

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ

Дисциплина изучается в 1 и 2 семестрах магистратуры.

Предусмотрены лекции, лабораторные работы,
семинары и самостоятельная работа.

Итоговая аттестация: экзамены в 1 и 2 семестрах

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Конспект лекций.*

2. Афонин В.Л., Илюхин Ю.В. Интеллектуальное управление в робототехнике и мехатронике: учебное пособие – М.: ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», 2018. – 220 с.: ил. (*есть в библиотеке Станкина*)
3. Интеллектуальные роботы: учебное пособие / под общей ред. Е.И. Юревича / И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Макаров и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с. (*есть в библиотеке Станкина*)
4. Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова, 2е изд. — М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. — 744 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. - СПб.: Профессия, 2004.
6. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова и В.М. Лохина. – М.: Физматлит, 2001.

Дополнительная литература

9. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. - М.: Горячая линия - Телеком. 2006. - 452с.
10. Прикладные нечёткие системы. / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. - М.: Мир. 1993. - 368 с.
11. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. – Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 312 с.
12. Илюхин Ю.В. Компьютерное управление мехатронными системами: учебное пособие. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин».– 2014. – 320 с.: ил. ISBN 978-5-7028-0737-9. (*есть в библиотеке Станкина*)
13. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2006. – 256 с. (*есть в библиотеке Станкина*)
14. Научно-технический журнал «Мехатроника, автоматизация, управление».

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ И МЕХАТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ

В **состав** системы управления входят, по крайней мере, три компонента:

- **объект управления**,
- **устройство управления**,
- **комплекс датчиков**, дающих информацию о состоянии объекта управления и взаимодействующих с ним компонентов окружающей среды.

Объектом управления, называемым также **управляемым объектом**, может быть собственно механический объект, который требуется заставить совершать желаемые движения, подавая на него управляющее воздействие. Например, в качестве такого объекта может выступать рабочий орган манипулятора в виде схвата или технологического инструмента.

Движение объекта управления задаётся с помощью **управляющего воздействия**, которое формируется устройством управления. Но управляющее воздействие, как правило, имеет малую мощность и не способно привести в движение механический объект управления без использования преобразователей энергии и усилителей мощности.

Поэтому чаще всего под объектом управления понимается **совокупность** механического объекта и исполнительного устройства.

Исполнительное устройство включает в себя **силовую часть** привода, в которую входят исполнительный двигатель, преобразователь движения и усилитель мощности, подключённый к источнику энергии (рис.1).

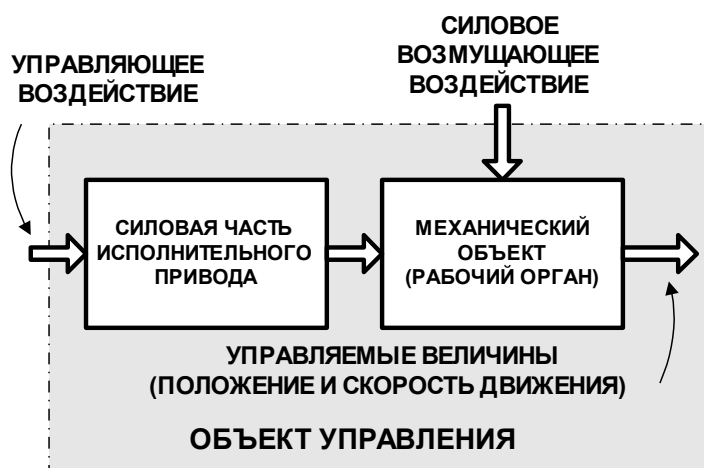


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

Такой расширенный состав объекта управления необходим для того, чтобы можно было, используя энергию источника питания, сформировать необходимые **силы**, действующие **на механический объект**, в функции от входного маломощного управляющего воздействия, создаваемого устройством управления.

В более общем случае под объектом управления понимается совокупность **рабочего органа** технологической машины и дополнительных механических исполнительных элементов технологической системы (рис.2).

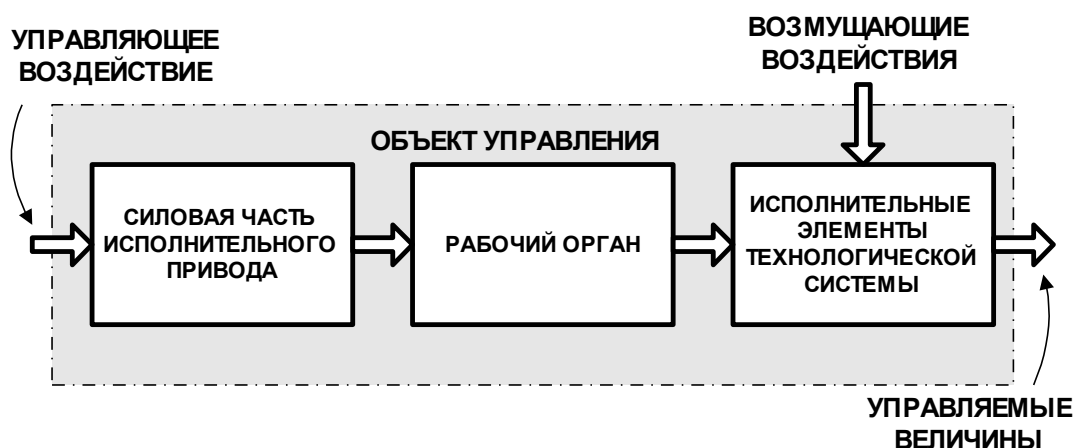


Рис. 2. Структурная схема объекта управления, состоящего из рабочего органа и элементов технологической системы

Управление представляет собой совокупность **действий**, направленных на обеспечение такого процесса функционирования управляемого объекта, при котором достигается **цель управления** при наличии **заданных ограничений** и **воздействий** со стороны окружающей среды.

Цель управления связывается с желаемым изменением во времени управляемой выходной величины объекта или группы переменных, характеризующих текущее состояние этого объекта.

Например, при управлении углом поворота вала электродвигателя цель управления может пониматься как получение в каждый момент времени минимальной разности (**рассогласования**) между требуемым и фактическим углом поворота этого вала.

В теории управления такое рассогласование называют **ошибкой** системы управления. В идеальном случае эта ошибка должна быть равна нулю.

Для достижения цели управления со стороны устройства управления к объекту управления прикладывается *управляющее воздействие*. Оно формируется *устройством управления* с учётом статических и динамических свойств объекта управления таким образом, чтобы достаточно быстро и качественно свести к нулю рассогласование и при этом устранить негативное мешающее влияние внешних возмущающих воздействий.

Устройство управления функционирует на основании поступающего извне *задающего воздействия* и чаще всего учитывает текущее состояние объекта управления. Информацию о состоянии объекта управления даёт *комплекс датчиков сигналов обратных связей*.

Совокупность взаимодействующих друг с другом устройства управления, объекта управления и комплекса датчиков сигналов обратных связей представляет собой *систему автоматического управления (САУ)*.

ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ЭТАПЫ ИХ РАЗВИТИЯ

1. Управление без использования обратных связей

Реализуется *принцип управления по разомкнутой схеме*. Это наиболее простой вариант управления. Устройство управления оказывает управляющее воздействие на объект управления и *не контролирует* реакцию объекта (рис. 3).

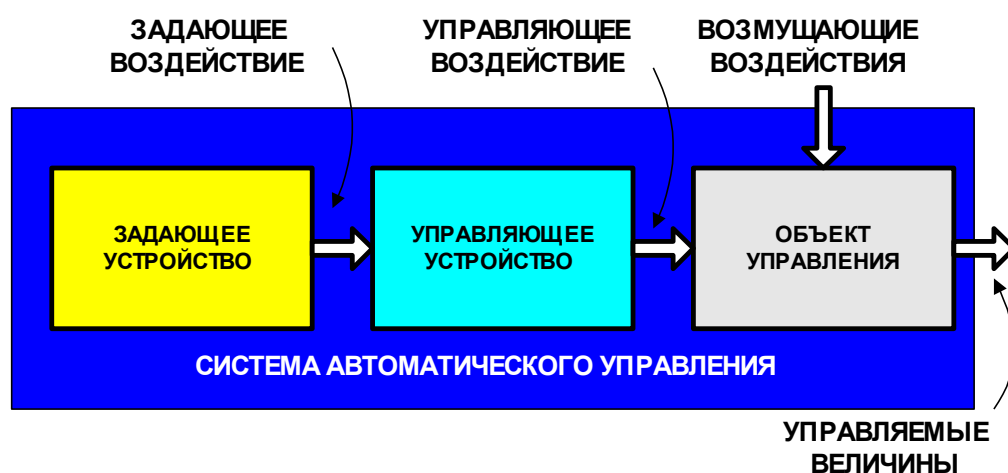


Рис. 3. Структура системы управления по разомкнутой схеме.

Преимущество такого варианта построения системы управления состоит в высоком быстродействии и, как правило, в отсутствии проблем с обеспечением устойчивости.

Но *недостаток* такой системы заключается в том, что *управляющее устройство не учитывает возмущающие воздействия*.

Если параметры объекта управления *известны заранее и не меняются*, а *внешнее возмущающее воздействие отсутствует*, то система работает качественно. Но при изменении значений параметров объекта и при наличии возмущающих воздействий точность системы и качество процессов управления резко снижаются.

2. Управление с использованием компенсирующих связей по возмущающим воздействиям реализует *принцип компенсации*.

Система разомкнута. Но благодаря введению *компенсирующих связей* повышается точность системы.

При компенсации влияния возмущающего воздействия в состав системы вводятся последовательно включённые *датчик возмущающего воздействия* и *корректирующее устройство*, вырабатывающее на своём выходе сигнал, *добавляемый* к задающему воздействию (рис. 4).

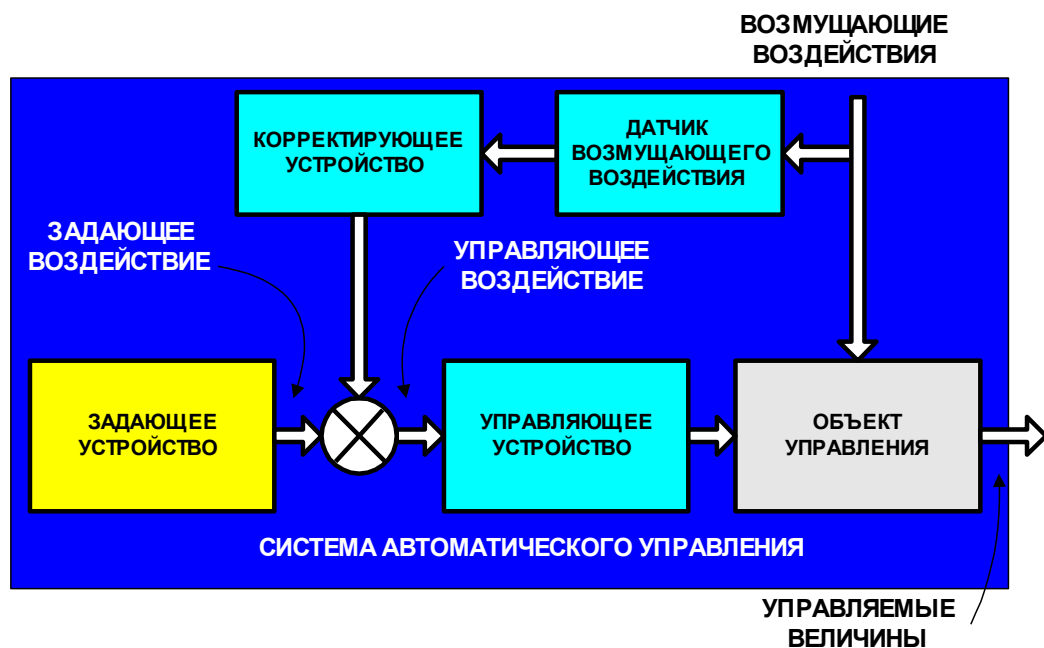


Рис. 4. Структурная схема системы управления, построенная в соответствии с принципом компенсации

Образуемое в результате этого результирующее управляющее воздействие содержит составляющую, способную **скомпенсировать влияние возмущения** на управляемую переменную.

Это достигается в том случае, если *известны и неизменны свойства объекта управления и могут быть измерены внешние воздействия*.

3. Управление, построенное с использованием обратных связей

Реализуется *принцип управления по отклонению* (принцип обратной связи).

Принцип обратной связи означает, что *управляющее воздействие формируется в функции от рассогласования* (разности между задающим воздействием и измеренной управляемой величиной) (рис. 5).

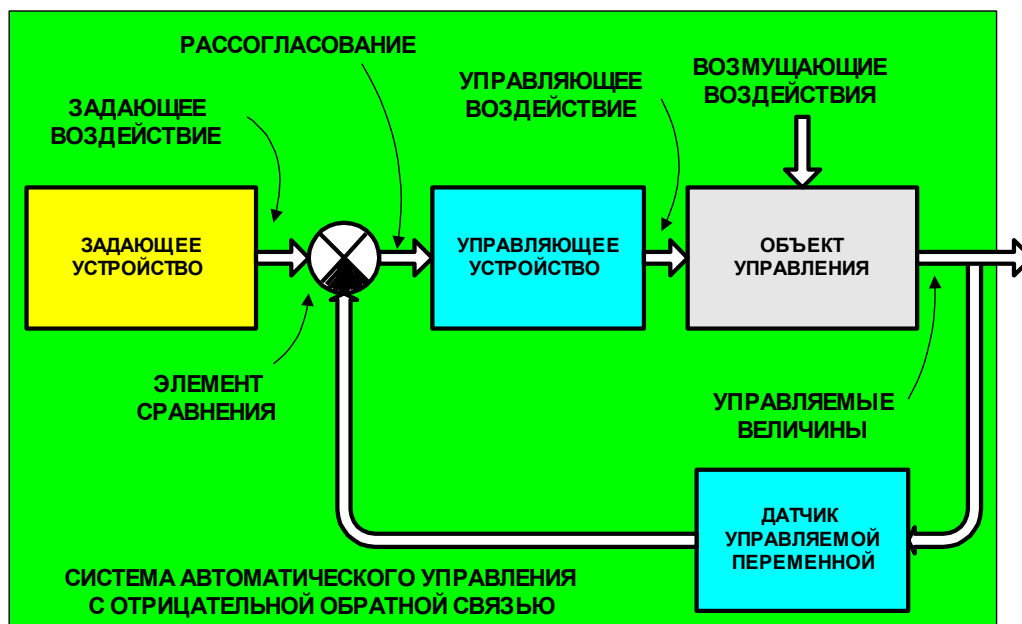


Рис. 5. Структурная схема системы управления, построенная с использованием обратной связи

Управляющее устройство называют *регулятором*, реализующим выбранный *закон управления* (*закон регулирования*).

