

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА”

*На правах рукописи*



КАРАСЕВ Виктор Сергеевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ**

Специальность 05.13.06 –  
«Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами  
(промышленность)»

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Кондрашин А.В.

Иваново – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1. Анализ проблемной области исследования и постановка задачи.....	10
1.1. Обзор процессов в технологических объектах и понятие «адаптация» .....	10
1.2. Обзор методов адаптивного управления.....	11
1.3. Обзор рынка адаптивных регуляторов.....	17
1.4. Выводы по главе и постановка задачи .....	20
2. Анализ показателей, определяющих свойства объекта, и разработка методики их оценки в режиме реального времени .....	26
2.1. Анализ теплофизических особенностей процессов в объекте управления и оценка характера их влияния на свойства объекта.....	26
2.2. Выбор показателей для оценки свойств объекта управления.....	36
2.3. Алгоритмизация расчёта показателей свойств объекта .....	42
2.4. Алгоритм работы адаптивной системы.....	54
2.5. Экспериментальные исследования работы системы .....	59
3. Реализация адаптивной системы на базе ПТК.....	66
3.1. Постановка задачи.....	66
3.2. Анализ структуры ПТК.....	66
3.3. Программные средства ПТК и информационные потоки .....	67
3.3.1. Системное программное обеспечение.....	68
3.3.2. Прикладное программное обеспечение .....	69
3.4. Варианты архитектуры системы.....	70
3.5. Надежность комплекса .....	75
3.6. Подсистема диагностики работы адаптивного комплекса.....	76
3.7. Реализация адаптивной системы .....	81
3.7.1. Выбор языка программирования .....	81
3.7.2. Реализация алгоритма системы.....	82

3.8. Проверка работы блока подстройки .....	92
3.8.1. Описание тренажера.....	92
3.8.2. Модель объекта.....	94
3.8.3. Результаты проверки .....	99
3.8.4. Экономическая эффективность.....	107
4. Методика наладки адаптивной системы .....	112
4.1. Постановка задачи.....	112
4.2. Параметры блока адаптивной подстройки системы регулирования .....	112
4.3. Методика инициализации адаптивной системы подстройки .....	114
Заключение .....	132
Список использованных источников .....	133
Приложение А. ....	140

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие производства характеризуется возрастающими требованиями, предъявляемыми к качеству выпускаемой продукции, снижением затрат на эксплуатацию и ремонт, а также увеличением роли наукоемких технологий в проектировании систем автоматического управления. Все это неуклонно ведет к ужесточению требований, предъявляемых к разрабатываемым методам и способам управления, которые, помимо своей структурной простоты, должны также обеспечивать надежное, безотказное и высокоточное функционирование всего производства в целом.

Сложность большинства технологических агрегатов и аппаратов такова, что их точное математическое описание получить весьма затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно. Немаловажным является тот факт, что при вводе в эксплуатацию нового, модернизированного или капитально отремонтированного оборудования производится режимная наладка, результаты которой в полной мере не прогнозируемы. Следовательно, свойства объекта управления недоопределены и поэтому при внедрении систем управления технологическими процессами на таком оборудовании требуются специальные дорогостоящие испытания, в значительной мере затягивающие ввод в эксплуатацию автоматизированных объектов. Если принять во внимание нестабильность параметров топлива и наличие множества неконтролируемых возмущений, то большинство реальных объектов управления можно с уверенностью отнести к классу априорно неопределенных. Как известно, для таких объектов целесообразно применять методы адаптивного, робастного и нейро-нечеткого управления [50].

Данная работа посвящена одному из классов систем адаптивного управления, отличающемуся использованием априорной информации о специфике объекта управления и взаимосвязях в нем. В связи с наличием в литературе разных трактовок понятий обучения, самообучения и адаптации [73] приведем определение, взятое из работы [55] и разделяемое автором диссертации, а именно: самоприспосабливающаяся (адаптивная) система – система автоматического управления, которая сохраняет работоспособность в условиях непредвиденного изменения свойств управляемого объекта, цели управления или условий окружающей среды посредством смены алгоритмов своего функционирования или поиска оптимальных состояний.

К этому определению добавим, что основой самонастройки являются специфические особенности переходных процессов, выделяемые (оцениваемые) в режиме реального времени на действующем в условиях нормальной эксплуатации оборудовании.

По способам адаптации самоприспосабливающиеся системы подразделяются на самонастраивающиеся, самообучающиеся и самоорганизующиеся системы [55].

Среди интересующих автора самонастраивающихся систем выделяют два принципиально разных типа систем, отличающихся способом выхода параметров на заданный (оптимальный) уровень:

- поисковые СС, в которых качество настройки характеризуется некоторым обобщённым показателем, который измеряется непосредственно или вычисляется по измеренным значениям первичных параметров. Параметрам настройки в СС придаются поисковые или пробные изменения. Анализ колебаний показателя качества настройки, вызванных поисковыми воздействиями, позволяет установить, является ли настройка оптимальной, т. е. соответствующей экстремуму (максимуму или минимуму) показателя качества. Если имеют место отклонения от экстремума, то настройка изменяется до тех пор, пока не приблизится к оптимальной. Поисковые СС могут работать при изменении внешних условий в широких пределах;
- беспоисковые СС, в которых используется некоторый контролируемый показатель качества управления. Автоматической настройкой параметров этот показатель поддерживается в заданных пределах. В зависимости от вида показателя различают СС с контролем переходных процессов, с контролем частотных характеристик, с эталонной моделью и др. Всё СС этого типа имеют параметрический контур, обеспечивающий стабилизацию принятого показателя качества в случае его выхода за допустимые пределы.

Задача, связанная с разработкой адаптивных систем управления динамическими объектами, является одной из современных задач в теории автоматического управления, решение которой имеет ярко выраженный прикладной характер. Очевидно, что решение данной проблемы в классе линейных динамических объектов представляет собой весьма актуальную задачу адаптивного управления динамическими объектами, имеющую важное практическое значение.

Многие фирмы работают над внедрением адаптивных систем. И хотя уже в первых серийных микропроцессорных системах управления технологическими процессами, примером которых может служить система шведской фирмы ASEA (на рынке появилась в 1981 г.), были использованы модифицированные оптимальные адаптивные алгоритмы с цифровой моделью объекта, в большинстве современных регуляторов используется лишь автоматическая подстройка [33]. Можно привести два примера подобных методов:

- Экспертные методы автоматизированной настройки [33].
- Автоматизированный вариант эмпирического метода настройки Зиглера-Никольса [26].

В обоих методах не удалось реализовать адаптивное управление, которое, по самому определению этого термина, должно обеспечить слежение параметров настройки за непрерывно меняющимися свойствами объекта. Успешно реализована лишь автоматизированная настройка параметров регулятора, осуществляемая только при практически неизменных во время настройки свойствах объекта [26].

Стоит отметить, что на рынке регуляторов более простой и эффективный подход, отличающийся использованием априорной информации о специфике объекта и взаимосвязях в нем, представлен слабо. Между тем, наряду с адаптивными системами, реализующими алгоритмы общего назначения, заслуживают интерес и системы, учитывающие прикладную особенность технологических процессов. Пример системы регулирования учитывающей специфику теплоэнергетических объектов рассматривается в [41], где предложен способ анализа особенностей процессов в произвольном сечении распределённого по длине объекта управления.

Изложенное выше даёт основания поставить задачу анализа природы неполной прогнозируемости параметров динамической модели от множества режимных факторов и на основе сделанного анализа сформулировать принципы построения блоков параметрического управления технологическим регулятором, способных решать задачи адаптации, с учетом прикладной специфики объекта. Включение специфичных, для теплоэнергетических объектов особенностей, имеющих место в системах регулирования позволяет повысить эффективность адаптации, и в то же время упростить эксплуатацию подобных регуляторов для обслуживающего персонала. Представление распределенных объектов управления математическими моделями, учитывающими присущие

теплоэнергетике особенности, является ключевым отличием предлагаемых решений от общих положений теории адаптивных систем.

Целью данной работы является разработка алгоритма адаптивной системы, развивающего идеи, предложенные в [41], и его реализация на базе микропроцессорного устройства, способного работать на разных уровнях ПТК. Реализация подобной системы на базе аналоговой аппаратуры вызывала ряд трудностей, появление же микропроцессорных систем управления открыло возможность не только её широкого внедрения, но и совершенствования предложенных алгоритмов. Появилась возможность разработки универсального блока адаптации, применимого для целого класса систем.

Поставленная цель достигается путем решения ряда взаимосвязанных задач диссертационной работы, а именно:

1. Анализа способов управления и наблюдения за процессами, происходящими в теплоэнергетических объектах, исходя из требований к качеству технологических процессов.
2. Разработки:
  - a) способов оценки дрейфа характеристик объекта;
  - b) способов функциональной диагностики системы;
  - c) способов настройки адаптивной системы.

В итоге формируется комплекс алгоритмов, обеспечивающих гарантированное выполнение функций регулирования с учётом заданных требований к запасу устойчивости системы, в условиях нестационарности и переменных режимов работы технологического оборудования.

Научная новизна представлена следующими положениями:

1. Выявлена природа неполной прогнозируемости параметров динамической модели, обусловленная действием режимных факторов, множество из которых не допускает возможности оперативного наблюдения, а также возможность оценки влияния этих факторов с помощью двух обобщенных показателей, оценивающих статические и динамические свойства объекта.

2. Предложены уточненные алгоритмы адаптивного управления технологическими процессами в условиях переменных режимов работы оборудования, а также сформулированы принципы построения блоков параметрического управления технологическим регулятором и их реализации в многоуровневых структурах ПТК.

3. Решена задача диагностирования работы системы, гарантирующая защищенность системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре, путем ослабления или полного исключения влияния этого контура при обнаружении ухудшения работы координатного контура.

Практическая ценность заключается в том, что:

1. Разработаны и реализованы на базе ПТК алгоритмы адаптивного управления. Использование разработанных алгоритмов в системах управления позволяет повысить эффективность и качество работы регуляторов технологических процессов. Таким образом, получается система обеспечивающая сохранение запаса устойчивости на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений.

2. Разработаны принципы и алгоритмы, связанные с включением в алгоритм функций оперативной диагностики работоспособности параметрического контура системы управления. Это гарантирует защищенность системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре, и способствуют возможности применения алгоритма в переменных режимах работы оборудования.

3. Предложены методы инициации адаптивной системы.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритмы, реализующие принципы адаптации, отличающиеся использованием априорной информации о специфике объекта и взаимосвязях в нем и предназначенные для сохранения запаса устойчивости системы в условиях действующих на неё возмущений.

2. Принципы и алгоритмы самодиагностики работы адаптивной системы.

3. Методика инициализации данных алгоритмов.

Данная диссертационная работа состоит из четырех глав, заключения и приложения.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы адаптивного управления в энергетике и сделан обзор средств, реализующих принципы адаптивного управления на современном рынке регуляторов.



Вторая глава посвящена поиску и обоснованию показателей, закономерно реагирующих на изменение динамических характеристик объекта управления, и выводу расчетных формул, необходимых для нахождения этих показателей по оперативному сигналу ошибки управления.

