдвиг, не зависящий от частоты, и формирует форсирующий сигнал на определенном временном интервале, позволяющий улучшить качество переходных процессов.

На рисунке 3 показан вид выходного сигнала корректирующего устройства.

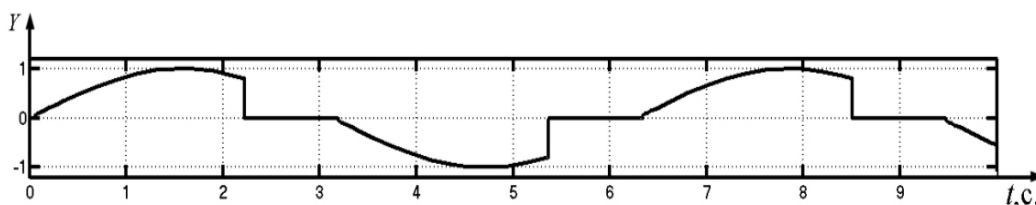


Рисунок 3 – Вид выходного сигнала псевдолинейного корректирующего устройства с запоминанием экстремума входного сигнала с форсирующим свойством

Данное устройство включается параллельно ПИД-регулятору.

На базе описанных выше корректирующих устройств разработаны их модификации, характеризующиеся устойчивостью к высокочастотным помехам.

Проведено исследование свойств адаптивных систем с использованием различных типов корректирующих устройств. Структура таких систем представлена на рисунке 4. В состав системы входят: ГПС–генератор пробного сигнала; БОК–блок определения критерия качества системы; БНКУ–блок настройки корректирующего устройства; КУ–корректирующее устройство определенного типа; РЕГ–регулятор; ОУ–объект управления, свойства которого меняются с течением времени.

Исследование работы такой системы проводилось при использовании псевдолинейных корректирующих устройств с амплитудным подавлением и с фазовым опережением. Данная система относится к классу поисковых адаптивных систем. Показателем качества, определяемым в БОК для системы с корректирующим устройством с амплитудным подавлением, является значение

перерегулирования, а для системы с корректирующим устройством с фазовым опережением – значение интегрального критерия. Показатели качества определяются на заданном временном интервале, после воздействия на систему пробного сигнала прямоугольной формы, накладываемого ГПС в процессе работы САР на задающее воздействие.

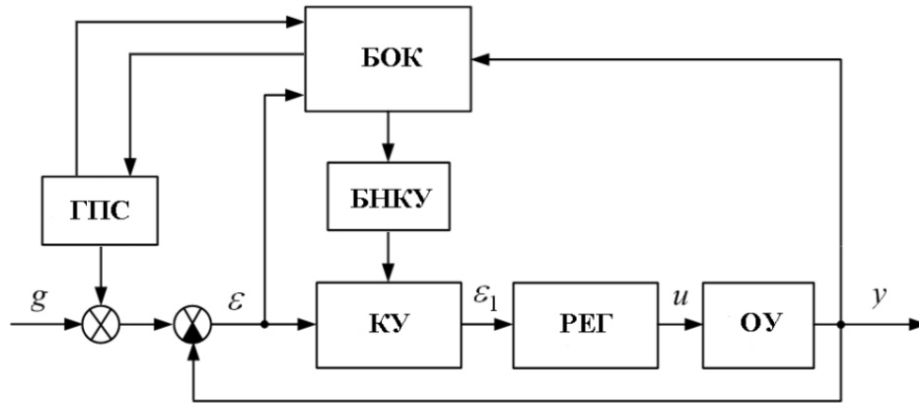


Рисунок 4 – Структура адаптивной системы с корректирующим устройством

В БНКУ, в зависимости от отклонения показателей качества от требуемых, на основе итерационной процедуры осуществляется корректировка параметров настройки используемого корректирующего устройства.

На рисунках 5 и 6 показаны используемые в работе структуры корректирующих устройств с амплитудным подавлением и фазовым опережением.