Регулятор системы автоматически вырабатывает управляющее воздействие, приводящее *к уменьшению рассогласования без измерения возмущающих воздействий*.

Наиболее распространёнными регуляторами являются пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы. Такие регуляторы являются линейными. Они описываются линейными дифференциальными и алгебраическими уравнениями.

Но существуют и более сложные регуляторы: нелинейные, адаптивные, построенные с использованием элементов искусственного интеллекта.

Пример – следящая система на основе коллекторного двигателя постоянного тока в виде *системы контуров подчинённого регулирования* (рис.6).

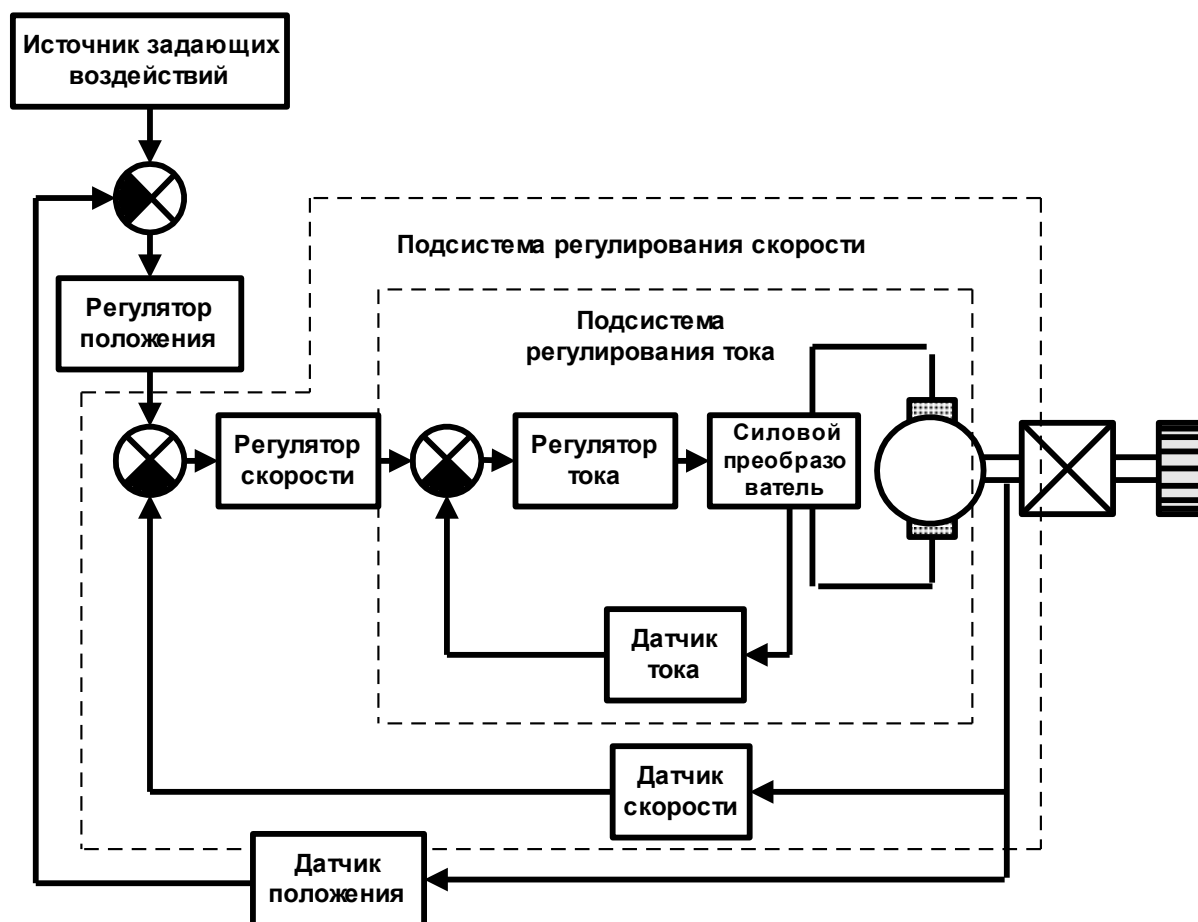


Рис. 6. Структура следящего привода с обратными связями по положению, скорости и току

Динамические свойства системы улучшаются благодаря постоянному контролю состояния объекта и формированию управляющего воздействия в функции от текущего значения рассогласования (ошибки системы). *Структура* системы такова, что *движение объекта управления всегда направляется в сторону устранения рассогласования*.

Преимущество систем управления, построенных с использованием обратных связей, состоит в том, что они обладают высокой точностью и пониженным влиянием изменений параметров объекта и возмущающих воздействия на качество процессов управления.

4. Комбинированное управление – это такое управление, при котором одновременно реализуются принцип управления по рассогласованию и принцип компенсации при управлении по разомкнутому циклу.

Таким образом, в системе присутствуют и *обратные связи*, и *прямые связи* компенсационного характера (рис.7).

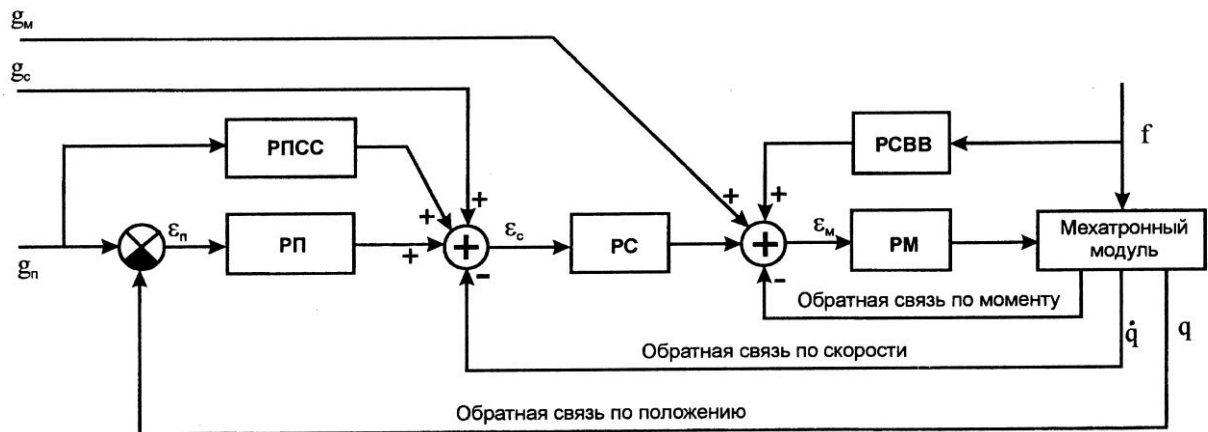


Рис. 7. Структурная схема привода с обратными и прямыми связями

Например, для повышения точности отработки задающего воздействия к этому воздействию добавляют составляющую, являющуюся суммой сигналов, пропорциональных производным от задающего воздействия по времени.

В настоящее время для улучшения динамических свойств систем управления в робототехнике и мехатронике применяется ряд новых подходов и методов управления.

Среди них

- **адаптивное** управление,
- **робастное** управление,
- **оптимальное** управление,
- **интеллектуальное** управление.

5. Адаптивное управление

Особенность адаптивных систем состоит в том, что они способны *приспосабливаться* к изменениям свойств объекта управления или внешних воздействий, заранее неизвестным и происходящим в процессе функционирования системы управления.

Внутри управляющей части системы адаптивного управления присутствуют два элемента - *блок управления* и *блок адаптации*.

Блок адаптации

- *получает от датчиков сигналы* о состоянии объекта управления и внешних воздействиях,
- *распознает* события, требующие коррекции программ, исполняемых блоком управления,
- производит *изменение* значений параметров устройства управления, формируемых им сигналами или закона управления.

Это позволяет добиться улучшения качества работы системы управления при изменении свойств объекта управления или внешних воздействий.

Одна из часто встречающихся разновидностей адаптивных систем – это *системы с эталонной моделью*, свойства которой соответствуют желаемым свойствам системы управления (рис. 8).

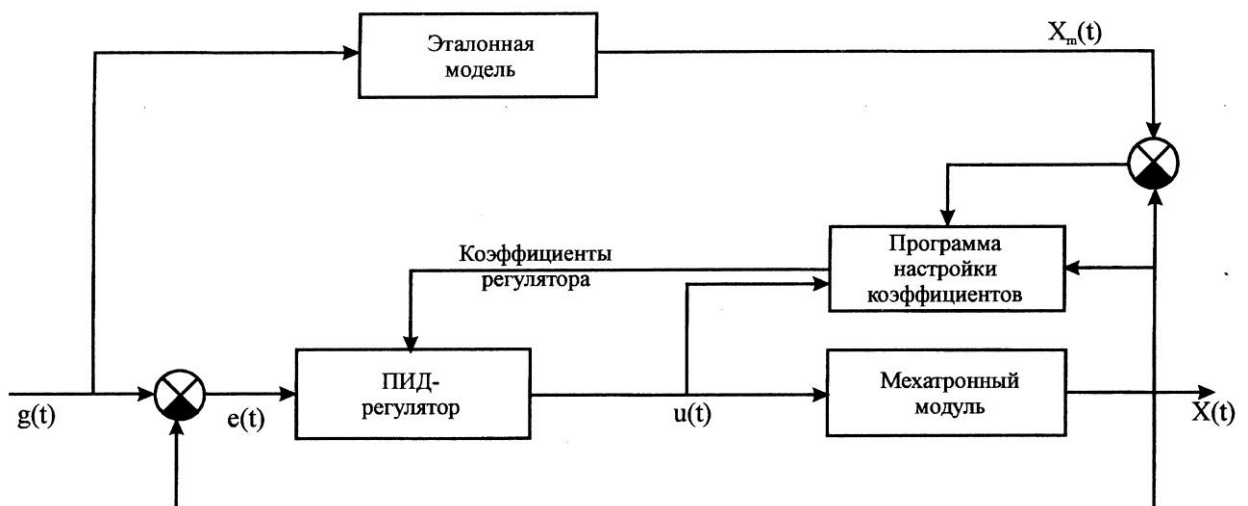


Рис. 8. Пример структурной схемы адаптивной системы с эталонной моделью

Свойства реальной системы управления могут сильно отличаться от желаемых свойств в результате нестабильности параметров объекта управления и внешних воздействий.

Реакция эталонной модели на задающее воздействие сравнивается с реакцией на то же воздействие реальной системы управления.

Рассогласование между этими реакциями служит основанием для выяснения того, какие параметры регулятора системы требуется скорректировать и каким образом. Такие операции осуществляются блоком настройки коэффициентов.

В результате подстройки значений параметров ПИД-регулятора динамические свойства системы управления улучшаются. Её реакция *приближается* к реакции эталонной модели.

6. Робастное управление

Основа систем с робастным управлением та же, что и у систем, работающих по отклонению. Но они построены так, что *свойства системы управления остаются весьма стабильными* при изменении параметров объекта и внешних воздействий в широких диапазонах значений.

Современные тенденции таковы, что наиболее ответственные системы стремятся строить как робастные (*грубые*) системы.

7. **Оптимальное управление** обеспечивает минимизацию или максимизацию *показателя качества* системы управления.

Например, оптимальное управление обеспечивает минимизацию времени перехода системы из исходного состояния в конечное состояние (это системы, оптимальные по быстродействию), либо минимизацию затрат энергии при управлении, либо минимизацию ошибки (системы оптимальные по точности).

Принципиально важно, что оптимизация выполняется при задании *критерия оптимальности* и *с учётом заданных ограничений*. Наиболее часто применяемые идеи – это *принцип максимума Понтрягина* и метод *динамического программирования Белмана*.

8. Интеллектуальное управление – это управление, основанное на применении различных технологий **искусственного интеллекта**, копирующих элементы интеллектуальных способностей человека и осуществляющих накопление знаний и их использование для анализа ситуации и принятия адекватного решения о рациональных действиях для достижения цели управления.

Интеллект человека (от латинского слова *intellectus* , означающего понимание) — это качество психики, состоящее из

- способности **адаптироваться** к новым ситуациям,
- способности к **обучению** на основе опыта,
- **пониманию и применению абстрактных концепций** и
- использованию своих **знаний** для **целенаправленного воздействия** на окружающую среду.

Интеллект — это, прежде всего, целеполагание, предвидение результатов действий, планирование ресурсов и построение стратегии достижения цели.

Искусственный интеллект (Artificial Intelligence – AI) – это способность технической системы (робота, технологической машины) действовать таким образом, что она будет восприниматься человеком как разумная.

Системы управления, в которых применяются методы искусственного интеллекта, называют **интеллектуальными системами управления (ИСУ)** или **системами управления с элементами искусственного интеллекта**.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Понятие об адаптивных системах

Слово *адаптация* происходит от латинского слова *adaptatio*, означающего приспособление. Оно означает процесс приспособления живого субъекта или технического объекта к изменяющимся условиям внешней среды с целью оптимизации процессов функционирования по некоторому заранее заданному критерию.

Вначале понятие адаптации использовалось применительно к биологическим организмам. Речь шла о приспособлении организма к внешним условиям в процессе эволюции, включая физиологическую и поведенческую составляющие. В частности, адаптация может обеспечивать повышение шансов на выживаемость при действии неблагоприятных факторов или успешность конкуренции с другими особями. Возможности адаптации ограничены и определяются особенностями организма.

В технике *адаптивная система* – это система, которая автоматически и целенаправленно изменяет значения параметров и структуру регуляторов с целью достижения оптимального состояния при действии на неё разнообразных *факторов*. Этими факторами могут быть внешние *воздействия* или обусловленные этими воздействиями *изменения параметров* объекта управления. К числу таких факторов относятся, например, переменные силовые воздействия на объект управления, изменения момента инерции подвижных частей и коэффициентов передачи различных звеньев системы управления. Адаптивная система приспособляется к этим факторам, стремясь уменьшить их негативное влияние на качество своего функционирования.

Свойство адаптивности системе управления придаёт *адаптивное управление*, которое обеспечивает изменение параметров и/или структуры регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений, действующих на объект управления.

Существует три общих свойства, которые вместе характеризуют процесс адаптации.

1. Рабочие характеристики всей системы находятся под постоянным контролем и управлением с помощью дополнительных элементов и устройств.

2. Наблюдаемое поведение выражается в виде некоторого показателя качества или числовой характеристики, т.е. характеристики и операции в системе оцениваются количественно.

3. Если показатель качества изменился, то для того, чтобы он достиг снова оптимального значения, с помощью соответствующих дополнительных устройств изменяют параметры устройства управления, что приводит к изменению параметров всей системы.

Адаптивные системы всегда являются системами с обратными связями. Но не всякая система с обратной связью будет адаптивной.

Классификация адаптивных систем

Существует несколько вариантов классификации адаптивных систем.