Третья глава раскрывает особенности реализации предложенных алгоритмов адаптивного управления на базе современных ПТК. Распределённый характер структуры АСУ ПТ поставил ещё одну задачу, связанную с выделением уровня сети, наиболее рационального для реализации алгоритмов адаптации. Кроме алгоритма, отвечающего за адаптацию, также рассматриваются алгоритмы подсистемы оперативной диагностики работоспособности параметрического контура системы управления. Эти алгоритмы гарантируют защищённость системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре и способствуют расширению диапазона его применимости в переменных режимах работы оборудования.

Четвертая глава представляет методику инициализации разработанной адаптивной системы и дает подробное описание назначения всех параметров получившегося функционального блока.

В заключении содержатся основные результаты диссертационной работы.

# 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНОЙ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

## 1.1. Обзор процессов в технологических объектах и понятие «адаптация»

Современное направление развития производства, обусловленное переходом на использование микроконтроллеров, отличается жесткими требованиями, предъявляемыми к качеству выпускаемой продукции, снижением трудозатрат на эксплуатацию и ремонт, а также увеличением роли наукоемких технологий в проектировании систем автоматического управления. Таким образом, промышленные системы управления должны обеспечивать надежное, безотказное и высокоточное функционирование всего производства в целом.

Характерной особенностью процессов, происходящих в объектах теплоэнергетики, является:

- непрерывный характер основных технологических потоков (носителей тепловой и электрической энергий) и дискретный характер вспомогательных технологических потоков, обеспечивающих работу основных потоков;
- значительные единичные мощности энергоблока, что приводит к значительным потерям при профилактике, ремонте, авариях, а также усложнению вспомогательного технологического оборудования;
- сложность технологического процесса и недостаточная его изученность, что не позволяет ограничиться линейным управлением по состоянию;
- высокая экологическая опасность, необходимость обеспечения высокой пожарной, взрывной, электробезопасности.

Структура большинства технологических процессов такова, что точное математическое описание объектов, входящих в их состав, получить весьма затруднительно, а в некоторых случаях и невозможно. Немаловажным является и тот факт, что даже при такой типичной ситуации, как внедрение нового или ремонт старого оборудования, возникает необходимость корректировки работы управляющих элементов системы. Если помимо этого принять во внимание нестабильность параметров сырья, топлива и наличие неконтролируемых возмущений, то большинство

реальных объектов управления можно с уверенностью отнести к классу априорно неопределенных. При этом основными методами синтеза систем подобного рода являются методы адаптивного, робастного и нейро-нечеткого управления [1].

Как отмечается в [69], известно большое число определений того, что следует понимать под обучением, самообучением и адаптацией.

Преимущественное распространение получили самонастраивающиеся системы (СС), под которыми принято понимать системы автоматического управления, обладающие способностью приспосабливаться к случайно изменяющимся свойствам объектов управления и процессов в них за счёт оперативного контроля качества переходных процессов. Среди этого класса систем выделяют два принципиально разных типа систем, отличающихся способом выхода параметров на заданный (оптимальный) уровень. Это – поисковые и беспоисковые СС.

В беспоисковых СС используется некоторый контролируемый показатель качества управления. Автоматической настройкой параметров этот показатель поддерживается в заданных пределах. В зависимости от вида показателя различают СС с контролем переходных процессов, с контролем частотных характеристик, с эталонной моделью и др. Всё это – замкнутые беспоисковые СС с контуром самонастройки, в котором параметры настройки автоматически изменяются при выходе показателя качества за допустимые пределы.

## **1.2. Обзор методов адаптивного управления**

Основным алгоритмом, используемым в системах автоматизации, является ПИД-алгоритм. ПИД-регулятор был изобретён ещё в 1910 году [2]. Через 32 года, в 1942 году, Циглер и Никольс разработали методику его настройки [26]. После появления микропроцессоров в 1980-х годах развитие ПИД-регуляторов происходило нарастающими темпами. В работе [33] было проведено исследование количества работ по тематике ПИД регулирования. Далее приводятся некоторые результаты данного исследования. Общее количество публикаций по ПИД-регуляторам за 9 лет с 1973 по 1982 год составило 14 шт., с 1983 по 1992 год – 111 шт., а за период с 1998 по 2002 год (всего за 4 года) – 225 шт [21]. На одном только семинаре IFAC (International Federation of Automatic Control) в 2000 году было представлено около 90 докладов, посвящённых ПИД-регуляторам [21]. Количество патентов по этой теме, содержащихся в патентной

базе данных <http://gb.espacenet.com>, в январе 2006 года составило 364 шт. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. В порядка 90-95% регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, заявлен ПИД-алгоритм [33]. При этом во многих микроконтроллерах, использующих ПИД алгоритм дифференциальная компонента выключена потому, что ее трудно правильно настроить. Как отмечается в [33], пользователи пренебрегают процедурой калибровки, недостаточно глубокие знания динамики регулируемого процесса не позволяют правильно выбрать параметры регулятора.

Естественные направления развития ПИД-алгоритмов управления технологическими процессами, инициированные переходом на современную микропроцессорную технику, отличаются прежде всего поиском решений, обеспечивающих повышение качества автоматического управления, расширение области функционирования автоматических систем регулирования, а также снижение трудозатрат на разработку и внедрение промышленных версий систем. В связи с технической сложностью реализации адаптивных алгоритмов на элементной базе, которая существовала до появления микроконтроллеров, подобные алгоритмы начали использоваться только с середины 80-х.

Первые подобные системы, появившиеся в конце 30-х годов прошлого столетия, решали задачу автоматической оптимизации производительности промышленных установок. Основное содержание задачи автоматической оптимизации состояло в поиске и удержании системы на экстремуме ее статической характеристики. Хотя автоматическая оптимизация и не имеет прямого отношения к адаптации систем управления, она может использоваться как способ повышения эффективности управления.

В работе [67] проведен обширный обзор эволюции и проблем адаптивных систем управления. Далее идет небольшой фрагмент этого обзора, касающийся оптимальных систем. Автоматический поиск экстремума статической характеристики объекта как способ автоматического регулирования по максимуму или минимуму показателя качества технологического процесса был предложен в СССР Ю. С. Хлебцевичем в 1940 г. [49] и несколько позже В. В. Казакевичем в 1943 г. [50]. Проблемы теории

экстремальных регуляторов привлекли к себе внимание многих ученых в СССР и за рубежом в 50-е годы [51 – 59] прошлого столетия. Первое систематическое изложение прикладной теории экстремального регулирования как принципа автоматической оптимизации систем содержится в опубликованной в США в 1951 г. под редакцией Ч. С. Дрейпера и И. Т. Ли книге “Принципы автоматической оптимизации”, где были представлены результаты исследований коллектива специалистов лаборатории авиационной автоматики MIT. Обширный список работ по адаптивным системам, содержится в обзорной статье [4]. Большинство ранних работ по экстремальным системам рассматривают модели объектов в виде статических отображений, позже некоторые авторы расширяют класс допустимых систем до моделей Винера и Гаммерштейна [25]. Анализ устойчивости экстремальных систем управления детерминированными нелинейными динамическими объектами в замкнутом контуре оставался открытой проблемой более сорока лет.

Альтернативой идее поиска экстремального значения функционала качества системы управления с использованием метода “проб” и “ошибок” стала “беспоисковая” оптимизация. Применительно к адаптивным системам этот подход к реализации механизма адаптации к неконтролируемым факторам основывался на аналитических вычислениях, тем или иным способом, условий экстремума функционала качества без использования пробных воздействий на объект. Согласно [64] адаптация, самоорганизация, саморегулирование означает постепенное изменение усредненных свойств в стохастической среде функционирования динамической системы.

В работе [65] способы достижения требуемых динамических свойств самонастраивающихся систем классифицируются по степени сложности этих систем.

- а) Системы с высоким контурным коэффициентом усиления. При отсутствии информации об уровне аддитивных возмущений или о величине невязки между математической моделью процесса и реальными физическими процессами в объекте, способ применяется наиболее часто. В теории управления нелинейными объектами регуляторы, позволяющие изменять коэффициент вплоть до бесконечно больших величин в зависимости от величины отклонения от положения равновесия, называют “регуляторами с бесконечной границей роста коэффициента”.

- б) Системы с изменением параметра по программе согласно заранее заданным условиям работы системы. Пример адаптивной системы, построенной таким образом, приведен в некоторых работах [66, 67], где параметры адаптивного регулятора изменяются согласно программе, реализуемой на основе схемы с гистерезисом. Критерием переключения является значение функционала качества, ассоциированного с конкретным контроллером. Выбор следующего контроллера из конечного множества возможных происходит последовательным перебором и циклическим образом.
- в) Системы с изменением параметров в зависимости от требуемого критерия качества системы. К системам, использующим данный принцип, следует отнести и все то огромное множество работ в современной параметрической постановке, где параметры регулятора основного контура настраиваются согласно алгоритмам градиентного типа.
- г) Системы с изменением структуры в зависимости от требуемого показателя ее качества. Данный способ в классификации выделенный отдельно можно считать подклассом систем (в) с той лишь оговоркой, что для реализации таких систем потребуется рассматривать параметризованные линейные комбинации управляющих функций из заданного класса вместо единственной функции.

Несмотря на то, что приведенные способы хронологически относятся еще к началу 60-х годов прошлого столетия, их логические принципы сохраняются в той или иной мере и в современных схемах адаптивных систем управления.

Как указано в [66] с момента публикации первых работ по адаптивным системам в первой половине 20-го века до настоящего дня, приспособляющиеся системы или системы с адаптацией эволюционировали от сравнительно простых экстремальных систем управления линейными объектами до адаптивных регуляторов линейных объектов, порядок математической модели которых существенно превосходит порядок математической модели объекта. В подавляющем большинстве практических приложений теория адаптивных систем управления и идентификации, как совокупность общесистемных положений и методов, используется для решения стандартных задач регулирования хорошо изученных и исследованных, зачастую устойчивых по Ляпунову объектов. Потенциальная роль этих теорий уже на этапе их возникновения

представлялась, как это следует из анализа работ ученых в конце 50-х – начала 60-х годов прошлого века, значительно шире и глубже. Однако эти предвидения не были поняты или на это не было обращено внимание большинства ученых, активно занятых задачами адаптивного управления того времени.

В работе [66] отмечается что, не менее актуальным остается подход к проектированию адаптивных систем управления функционально сложными техническими объектами и технологическими процессами в условиях неконтролируемых изменений собственных свойств и свойств внешней среды. Примером такого подхода может быть предложенный в [66] метод синтеза адаптивных регуляторов – т. н. метод виртуального алгоритма адаптации. В то же время применение “классических” методов оказывается в значительной мере затруднительным или малоэффективным [65, 67, 73]. Основное внимание авторов упомянутых работ сосредоточено на теории и методах адаптивного управления нелинейными динамическими объектами:

- а) с потенциально неустойчивой по Ляпунову и неравновесной целевой динамикой;
- б) при условии потенциальной невозможности задания целевых множеств в явном виде;
- в) с использованием минимальной качественной информации об объекте, а также в условиях недоступности информации о точных математических моделях объекта;
- г) с использованием моделей неопределенностей, максимально адекватных физической сущности процессов и явлений в самом объекте;
- д) с возможностью реализации механизмов управления в типовых и однородных структурах типа искусственных нейронных сетей прямого действия.