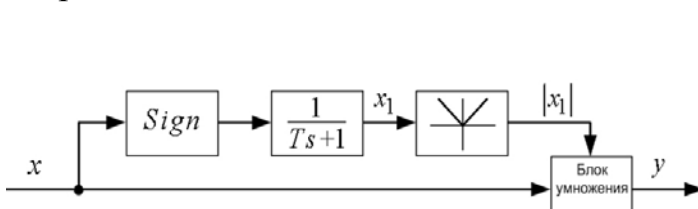


Рисунок 5 – Структура корректирующего устройства с амплитудным подавлением

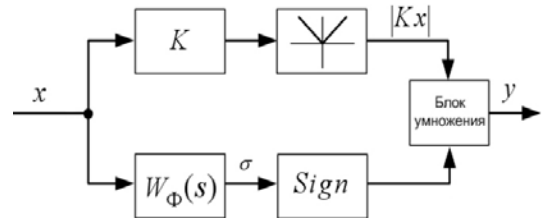


Рисунок 6 – Структура корректирующего устройства с фазовым опережением

В составе корректирующего устройства с фазовым опережением содержится интегро-дифференцирующее звено с передаточной функцией вида

$$W_{\hat{O}}(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T \cdot s + 1}{T_1 \cdot s + 1}. \quad (1)$$

Подстраиваемым параметром в данных устройствах является постоянная времени T .

Проведено исследование работы систем управления объектом второго порядка с ПИ-регулятором и описанными выше подстраиваемыми корректирующими устройствами.

Передаточная функция объекта управления имеет вид

$$W_{\dot{1}}(s) = \frac{K}{T_1^2 \cdot s^2 + T_2 \cdot s + 1}. \quad (2)$$

Численные значения параметров объекта управления приняты равными $T_1=1$ с.; $T_2=3$ с.; $K=1$. Параметры ПИ–регулятора приняты равными $K_{\dot{1}}=1$; $T_{\dot{e}}=2$ с. Значение постоянной времени T корректирующего устройства, с которым САР запускается в работу, принято равным 0.01 с.

Исследование проводилось при изменении постоянной времени объекта управления T_1 в диапазоне от 1 с. до 3 с.

На рисунке 7 представлены временные диаграммы, иллюстрирующие процесс подстройки корректирующего устройства с амплитудным подавлением.

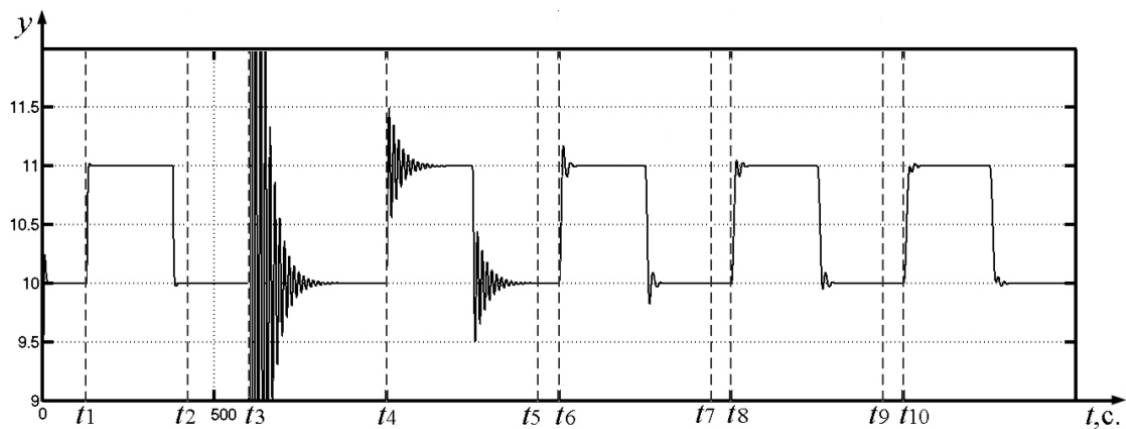


Рисунок 7 – Кривые и характер изменения выходной координаты объекта управления в процессе подстройки корректирующего устройства