Классификация адаптивных систем по характеру изменений в управляющем устройстве:

- самонастраивающиеся адаптивные системы,
- самоорганизующиеся адаптивные системы.

В самонастраивающихся адаптивных системах изменяются только значения параметров регулятора.

В самоорганизующихся адаптивных системах изменяется структура регулятора.

Если закон изменения характеристик объекта во времени неизвестен, а разовая или программная настройка не позволяет получить желаемое качество работы системы, то в неё вводят элементы самонастройки.

Самонастраивающиеся системы строятся на основе принципа управления по отклонению или с использованием комбинированного управления. Характерными свойствами таких систем являются:

- наличие двух контуров управления: **основного контура управления** и **контура самонастройки**;
- наличие элементов с изменяющимися параметрами;
- наличие вычислительных средств;
- повышенная чувствительность к изменению параметров системы и входных сигналов;

- использование случайных сигналов для осуществления автоматического поиска экстремума.

Классификация адаптивных систем по способу изучения свойств объекта для адаптивной корректировки параметров и структуры.

- поисковые адаптивные системы,
- беспойсковые адаптивные системы.

К поисковым адаптивным системам относятся экстремальные системы. Их особенность состоит в том, что они стремятся поддерживать экстремальное значение показателя качества функционирования. При этом система осуществляет поиск этого экстремального значения.

В зависимости от способа получения информации для подстройки параметров регулятора беспойсковые адаптивные системы делятся на

- адаптивные системы с эталонной моделью,
- адаптивные системы с идентификатором.

Адаптивные системы с идентификатором называют также адаптивными системами с настраиваемой моделью.

В состав адаптивной системы с эталонной моделью (ЭМ) входит динамическая модель системы, обладающая желаемыми свойствами. Управляющие воздействия, формируемые системой для изменения параметров или структуры регулятора, вырабатываются путём сравнения реакций объекта управления и эталонной модели. В результате этого поведение адаптивной системы становится похожим на поведение эталонной модели.

Способы управления в адаптивных системах с идентификатором делятся на

- прямой
- косвенный, который называется также непрямым.

При косвенном адаптивном управлении сначала делается оценка параметров объекта, после чего на основании полученных оценок определяются требуемые значения параметров регулятора и производится их подстройка.

При прямом адаптивном управлении благодаря учёту взаимосвязи параметров объекта и регулятора производится непосредственная оценка и

подстройка параметров регулятора, чем исключается этап идентификации параметров объекта. По способу достижения эффекта самонастройки системы с моделью делятся на

- системы с сигнальной (пассивной) адаптацией
- системы с параметрической (активной) адаптацией.

В системах с сигнальной адаптацией эффект самонастройки достигается с помощью компенсирующих сигналов без изменения параметров управляющего устройства. Системы, сочетающие в себе оба вида адаптации, называют

- **комбинированными.**

Структура адаптивной системы такова, что в ней можно выделить основной контур управления и вспомогательный контур адаптации.

Основной контур управления строится на основании принципа управления по отклонению и содержит регулятор и совокупность последовательно соединённых элементов, которые можно считать результирующим объектом управления (рис. 1). В состав последнего входят механический объект управления, исполнительный двигатель, усилитель мощности (силовой преобразователь). К результирующему объекту управления можно отнести и датчик главной обратной связи.

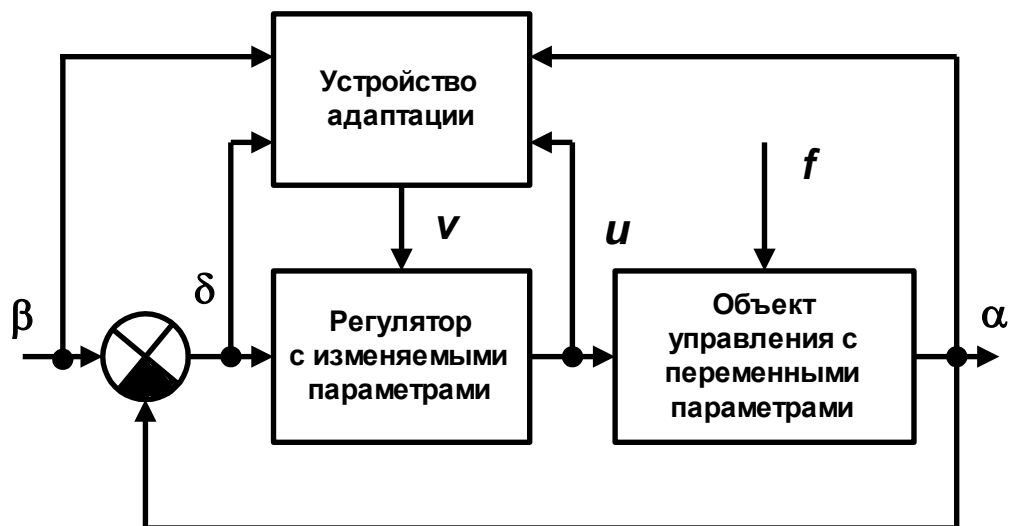


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного управления

Вспомогательным контуром называется контур, осуществляющий подстройку параметров регулятора таким образом, чтобы обеспечить заданное качество системы управления при изменяющихся параметрах

объекта управления. Этот контур образуется из части компонентов основного контура и устройства адаптации. Вспомогательный контур осуществляет выделение, измерение и обработку информации о переменных параметрах объекта управления. Для этого он использует сигналы, циркулирующие в системе. На основании полученной информации производится подстройка параметров регулятора.

Ошибка регулирования δ , представляющая собой разность задающего воздействия β и регулируемой переменной α , поступает на вход регулятора. На его выходе образуется управляющее воздействие u , которое изменяет желаемым образом регулируемую переменную α .

Проблема состоит в том, что компоненты результирующего объекта управления имеют переменные параметры, на значения которых влияют внешние воздействия f , являющиеся функциями времени. При постоянных параметрах регулятора это не позволяет добиться высокого качества управления при всех возможных сочетаниях значений параметров объекта управления. Поэтому требуется введение устройства адаптации и наличие в регуляторе изменяемых параметров.

Устройство адаптации принимает сигналы β , δ , u , α и использует их для вычисления воздействий v , передаваемых на регулятор. Таким образом, под влиянием воздействий v , формируемых во вспомогательном контуре управления, могут быть изменены некоторые или все параметры регулятора либо непосредственно скорректировано управляющее воздействие.

По способу самонастройки адаптивные системы подразделяются на адаптивные системы разомкнутого и замкнутого типов.

Адаптивные системы разомкнутого типа имеют разомкнутый вспомогательный контур настройки параметров регулятора. Такие системы называются также адаптивными системами с разомкнутыми цепями самонастройки.

Для работы таких систем достаточно измерять внешние воздействия и знать зависимость изменяющихся параметров объекта управления от этих внешних воздействий.

Адаптивные системы замкнутого типа имеют замкнутый вспомогательный контур настройки параметров. Они также называются адаптивными системами с замкнутыми цепями самонастройки.

ПРИМЕРЫ СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Пример системы с разомкнутыми цепями самонастройки

Структурная схема системы с разомкнутыми цепями самонастройки показана на рис.2.

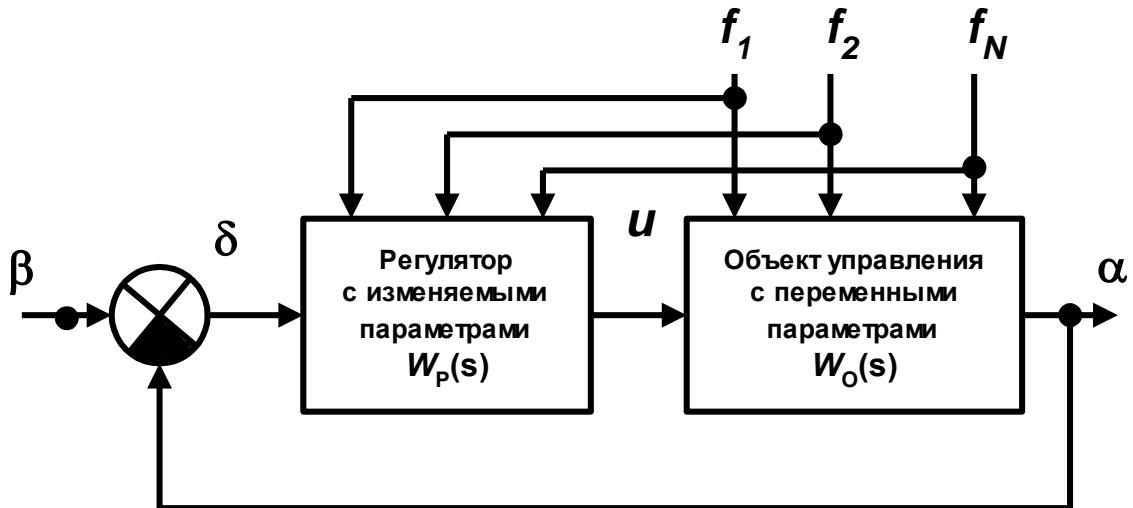


Рис. 2. Структурная схема системы с разомкнутыми цепями самонастройки

Она состоит из регулятора с передаточной функцией $W_P(s)$ и объекта управления с передаточной функцией $W_O(s)$. К объекту управления приложены внешние воздействия $f_1(s)$, $f_2(s)$, ..., $f_N(s)$, которые изменяют передаточную функцию объекта управления.

Задача состоит в том, чтобы с помощью автоматической подстройки параметров регулятора обеспечить стабильные свойства системы управления, а значит, стабильную передаточную функцию замкнутой системы

$$\Phi(s) = \frac{W_P(s)W_O(s)}{1 + W_P(s)W_O(s)}.$$

Наилучшие свойства система имеет в том случае, если объект управления и регулятор обладают «номинальными» передаточными функциями $W_{OH}(s)$ и $W_{PH}(s)$.

Для постоянства передаточной функции необходимо выполнить условие

$$W_P(s) W_O(s) = W_{PH}(s) W_{OH}(s).$$

Поэтому передаточная функция регулятора должна изменяться по закону

$$W_P(s) = \frac{W_{PH}(s)W_{OH}(s)}{W_O(s)}.$$

Предполагается, что известен закон изменения передаточной функции объекта управления под воздействием величин $f_1(s)$, $f_2(s)$, ..., $f_N(s)$. Тогда в адаптивной системе производится измерение этих воздействий и на основании результатов измерения вычисляется актуальная оценка передаточной функции объекта управления $W_{O.PACH}(s)$. Передаточная функция регулятора фактически формируется в соответствии с уравнением

$$W_P(s) = \frac{W_{PH}(s)W_{OH}(s)}{W_{O.PACH}(s)}.$$

Рассмотрим *пример*. В основном контуре системы управления последовательно включены ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W_P(s) = k_P \frac{T_P s + 1}{T_P s},$$

где k_P и T_P – коэффициент усиления и постоянная времени регулятора соответственно, и объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W_O(s) = \frac{k_0}{(T_0 s + 1)(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)},$$

где k_0 – коэффициент передачи объекта управления; T_0 и τ – постоянные времени; ζ – коэффициент относительного демпфирования, причём $\tau = 0,01\text{с}$ и $\zeta = 0,5$.

Внешнее воздействие f вызывает изменение параметров k_0 и T_0 объекта управления. Зависимости этих параметров от f считаются известными:

$$k_0 = k_{0H} f,$$

$$T_0 = T_{0H} f^{-1}.$$

Значения параметров $k_{0H} = 10$ и $T_{0H} = 0,02$ с представляют собой номинальные значения коэффициента передачи и постоянной времени соответственно (при $f = 1$).

При $f = 1$ наилучшая (номинальная) настройка системы управления характеризуется частотой среза в разомкнутом состоянии, равной 20 рад/с, и соответствует следующим значениям параметров ПИ-регулятора: $k_P = k_{PH} = 0,04$ и $T_P = T_{0H} = 0,02$ с. В этом случае система имеет переходный процесс, показанный на рисунке А1. Длительность переходного процесса, имеющего апериодический характер, составляет примерно 0,12 с. Перерегулирование отсутствует.

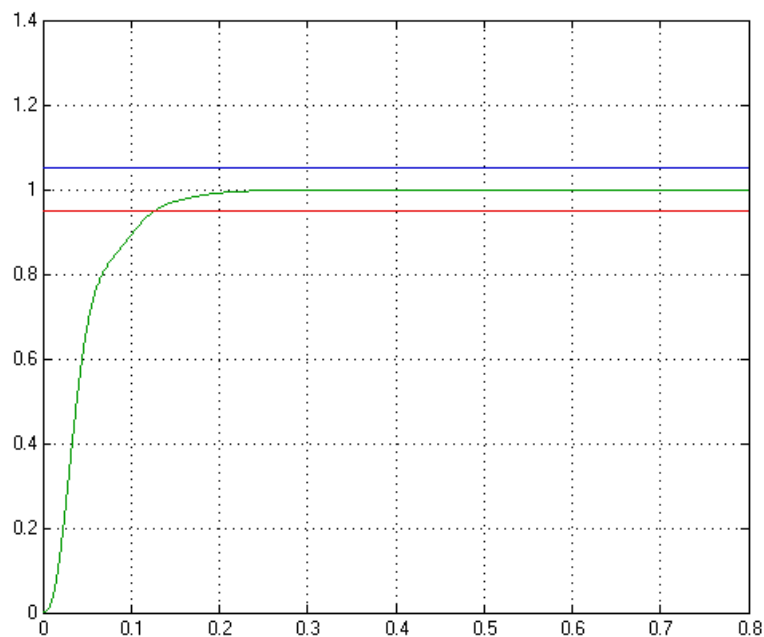


Рисунок А1. Переходный процесс системы управления при номинальной настройке регулятора

Будем считать, что значения f изменяются в диапазоне от 0,333 до 3. Тогда коэффициент передачи k_0 может принимать значения от 3,33 до 30, а постоянная времени объекта управления T_0 – значения от 6,66 мс до 60 мс. При этом, если не менять настройки регулятора, свойства системы управления существенно ухудшаются. В частности при $f = 3$ коэффициент передачи $k_0 = 30$, постоянная времени объекта управления $T_0 = 6,66$ мс, а переходный процесс в системе управления имеет вид, изображённый на рисунке А2.