Необходимыми компонентами такой теории адаптивного управления, как это следует из логики ее развития, являются:

- аппарат анализа свойств нелинейных систем, который не требует точного знания математических моделей исследуемых объектов и не зависит от того, устойчив ли объект по Ляпунову;

- принципы и методы адаптации к неконтролируемым, неизмеряемым возмущениям и неопределенностям среды и модели объекта, использующие лишь их общесистемные, фундаментальные свойства;
- поиск, анализ и синтез структур реализации алгоритмов нелинейного управления, адаптации и идентификации.

Одна из характерных особенностей современного уровня автоматизации весьма разнообразных технологических процессов заключается в том, что управление тем или иным объектом должно осуществляться в условиях априорной неопределенности, когда, либо отсутствует точное математическое описание управляемого объекта, либо неизвестен закон изменения его характеристик в процессе работы, либо динамические свойства как объекта управления, так и управляющих элементов меняются во времени. Кроме того, применяемые технические средства автоматизации могут существенно отличаться от идеальных. В частности, исполнительные механизмы систем регулирования имеют нелинейности (люфт в механических сочленениях, нелинейность статической характеристики). Хорошо известно [69], что возможность управления объектом в такой ситуации основана на применении принципа адаптации, позволяющего уменьшить первоначальный уровень неопределенности за счет использования информации, извлекаемой из наблюдений за выходом управляемого объекта в процессе его нормального функционирования.

Помимо трудностей, связанных с наличием априорной неопределенности, в большинстве случаев имеется возможность измерять только входные и выходные сигналы, но не их производные. Задача управления еще более усложняется, если разница порядков числителя и знаменателя передаточной функции объекта больше единицы, что характерно для теплоэнергетики. Параметры настройки систем регулирования, полученные в результате расчета аналитическими методами по известной модели объекта [20 – 30], часто нуждаются в коррекции непосредственно на действующих системах регулирования.

Для того чтобы оптимально настроить АСР, необходимо располагать динамическими характеристиками системы, но надо учитывать и характеристики возмущений. К сожалению, многие возмущения, действующие в системе, являются неизмеримыми, и характеризовать их можно лишь на основе анализа процессов изменения выходной величины действующей системы. Кроме того, большинство



методик расчета параметров ПИД-регулятора не учитывают возмущения, действующие в объекте (метод Зиглера и Никольса, метод CHR). Все это делает необходимым уточнение настройки, полученной аналитическими методами.

Исходя из этого, можно утверждать, что окончательная настройка может быть получена только на действующей системе, так как практически невозможно учесть в расчете все факторы, влияющие на работу системы, как вследствие отсутствия достаточной информации, так и вследствие ограниченности методов синтеза.

Таким образом, задача, связанная с разработкой адаптивных систем управления динамическими объектами, является одной из современных задач в теории автоматического управления, решение которой имеет ярко выраженный прикладной характер. Очевидно, что решение данной задачи в классе линейных динамических объектов представляет собой весьма актуальную задачу адаптивного управления динамическими объектами, имеющую важное практическое значение.

### **1.3. Обзор рынка адаптивных регуляторов**

Один из вариантов классификации адаптивных систем представлен на рисунке 1.1. Реализацией рассмотренных способов адаптации занимаются многие фирмы. В работе [33] было проведено исследование рынка адаптивных регуляторов. Далее приведены наиболее крупные фирмы производители предлагающие подобные решения.

Одной из первых компаний, представивших на рынок адаптивные регуляторы, была Foxboro. Первый адаптивный регулятор Foxboro EXACT TM (760/761), выпущенный в октябре 1984 г., был основан на распознавании образов; в дальнейшем было сделано множество модификаций в алгоритмах его функционирования. Эти алгоритмы легли также в основу построения распределенной системы управления Foxboro I/A. Контроллер EXACT MV включает три функциональных блока: PIDA, FBTUNE и FFTUNE. PIDA является современным ПИД-контроллером, FBTUNE служит для настройки петлевого усиления, предварительной настройки и адаптации, FFTUNE выполняет настройку прямой связи в регуляторе и табличное управление. Качество настройки контролируется по двум параметрам: перерегулирование и коэффициент затухания.

В контроллерах ABB подстройка основана на частотной релейной идентификации [28]. Первый адаптивный контроллер назывался ECA-40TM. Эта система также

использовала метод табличного управления параметрами регулятора. Впоследствии методы автонастройки дополнились непрерывной подстройкой, подстройкой не только петлевого усиления, но и параметров прямой связи, а также методами диагностики. Перечисленные методы были воплощены в модели ЕСА600 ТМ, выпущенной в 1988 году.

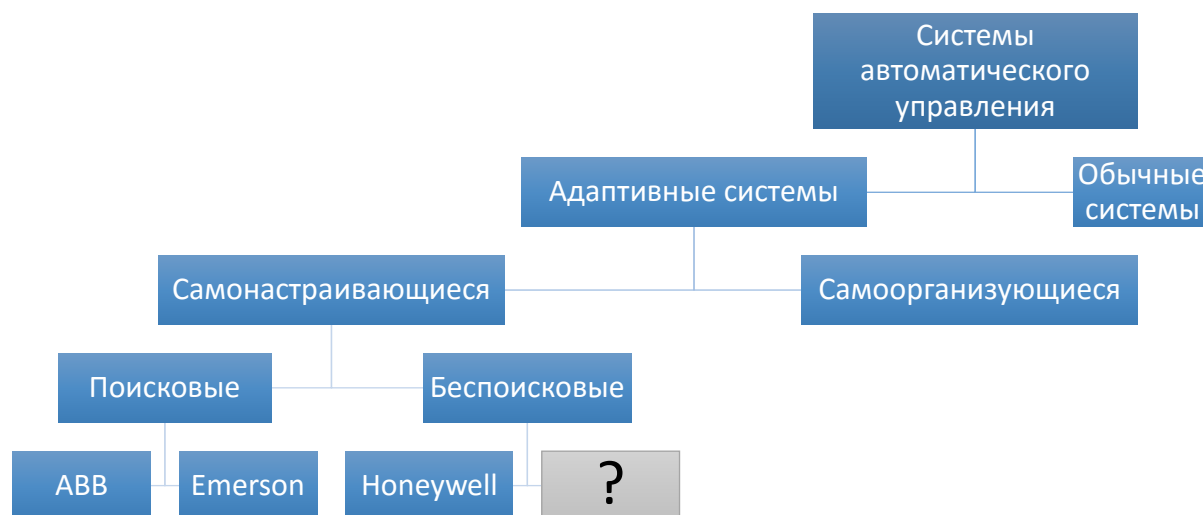


Рис. 1.1. Пример классификации адаптивных систем

Эти же принципы использованы в распределенной системе управления Industrial IT System 800xA ТМ, которая использует еще и методы нечеткой логики и предиктивный ПИ (ППИ) регулятор. В последних версиях контроллеров АВВ после идентификации в режиме релейного регулирования используется дополнительный этап идентификации по реакции объекта на входной скачок для идентификации статического коэффициента передачи.

В контроллерах Emerson методы регулирования, заложенные еще в распределенной системе управления Provox и RS3, впоследствии были перенесены и расширены в системе DeltaV. Система использует автонастройку, табличное управление и адаптацию. Имеется также программное обеспечение для нечеткого регулирования и систем с транспортной задержкой.

Автоматическая настройка базируется на методе релейной идентификации [28]. Используются несколько периодов колебаний в системе. Амплитуда колебаний выбирается равной нескольким процентам от полного динамического диапазона системы. Для оценки величины транспортной задержки используется реакция на скачок.

Полученные таким способом три параметра достаточны для идентификации модели первого порядка с задержкой. Для этого используются по выбору пользователя метод Зиглера-Никольса, регулятор с внутренней моделью или ламбда-тьюнинг. Система имеет также встроенную подсистему моделирования, которая позволяет увидеть графики процесса регулирования до того, как коэффициенты регулятора будут записаны в контроллер.

Управление в контроллере UDC6000 фирмы Honeywell выполняется как с помощью предварительной идентификации модели, так и на основе правил. Идентификация выполняется по отклику на скачок. Величину приращения уставки относительно рабочей точки задает пользователь. Эксперимент выполняется в разомкнутом контуре. Величина задержки определяется как время от начала эксперимента до момента, когда выходная переменная достигнет некоторого малого, наперед заданного значения.

Кроме перечисленных контроллеров, алгоритмы автонастройки могут быть реализованы на базе персонального компьютера, играющего роль операторской или инженерной станции. В данном случае типовая система для настройки ПИД-регулятора состоит из компьютера с программным обеспечением, комплекта модулей ввода-вывода и соединительных кабелей. Объект включается в контур регулирования, система настраивается желаемым способом, затем полученные коэффициенты регулятора записываются в ПИД-контроллер. Благодаря удобному пользовательскому интерфейсу, большой производительности компьютера и отсутствию ограничений на алгоритмы идентификации системы, удастся получить параметры регулятора, близкие к оптимальным.

В настоящее время имеется около полусотни коммерческих продуктов для настройки ПИД-регуляторов, при этом среди аналитических методов настройки в этих программах наиболее распространены ламбда-тьюнинг или метод регулятора с внутренней моделью. Подавляющее большинство программ использует модель первого порядка с задержкой для описания объекта регулирования. Среди них - Protuner фирмы Techmation Inc., LabVIEW PID Control Toolset фирмы National Instruments, Intelligent Tuner (Fisher-Rosemount), Profit PID (Honeywell), КИРАСА (ТеконАвтоматика) и др.

Развитие описываемых средств идет в направлении расширения диапазона поддерживаемых ПИД-регуляторов, применения методов искусственного интеллекта и

методов диагностики, развития пользовательского интерфейса. Современные средства настройки позволяют анализировать износ клапанов, делать оценку робастности, автоматически генерировать отчет с параметрами контура регулирования, строить графики спектральной плотности мощности и функций авто и взаимной корреляции, делать оптимизацию инверсной модели объекта управления и т.п.

#### **1.4. Выводы по главе и постановка задачи**

Как показывает обзор систем, сделанный выше, многие фирмы работают над внедрением адаптивных систем. К настоящему времени господствующее положение заняли две разновидности подобных методов.

1. Экспертные методы автоматизированной настройки (например, EXACT алгоритм американской фирмы Foxboro и сходные алгоритмы контроллеров японских фирм Yokogawa и Hitachi), учитывающие рекомендации опытных экспертов-наладчиков, осуществляющих настройку подачей на действующую систему автоматического регулирования ступенчатых воздействий и анализирующих затем характер получаемой реакции на такие воздействия.

2. Автоматизированный вариант эмпирического метода настройки Зиглера-Никольса, основанный на выводе действующей системы с П-регулятором на границу устойчивости и расчете по критическим периодам колебаний и коэффициенту передачи регулятора оптимальных параметров настройки ПИД-регулятора с использованием для этого простых эмпирических формул. Автоматизация метода состоит в замене настраиваемого регулятора двухпозиционным реле, что приводит к возникновению установившихся автоколебаний в контуре регулирования. На таком принципе работают блоки автонастройки контроллеров типа "Ремиконт" и "Протар".

В обоих методах не удалось реализовать адаптивное управление, которое, по самому определению этого термина, должно обеспечить измерение параметров настройки за соответственно меняющимися свойствами объекта; успешно реализована лишь автоматизированная настройка параметров регулятора, осуществляемая только при практически неизменных во время настройки свойствах объекта.