После запуска системы в работу и окончания переходного процесса на задающее воздействие, в момент времени t_1 блоком ГПС в САР подается первый пробный сигнал, затем в блоке БОК определяется значение перерегулирования, которое в момент времени t_2 запоминается в блоке БНКУ в качестве эталонного. В момент времени t_3 в системе регулирования происходит изменение постоянной времени объекта управления T_1 со значения $T_1=1$ с. до значения $T_1=3$ с. Это вызывает уменьшения запаса устойчивости САР и переходный процесс становится колебательным. В момент времени t_4 блок ГПС посылает в САР очередной импульс, после чего в блоке БОК определяется текущее значение перерегулирования, которое в блоке БНКУ сравнивается с эталонным значением перерегулирования, и после сравнения осуществляется подстройка корректирующего устройства. Подстройка осуществляется последовательными шагами с приращением $\Delta T=10$ с. в моменты времени t_5, t_7, t_9 . В процессе подстройки постоянная времени T корректирующего устройства изменилась со значения $T=0.01$ с. до значения $T=30.01$ с.

Система имела исходные показатели качества: $\sigma=2.8$ %, время регулирования $T_{\text{per}}=5.9$ с. Показатели качества после изменения постоянной

времени объекта управления: $\sigma=53.5\%$, время регулирования $T_{\text{рег}}=140.6$ с. Показатели качества после подстройки КУ: $\sigma=2.2\%$, время регулирования $T_{\text{рег}}=16.71$ с.

Исследования адаптивной системы с корректирующим устройством с фазовым опережением так же показали её работоспособность и эффективность.

Проведено исследование адаптивной системы с корректирующим устройством с отдельными каналами для амплитуды и фазы. Структура такой системы представлена на рисунке 8.

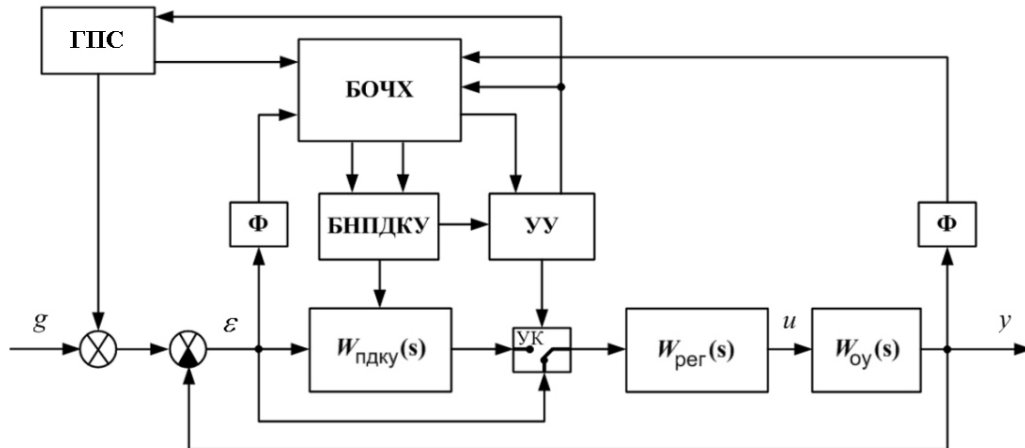


Рисунок 8 – Структура адаптивной системы с корректирующим устройством с отдельными каналами для амплитуды и фазы

На рисунке 8 использованы следующие обозначения: $W_{\text{об}}(s)$ – передаточная функция объекта управления; $W_{\text{рег}}(s)$ – передаточная функция регулятора; $W_{\text{пдку}}(s)$ – передаточная функция псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; Φ – полосовой фильтр; БАПДУ – блок настройки псевдолинейного двухканального корректирующего устройства; БОЧХ – блок определения частотных характеристик; УУ – управляющее устройство; УК – управляемый ключ; ГПС – генератор пробного сигнала, вырабатывающий синусоидальный сигнал вида $A_0 \sin \omega_0 t$.

Структура псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы представлена на рисунке 9.