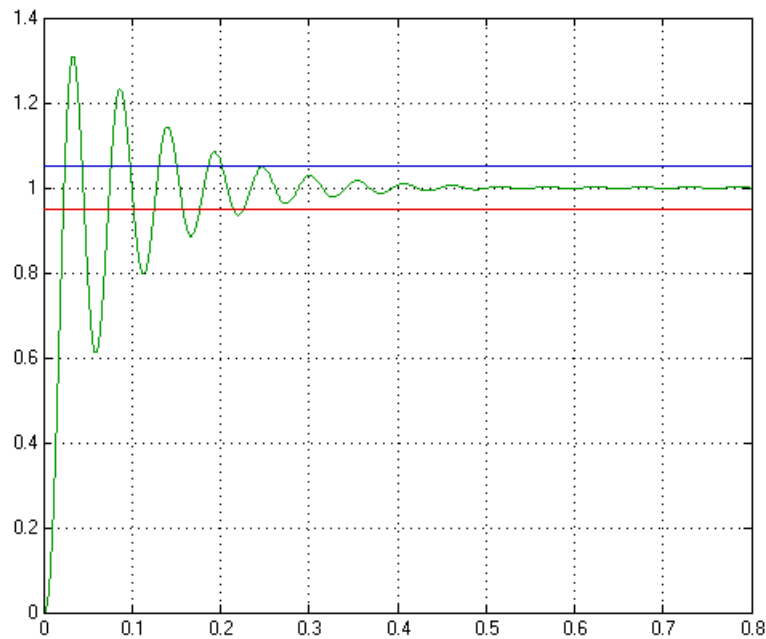


Рисунок А2. Переходный процесс системы управления при номинальной настройке регулятора и воздействии $f = 3$

Видно, что переходный процесс имеет явно выраженный колебательный характер, длительность переходного процесса увеличилась до 0,22 с, а перерегулирование достигает 30%. Причина такого изменения свойств системы состоит в существенном снижении её запасов устойчивости из-за чрезмерного увеличения частоты среза.

При снижении f до 0,333 качество системы так же оказывается низким. В результате значительного уменьшения коэффициента передачи объекта управления падает значение частоты среза системы в разомкнутом состоянии. Поэтому, хотя переходный процесс носит апериодический характер и перерегулирование практически отсутствует, длительность этого процесса, равная примерно 0,33 с, оказывается значительно больше того же показателя при номинальных значениях параметров объекта управления (рисунок А3).

Приведённые результаты анализа свойств системы при различных значениях воздействия f свидетельствуют о целесообразности применения адаптивного управления для стабилизации свойств системы.

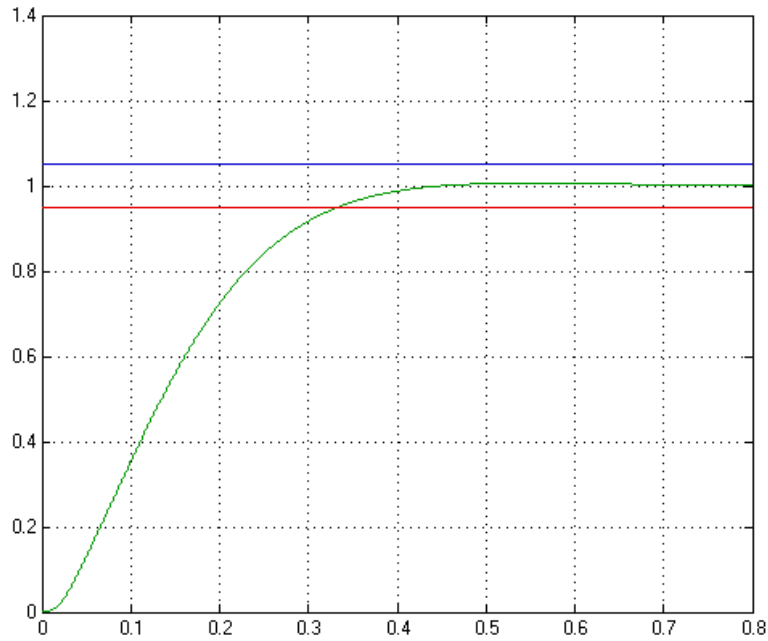


Рисунок А3. Переходный процесс системы управления при номинальной настройке регулятора и воздействии $f = 0,333$

Для построения системы адаптивного управления воспользуемся формулой

$$W_P(s) = \frac{W_{PH}(s)W_{OH}(s)}{W_{O.PACЧ}(s)},$$

где
$$W_{OH}(s) = \frac{k_{0H}}{(T_{0H}s + 1)(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)},$$

$$W_{PH}(s) = k_{PH} \frac{T_{0H}s + 1}{T_{0H}s},$$

$$W_{O.PACЧ}(s) = \frac{k_{0H}f}{(T_{0H}f^{-1}s + 1)(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)}.$$

Учитывая, что

$$W_{PH}(s)W_{OH}(s) = \frac{k_{PH}k_{0H}}{T_{0H}s(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)},$$

имеем

$$W_P(s) = \frac{k_{PH}}{f^2} \cdot \frac{(T_{0H}f^{-1}s + 1)}{T_{0H}f^{-1}s}.$$

Из последней формулы следуют правила адаптивной подстройки параметров ПИ-регулятора на основании измеренного воздействия f :

$$k_P = k_{PH} f^{-2},$$

$$T_P = T_{PH} f^{-1}.$$

При реализации полученных зависимостей свойства адаптивной системы оказываются стабильными при изменении воздействия f в указанном выше диапазоне значений, а переходный процесс приобретает вид, показанный на рисунке А4.

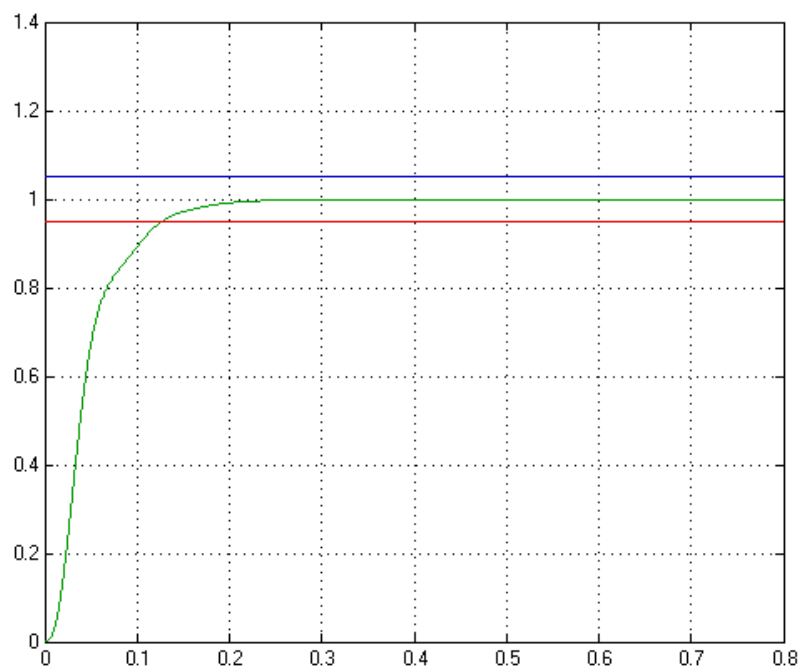


Рисунок А4. Переходный процесс системы управления при адаптивной подстройке значений параметров регулятора

Можно заметить, что, как и ожидалось, переходный процесс на рисунке А4 не отличается от процесса при номинальной настройке регулятора и номинальном значении воздействия (рисунок А1).

Точность решения задачи и динамические свойства системы зависят от точности измерения внешних воздействий и адекватности математической модели, характеризующей влияние этих воздействий на свойства объекта управления.

Естественно, что в данной постановке задача адаптивного управления решается приближённо. Тем не менее, такой подход широко применяется при построении адаптивных систем.

Пример системы с замкнутыми цепями самонастройки и сигнальной адаптацией

Рассматривается система, которая должна обладать стабильным качеством процессов управления. В прямой цепи основного контура управления находятся регулятор с передаточной функцией $W_P(s)$ и объект управления с передаточной функцией $W_O(s)$.

Реакция реальной системы сравнивается с реакцией эталонной модели, которая имеет передаточную функцию $W_Э(s)$, соответствующую желаемым свойствам всей системы адаптивного управления (рис. 3).

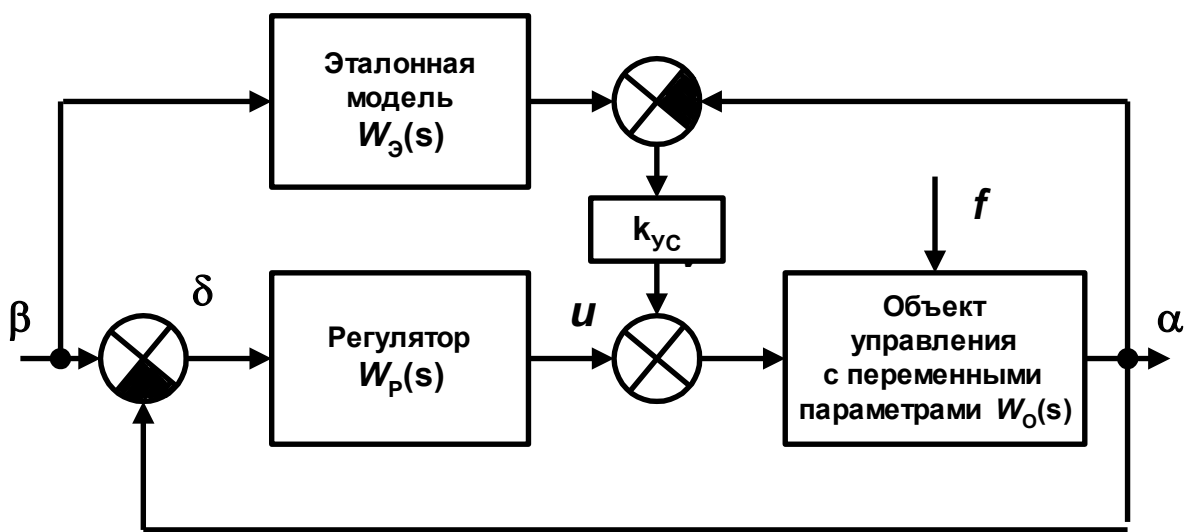


Рис. 3. Структурная схема системы с замкнутыми цепями самонастройки и сигнальной адаптацией

Цепь самонастройки содержит элемент сравнения и усилитель с коэффициентом усиления k_{yc} . На выходе усилителя образуется **корректирующий сигнал**, который суммируется с выходным сигналом регулятора и способствует улучшения динамических свойств системы в целом. В этом можно убедиться, выражение, характеризующее передаточную функцию $\Phi(s)$ замкнутой адаптивной системы:

$$\Phi(s) = \frac{W_P(s)W_O(s) + k_{yc}W_O(s)W_Э(s)}{1 + W_P(s)W_O(s) + k_{yc}W_O(s)}$$

Нетрудно заметить, что при достаточно большом значении k_{yc} передаточная функция замкнутой системы $\Phi(s)$ стремится к передаточной

функции эталонной системы $W_{\varepsilon}(s)$. Поэтому адаптивная система приобретает свойства эталонной системы.

Однако при построении адаптивных систем с эталонной моделью может возникнуть проблема. Дело в том, что реализовать достаточно большое значение коэффициента усиления k_{yc} удаётся далеко не всегда. Это вызвано опасностью потери устойчивости системы, которая имеет два контура обратных связей. А при недостаточно высоком значении k_{yc} качество адаптивной системы может оказаться невысоким. Вместе с тем, адаптивные системы с сигнальной адаптацией достаточно широко распространены. Это обусловлено, в том числе, простотой их реализации.

Рассмотрим *пример*. В основном контуре системы управления последовательно включены П-регулятор с коэффициентом усиления k_p и объект управления, имеющий передаточную функцию

$$W_O(s) = \frac{k_0}{s(T_0s + 1)(\tau^2s^2 + 2\zeta\tau s + 1)},$$

где k_0 – коэффициент передачи объекта управления; T_0 и τ – постоянные времени; ζ – коэффициент относительного демпфирования, причём $T_0 = 0,02\text{с}$; $\tau = 0,01\text{ с}$ и $\zeta = 0,5$. Под действием внешнего возмущения коэффициент передачи меняется. Закон изменения его значений неизвестен. Но известно, что значения k_0 могут принадлежать интервалу от 1 до 10.

При настройке основного контура управления найдено наилучшее значение коэффициента усиления регулятора $k_p = 1,5$. Для максимального значения коэффициента $k_0 = 10\text{ с}^{-1}$ это обеспечивает значение частоты среза разомкнутой системы $\omega_C = 15\text{ с}^{-1}$. В этом случае переходный процесс изменения выходной переменной системы имеет вид, представленный на рисунке А5.

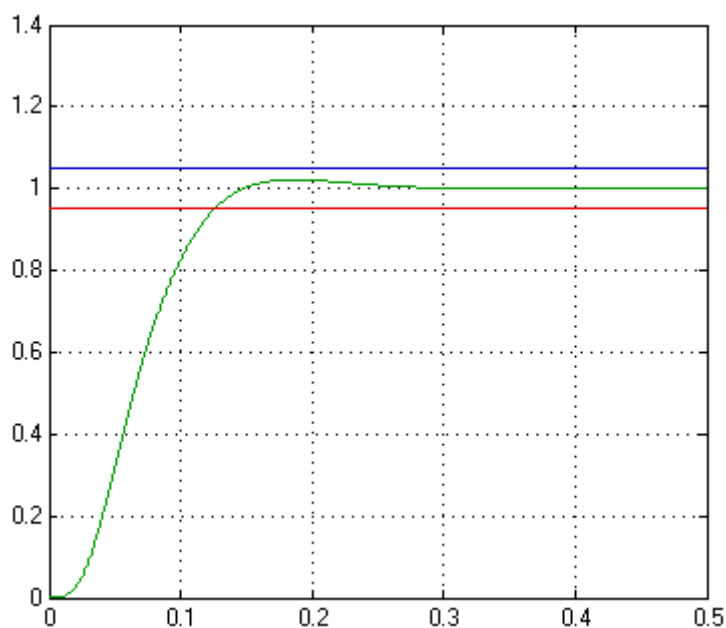


Рисунок А5. Переходный процесс в неадаптивной системе при $k_0 = 10 \text{ с}^{-1}$

Можно заметить, что перерегулирование незначительно (примерно равно 2,5%), а длительность переходного процесса, составляющая 0,125 с, вполне приемлема. Однако при меньших значениях коэффициента k_0 длительность процесса регулирования увеличивается и, таким образом, качество системы управления ухудшается. При $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ переходный процесс увеличивается до 0,33 с (рисунок А6), а при $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ он достигает примерно 2 с (рисунок А7).