Стоит отметить, что на рынке регуляторов более простой и эффективный подход, отличающийся использованием априорной информации о специфике объекта и взаимосвязях в нем, представлен слабо. Между тем, наряду с адаптивными системами,

реализующими алгоритмы общего назначения, заслуживают интерес и системы, учитывающие прикладную особенность технологических процессов.

Как отмечается в [71] для теплоэнергетики характерной является задача, ориентированная на достижение минимума дисперсии ошибки регулирования  $\sigma_\varepsilon^2$  в условиях существенных функциональных ограничений, связанных:

- с требованиями к запасу устойчивости, выраженными обычно значением нижнего уровня степени затухания переходного процесса  $\psi_0$ ;
- с предельно допустимыми динамическими отклонениями технологических параметров  $A_{\max}$  при действии на объект наиболее неблагоприятных детерминированных возмущений;
- с тривиальными ограничениями на область изменения параметров элементов автоматики  $D_\theta$ , в значительной степени зависящих от типа исполнительного механизма.

Пример системы регулирования, учитывающей специфику теплоэнергетических объектов, рассматривается в работе [41], где предложен способ анализа особенностей процессов в произвольном сечении распределённого по длине объекта управления. В качестве показателей, влияющих на надёжность и долговечность термонапряжённых поверхностей энергетического оборудования, рассматриваются дисперсия и средняя частота случайного процесса. Учитывается коррелированность действующих на объект возмущений. Результатами такого анализа являются нелинейные функции влияния свойств возмущений на дисперсию и среднюю частоту случайного процесса. Это открывает возможность оптимизации процессов управления по технологически обоснованному критерию, ориентированному на повышение эксплуатационной надёжности и долговечности теплоэнергетического оборудования. Это очень актуально прежде всего для пароперегревателей современных энергетических котлов.

Целью данной работы является разработка алгоритма адаптивной системы, предложенной в [41], и его реализация на базе микропроцессорного устройства, способного работать на разных уровнях ПТК. Реализация подобной системы на базе аналоговой аппаратуры вызывала ряд трудностей, появление же микропроцессорных систем управления открыло возможность не только её широкого внедрения, но и совершенствования предложенных алгоритмов. В частности, появилась возможность разработки универсального блока адаптации, применимого для целого класса систем.

Сущность подхода опирается на специфику теплоэнергетических объектов, заключающуюся в том, что изменения параметров передаточных функций их каналов, под влиянием общих режимных факторов, происходят синхронно. Проведённые в [68] теоретические и экспериментальные исследования свойств объектов позволили выделить два характерных типа изменений динамических свойств объекта, происходящих как при смене режимов, так и в процессе ухудшения функционального состояния агрегатов:

- коэффициенты усиления каналов  $k$  объекта изменяются (масштабируются по уровню) относительно независимо друг от друга;
- постоянные времени  $T$  и запаздывание  $\tau$  в передаточной функции канала объекта связаны единым масштабирующим множителем.

Принимается во внимание основное соотношение, характерное для оптимально настроенной системы:

$$k_o \cdot k_p = \frac{R}{\tau/T},$$

в котором  $k_o$  и  $k_p$  – коэффициенты усиления основного канала объекта и регулятора соответственно, а  $R$  – константа, определяющая запас устойчивости процесса. Таким образом, при изменении режима работы объекта и фиксированных свойствах регулятора прежде всего происходит изменение коэффициента усиления объекта  $k_o$  и, как следствие, степени затухания процесса  $\psi$ . Стабилизация последней требует адекватного (обратного) изменения коэффициента усиления регулятора  $k_p$ . Масштабирование по времени сопряжено с пропорциональным изменением постоянной интегрирования  $T$ .

Изложенные предпосылки позволяют поставить задачи оперативной оценки:

- колебательности процесса, выражаемой степенью затухания  $\psi$ ;
- средней частоты колебаний процесса  $\omega$ .

С целью выявления основных качественных признаков замкнутой АСР представим её модель в виде:

$$w(t) = A \cdot e^{-a \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi).$$

Тогда взаимная корреляционная функция между процессом  $w(t)$  и его второй производной  $w''(t)$  будет иметь вид:

$$R_{w-w^*}(\tau) = A^2(a^2 + \omega^2)e^{-a\tau} \left[ \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \omega\tau)}{a} - \frac{\sin\left(\varphi_2 + \varphi_1 + \omega\tau + \arctg\left(\frac{\omega}{a}\right)\right)}{\sqrt{a^2 + \omega^2}} \right]$$

Нормированные значения корреляционной функции, отнесённые к дисперсии процесса, при  $\tau = 0$  будут находиться в интервале:

$$1) \omega = 0 - \text{Апериодический процесс: } r_{w-w^*}(0) = \frac{R_{w-w^*}(0)}{\sqrt{D_w \cdot D_{w^*}}} = +1$$

$$2) a = 0 - \text{Незатухающие колебания: } r_{w-w^*}(0) = -1$$

Это даёт возможность однозначно связать степень затухания процесса с параметром нормированной взаимной корреляционной функции в нуле функции, представленной на рисунке 1.6.

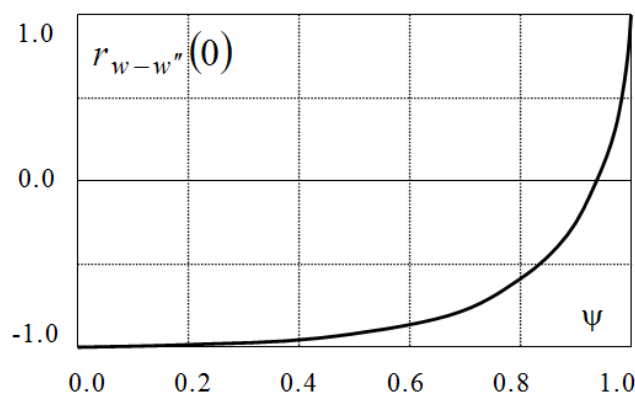


Рис.1.6. К оценке степени затухания процесса по взаимной корреляционной функции

Интересно, что для очень распространённого случая настройки на степень затухания  $\psi = 0.9$  взаимная корреляционная функция близка к нулю. Кроме того, обратим внимание, что наибольшая чувствительность функции соответствует самому важному для практических приложений интервалу значений степени затухания 0.75 – 0.9.

В связи с изложенным определены следующие задачи исследования:

3. Анализ способов управления и наблюдения за теплоэнергетическими объектами, исходя из требований к качеству технологических процессов.
4. Исследование:
  - а) способов оценки дрейфа характеристик объекта;
  - б) способов функциональной диагностики системы;
  - в) способов настройки адаптивной системы.

Таким образом, получается комплекс методов, обеспечивающих гарантированное выполнение функций регулирования с учётом заданных требований к запасу устойчивости системы, в условиях нестационарности и переменных режимов работы технологического оборудования.

Принципы, использованные при разработке данной самонастраивающейся системы, развивают идеи, предложенные в работе Белова В.В., Кондрашина А.В., Гушло В.Н. «Импульсный регулятор». Система настраивает контур с классическим ПИД-регулятором с достаточным для данного процесса качеством, заданным человеком-экспертом. После чего использует процедуры автоматической коррекции параметров ПИД-регулятора по оперативной информации об ошибке управления  $\varepsilon$ . В частности, методы обработки случайных процессов позволяют в режиме реального времени отслеживать изменения таких характерных свойств сигнала ошибки управления, как средняя частота  $\omega_{\text{ср}}$  и  $A_{\text{ср}}$  средняя амплитуда колебаний, а также значение эквивалентной степени затухания  $\psi_z$ , оценивающей запас устойчивости системы. Принимается во внимание, что темп изменения этих характеристик достаточно мал для эффективного разделения процессов координатного и параметрического управлений. Совокупность такой информации в полной мере обеспечивает возможность обоснованного изменения параметров регулятора.

При фиксированных свойствах регулятора изменение средней частоты процесса  $\omega_{\text{ср}}$  связано с изменением инерционности объекта, оцениваемым показателем, аналогичным масштабу времени. Это позволяет применить этот показатель прежде всего для адекватного изменения постоянных времени интегрирования  $T_{\text{и}}$  и дифференцирования  $T_{\text{д}}$  в ПИД-алгоритме регулятора (при сохранении значения коэффициента предварения  $\alpha = T_{\text{д}} / T_{\text{и}}$ ). Для корректной оценки величины изменения инерционности объекта свойства регулятора не должны влиять на эту оценку. Исключение влияния свойств регулятора достигается стабилизацией значения эквивалентной степени затухания  $\psi_z$ , оценивающей запас устойчивости системы. Это реализуется с помощью коррекции коэффициента усиления регулятора  $k_{\text{р}}$ . Средняя амплитуда колебаний  $A_{\text{ср}}$  необходима для синхронизации параметрических изменений регулятора. Структура системы, функционирующая на этих принципах приведена на рисунке 1.6.



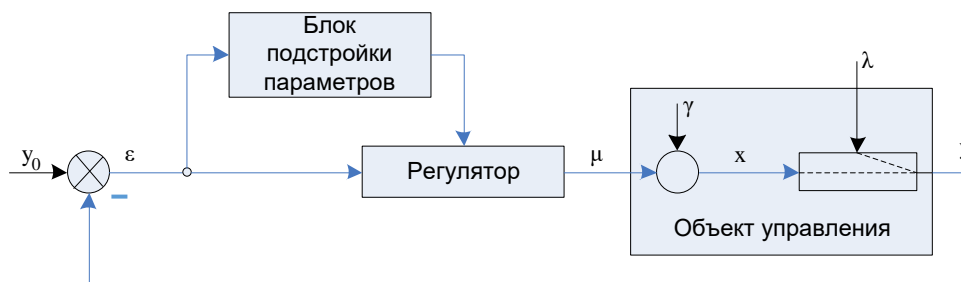


Рис. 1.2. Структура системы

Работая таким образом, система получает возможность сохранять заданные показатели качества, подстраивая параметры регулятора. Необходимость такой подстройки может возникать в ситуациях перехода объекта на другую нагрузку, нелинейности органов управления, внутренних изменениях в объекте.

Таким образом, можно обозначить следующие задачи исследования:

1. Технологически обосновать критерии, характеризующие статические и динамические свойства объекта.
2. Найти показатели, характеризующие эти критерии, и математически обосновать их связь с ними.
3. Вывести формулы расчета найденных показателей по оперативному сигналу ошибки управления.
4. На действующей модели провести исследования для экспериментальной проверки выдвигаемых положений.

## **2. АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СВОЙСТВА ОБЪЕКТА, И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИХ ОЦЕНКИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

### **2.1. Анализ теплофизических особенностей процессов в объекте управления и оценка характера их влияния на свойства объекта**

В предыдущей главе было показано, что задача разработки адаптивной системы управления по-прежнему является актуальной. Предлагаемая в данной работе система имеет ряд преимуществ по сравнению с адаптивными системами, рассмотренными в предыдущей главе. Одним из преимуществ системы является отсутствие тестовых возмущений. Система определяет необходимость тех или иных изменений параметров регулятора по оценкам, рассчитываемым по оперативному сигналу ошибки управления, без использования поисковых сигналов. Также стоит отметить и то, что изменение параметров регулятора происходит в темпе с процессом. Кроме того, система спроектирована с учетом специфики теплоэнергетических объектов, заключающейся в том, что изменения параметров передаточных функций под влиянием общих режимных факторов происходят синхронно.