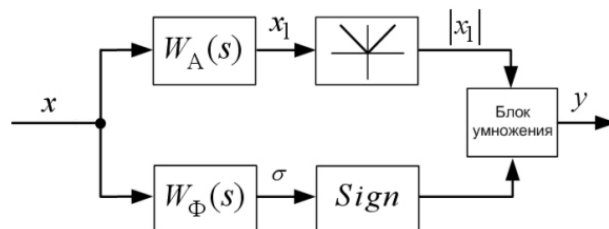


Рисунок 9 – Структура корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Передаточная функция звена, составляющего основу амплитудного

канала, имеет вид

$$W_{\dot{A}}(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1}.$$

Передаточная функция звена, составляющего основу фазового канала, определяется формулой (1).

Принцип работы адаптивной системы заключается в следующем. В процессе работы системы происходит изменение параметров объекта управления. При этом происходит изменение коэффициента передачи и фазо-частотной характеристики объекта управления. В процессе работы на основании сигналов, характеризующих значение ошибки системы, выходной величины объекта управления и параметров поискового сигнала, в блоке БОЧХ определяется произошедшее изменение значений коэффициента передачи и значения фазо-частотной характеристики системы управления на частоте ω_0 .

На основе данной информации определяются численные значения параметров корректирующего устройства, при которых обеспечиваются компенсация влияния изменения параметров объекта управления на частотные характеристики системы управления.

Особенностью данной адаптивной системы является то, что значение фазового сдвига разомкнутой системы определяется по значениям АЧХ разомкнутой и замкнутой систем, нахождение которых проводится после подачи в систему синусоидального пробного сигнала. В этом случае упрощается процедура определения фазового сдвига, особенно в присутствии помех.

Получена формула, устанавливающая связь между величиной фазового сдвига разомкнутой системы и амплитудно-частотными характеристиками замкнутой системы. Данная формула имеет вид

$$\cos(\varphi_1) = \cos(\varphi_8) = \frac{\dot{A}_1^2(\omega_0) - \dot{A}_c^2(\omega_0) - \dot{A}_c^2(\omega_0) \cdot \dot{A}_1^2(\omega_0) \cdot K_{\dot{a}}^2}{2 \cdot \dot{A}_c^2(\omega_0) \cdot \dot{A}_1(\omega_0) \cdot K_{\dot{a}}},$$

где $\dot{A}_1(\omega_0)$, $\dot{A}_c(\omega_0)$ – коэффициенты передачи по амплитуде прямой цепи и замкнутой системы; $K_{\dot{a}}$ – статический коэффициент передачи датчика цепи обратной связи.

Определение требуемых параметров корректирующего устройства осуществляется с помощью кусочно-линейных функций, устанавливающих связь между фазовым сдвигом, вносимым корректирующим устройством на частоте ω_0 , коэффициентом передачи корректирующего устройства, и параметрами настройки соответствующих каналов корректирующего устройства.

На рисунке 10 приведена иллюстрация процесса подстройки корректирующего устройства, проведенного для системы управления объектом, рассмотренным выше.

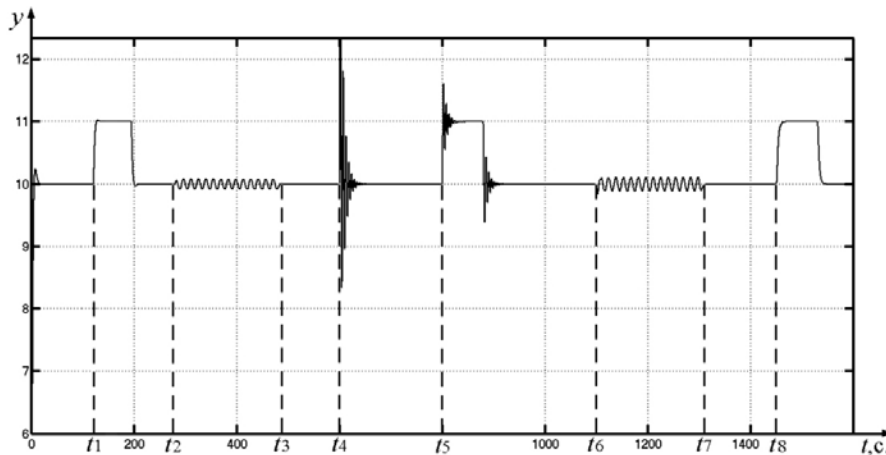


Рисунок 10 – Кривые и характер изменения выходной координаты объекта управления в процессе подстройки корректирующего устройства