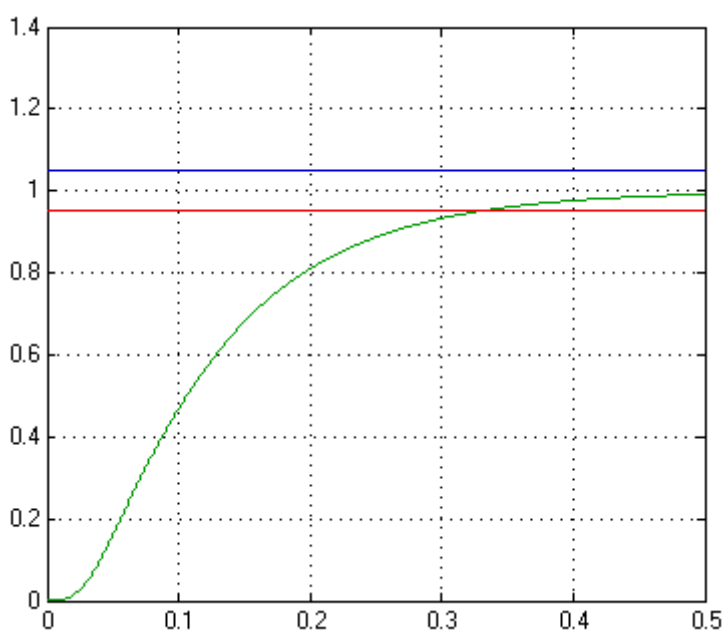


Рисунок А6. Переходный процесс в неадаптивной системе при $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$

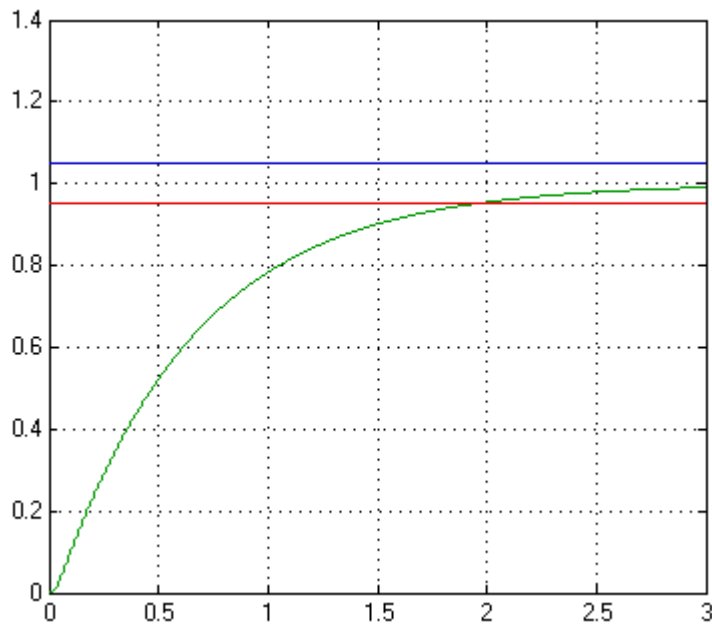


Рисунок А7. Переходный процесс в неадаптивной системе при $k_0 = 1 \text{ с}^{-1}$

Для улучшения динамических свойств системы управления целесообразно использовать сигнальную адаптацию. В качестве эталонной модели замкнутой системы управления выбирается модель аperiodического звена, описываемого передаточной функцией

$$W_{\mathcal{D}}(s) = \frac{1}{T_{\mathcal{D}}s + 1},$$

с постоянной времени $T_{\mathcal{D}} = 0,05 \text{ с}$.

Для обеспечения необходимых запасов устойчивости адаптивной системы выбор допустимого значения коэффициента усиления k_{yc} целесообразно производить при наибольшем допустимом значении коэффициента передачи k_0 объекта управления. В результате компьютерного моделирования установлено, что приемлемым значением коэффициента k_{yc} является 1,5. В этом случае переходный процесс системы имеет вид, показанный на рисунке А8, а процесс изменения дополнительного корректирующего сигнала изображён на рисунке А9.

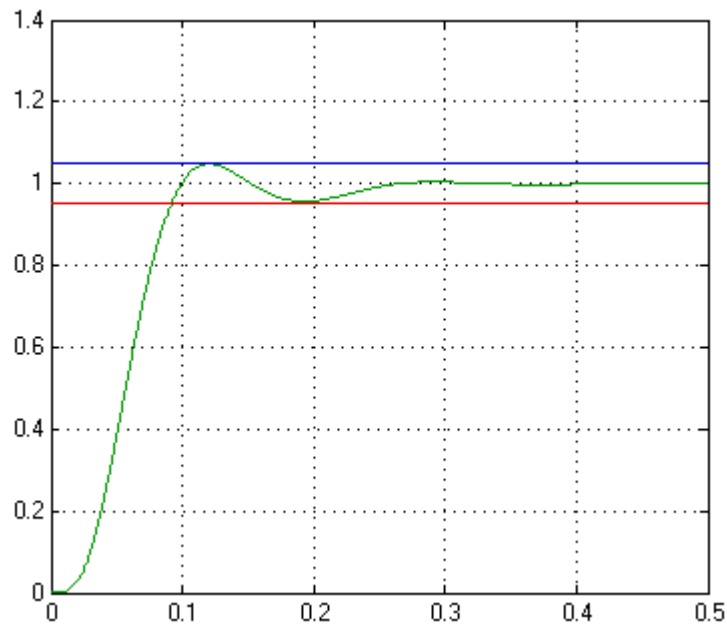


Рисунок А8. Переходный процесс в адаптивной системе при $k_0 = 10 \text{ с}^{-1}$

В результате действия сигнала в дополнительном контуре обратной связи запасы устойчивости несколько снизились. Это привело к появлению затухающих колебаний. Но при этом перерегулирование не превышает 5%, а время переходного процесса составляет примерно 0,09 с, что можно считать приемлемым.

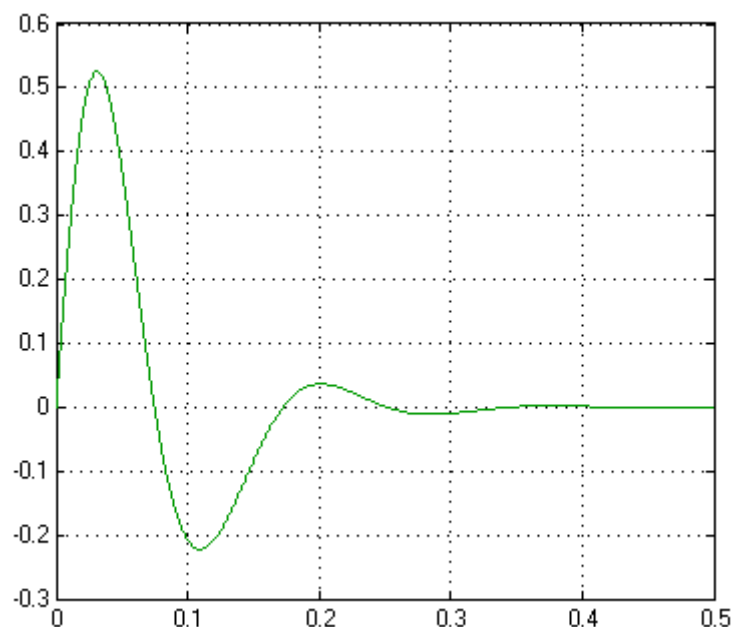


Рисунок А9. Процесс изменения корректирующего сигнала при $k_0 = 10 \text{ с}^{-1}$

Благодаря сигналу адаптивной коррекции движение объекта управления форсируется при значениях коэффициента передачи, меньших 10

с^{-1} . В результате этого время переходного процесса сокращается по сравнению со случаем отсутствия адаптации. При $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ в адаптивной системе возникает практически аperiodический переходный процесс, время которого составляет примерно 0,18 с (рисунок A10). Процесс изменения соответствующего корректирующего сигнала показан на рисунке A11.

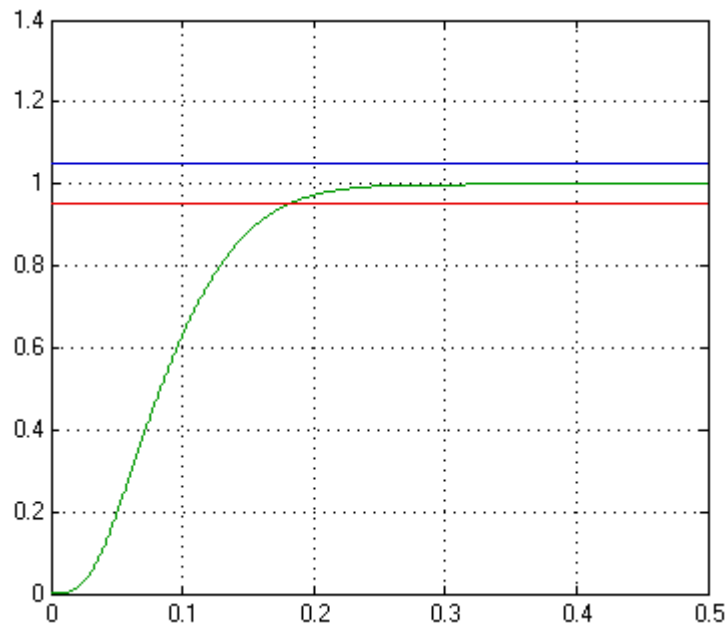


Рисунок A10. Переходный процесс в адаптивной системе при $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$

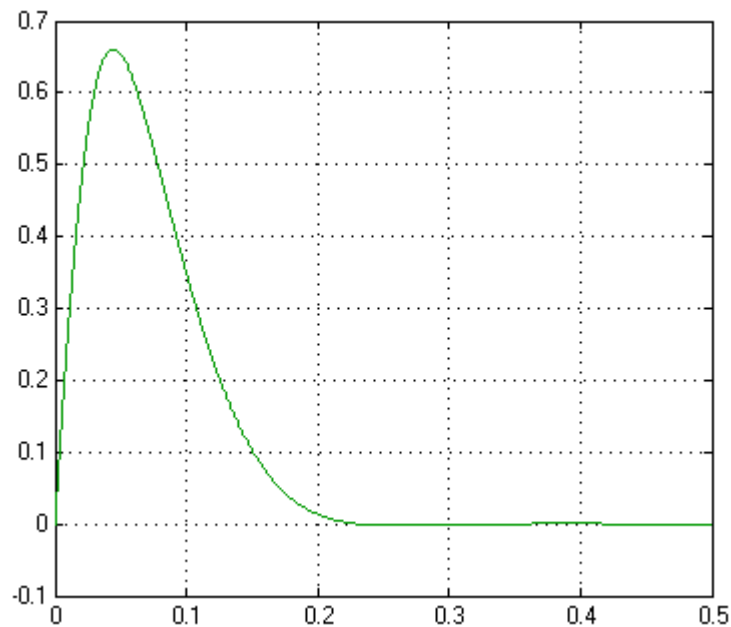


Рисунок A11. Процесс изменения корректирующего сигнала при $k_0 = 5 \text{ с}^{-1}$

При $k_0 = 1 \text{ с}^{-1}$ переходный процесс также имеет практически аperiodический характер. Его длительность вдвое меньше, чем в

неадаптивной системе и составляет 1 с. (рисунок A12). Процесс изменения корректирующего сигнала показан на рисунке A13.

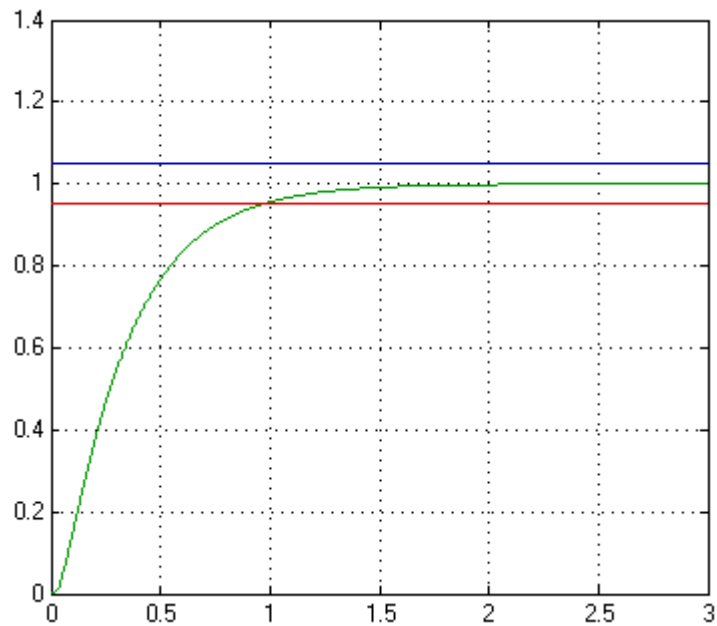


Рисунок A12. Переходный процесс в адаптивной системе при $k_0 = 1 \text{ с}^{-1}$

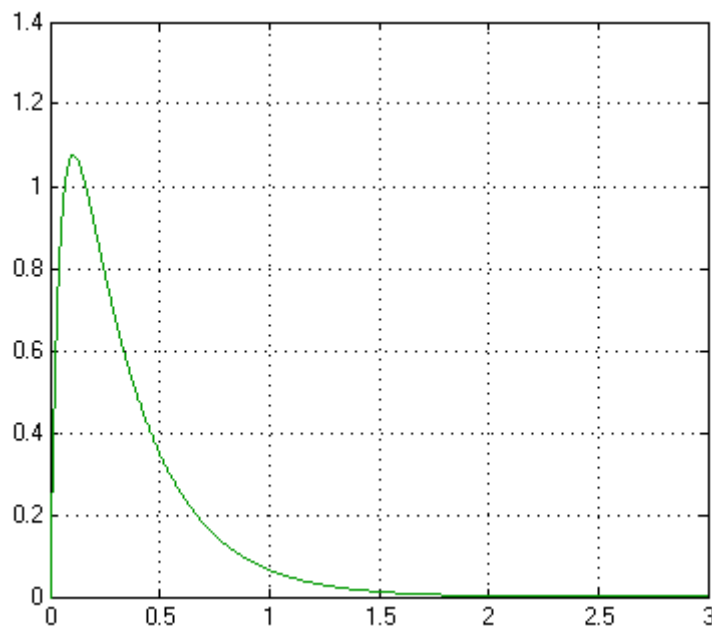


Рисунок A13. Процесс изменения корректирующего сигнала при $k_0 = 1 \text{ с}^{-1}$

Можно заметить, что использование сигнальной адаптации и эталонной модели даёт возможность сократить время переходного процесса при вариации значения коэффициента передачи объекта управления. Но получить стабильную его длительность не представляется возможным,

несмотря на то, что при уменьшении коэффициента передачи объекта управления возрастает интенсивность компенсирующего сигнала.

Причина кроется в ограниченном значении коэффициента k_{yc} , увеличить которое не удаётся из-за снижения запасов устойчивости адаптивной системы, вызванных появлением в ней дополнительного адаптационного контура с отрицательной обратной связью.