Характерными процессами в технологическом оборудовании для теплоэнергетики можно считать процессы тепломассообмена, физико-химические, тепломеханические, пневмогидравлические, электромеханические и электротехнические. В основе производственного цикла ТЭС лежит последовательный процесс извлечения тепловой энергии из органического топлива, генерации с помощью этой энергии водяного пара и преобразовании энергии пара в механическую, а затем и в электрическую энергию с сопутствующим использованием низко потенциального пара для производственных и отопительных нужд. Тепломассообменные процессы занимают в технологическом процессе ТЭС центральное место. Они позволяют эффективно преобразовать энергию факела в энергию высокопотенциального пара, способного осуществить основной цикл ТЭС. Не раскрывая всей сути технико-экономической целесообразности, отметим лишь принятые в энергетике процессы анализа:

- экономичность процесса;
- надежность и долговечность оборудования;
- сложность системы управления.

Рассмотрим процессы дросселирования, аккумуляции и теплообмена более подробно.

Исследуем характер влияния динамики на процессы в трубопроводе. В [43] подробно рассматривается суть процессов, происходящих при движении рабочего тела (среды) по закрытому каналу (трубопроводу). Расчетная схема включает два процесса дросселирования и процесс в рассечке между ними. Объем аккумулятора принят равным  $V_a$ . Он может быть образован естественным объемом трубы, либо соответствовать общему трубной системы и ёмкости, встраиваемой в технологическую схему для аккумуляции.

Обратим внимание, что термодинамическая характеристика потока на выходе из первого дросселя  $\theta_3$  отличается от значения  $\theta_A$ , свойственного аккумулятору, т.к. формируется только процессом адиабатного расширения. Давление же среды не зависит от направленности потока, ибо передаётся равномерно во все стороны. Поэтому принимаем его одинаковым и равным  $p_A$  на всём внутреннем интервале технологического участка.

Запишем необходимую систему уравнений, характерных для нашей задачи, включив в неё:

- уравнения сохранения массы и энергии для объёма:

$$V_a * \frac{\partial \rho_a}{\partial \tau} = G_1 - G_2,$$

$$V_a * \frac{\partial (\rho_a * h_a)}{\partial \tau} = G_1 * h(p_a, \theta_3) - G_2 * h_a;$$

- два уравнения, описывающие входной процесс адиабатного дросселирования:

$$p_1 - p_a - \zeta_1 * \frac{G_1^2}{2 * \rho_1 * f_1^2} = 0,$$

$$h_1 - h(p_a, \theta_3) = 0;$$

- два уравнения, описывающие выходной процесс адиабатного дросселирования:

$$p_a - p_2 - \zeta_2 * \frac{G_2^2}{2 * \rho_a * f_2^2} = 0,$$

$$h_a - h_2 = 0.$$

Где  $V_a$  – объем аккумулятора,  $G$  – расход,  $\theta$  – термодинамическая характеристика дросселя,  $p$  – давление среды,  $f$  – площадь проходного сечения,  $\rho$  – плотность среды.

Будем исходить из того, что трубопровод нерегулируемый. Следовательно, оба расхода не могут быть признаны независимыми переменными. Поэтому к аргументам задачи отнесём давления на входе и выходе, а также температуру среды на входе. Динамика изменения расходов будет следовать за изменениями давления в аккумуляторе.

Вследствие нелинейности уравнений, соответствующих законам сохранения энергии и движения, а также нелинейности термодинамических функций состояния анализ системы затруднителен. Поэтому воспользуемся линейным приближением, сохраняющим все основные свойства системы.

Для этого используем разложение функций в ряд Тейлора в окрестности некоторой режимной точки, соответствующей известному стационарному состоянию процесса.

Частные производные берём в окрестности соответствующего начального значения, отвечающего статическому режиму системы. При этом, если производная берётся по давлению  $p$ , то следует считать  $\theta = \text{Const}$ , а если по параметру  $\theta$ , то следует исходить из условия  $p = \text{Const}$ . В результате линеаризации получим модель первого порядка процесса дросселирования:

$$\Delta p_1 - \Delta p_a = k_{12} * \Delta G_1 - k_{13} * \Delta p_1 - k_{14} * \Delta \theta_1.$$

Отсюда выразим расход на входе в трубу:

$$\Delta G_1 = \frac{(1 + k_{13})}{k_{12}} * \Delta p_1 - \frac{1}{k_{12}} * \Delta p_a + \frac{k_{14}}{k_{12}} * \Delta \theta_1 = k_{15} * \Delta p_1 - k_{16} * \Delta p_a + k_{17} * \Delta \theta_1$$

Аналогично можно получить модель второго процесса дросселирования:

$$\Delta \left( \frac{\zeta_2 G_2^2}{2 \rho_a f_2^2} \right) = \frac{1}{\varphi_2^2} \left( \frac{2 G_0}{\rho_{a0}} \Delta G_2 - \left( \frac{G_0^2}{\rho_{a0}^2} \right) * \left( \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{a0} \Delta p_a + \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{a0} \Delta \theta_a \right) \right) \\ = k_{18} * \Delta G_2 - k_{19} * \Delta p_a - k_{20} * \Delta \theta_a.$$

Тогда

$$\Delta p_a - \Delta p_2 = k_{18} * \Delta G_2 - k_{19} * \Delta p_a - k_{20} * \Delta \theta_a.$$

В окончательном виде, разрешенном относительно  $G_2$ , она будет иметь вид:

$$\Delta G_2 = \frac{(1 + k_{19})}{k_{18}} * \Delta p_a - \frac{1}{k_{18}} * \Delta p_2 + \frac{k_{20}}{k_{18}} * \Delta \theta_a = k_{21} * \Delta p_a - k_{22} * \Delta p_2 - k_{23} * \Delta \theta_a.$$

Это дает основания получить систему линейных уравнений, в которой закон сохранения массы может быть приведен к виду:

$$k_1 V_a * \frac{dp_a}{d\tau} = G_1 - G_2 - k_2 V_a * \frac{d\theta_a}{d\tau}.$$

Подставим в него выражения для расходов:

$$k_1 V_a * \frac{dp_a}{d\tau} = (k_{15} * \Delta p_1 - k_{16} * \Delta p_a + k_{17} * \Delta \theta_1) - (k_{21} * \Delta p_a - k_{22} * \Delta p_2 - k_{23} * \Delta \theta_a) - k_2 V_a * \frac{d\theta_a}{d\tau}.$$

После переноса в левую часть слагаемых с давлением в ёмкости и перегруппировки получим дифференциальное уравнение относительно интересующего нас давления  $p_a$ :

$$k_1 V_a * \frac{dp_a}{d\tau} + (k_{16} + k_{21}) p_a = k_{15} p_1 + k_{22} p_2 + k_{17} \theta_1 - \left( k_2 V_a * \frac{d\theta_a}{d\tau} + k_{23} \theta_a \right).$$

Приведем его к операторной форме

$$(T_p s + 1) * p_a(s) = \bar{k}_1 p_1(s) + \bar{k}_2 p_2(s) + \bar{k}_3 \theta_1(s) - \bar{k}_4 (T_{p\theta} s + 1) \theta_a(s).$$

Параметрами этого уравнения являются две постоянные времени  $T_p$  и  $T_{\theta}$ , а также коэффициенты усиления:

$$T_p = \frac{k_1 V_a}{k_{16} + k_{21}}; \quad T_{\theta} = \frac{k_2 V_a}{k_{23}};$$

$$\bar{k}_1 = \frac{k_{15}}{k_{16} + k_{21}}; \quad \bar{k}_2 = \frac{k_{22}}{k_{16} + k_{21}}; \quad \bar{k}_3 = \frac{k_{17}}{k_{16} + k_{21}}; \quad \bar{k}_4 = \frac{k_{23}}{k_{16} + k_{21}}.$$

Используя эквивалентный коэффициент расхода

$$\varphi_i = f_i \sqrt{2/\zeta_i},$$

раскроем постоянную времени по давлению  $T_p$ . Сделав все необходимые подстановки, получим:

$$T_p = \frac{2 * V_a * G_0 * \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{a0}}{\varphi_1^2 \rho_{10} + \varphi_2^2 \rho_{a0} + \frac{G_0^2}{\rho_{a0}} * \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{a0}}, \text{ с}$$

Качественный анализ этого выражения позволяет сделать выводы о прямой связи значения с объемом и обратной связи с расходом, т.е. скоростью среды. Кроме того на

постоянную времени оказывают влияние многие другие факторы. В их числе можно отметить эквивалентный коэффициент расхода  $\varphi_i = f_i \sqrt{2/\zeta_i}$ , зависящий от площади проходного сечения трубы и коэффициента сопротивления. Коэффициент сопротивления учитывает длину трубы  $L$ , внутренний диаметр трубы  $d_{\text{вн}}$ , а также коэффициент трения  $\lambda_{\text{тр}}$ , зависящий от режима течения (числа  $Re$ ) и от отношения диаметра трубы к размеру выступов шероховатости:

$$\zeta = \lambda_{\text{тр}} * \frac{L}{d_{\text{вн}}} + \sum_i \zeta_{\text{м},i}.$$

У эффекта аккумуляции массы имеется прямая связь со сжимаемостью теплоносителя ( $\partial\rho/\partial p$ ). Степень влияния сжимаемости возрастает по мере увеличения открытости системы. С достаточной для практики степенью точности можно взять среднее арифметическое значение плотности

$$\rho_L = \int_0^L \rho(p(l), \theta(l)) * dl.$$

$$\rho(p, \theta) = \frac{(\rho(p_1, \theta_1) + \rho(p_2, \theta_2))}{2}.$$

Где  $\theta$  – термодинамическая характеристика

$$\theta = \begin{cases} t - \text{температура однофазного потока, } ^\circ\text{C} \\ x - \text{степень сухости двухфазной смеси.} \end{cases}$$

Из сказанного выше видно, что постоянная времени зависит не только от режима работы, но и от многих других конструктивных и физических факторов,

$$T_p = f(G_0, V_a, \varphi_i, \rho_{a0}, \dots), \quad (1)$$

каждый из которых невозможно учесть при разработке системы управления. Это не даёт оснований рассчитывать на возможность коррекции параметров регулятора только по одному ведущему фактору (например, по расходу теплоносителя или по производительности).

Другим типом процессов, занимающих важное место в технологическом цикле ТЭС, является теплообмен. Воспользуемся материалом, приведенным в [77], и рассмотрим процессы, характерные для теплообменников, относящихся к категории радиационных. Процессы на стороне горячего теплоносителя соответствуют радиационному теплообмену. Обычно эти процессы в газоходах котла связаны с нагревом разделяющей поверхности (стенки). Нагрев же холодного теплоносителя

происходит за счёт конвективной теплоотдачи от стенки. В таком теплообменнике в статике уравнение баланса энергии имеет достаточно очевидный вид:

$$Q_{\text{л}} = Q_{\text{к}}.$$

В нестационарном случае уравнение, отражающее сущность закона сохранения энергии, представим в виде, учитывающем все три компонента системы – газов, стенки и нагреваемой среды. За основу возьмём уравнение:

$$M_{\text{м}} c_{\text{м}} * \frac{dt_{\text{м}}(\tau)}{d\tau} = Q_{\text{л}}(\tau) - Q_{\text{к}}(\tau), \quad (2)$$

соответствующее так называемой сосредоточенной модели и предполагающее равенство температуры во всех точках стенки. Это позволяет отказаться от учёта распределенной температуры стенки по длине трубы теплообменника.