В момент времени t_4 произошло изменение параметров объекта управления со значений $T_1=1$ с.; $K=1$ до значений $T_1=2$ с.; $K=5$. Это привело к возникновению в момент времени t_5 колебательного переходного процесса с большим перерегулированием. После проведения подстройки переходный процесс, начало которого происходит в момент времени t_8 , характеризует восстановление показателей качества системы.

Показатели качества при запуске САР в работу: перерегулирование $\sigma=2.8\%$, время регулирования $T_{\text{рег}}=5.9$ с.

Показатели качества после изменение параметров объекта управления: перерегулирование $\sigma=60.7\%$, время регулирования $T_{\text{рег}}=19.60$ с.

Показатели качества после подстройки параметров корректирующего устройства: перерегулирование $\sigma=0\%$, время регулирования $T_{\text{рег}}=8.9$ с.

Кроме описанных выше систем проведено так же исследование работы систем с корректирующим устройством с запоминанием экстремума производной от входного сигнала с фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 90 до 175 градусов; с корректирующим устройством с запоминанием экстремума производной от входного сигнала с фазовым опережением, меняющимся в диапазоне от 0 до 120 градусов; с корректирующим устройством с запоминанием экстремума входного сигнала с форсирующим свойством.

Результаты исследования систем с корректирующими устройствами различного типа позволили выработать рекомендации по их использованию, основными из которых являются следующие:

- корректирующее устройство с амплитудным подавлением целесообразно применять в составе систем управления, не требующих высокого быстродействия, для объектов, у которых нестационарность параметров приводит к колебательным, медленно затухающим переходным процессам;
- корректирующее устройство с фазовым опережением целесообразно применять в составе систем управления, требующих высокого быстродействия, для объектов, у которых нестационарность параметров

приводит к колебательным, затухающим переходным процессам;

- корректирующее устройство с отдельными каналами для амплитуды и фазы целесообразно применять в составе систем управления объектами, допускающими подачу на вход гармонических колебаний небольшой амплитуды;
- корректирующие устройства с запоминанием экстремума целесообразно применять в системах управления, в процессе работы которых изменения свойств объекта управления приводит к значительному изменению фазо-частотной характеристики, особенно на низких частотах. Применение этих устройств позволяет осуществлять подъем фазо-частотной характеристики в широком диапазоне частот, включая низкочастотную область.

Адаптация системы управления путем подстройки корректирующего устройства обладает следующими особенностями по отношению к системе с подстройкой параметров регулятора:

- не требуется проводить идентификацию объекта управления;
- процедура подстройки является более простой;
- величина вносимого корректирующим устройством фазового сдвига может достигать 175 градусов;
- подстройка корректирующего устройства может быть использована в качестве дополнительного средства системы управления с адаптивным ПИД-регулятором.

В третьей главе проведен анализ структур нечетких регуляторов. Разработана структура адаптивного корректирующего устройства с фазовым опережением с подстройкой на основе аппарата нечеткой логики.

Для настройки корректирующего устройства использована лингвистическая переменная "Значение интегрального критерия качества", терм-множество которой является следующим: {"малый", "средний", "большой"}. Для фазификации и дефазификации использованы кусочно-линейные функции.

Процесс подстройки корректирующего устройства с фазовым опережением, входящим в состав системы управления объектом с передаточной функцией (2), реализуемый на основе аппарата нечеткой логики, иллюстрируется рисунком 11.