Таким образом, сигнальная адаптация, основанная на применении эталонной модели, может быть средством улучшения динамических свойств системы управления при заранее неизвестных законах изменения параметров объекта управления. Но возможности такого подхода ограничены, и он эффективен при относительно небольших диапазонах изменения значений параметров объекта. Большей эффективностью обладают те адаптивные системы, в которых удаётся реализовать более высокие значения коэффициента усиления k_{yc} в цепи корректирующего воздействия.

Пример системы с замкнутыми цепями самонастройки и параметрической адаптацией

Рассматривается система, которая должна обладать стабильным качеством процессов управления. В прямой цепи основного контура управления находятся регулятор с передаточной функцией $W_P(s)$ и объект управления с передаточной функцией $W_O(s)$ (рис. 4). Параметры регулятора изменяются под воздействием сигналов, формируемых корректирующим устройством.

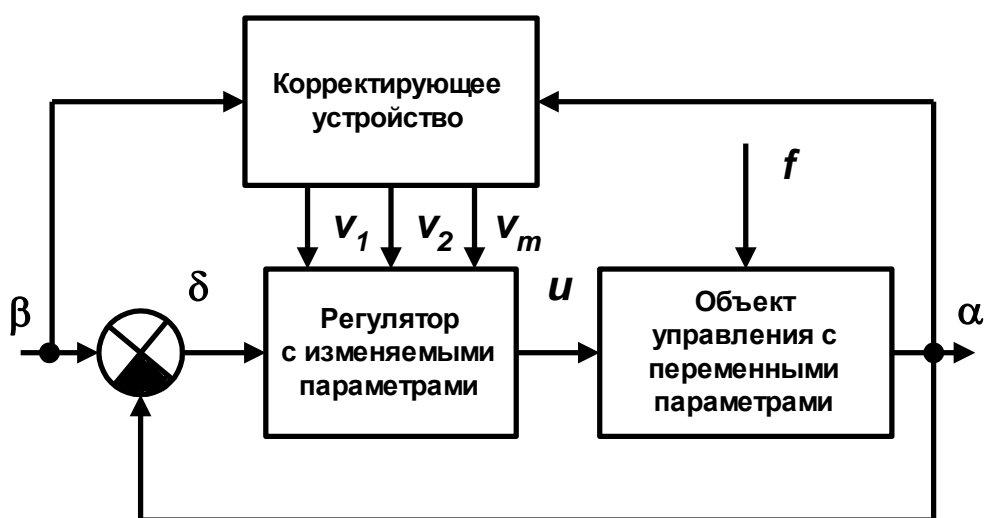


Рис. 4. Структурная схема системы с замкнутыми цепями самонастройки и параметрической адаптацией

Корректирующее устройство представляет собой контроллер, который определяет рассогласование между реакцией эталонной модели и реакцией системы и в зависимости от этого рассогласования изменяет значения параметров регулятора. Это приводит к желаемому изменению передаточной функции регулятора.

Один из возможных способов построения адаптивных систем подобного рода состоит в следующем. На вход системы подаётся несколько тестовых сигналов, имеющих известные частоты и достаточно малые амплитуды. В реакции системы выделяют сигналы на тех же частотах и по ним определяют частотные характеристики системы.

Отношение амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного тестового сигнала даёт значение амплитудно-частотной характеристики системы на частоте тестового воздействия. Сдвиг фазы выходного сигнала по

отношению к фазе тестового сигнала свидетельствует о значении фазо-частотной характеристики системы на частоте тестового сигнала.

Количество частот тестовых воздействий зависит от сложности объекта управления. Совокупность полученных оценок позволяет судить об АЧХ и ФЧХ системы, а они служат основой для определения актуальной передаточной функции системы $\Phi(s)$.

Учитывая её связь с передаточными функциями регулятора и объекта управления

$$\Phi(s) = \frac{W_P(s)W_O(s)}{1 + W_P(s)W_O(s)}$$

и то, что при проведении исследования свойств системы передаточная функция регулятора известна, можно найти актуальную передаточную функцию объекта управления по формуле

$$W_O(s) = \frac{\Phi(s)}{[1 - \Phi(s)]W_P(s)}.$$

Поскольку желаемые свойства адаптивной системы заданы, известно желаемое произведение «номинальных» передаточных функций объекта управления и регулятора $W_{OH}(s) W_{PH}(s)$.

Отсюда становится ясно, какую передаточную функцию должен иметь регулятор, чтобы обеспечить стабильное качество всей системы:

$$W_P(s) = \frac{W_{PH}(s)W_{OH}(s)}{W_O(s)}.$$

Производится расчёт значений параметров регулятора, соответствующих этой передаточной функции, и значения параметров регулятора приводятся в соответствие с этими расчётными значениями. Можно считать, что такой способ самонастройки подобен автоматическому синтезу регуляторов систем управления методом частотных характеристик.

Амплитуды тестовых воздействий на систему должны быть настолько малыми, чтобы не они не исказили основной процесс управления. Но при этом затрудняется выделение реакций системы на эти тестовые воздействия, особенно при наличии помех и шумов. Это обстоятельство может привести к ухудшению свойств адаптивной системы.

Пример адаптивной подсистемы регулирования скорости следящего привода

В процессе работы робота или иной технологической машины может меняться момент инерции подвижных частей, приведённый к валу двигателя следящего привода. Например, при вытягивании манипулятора или при взятии роботом груза момент инерции подвижных частей увеличивается. При складывании манипулятора и отпускании груза момент инерции уменьшается. Особенно это заметно при использовании безредукторных приводов. В этом случае отношение максимального значения момента инерции к его минимальному значению может достигать пяти и более.

Передаточная функция объекта управления в подсистеме регулирования скорости $W_{OC}(s)$ зависит от момента инерции подвижных частей J и может быть записана следующим образом:

$$W_{OC}(s) = \frac{k_M W_T(s)}{J s k_{OCT}},$$

где k_M – коэффициент момента двигателя; k_{OCT} – коэффициент обратной связи по току; $W_T(s)$ – передаточная функция замкнутой подсистемы регулирования тока.

Видно, что при неизменных настройках параметров регулятора скорости коэффициент усиления разомкнутой подсистемы регулирования скорости, а, значит, и её частота среза изменяются обратно пропорционально моменту инерции подвижных частей. Это может привести к существенному ухудшению динамических свойств подсистемы регулирования скорости и всего следящего привода. При значительном изменении момента инерции подсистема и привод в целом могут стать неработоспособными.

Для поддержания стабильного значения частоты среза разомкнутой подсистемы регулирования скорости требуется ввести адаптивную коррекцию, которая должна изменять коэффициент усиления регулятора скорости пропорционально моменту инерции подвижных частей. Этого можно добиться добавлением умножителя в прямую цепь подсистемы регулирования скорости, на один из входов которого подаётся вычисленное или измеренное каким-либо образом корректирующее воздействие,

пропорциональное моменту инерции подвижных частей. Структурная схема такой адаптивной подсистемы приведена на рис.5.

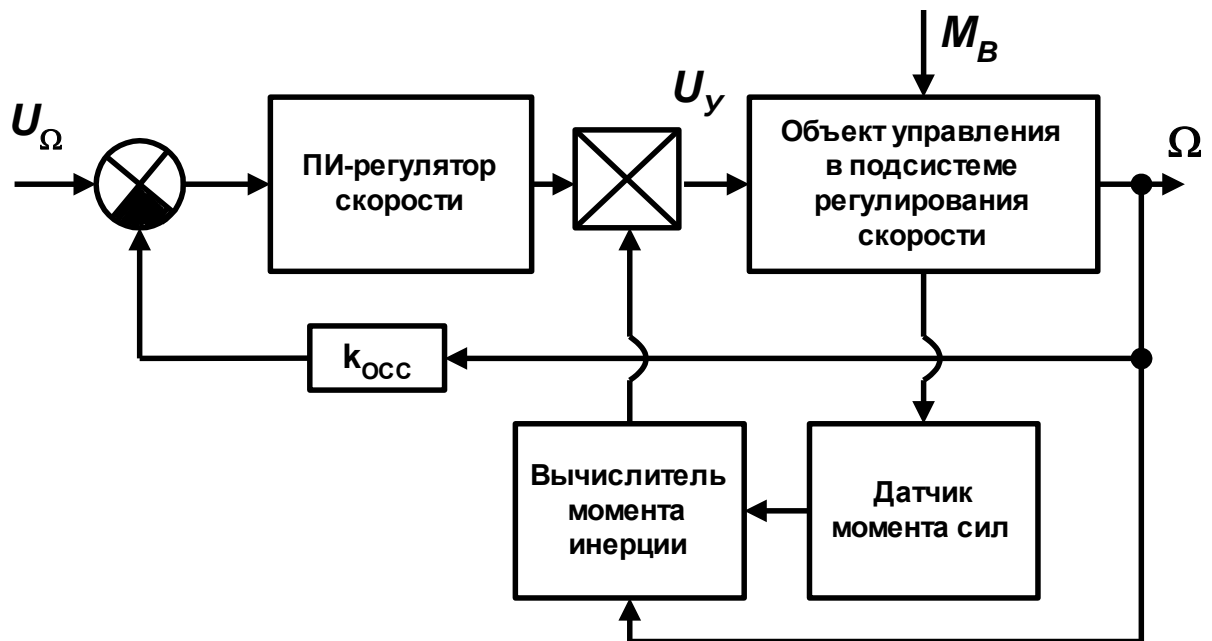


Рис. 5. Структурная схема подсистемы регулирования скорости с адаптацией к изменению момента инерции подвижных частей

При создании рассматриваемой адаптивной системы необходимо решить задачу идентификации параметров объекта управления.

Идентификация – определение значений параметров и структуры математической модели исследуемой системы путём анализа реакций этой системы на входные воздействия.

Если говорить более конкретно, то речь идёт об идентификации момента инерции подвижных частей. Эту задачу можно решить, сформировав вычислитель момента инерции.

Для построения вычислителя момента инерции можно воспользоваться следующим уравнением, выражающим второй закон Ньютона:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{M}{J},$$

где Ω – угловая скорость вращения вала двигателя; M – результирующий момент сил, действующий на ротор двигателя и присоединённый к нему механический объект управления.

Из этого уравнения следует формула

$$J = \frac{M}{(d\Omega/dt)}$$

и способ оценки момента инерции: необходимо измерить или вычислить результирующий момент сил, измерить или вычислить угловое ускорение вала двигателя и первое разделить на второе.

Несмотря на кажущуюся простоту идеи, на пути решения задачи встречаются трудности. Во-первых, результирующий момент сил равен разности электромагнитного момента двигателя и внешнего момента, действующего на вал двигателя. Поэтому нужно либо ставить в привод датчик результирующего момента, либо отдельно измерять электромагнитный момент и внешний момент, производя затем вычисление результирующего момента сил. Во-вторых, угловое ускорение непосредственно измерить сложно, хотя и можно применить асинхронный тахогенератор с питанием обмотки возбуждения постоянным током. Чаще используется численное дифференцирование сигнала датчика скорости или вычисление второй производной по времени от сигнала датчика положения.

Ещё одна проблема заключается в том, что в установившемся режиме движения результирующий момент и вызываемое им ускорение равны нулю. Поэтому в этом режиме вычислить момент инерции по приведённой выше формуле не удаётся. Решить проблему можно введя дополнительное воздействие, заставляющее ротор двигателя совершать колебания с небольшой амплитудой. Тогда появляется возможность оценить момент инерции по реакции системы на это воздействие.

Пример адаптивной подсистемы регулирования скорости следящего привода с дополнительным воздействием

Подсистема регулирования скорости следящего привода с дополнительным воздействием отличается от рассмотренного выше варианта такой подсистемы тем, что в ней постоянно существуют динамические процессы. Поэтому оценить момент инерции подвижных частей удаётся на основании второго закона Ньютона даже в том случае, когда возникает установившийся процесс отработки основного (управляющего) воздействия.

Особенность рассматриваемой подсистемы регулирования скорости состоит в том, что на вход вложенной в неё подсистемы регулирования тока исполнительного привода подаётся создаваемое генератором гармоническое воздействие. Оно приводит к появлению переменной составляющей электромагнитного момента, которая вызывает колебания угловой скорости вала двигателя.

Зависимость амплитуды A_{Ω} колебаний угловой скорости от частоты ω_0 и амплитуды A_M колебаний электромагнитного момента, вызываемого дополнительным воздействием, имеет вид

$$A_{\Omega} = \frac{A_M}{J\omega_0}.$$

Отсюда следует формула для вычисления момента инерции подвижных частей:

$$J = \frac{A_M}{A_{\Omega}\omega_0}.$$

Амплитуда колебаний момента и частота дополнительного воздействия известны. Поэтому формула упрощается:

$$J = \frac{a}{A_{\Omega}},$$

где $a = \frac{A_M}{\omega_0}$ – известная постоянная величина.

Из приведённых выше соображений следует, что для решения задачи идентификации момента инерции в состав адаптивной системы необходимо ввести

- генератор дополнительного гармонического воздействия $U_{доп}$, подаваемого на вход замкнутой подсистемы регулирования тока;
- датчик скорости;
- устройство выделения и определения амплитуды колебаний скорости;
- вычислитель момента инерции в соответствии с последней формулой.

Устройство выделения и определения амплитуды колебаний скорости представляет собой динамический объект. Это устройство может содержать узкополосный фильтр, настроенный на частоту дополнительного

воздействия, двухполупериодный выпрямитель и фильтр нижних частот, предназначенный для сглаживания пульсаций сигнала, несущего информацию об амплитуде колебаний скорости.

Структурная схема подсистемы регулирования скорости следящего привода с дополнительным воздействием, позволяющим идентифицировать момент инерции вращающихся частей, показана на рис.6.