При описании конвективного теплообмена стенки со средой начнём с некоторых упрощений, не мешающих выделению принципиальных особенностей рассматриваемого типа теплообменника, а именно:

- будем считать нагреваемую среду однофазной и несжимаемой;
- пренебрежём влиянием температуры среды на плотность;
- пренебрежём эффектом дросселирования нагреваемого теплоносителя.

Это позволяет:

- исключить из системы уравнений модель аккумуляции массы и энергии в нагреваемом теплоносителе;
- считать, что  $G_1 = G_2 = G$ ;
- принять, что  $\theta = t$ .

Поэтому для нагреваемого теплоносителя

$$Q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}}(G) * F_{\text{к}} * \Delta e = G * c * (t_2 - t_1). \quad (3)$$

Учтём равномерность прогрева стенки:

$$\Delta t = t_{\text{м}} - \bar{t} = t_{\text{м}} - 0.5 * (t_2 - t_1). \quad (4)$$

Подставим (4) в уравнение баланса (3) и разрешим его относительно  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{G * c - 0.5 * \alpha_{\text{к}} * F_{\text{к}}}{G * c + 0.5 * \alpha_{\text{к}} * F_{\text{к}}} * t_1 + \frac{\alpha_{\text{к}} * F_{\text{к}}}{G * c + 0.5 * \alpha_{\text{к}} * F_{\text{к}}} * t_{\text{м}}.$$

Это даёт возможность найти связь средней температуры нагреваемого теплоносителя с режимными параметрами:

$$\begin{aligned}\bar{t} &= 0.5 * (t_1 + t_2) = \frac{G * c}{G * c + 0.5 * \alpha_K * F_K} * t_1 + \frac{0.5 * \alpha_K * F_K}{G * c + 0.5 * \alpha_K * F_K} * t_M \\ &= A(G) * t_1 + B(G) * t_M.\end{aligned}$$

Принимая во внимание зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода теплоносителя, представим комплексы А и В в виде функций:

$$\begin{aligned}A(G) &= \frac{G * c}{G * c + 0.5 * \alpha_K(G) * F_K}; \\ B(G) &= \frac{0.5 * \alpha_K(G) * F_K}{G * c + 0.5 * \alpha_K(G) * F_K}.\end{aligned}$$

С учётом введённых обозначений выражение для конвективного теплового потока примет вид:

$$Q_K = \alpha_K(G) * F_K * (t_M - \bar{t}) = \alpha_K(G) * F_K * A(G) * (t_M - t_1). \quad (5)$$

Перейдём к линеаризации уравнений для радиационного и конвективного потоков теплоты.

$$Q_L \approx k_1 * \Delta t_{\Gamma 1} + k_2 * \Delta G_{\Gamma}.$$

А теперь, принимая во внимание зависимость комплексов А и В от расхода теплоносителя G, а также мультипликативную связь с температурами, линеаризуем и выражение (5) для конвективного потока:

$$\Delta Q_K = k_3 * (\Delta t_M - \Delta t_{c1}) + k_4 \Delta G,$$

в котором

$$k_3 = \alpha_K(G_0) * F_K * A(G_0);$$

$$k_4 = c * F_K * \alpha_K(G_0) * (t_{M0} - t_{10}) * \frac{ncG_0 + 0.5 * \alpha_K(G_0) * F}{[cG_0 + 0.5 * \alpha_K(G_0) * F]^2}.$$

Подставляя результаты линеаризации в уравнение (2), получим:

$$M_M c_M * \frac{d(\Delta t_M(\tau))}{d\tau} = k_1 * \Delta t_{\Gamma}(\tau) + k_2 * \Delta G_{\Gamma}(\tau) - k_3 * (\Delta t_M - \Delta t_{c1}) - k_4 * \Delta G.$$

После перегруппировки представим следующую итоговую операторную запись уравнения, характеризующего тепловой баланс стенки:

$$(T_M * s + 1) * t_M(s) = \bar{k}_1 * t_{\Gamma}(s) + \bar{k}_2 * G_{\Gamma}(s) - t_{c1}(s) - \bar{k}_4 * \Delta G(s).$$

Его параметры определяются следующими выражениями:

$$T_M = \frac{M_M c_M}{\alpha_K(G_0) * F_K} * \frac{1}{A(G_0)} = \frac{M_M c_M}{\alpha_K(G_0) * F_K} * \left( 1 + 0.5 * \frac{\alpha_K(G_0) * F_K}{cG_0} \right), c \quad (6)$$



$$\bar{k}_1 = \frac{k_1}{k_3}; \bar{k}_2 = \frac{k_2}{k_3}; \bar{k}_4 = \frac{k_4}{k_3}.$$

Проанализируем параметры, оказывающие влияние на постоянную времени  $T_m$  (6). Одним из факторов, оказывающих влияние на постоянную времени, является коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$ . При расчете значения  $\alpha_k$  учитываются многие критерии подобия, полученные при проведении многочисленных физических экспериментов. К ним относятся критерий конвективного теплообмена Пекле (Pe), вязкостно-инерционный критерий Рейнольдса (Re) и критерий подъемной силы Грасгофа (Gr). На их основе формируется критерий физических свойств Прандтля (Pr) и критерий теплоотдачи Нуссельта (Nu). Так что

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{l_0} * Nu = f(Re, Gr, Pe),$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $l_0$  – характерный линейный размер поверхности теплообмена (для труб это диаметр).

Для однофазных потоков можно использовать функцию

$$\alpha_k \approx k * G^n,$$

в которой  $k$  – параметр, зависящий от температуры, давления и геометрических особенностей канала, а  $n$  – от способа омыwania потоком поверхности. Часто применяют модель, учитывающую лишь относительное изменение скорости потока:

$$\alpha_k \approx \alpha_{k0} * \left( \frac{G}{G_0} \right)^n.$$

Таким образом, делаем вывод, что, как и в случае процессов дросселирования и аккумуляции, постоянная времени зависит от многих других параметров:

$$T_m = f(M_m, c_m, \alpha_k, G_0, F_k, \dots). \quad (7)$$

Обобщая результаты этого анализа (7), подчеркнём, что изменение теплофизических параметров процесса и зависящих от них характеристик проявляется синхронно во всех элементах технологического узла объекта управления. Это даёт основания сформулировать очень важную предпосылку, лежащую в основе предлагаемых ниже решений, а именно: считать возможным распределённый объект представлять моделью вида

$$W_o(p) = k_o * e^{-\tau_o * p} * \prod_{j=1}^n \frac{1}{\beta_j * T_o * p + 1}, \text{ при } \sum_{j=1}^n \beta_j = 1, \quad (8)$$

в которой общий эффект аккумуляции  $T_o$  распределён по элементам цепи с учётом доли каждого  $j$ -го элемента, оцениваемой весовым параметром  $\beta_j$ , зависимым от конструктивных параметров участка (объёма, массы металла и массы находящегося в этом объёме теплоносителя).

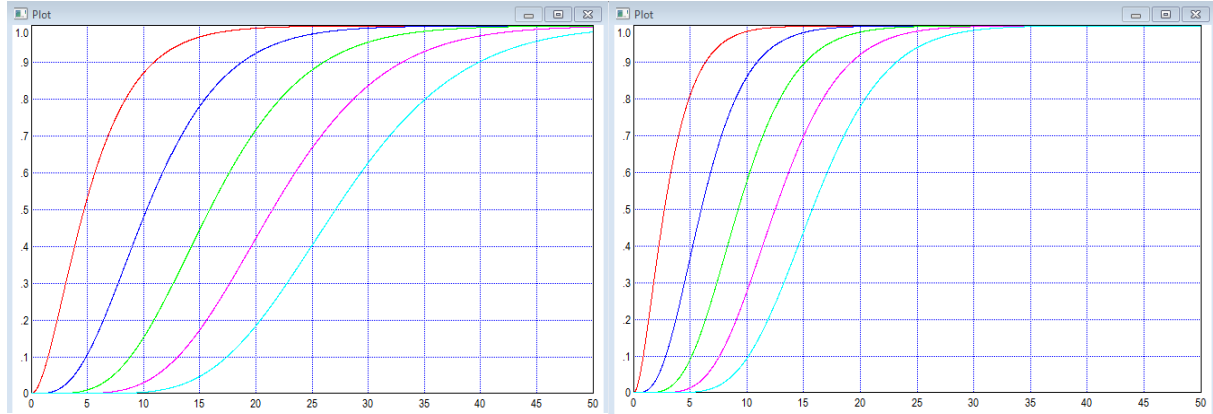


Рис. 2.1. Распределённость объекта и влияние теплофизических и режимных факторов на эффект аккумуляции (инерционности)

На рис. 2.1 сопоставлены два множества нормированных переходных функций теплообменников с разным числом выделенных в них и последовательно соединённых элементарных (сосредоточенных) участков. Отличие множеств выражено явным эффектом масштабирования процессов по времени по отношению к некоторому *номинальному* состоянию. Можно утверждать, что с учётом (1) и (8) масштабный коэффициент  $M_T$  зависит от множества режимных ( $p$ ) и теплофизических ( $тф$ ) факторов  $\Theta$ :

$$T_o(t) = T_o^{ном} \cdot M_T(\Theta_p, \Theta_{тф}, t) \quad (9)$$

Принимая во внимание, что теоретически длина этой цепи  $n$  равна бесконечности, а также факт малозначительности транспортного запаздывания  $\tau_{тр}$  на фоне явной выраженности ёмкостного запаздывания  $\tau_e$ , также наследующего масштабирующий эффект  $M_T$ , можно прийти к выводу о том, что в процессе эксплуатации относительная величина запаздывания является константой:

$$\frac{\tau_o}{T_o} = \frac{\tau_{тр} + \tau_e}{T_o} \approx \frac{\tau_e}{T_o} = \frac{M_T \cdot \tau_e^{ном}}{M_T \cdot T_o^{ном}} = \frac{\tau_e^{ном}}{T_o^{ном}} = const, \quad (10)$$

числовое значение которой определено только местом технологического участка в агрегате и его конструктивными параметрами.

Итоги анализа, выраженные соотношениями (11) и (12), позволяют воспользоваться известным результатом решения задачи оптимального управления по

Винеру, в соответствии с которым для объектов рассматриваемого типа (с запаздыванием и с самовыравниванием), работающих при характерных для теплоэнергетики низкочастотных возмущениях, оптимальным является классический ПИ-регулятор с параметрами [27]:

$$k_p^* \cdot k_o = \frac{1}{\tau_o / T_o}; \quad T_i^* = T_o.$$

Обобщая это соотношение на другие распространённые условия оптимальности, отличающиеся иными требованиями к запасу устойчивости, выраженному значением ожидаемой степени затухания переходных процессов  $\psi$ , получим соотношение:

$$k_p^*(t) \cdot k_o(t) = \frac{R(\psi)}{\tau_o / T_o}; \quad T_i^*(t) = f \left[ M_T(t) \cdot T_o^{\text{ном}} \right], \quad (11)$$

в котором  $R(\psi)$  – параметр, отвечающий за запас устойчивости. Условие оптимальности, выраженное формулами (11), позволяет явно разделить задачи наблюдения за изменяющимися свойствами объекта управления на две задачи:

- 1) на задачу оперативной оценки фактического запаса устойчивости, представленного в (11) параметром  $\psi$ ;
- 2) на задачу оценки текущего значения масштабирующего фактора  $M_T$ .