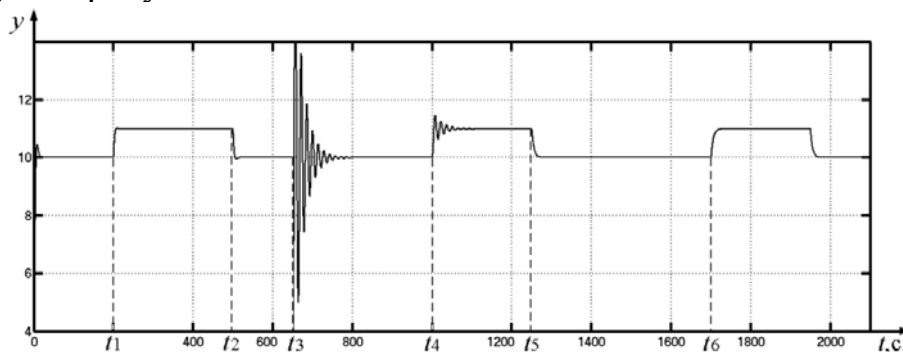


Рисунок 11 – Кривые и характер изменения выходной координаты объекта управления в процессе подстройки корректирующего устройства

Параметры объекта управления и настройки регулятора соответствуют системе, описанной во второй главе.

Проведенные исследования показали, что наиболее эффективно рассмотренный выше способ подстройки корректирующего устройства может быть применен для систем управления, не допускающих длительную подстройку параметров корректирующего устройства.

Предложена адаптивная система с реконфигурируемым корректирующим устройством, структура которого представлена на рисунке 12.

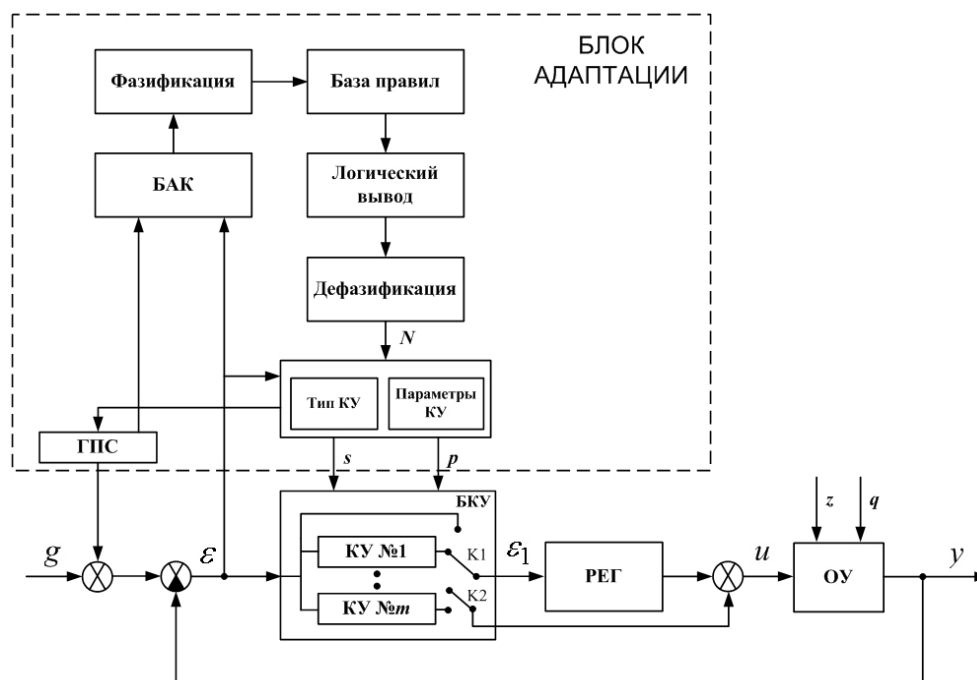


Рисунок 12 – Структура адаптивной системы с реконфигурируемым корректирующим устройством

На рисунке 12 использованы следующие обозначения: БКУ–блок корректирующих устройств; КУ–корректирующее устройство определенного типа; K1, K2 – ключи, предназначенные для параллельного или последовательного включения КУ; РЕГ–регулятор; ОУ–объект управления; ГПС–генератор пробных сигналов; s –сигнал, определяющий тип используемого корректирующего устройства; БАК–блок анализа качества САР; p –сигнал, определяющий текущие параметры корректирующего устройства; N –параметр, определяющий тип адаптивного корректирующего устройства, активного в текущий момент времени.