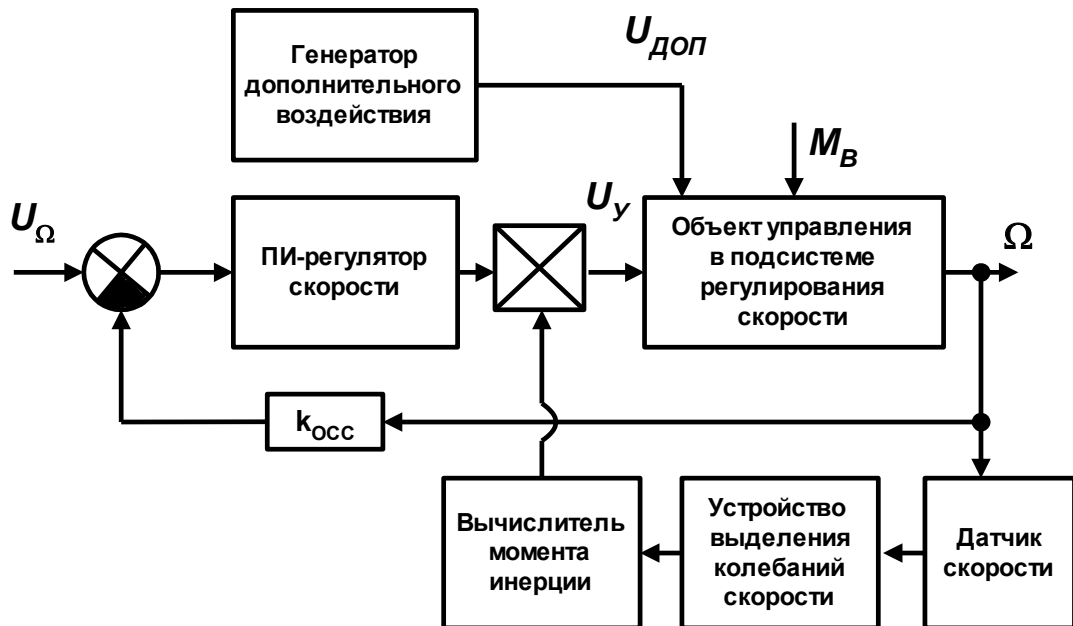


Рис. 6. Структурная схема подсистемы регулирования скорости следящего привода с дополнительным воздействием

Для интенсивного подавления сигналов, частота которых отличается от частоты дополнительного воздействия, целесообразно выбрать передаточную функцию узкополосного фильтра следующего вида:

$$W_{\phi.y}(s) = \frac{\tau^2 s^2}{(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)^2},$$

где τ – постоянная времени фильтра; ξ – коэффициент относительного демпфирования, причём $\tau = \omega_0^{-1}$, $\xi = 0,5$.

Передаточная функция ФНЧ может быть выбрана такой:

$$W_{\phi.HЧ}(s) = \frac{k_{\phi.HЧ}}{(T_{\phi.HЧ} s + 1)^2},$$

где $T_{ФНЧ}$ и $k_{ФНЧ}$ – постоянная времени и коэффициент передачи фильтра нижних частот соответственно. Для уменьшения колебаний оценки момента инерции значение постоянной времени должно удовлетворять условию

$$T_{ФНЧ} \gg \omega_0^{-1}.$$

Амплитуда и частота дополнительного гармонического воздействия выбираются такими, чтобы колебания электромагнитного момента двигателя составляли 10...20% от номинального момента двигателя, а колебания угла поворота вала двигателя были незначительными и не приводили к появлению недопустимых погрешностей положения объекта управления.

Адаптивная система роботизированной механообработки

Робототехнический комплекс для механической обработки деталей (РТК-М), например, путём их фрезерования, имеет в своём составе многостепенный промышленный робот, который по программе, выполняемой устройством управления, перемещает инструмент (фрезу).

Пример комплекса для механообработки на основе роботов фирмы АВВ показан на рис.7.



Рис. 7. Робот фирмы АВВ, используемый для механообработки

Роботы оснащаются шпинделями, приводящими во вращение режущий инструмент. Например, шпиндели, имеющие мощность 7,5 и 15 кВт (рис. 8),

позволяют осуществлять фрезерование, сверление, снятие заусенцев, шлифование и полирование.



Рис. 8. Фрезерный шпиндель, устанавливаемый на робот

Фрезерованием обрабатываются детали из дерева, пластика, алюминия, стали или камня. На стальных деталях производится только снятие фасок или заусенцев.

Критерии эффективности и особенности технологического процесса роботизированной механообработки

Создаваемый роботизированный комплекс для механообработки должен быть технологически пригодным и высокоэффективным. Это значит, что он должен удовлетворять требованиям к производительности и обладать необходимой точностью движений рабочего органа (РО) технологического робота (ТР), удовлетворительной надежностью и минимальной стоимостью.

Эффективность РТК-М тем выше, чем больше его производительность. Поэтому при создании РТК-М важно решить задачу достижения максимальной возможной производительности.

В качестве **критерия эффективности** Q роботизированной механообработки, например, фрезерования будем рассматривать **скорость удаления материала заготовки** ($\text{мм}^3/\text{с}$).

Она вычисляется по формуле

$$Q = BhV, \quad (1)$$

где h – глубина резания; B – ширина резания; V – скорость продольной подачи инструмента относительно поверхности обрабатываемой детали.

В процессе механической обработки возникают силы резания, действующие на инструмент и передающиеся на привод инструмента и манипулятор робота. Они функционально связаны с главной (окружной) силой резания F_p , абсолютное значение которой зависит от свойств

инструмента, детали и значений параметров движения инструмента относительно объекта обработки, причём эта зависимость носит нелинейный характер.

Сила резания F_P вычисляется по эмпирическим формулам, известным в теории резания и в области технологии машиностроения. Одна из таких формул имеет вид

$$F_P = k_F B^{n_1} h^{n_2} V^{n_3},$$

где k_F – коэффициент пропорциональности, учитывающий свойства материала обрабатываемой детали и инструмента, диаметр, число зубьев, частоту вращения и степень износа фрезы; n_1, \dots, n_3 – показатели степени, значения которых определяются путём обобщения результатов экспериментальных исследований.

В результате действия сил резания фактическая траектория движения инструмента, например, концевой фрезы, определяющая положение образующейся обработанной поверхности детали, может отличаться от желаемой траектории. В этом можно убедиться, рассмотрев математическую модель влияния этих сил на отклонения рабочего органа шестистепенного универсального манипулятора.

Компоненты сил резания образуют (6х1)-вектор F сил и моментов, действующих на рабочий орган робота, причём этот вектор рассматривается в базовой системе координат робота. Вектор F вызывает появление (6х1)-вектора моментов сил реакции M в сочленениях манипуляционного механизма, который может быть вычислен по формуле

$$M = J^T(q)F,$$

где $J(q)$ – (6х6)-матрица Якоби манипулятора; q – (6х1)-вектор обобщённых координат манипулятора.

Компоненты вектора моментов M вызывают упругие деформации в механических передачах приводов робота, которые можно оценить, введя в рассмотрение диагональную (6х6)-матрицу G коэффициентов упругой податливости механических передач. Вектор угловых отклонений Δq в степенях подвижности можно оценить по формуле

$$\Delta q = GM.$$

Учитывая малость компонентов вектора угловых отклонений Δq в степенях подвижности, вектор ΔX отклонений координат рабочего органа манипулятора, вызванных силами резания, можно определить, используя зависимость

$$\Delta X = J(q)GJ^T(q)F.$$

Проекция вектора на направление, перпендикулярное плоскости, касательной к обрабатываемой поверхности, образует ту часть отклонения инструмента от желаемой траектории δ_T , которая обусловлена действием сил резания:

$$\delta_T = f(\Delta X).$$

Здесь $f(\Delta X)$ – функция, связывающая δ_T с компонентами вектора ΔX . Эта функция зависит от формы поверхности обрабатываемой детали и её расположения в системе координат робота.

Видно, что упругие деформации приводят к отклонению инструмента от запрограммированной траектории движения и снижают точность изготавливаемого изделия. Отклонение δ_T тем больше, чем больше значения контурной скорости движения инструмента и глубины резания. При этом изменения глубины резания обусловлены, в частности, отклонением расположения поверхности детали от запрограммированного уровня. Таким образом, точность обработки и производительность оказываются взаимосвязанными.

Очевидно, что при создании РТК-М должно выполняться условие

$$\delta_T \leq \delta_{T.доп}, \quad (2)$$

где $\delta_{T.доп}$ – допустимое отклонение инструмента. Поэтому увеличение производительности должно быть согласовано с допустимой погрешностью обработки.

Это обстоятельство выступает в роли ограничения при оптимизации параметров механообработки по критерию производительности. Таким образом, рост производительности должен быть обеспечен, прежде всего, при соблюдении требования к точности обработки.

Построение адаптивной системы управления робототехническим комплексом механообработки

Проблема состоит в том, что форма поверхности обрабатываемой детали может быть сложной, а величина припуска нестабильной. Поэтому фактическая глубина резания может колебаться в некоторых пределах случайным образом, и учесть заранее эти колебания при программировании робота невозможно. Это приводит к нестабильности сил резания, которая может привести к недопустимым отклонениям фрезы от желаемой траектории. Кроме того, момент сил, действующий на привод инструмента, вызывает снижение частоты вращения фрезы, что ведёт к ещё большему росту силы резания. При неблагоприятном стечении обстоятельств это может вызвать поломку инструмента или робота.

Одним из актуальных направлений совершенствования системы управления (СУ) роботом в составе РТК-М является построение адаптивной системы управления скоростью подачи инструмента. В каждый момент времени СУ должна устанавливать контурную скорость, максимально возможную с точки зрения обеспечения гарантированной точности обработки, но не превышающую максимальную рекомендованную скорость, отвечающую условию достижения требуемого качества поверхности.

Адаптивность достигается использованием аналитически задаваемых программных траекторий движения инструмента, зависящих от пути вдоль этих траекторий. В этом случае появляется возможность вычислять путь, интегрируя по времени желаемую скорость движения, причем эта скорость определяется с учётом оценки δ_T отклонения инструмента от желаемой траектории.

Расчёт величины δ_T производится по измеренным силам, действующим на инструмент, и коэффициентам динамической податливости механических передач в составе приводов манипулятора технологического робота. Информация о силах поступает в систему управления РТК-М от датчика, установленного в «запястье» манипулятора, или вычисляется на основании данных от датчиков привода инструмента (рис. 9).

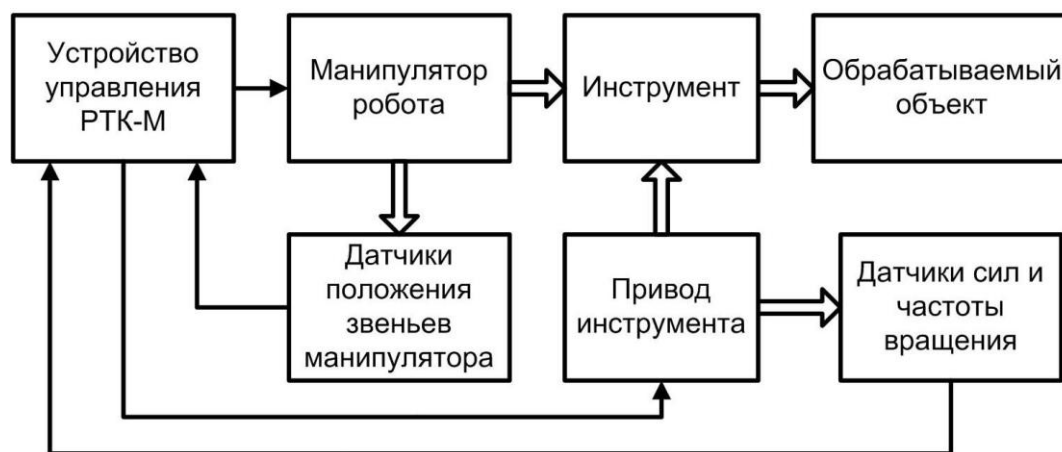


Рис. 9 Структура адаптивной системы управления РТК-М

Если оценка отклонения инструмента от желаемой траектории δ_T превышает заданный уровень $k_0 \delta_{T.доп}$, то производится снижение контурной скорости V движения рабочего органа. Здесь k_0 – коэффициент, значение которого не превышает 1.

Для того, чтобы осуществить регулирование контурной скорости, желаемая траектория движения рабочего органа разбивается на отдельные участки. На каждом участке желаемые значения координат рабочего органа описываются многочленами, зависящими от длины пути L , пройденного рабочим органом по заданному участку траектории. Например, декартовы координаты рабочего органа могут быть представлены в виде

$$x = x_0 + a_x L + \frac{1}{2} b_x L^2 + \frac{1}{6} c_x L^3,$$

$$y = y_0 + a_y L + \frac{1}{2} b_y L^2 + \frac{1}{6} c_y L^3,$$

$$z = z_0 + a_z L + \frac{1}{2} b_z L^2 + \frac{1}{6} c_z L^3,$$

где a_x, b_x, \dots, c_z – коэффициенты, характерные для рассматриваемого участка траектории; x_0, y_0, z – начальные значения координат соответственно.

Желаемая контурная скорость $V_{ж}$ оперативно рассчитывается устройством адаптации, входящим в состав устройства управления РТК-М, и поэтому является функцией времени. Путь L образуется в результате

интегрирования желаемой контурной скорости движения $V_{\text{ж}}$ по времени и, таким образом, тоже является функцией времени:

$$L(t) = \int_0^t V_{\text{ж}}(t) dt .$$

Законы регулирования желаемой скорости $V_{\text{ж}}$ могут быть различными. Например, желаемое значение контурной скорости можно рассчитывать по формуле

$$V_{\text{ж}} = \begin{cases} V_0 & \text{при } \delta_T \leq k_0 \delta_{T.\text{ДОП}} \\ V_0 - k_V (\delta_T - k_0 \delta_{T.\text{ДОП}}) & \text{при } \delta_T > k_0 \delta_{T.\text{ДОП}} \end{cases} ,$$

где V_0 – номинальная желаемая контурная скорость; k_V – коэффициент усиления, влияющий на характер и точность процессов регулирования скорости и сил резания. Если расчётное значение $V_{\text{ж}}$ превышает V_0 , то оно ограничивается на уровне V_0 .

Структурная схема адаптивной системы, построенной в соответствии с описанным выше подходом, показана на рис.10.