Решение первой задачи акцентировано фактически на отслеживание статических свойств объекта, влияющих на текущее значение  $k_o$  – коэффициента усиления основного канала объекта.

Вторая задача отличается своей направленностью на оценку изменяющейся аккумулирующей способности управляемой части объекта, оцениваемой текущим значением  $M_T$ .

Кроме очевидных достоинств автономного решения этих задач, есть и ещё одно, очень важное для последующей реализации достоинство – возможность разделения контуров параметрической коррекции  $k_p$  и  $T_i$  по быстродействию. Без этого качества решение задач может превратиться в итерационное решение системы уравнений, требующее гарантий сходимости и сопряжённое со снижением достижимой скорости решения.

Завершая технологический анализ и выражая его результаты в форме поставленных выше задач, перейдём к поиску способов их решения.

## 2.2. Выбор показателей для оценки свойств объекта управления

Приступая к первой задаче, отметим, что из соотношения (11) следует очевидная возможность оценки статического коэффициента усиления основного канала объекта через его связь с запасом устойчивости, пока ещё представляемого степенью затухания детерминированного переходного процесса  $\psi$ :

$$k_o(t) = \frac{R(\psi)}{k_p^*(t) \cdot \tau_o / T_o} = f[\psi(t)],$$

С другой стороны, обратим внимание, что в функционирующей системе нас уже не интересует собственно коэффициент усиления объекта, т.к. решение задачи параметрической подстройки регулятора может быть сведено к поиску такого корректирующего значения  $M_k(t)$ , чтобы соблюдалось условие, гарантирующее стабилизацию фактического запаса устойчивости  $\psi(t)$  на заданном уровне  $\psi_o$ :

$$k_p^*(t) = M_k(t) \cdot k_p^{\text{ном}}, \text{ где } M_k(t) = f[\psi(t), \psi_o] \quad (12)$$

Для систем автоматического регулирования, используемых в теплоэнергетике, запас устойчивости принято задавать или оценивать с помощью степени затухания  $\psi$  переходного процесса, инициируемого в процессе настройки системы путём подачи на систему ступенчатого возмущения [26]. Численно значение  $\psi_o$  определяется технологическими требованиями и лежит в интервале 0,75 – 0,9.

В условиях обычных режимов функционирования АСР такой прямой способ оценки  $\psi$  не имеет смысла и, следовательно, должен быть предложен некий косвенный способ, основанный на наблюдениях реального случайного процесса. Один из возможных вариантов, предлагаемых в этой работе, использует результат аналитического исследования элементарных процессов в АСР, выполненного А.В. Кондрашиным на одном из частных примеров [41]. В качестве наблюдаемого процесса использовалась ошибка управления. В соответствии с выводами, полученными в процессе этого исследования, оказалось возможным выявить интересные закономерности в корреляционной связи между ошибкой управления и её второй производной, представленной на рис. 2.2, а именно:

- 1) коэффициент взаимной корреляции зависит от заложенного при настройке регулятора запаса устойчивости (степени затухания);
- 2) практически важному уровню запаса устойчивости  $\psi = 0,9$  соответствует значение коэффициента взаимной корреляции, близкое к нулю;

- 3) наибольшая чувствительность функции соответствует самому важному для практических приложений интервалу значений степени затухания  $\psi > 0.7$ .

При всей привлекательности упомянутого выше способа оценки степени затухания его прямая реализация затруднительна, т.к. исследования проводились на не зашумлённом объекте. Это важно, поскольку наличие шумов может существенно повлиять «на качество» второй производной и, следовательно, на точность коэффициента корреляции. Поэтому в работе предложено иное решение, наследующее выявленный эффект, но не требующее использования второй производной.

Суть предлагаемого решения основана на параметрах не взаимной корреляционной функции, а автокорреляционной функции ошибки управления. В условиях действия на объект управления случайных процессов, отфильтрованных уже смежными технологическими участками, можно исходить из монотонности спектральных плотностей этих возмущений, приведённых к входу регулятора. Сама же система по условиям её настройки обладает резонансной частотой. Таким образом, нормированная корреляционная функция ошибки управления будет в первом приближении иметь вид, учитывающий как запас устойчивости (параметр  $a$ , отвечающий за интенсивность затухания корреляционной функции), так и наличие резонансной частоты  $\omega_p$ :

$$\rho_\varepsilon(\tau) = e^{-a|\tau|} \cdot \left[ \cos(\omega_p \cdot \tau) - \frac{a}{\omega_p} \cdot \sin(\omega_p \cdot \tau) \right]. \quad (13)$$

В качестве модели (13) принята модель, естественная для процесса  $\varepsilon(t)$  и отличающаяся нулевым значением спектра на нулевой частоте, что соответствует реальным процессам в астатической системе регулирования.

Существует устойчивая связь между параметрами корреляционной функции ( $a$ ,  $\omega_p$ ) и величиной запаса устойчивости  $\psi_0$ . Подчеркнём, что для целей параметрической коррекции регулятора нет необходимости знать абсолютные оценки искомых характеристик, а достаточно оценить лишь их изменение, обусловленное происходящими в объекте изменениями свойств. Колебательный характер корреляционной функции  $\rho_\varepsilon(\tau)$  позволяет провести аналогию между её видом (рис. 2.3) и свойствами функции веса колебательной системы второго порядка. В результате такого сравнения предложено в качестве меры, оценивающей запас устойчивости, использовать отношение

$$\alpha = A_2 / A_1.$$

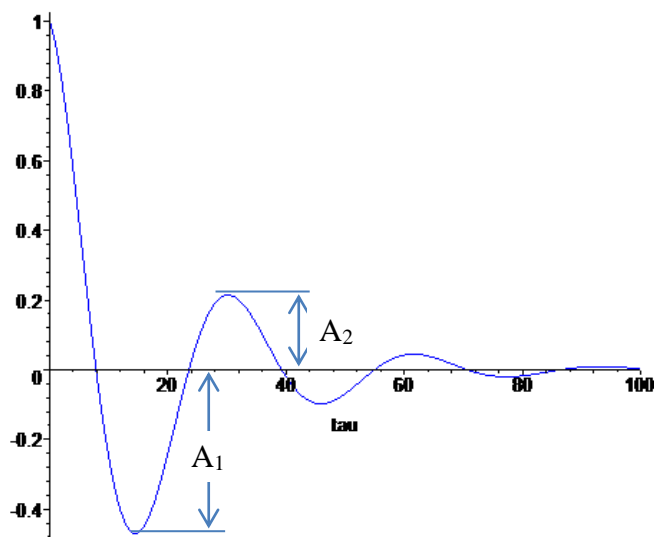


Рис. 2.3. К определению параметра  $\alpha$ , оценивающего запас устойчивости АСР

Таким образом, условие стабилизации запаса устойчивости уместно вместо варианта (12) представить в виде:

$$k_p^*(t) = M_k(t) \cdot k_p^{\text{НОМ}}, \text{ где } M_k(t) = f[\alpha(t) - \alpha_o]. \quad (14)$$

Рабочий алгоритм оперативной оценки параметра основан на обработке постоянно обновляющихся массива значений  $\varepsilon(t)$ . Длина этого массива, а также параметры фильтров процесса, используемого на стадии первичной обработки данных, являются параметрами *on-line* алгоритма настройки, реализующего условие (14).

Принято считать, что чем большее значение имеет  $T$ , тем инерционнее объект. Для решения второй задачи – наблюдения за параметром  $T_o$ , учитывающим аккумулирующую способность объекта управления – воспользуемся тем, что при фиксированных параметрах регулятора частотные свойства системы будут зависеть только от инерционности объекта, представляемой именно параметром  $T_o$ .

Рассмотрим задачу измерения, в которой динамика первичного измерительного преобразователя может (ПИП) быть выражена свойствами апериодического звена первого порядка (А-звена). Схема для определения динамической погрешности измерительного прибора приведена на рисунке 2.1.

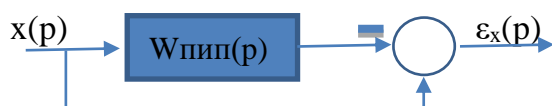


Рис. 2.1. Определение динамической погрешности измерительного прибора

Не будем принимать во внимание статические свойства датчика, т.е. его статическую характеристику. Поэтому

$$W_{\text{ПИП}}(p) = \frac{1}{Tp+1}.$$

Вполне очевидно, что динамическая ошибка измерения может быть представлена моделью:

$$\varepsilon_x(p) = [1 - W_{\text{ПИП}}(p)] * x(p) = W_\varepsilon(p) * x(p) = \frac{Tp}{Tp+1} * x(p).$$

В условиях случайного процесса  $x(t)$  дисперсия ошибки, характеризующая динамическую погрешность датчика, будет определяться постоянной времени  $T$  и частотными свойствами процесса. Пусть в качестве примера  $x(t)$  отвечает модели Марковского процесса со спектральной плотностью:

$$S_x(\omega) = \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\alpha^2 + \omega^2}$$

Тогда спектральную плотность ошибки можно выразить в виде:

$$S_\varepsilon = |W_\varepsilon(j\omega)|^2 * S_x(\omega) = \frac{T^2\omega^2}{T^2\omega^2 + 1} * \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} * \sigma_x^2.$$

Это позволяет найти выражение для дисперсии, оценивающее динамическую ошибку:

$$\sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_\varepsilon(\omega) * d\omega = \frac{\alpha T}{\alpha T + 1} * \sigma_x^2.$$

Оно дает ясное представление о влиянии параметра  $T$  на динамическую точность. С этой точки зрения постоянная времени  $T$  является характеристикой инерционности ПИП.

Наиболее распространенными объектами управления являются системы, описываемые уравнениями тепломассопереноса. Реакция таких объектов, при условии, что они являются линейными по входному воздействию, на ступенчатое входное воздействие имеет задержку и точку перегиба. Точное решение этих уравнений осуществляется численными методами и в теории автоматического управления не используется. Используют достаточно простое выражение, модель первого или второго порядка с транспортным запаздыванием, адекватно отражающее концептуальные свойства объекта управления. Теперь рассмотрим систему управления с объектом, представленным типовым апериодическим звеном с самовыравниванием в качестве основного канала. Структура такой системы представлена на рисунке 2.2.