В состав БКУ включены следующие корректирующие устройства:

- корректирующее устройство с амплитудным подавлением;
- корректирующее устройство с фазовым опережением;
- корректирующее устройство с форсирующим свойством.

Разработана база правил, определяющая веса корректирующих устройств, в зависимости от численного значения интегрального критерия качества.

Выбор корректирующего устройства, включаемого в состав системы управления, производится на основе дефазификации по методу максимума.

В четвертой главе представлена методика синтеза систем автоматического регулирования, реализованных на базе адаптивных корректирующих устройств. Методика содержит этапы синтеза, рекомендации по выбору типа корректирующего устройства, способы определения диапазонов изменения параметров настройки корректирующих устройств, методы оценки устойчивости САР.

В основу способов определения диапазона изменения параметров корректирующих устройств положен корневой метод. Параметры первоначальной настройки корректирующих устройств предложено определять на основе логарифмических частотных характеристик.

Приведена модель кожухотрубного теплообменника, используемого на производстве этилена в ООО "Томскнефтехим", и проведено исследование свойств системы регулирования температуры пироконденсата с псевдолинейными корректирующими устройствами с амплитудным подавлением и фазовым опережением. Показано, что применение корректирующих устройств улучшает качество переходного процесса, позволяет устранить перерегулирование, равное 20 процентам, и обеспечить устойчивость системы при изменении времени запаздывания объекта с 10 до 28 секунд.

В пятой главе описаны программные модули адаптивной коррекции, реализованные на основе устройств с амплитудным подавлением и фазовым опережением, составленные для контроллеров Ремиконт Р-130 и КРОСС-500.

Модули разработаны с применением языков функциональных блоков (FBD) и структурированного текста (ST). Отладка модулей проведена на специализированных лабораторных стендах, состоящих из контроллеров и аналоговых вычислительных комплексов, имитирующих работу объектов управления.

В заключении приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Представленная диссертационная работа описывает результаты исследований, направленных на разработку и программную реализацию адаптивных корректирующих устройств, применяемых в составе систем автоматического управления с ПИ и ПИД-регуляторами. Основными результатами диссертационной работы являются следующие.

1. Осуществлена разработка псевдолинейных корректирующих устройств с фазовым опережением, изменяющимся в диапазоне от 0 до 175 градусов и псевдолинейного корректирующего устройства, обладающего форсирующим свойством.

2. Разработаны способы подстройки корректирующих устройств, основанные на оценке значения интегрального критерия качества и стабилизации АЧХ и ФЧХ на заданной частоте.
3. Предложен способ определения значения фазо-частотной характеристики разомкнутой системы по значениям амплитудно-частотных характеристик замкнутой системы и осуществлена проверка возможности реализации такого способа.
4. Разработана структура системы управления с адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством, обладающим форсирующим свойством, и проведено исследование этой системы, в результате которого даны рекомендации по эффективности применения такого устройства.
5. Разработана структура системы управления с адаптивным корректирующим устройством и способ подстройки параметра корректирующего устройства, реализованный на основе аппарата нечеткой логики.
6. Предложено реконфигурируемое корректирующее устройство и процедура реконфигурации, основанная на оценке интегрального критерия качества.
7. Разработаны программные модули адаптивной коррекции для промышленных микропроцессорных контроллеров Ремиконт Р-130 и КРОСС-500.
8. Разработана инженерная методика синтеза САР с адаптивными корректирующими устройствами.

Разработанные адаптивные корректирующие устройства и их программные реализации могут быть использованы как в промышленных системах управления объектами с интервально-меняющимися параметрами, так и в системах со стационарными параметрами. В последнем случае, требуется разовая подстройка корректирующего устройства, осуществляемого при включении системы управления в работу.