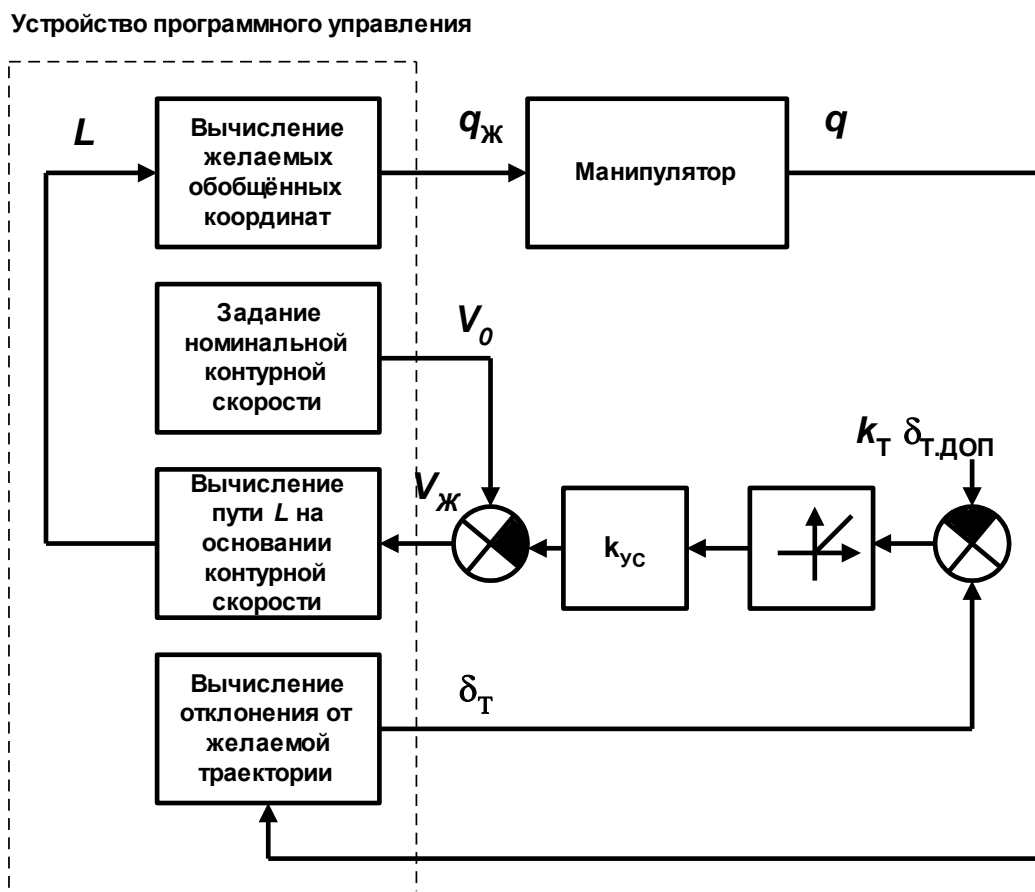


Рис. 10. Структурная схема адаптивной системы

Таким образом, регулируя контурную скорость и через неё влияя на силы резания, адаптивная система управления способна автоматически поддерживать наибольшую производительность механообработки и при этом обеспечивать требуемую точность движения инструмента по программной траектории.

Чем больше динамическая жёсткость манипулятора, тем меньше δ_T и, следовательно, по мере роста жёсткости можно увеличивать скорость подачи, наращивая производительность механообработки. Целесообразно построение систем управления РТК-М, обладающих способностью увеличения динамической жёсткости средствами регулирования при неизменной механической части.

Реализация всех рассмотренных выше методов адаптивного управления требует затрат времени на измерение тех или иных величин, накопление данных, их обработку и вычисления управляющих воздействий. Одно из важных требований к устройствам, входящим в состав вспомогательного контура, состоит в том, что они должны обладать высоким быстродействием. Это необходимо для того, чтобы сформированные ими

воздействия на регулятор были актуальными, т.е. отражали выявленные свойства объекта управления или всей системы в текущий момент времени. В противном случае динамические свойства адаптивной системы окажутся низкими, и она даже может потерять устойчивость.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ

Проблема низкой точности следящих приводов

Следящие приводы, как правило, строятся с использованием П-регуляторов положения с целью получения коротких переходных процессов без перерегулирования. Такие приводы могут иметь недостаточно высокую точность отработки задающего воздействия. Причина состоит в том, что приводы с П-регуляторами положения являются системами **первого порядка астатизма** по отношению к задающему воздействию. Поэтому при линейно нарастающем задающем воздействии

$$\beta = \dot{\beta}_0 t \cdot 1(t)$$

в установившемся режиме приводы имеют **скоростную ошибку**.

В качестве примера рассмотрим привод, замкнутый единичной отрицательной обратной связью (рис. 1), передаточная функция прямой цепи которого имеет вид

$$W_{\Pi}(s) = \frac{\omega_C}{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1)},$$

где ω_C – частота среза разомкнутого привода; ω_{CC} – частота среза разомкнутой подсистемы регулирования скорости; ω_{CT} – частота среза разомкнутой подсистемы регулирования тока.

Для того, чтобы оценить точность привода определим передаточную функцию $\Phi_{\varepsilon}(s)$ замкнутого привода по ошибке. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, можно записать

$$\varepsilon(s) = \beta(s) - \alpha(s),$$

$$\varepsilon(s) = \beta(s) - W_{\Pi}(s)\varepsilon(s),$$

где $\varepsilon(s)$, $\beta(s)$, $\alpha(s)$ изображения по Лапласу ошибки привода, задающего воздействия и регулируемой переменной соответственно. Поэтому передаточная функция $\Phi_\varepsilon(s)$ определяется по формуле

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W_{II}(s)}$$

и имеет вид

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1)}{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1) + \omega_C}.$$

Изображение ошибки привода определяется по уравнению

$$\varepsilon(s) = \Phi_\varepsilon(s)\beta(s).$$

Для нахождения ошибки привода в установившемся режиме (скоростной ошибки ε_{CK}) учтём, что

$$\beta(s) = \frac{\dot{\beta}_0}{s^2}$$

и воспользуемся теоремой о предельном значении функции-оригинала:

$$\varepsilon_{CK} = \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi_\varepsilon(s)\beta(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1)}{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1) + \omega_C} \cdot \frac{\dot{\beta}_0}{s^2} = \frac{\dot{\beta}_0}{\omega_C}$$

Эта формула показывает, что скоростная ошибка пропорциональна скорости изменения задающего воздействия $\dot{\beta}_0$ и обратно пропорциональна частоте среза ω_C разомкнутого привода. Т.к. ω_C нельзя сделать сколь угодно большой величиной, то при интенсивном нарастании задающего воздействия скоростная ошибка может быть значительной.

Например, при $\dot{\beta}_0 = 1$ рад/с и $\omega_c = 100$ рад/с скоростная ошибка равна 0,01 рад. Если привод управляет звеном манипулятора, имеющим длину 1 м, то линейная погрешность движения концевой точки этого звена составит 10 мм.

При отработке эквивалентного гармонического воздействия

$$g = A_{\mathfrak{O}} \sin \omega_{\mathfrak{O}} t,$$

параметры которого определяются на основании уравнений

$$\omega_{\mathfrak{O}} = \frac{\ddot{g}_{\max}}{\dot{g}_{\max}};$$

$$A_{\mathfrak{O}} = \frac{(\dot{g}_{\max})^2}{\ddot{g}_{\max}},$$

также может возникать значительное рассогласование. В установившемся режиме амплитуда $\varepsilon_{уст}$ гармонически изменяющейся ошибки привода пропорциональна амплитуде входного воздействия и может быть оценена по формуле

$$\varepsilon_{уст} \approx \frac{A_{\mathfrak{O}}}{|W_{\Pi}(j\omega_{\mathfrak{O}})|},$$

где $|W_{\Pi}(j\omega_{\mathfrak{O}})|$ – амплитудно-частотная характеристика разомкнутого привода на рабочей частоте $\omega_{\mathfrak{O}}$.

Учтём, что при $\omega_{\mathfrak{O}} < \omega_c$ справедливо приближённое равенство

$$|W_{\Pi}(j\omega_{\mathfrak{O}})| \approx \frac{\omega_c}{\omega_{\mathfrak{O}}}.$$

Тогда

$$\varepsilon_{уст} \approx \frac{A_{\mathfrak{O}} \cdot \omega_{\mathfrak{O}}}{\omega_c} = \frac{\dot{g}_{\max}}{\omega_c}$$

Видно, что и в этом случае ошибка привода пропорциональна скорости изменения задающего воздействия $A_{\mathfrak{O}} \cdot \omega_{\mathfrak{O}} = \dot{g}_{\max}$ и обратно пропорциональна

частоте среза ω_c разомкнутого привода, причём возможности увеличения ω_c ограничены.

Увеличение точности обработки задающих воздействий

Существенно повысить динамическую точность следящего привода можно путём создания **системы комбинированного уравнения**, в которую введены компенсирующие связи по производным от задающего воздействия. В этом случае возникает **сочетание управления по отклонению с управлением по разомкнутому циклу**.

Структурная схема привода с компенсирующей связью, приведённая на рис. 2, содержит звено, отражающее наличие компенсирующих связей и имеющее передаточную функцию $Q(s)$. Изображение по Лапласу управляющего воздействия $U(s)$, поступающего на вход элемента, стоящего в прямой цепи привода и имеющего передаточную функцию $W_{\Pi}(s)$, определяется в соответствии с уравнением

$$U(s) = \varepsilon(s) + Q(s)\beta(s).$$

В этом случае для рассматриваемого привода справедливо уравнение

$$\varepsilon(s) = \beta(s) - W_{\Pi}(s)\varepsilon(s) - W_{\Pi}(s)Q(s)\beta(s),$$

из которого следует выражение передаточной функции замкнутого привода по ошибке по отношению к задающему воздействию

$$\Phi_{\varepsilon}(s) = \frac{1 - W_{\Pi}(s)Q(s)}{1 + W_{\Pi}(s)}.$$

Вид и значения коэффициентов звена $Q(s)$ выбирается исходя из условия компенсации динамических погрешностей привода при обработке задающего воздействия. Получим это условие, исходя из того, что

$$\varepsilon(s) = \frac{1 - W_{II}(s) \cdot Q(s)}{1 + W_{II}(s)} \cdot \beta(s).$$

Ошибки будут отсутствовать в том случае, если обеспечить выполнение условия

$$\Phi_{\varepsilon}(s) = 0.$$

Это возможно при

$$1 - W_{II}(s) \cdot Q(s) = 0.$$

Отсюда следует равенство

$$Q(s) = \frac{1}{W_{II}(s)}.$$

При точном выполнении этого условия следящий привод становится инвариантным к задающему воздействию в том смысле, что его ошибка равна нулю и не зависит от задающего воздействия.

Реализовать это соотношение полностью не представляется возможным. Действительно, для рассматриваемого варианта описания динамического объекта, стоящего в прямой цепи привода, имеем

$$Q(s) = \frac{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1)}{\omega_C} = \frac{s}{\omega_C} + \frac{s^2(\omega_{CC}^{-1} + \omega_{CT}^{-1})}{\omega_C} + \frac{s^3\omega_{CC}^{-1}\omega_{CT}^{-1}}{\omega_C}.$$

Вид этой передаточной функции свидетельствует о необходимости формирования первой, второй и третьей производных от задающего воздействия по времени. Идеальный дифференциатор в природе не существует. Реализовать вычислитель с передаточной функцией $W(s) = s$ невозможно. Поэтому речь может идти только о приближённом дифференцировании задающего воздействия.

Но если привод включён в систему программного управления, решение задачи упрощается. Вычисление задающего воздействия осуществляется на основании аналитической зависимости. Поэтому и вычисление производных этого воздействия по времени производится на основании соответствующих аналитических зависимостей.

Обычно ограничиваются введением компенсирующей связи только по первой производной (по скорости изменения задающего воздействия). При этом не достигается полного устранения динамических ошибок, но они существенно уменьшаются.

Пусть
$$\varphi(s) = k_C \cdot s,$$

где $k_C = \omega_C^{-1}$ – коэффициент компенсирующей связи по скорости изменения задающего воздействия. Тогда передаточная функция замкнутого привода по ошибке приобретает вид

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1) - s}{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1) + \omega_C} = \frac{s^2[\omega_{CC}^{-1}\omega_{CT}^{-1}s + (\omega_{CC}^{-1} + \omega_{CT}^{-1})]}{s(\omega_{CC}^{-1}s + 1)(\omega_{CT}^{-1}s + 1) + \omega_C}.$$

Видно, что эта передаточная функция замкнутого привода по ошибке содержит в числителе множитель s^2 и поэтому соответствует системе второго порядка астатизма.

Принципиально важно, что увеличение порядка астатизма получено без изменения числа интеграторов в контуре регулирования положения. Поэтому введение компенсирующих связей не изменяет характеристическое уравнение привода и поэтому не влияет на его устойчивость.

Привод с компенсирующей связью по скорости изменения задающего воздействия не имеет скоростной ошибки. В установившемся режиме такой привод будет иметь ошибку, пропорциональную ускорению $\ddot{\beta}_0$, с которым изменяется задающее воздействие. В соответствии с теоремой о предельном значении функции-оригинала получаем

$$\varepsilon_{УСК} = \frac{(\omega_{CC}^{-1} + \omega_{CT}^{-1})}{\omega_C} \ddot{\beta}_0.$$

Ошибка обработки гармонического задающего воздействия

$$g(t) = A_\vartheta \sin \omega_\vartheta t$$

может быть определена по амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы по ошибке. При введении компенсирующей связи по скорости изменения задающего воздействия и при условии $\omega_{\mathfrak{z}} < \omega_c$ справедливо приближённое равенство

$$|\Phi_{\varepsilon K}(j\omega_{\mathfrak{z}})| \approx \frac{\omega_{\mathfrak{z}}^2}{\omega_C} (\omega_{CC}^{-1} + \omega_{CT}^{-1}).$$

Для оценки амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы по ошибке без введения компенсирующей связи используется формула

$$|\Phi_{\varepsilon}(j\omega_{\mathfrak{z}})| \approx \frac{\omega_{\mathfrak{z}}}{\omega_c}.$$

Значение коэффициента Δ , характеризующего выигрыш в точности привода при введении компенсирующей связи по скорости изменения задающего воздействия, можно оценить по формуле

$$\Delta = \frac{|\Phi_{\varepsilon}(j\omega_{\mathfrak{z}})|}{|\Phi_{\varepsilon K}(j\omega_{\mathfrak{z}})|} \approx \frac{1}{\omega_{\mathfrak{z}}(\omega_{CC}^{-1} + \omega_{CT}^{-1})}.$$

Учтём, что $\omega_{CC} = k_{CC}\omega_C$ и $\omega_{CT} = k_{CT}\omega_C$.

Тогда

$$\Delta = \frac{|\Phi_{\varepsilon}(j\omega_{\mathfrak{z}})|}{|\Phi_{\varepsilon K}(j\omega_{\mathfrak{z}})|} \approx \frac{\omega_C}{\omega_{\mathfrak{z}}} \frac{1}{(k_{CC}^{-1} + k_{CT}^{-1})}.$$

Видно, что выигрыш в точности привода тем больше, чем больше отношение частоты среза разомкнутого привода к эквивалентной рабочей частоте задающего гармонического воздействия.

Таким образом, введение компенсирующей связи по скорости задающего воздействия является эффективным средством повышения динамической точности приводов.

Замечания

Необходимо отметить, что образуемая в результате введения компенсирующей связи система чувствительна к изменению параметров объекта в прямой цепи привода. При изменении этих параметров возникают ситуации недокомпенсации или перекомпенсации. И то, и другое ситуация приводит к возрастанию ошибки привода.

В некоторых случаях удаётся сформировать компенсирующее воздействие, пропорциональное второй производной по времени от задающего воздействия. Тогда привод приобретает третий порядок астатизма. В установившемся режиме он не имеет ни скоростной ошибки, ни ошибки, пропорциональной ускорению задающего воздействия.

Необходимо учитывать, что формирование производных от задающего воздействия по времени представляет собой сложную задачу и может сопровождаться внесением больших погрешностей в вычисление компенсирующих воздействий. Эти погрешности будут воспроизводиться приводом, и его точность может не возрасти, а, наоборот, снизиться.