Результаты диссертационной работы представлены в научных журналах и материалах международных и Всероссийских конференций. Всего по теме диссертации опубликовано 28 работ, основные из которых приведены ниже.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Скороспешкин М.В.** Применение псевдолинейного адаптивного корректирующего устройства в системе регулирования температуры в кожухотрубном теплообменнике. // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» / Сборник трудов в 3 томах. – Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 338 с. – С. 282-283.
2. **Скороспешкин М.В.** Программная реализация адаптивного корректирующего устройства на контроллере КРОСС-500. // Технологии

Microsoft в теории и практике программирования. Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 17–18 марта 2009 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 340 с. – С. 337–338.

3. **Скороспешкин М.В.** Адаптивное двухканальное корректирующее устройство для систем автоматического регулирования. // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – №5. – С. 52 – 57.
4. **Скороспешкин М.В.** Адаптивная линейная система автоматического регулирования со стабилизацией частотных характеристик // Современные техника и технологии: Труды XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск.: Изд-во ТПУ, 2008 – Т. 2. – С. 384 – 385.
5. **Скороспешкин М.В.** Адаптивная система автоматического регулирования со стабилизацией частотных характеристик // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск.: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 395–396.
6. **Скороспешкин М.В.** Исследование способов подстройки коэффициентов псевдолинейных корректирующих устройств в адаптивных системах управления с ПИД-регуляторами. // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 26 – 30 марта 2007 г. Труды в 3-х т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007 – Т.2. – С. 433–434.
7. **Скороспешкин М.В., Савинков А.С.** Программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства на микропроцессорном контроллере КРОСС. // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 437–438.
8. **Скороспешкин М.В., Цапко Г.П.** Адаптивный корректор динамических характеристик систем автоматического регулирования. // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА// Двенадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тезисы докладов в 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. Т.1. – С. 498–499.
9. **Скороспешкин М.В.** Программная реализация корректора динамических характеристик систем автоматического регулирования с амплитудным подавлением на промышленном микропроцессорном контроллере КРОСС. // Составляющие научно-технического прогресса: сборник материалов 2-й международной научно-практической конференции.–Тамбов: Першина, 2006. – С. 141–143.
10. **Скороспешкин М.В.** Адаптивный линейный нечеткий корректор динамических свойств систем автоматического регулирования. В кн. XII

Международная научно–практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Труды в 2–х т. – Томск: Изд–во ТПУ, 2006 –Т.2. –С. 162–165.

11. **Скороспешкин М.В.** Нелинейный цифровой адаптивный корректор. // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы VI Всерос. науч.–техн. конф. –Чебоксары: Изд–во Чуваш, ун–та, 2006. – С. 189–191.
12. **Скороспешкин М.В.** Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – №7. – С. 172 – 176.
13. **Скороспешкин М.В.** Адаптивный нечеткий фазовый корректор систем автоматического регулирования // Материалы VI Международной научной конференции (2–3 марта 2006 г.): В 4 ч. / Кемеровский государственный университет. Беловский институт (филиал). – Белово: Беловский полиграфист, 2006.– Ч. 1. – С. 546–550.
14. **Скороспешкин М.В.** Адаптивный многорежимный цифровой регулятор // Наука и образование: Материалы VI Международной научной конференции (2–3 марта 2006 г.): В 4 ч. Кемеровский государственный университет. Беловский институт (филиал). – Белово: Беловский полиграфист, 2006.– Ч. 1. – С. 550–552.
15. **Скороспешкин М.В.** Программная реализация корректора динамических характеристик систем автоматического регулирования на контроллере Ремиконт Р–130. // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. Материалы всероссийской научной конференция молодых ученых в 7–ми частях. Новосибирск: Изд–во НГТУ, 2006. Часть 2. – 250с.
16. **Скороспешкин М.В.** Цифровой адаптивный фазовый корректор динамических характеристик систем автоматического регулирования. В кн. Современные проблемы математики и вычислительной техники: материалы IV республиканской научной конференции молодых ученых и студентов. — Брест: УО "БГТУ". – 2005. – С. 108–110.
17. **Скороспешкин М.В.** Цифровой адаптивный регулятор. // Сборник научных трудов. Вып. 19. Физико–математические науки. / Сургут. Гос. Ун–т. – Сургут: Изд–во СурГУ, 2004. – С. 110–114.