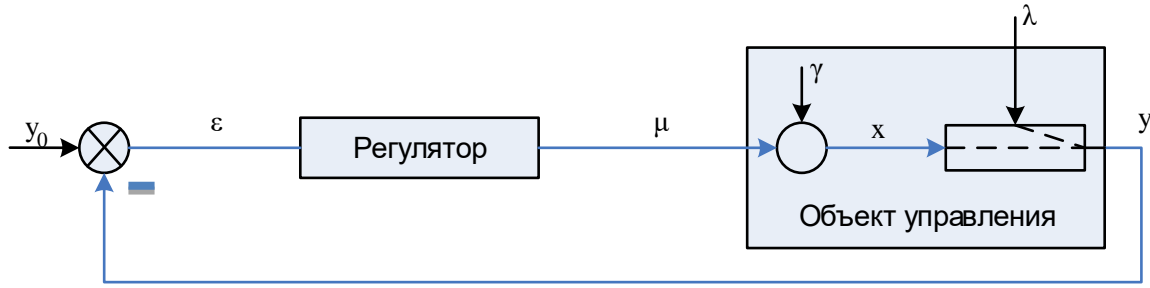


Рис. 2.2. Структура системы.

$$W_o = \frac{k_o}{T_o p + 1}$$

Пусть возмущение  $\gamma$  соответствует модели Марковского процесса со спектральной плотностью:

$$S_x(\omega) = \frac{2\alpha\sigma_x^2}{\alpha^2 + \omega^2}$$

Возьмем П-регулятор. Тогда передаточная функция замкнутой системы по каналу  $\gamma \rightarrow y$  будет иметь вид:

$$\Phi_{\gamma y} = \frac{k_o}{T_o p + 1 + k_p} = k_c \frac{1}{T_c p + 1}$$

Спектральная плотность системы может быть получена по формуле:

$$S = |\Phi_{\gamma y}(j\omega)|^2 S_\gamma$$

Используя модель Марковского процесса для возмущения  $\gamma$ , получим формулу для расчета дисперсии управляемого параметра  $y$ :

$$\sigma_y^2 = \frac{\alpha T_o}{\alpha T_o + 1 + k_p} * \frac{k_o^2}{(1 + k_p)^2} * \sigma_\gamma^2$$

Она в своих основных чертах соответствует ранее полученной формуле для дисперсии динамической ошибки. Следовательно, и в этом случае постоянная времени  $T$  является характеристикой инерционности объекта.

Если свойства объекта управления дополнены запаздыванием, так что

$$W_o = \frac{k_o}{T_o + 1} * e^{-\tau_o p},$$

то оптимальным с позиции задач фильтрации по Винеру, при характерных для теплоэнергетики низкочастотных возмущениях, можно считать ПИ-регулятор [77].

Минимальное значение дисперсии ошибки управления будет достигаться при следующем сочетании свойств объекта и регулятора:



$$k_p * k_o = \frac{1}{\tau_o/T_o}; T_n = T_o.$$

В то же время известно, что произведение  $k_p * k_o$  является характеристикой быстродействия системы. Это дает основания первую формулу интерпретировать следующим образом: быстродействие системы  $k_p * k_o$  является величиной обратной инерционности объекта  $\tau_o/T_o$ . Именно отношение, а не абсолютное значение  $T_o$  определяет инерционность объекта.

Подводя итог, можно выделить положение: в системах автоматического регулирования, имеющих в объекте запаздывание, мерой инерционности является отношение  $\tau_o/T_o$ .

В качестве оцениваемого свойства можно предложить либо прямой показатель инерционности – значение резонансной частоты  $\omega_p$  системы, либо косвенно связанную с ней среднюю частоту  $\omega_{cp}$  процесса. Вполне понятно, что определение значений этих частотных характеристик (рис. 2.3) может быть выполнено только на основе анализа свойств процесса  $\varepsilon(t)$ .

Выбор предпочтительного варианта должен быть обусловлен требованием максимальной защищённости показателя от случайных факторов, искажающих оценки характеристик случайного процесса. А это означает, что оценка положения максимума спектральной плотности будет намного критичнее к проявлению ограниченности длины выборки случайного процесса и к влиянию аддитивных шумов, не являющихся носителем необходимой нам информации о свойствах объекта. Таким образом, выбор фактически однозначен – средняя частота процесса.

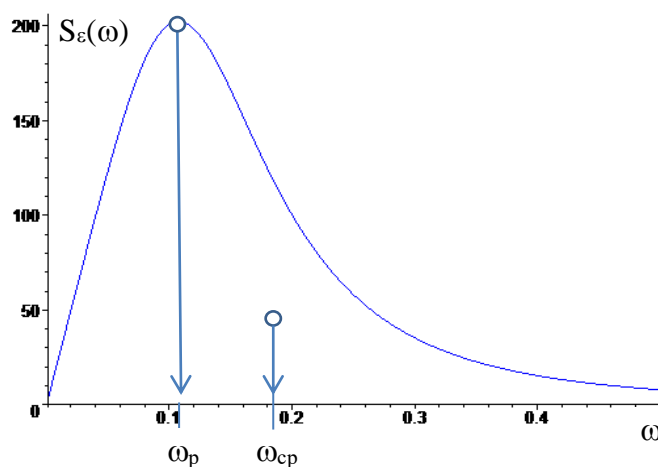


Рис. 2.3. К оценке частотных параметров системы и процесса

К способам оценки  $\omega_{cp}$  надо подходить с инструментальных позиций, учитывающих вычислительные возможности микропроцессора или рабочей станции. В работе предложено находить значение  $\omega_{cp}$  как значение первого начального момента нормированной спектральной плотности процесса  $\varepsilon(t)$ . В дискретном варианте, учитывающем представление процесса массивом равноудалённых точек, формула для вычисления приобретает вид:

$$\omega_{cp} \approx \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i * S_i(\bar{\omega}_i) / \sum_{i=1}^n S_i(\bar{\omega}_i), \text{ где } \bar{\omega}_i = \frac{\omega_{i-1} + \omega_i}{2}. \quad (18)$$

Дополнительным аргументом в пользу использования спектральной плотности следует считать наличие широких возможностей *on-line* сглаживания как самой выборки случайного процесса, так и вычисленных значений спектральной плотности.

### 2.3. Алгоритмизация расчёта показателей свойств объекта

Для нахождения спектральной плотности воспользуемся одним из алгоритмов преобразования Фурье. Перед обработкой процесса алгоритмом преобразования Фурье необходимо провести сглаживание массива его исходных данных при помощи оконных функций.

Используя [76], проанализируем длину массива исходных данных процесса. Она определяется, исходя из границ частотного диапазона. Количество точек в массиве связано с минимальной и максимальной частотой следующими соотношениями:

$$\omega_{\min} = \frac{\pi}{T_n} = \frac{\pi}{N_r \cdot \Delta_0}; \quad \omega_{\max}^H = \frac{\pi}{\Delta_0}, \text{ где } \Delta_0 - \text{ шаг по времени.}$$

Следовательно,

$$N_r = \text{int eger} \frac{\pi}{\omega_{\min} \cdot \Delta_0} = \text{int eger} \frac{\omega_{\max}^H}{\omega_{\min}}$$

На рисунке 2.3 приведен фрагмент исходного сигнала для адаптивного алгоритма.

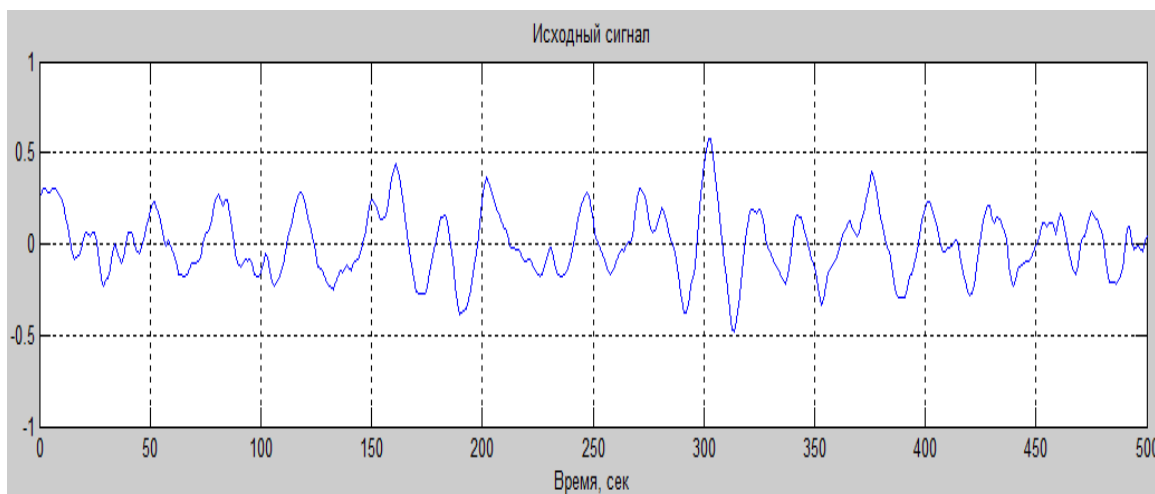


Рис. 2.3. Исходный сигнал без фильтрации

Оконные функции имеют исключительную важность в спектральном анализе сигналов. Окна характеризуются своей формой и амплитудно-частотной характеристикой. Высокий уровень амплитуды (называемый главным лепестком) характеризует полосу пропускания, низкий уровень амплитуды (называемый боковыми лепестками) характеризует полосу подавления. Между главным лепестком и боковыми лепестками существует переходная область. Чем она уже, тем лучше подавляются ненужные частоты сигнала, но, вместе с тем, увеличивается порядок фильтра, который также называют длительностью импульсной характеристики. Порядок фильтра определяет количество арифметических операций над отсчетами и объем сигнальной памяти при реализации фильтра. Чем длиннее будет импульсная характеристика, тем большая нагрузка будет ложиться на аппаратные ресурсы.

Тип сглаживающего окна влияет на процедуру предварительной фильтрации каждой выборки случайного процесса, позволяющей ослабить влияние шумов за счёт усреднения данных этой выборки на интервале, называемом шириной окна. Окно перемещается (скользит) по всей длине реализации, результат усреднения приписывается средней точке окна.

На рисунке 2.4. представлены прямоугольное и треугольное окна для относительной частоты  $\Omega$ . Первое из них более простое, но его АЧХ менее совершенна, т.к. порождает боковые гармоники, существенно искажающие спектр фильтрованного процесса в области средних и высоких частот. Частотная характеристика треугольного фильтра по этой причине более благоприятна, но имеет удвоенное значение кратной частоты для гармоник.

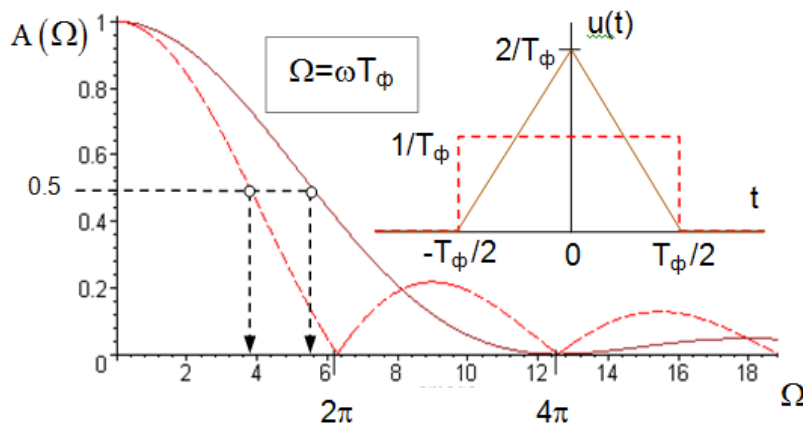


Рис. 2.4. Прямоугольное и треугольное сглаживающие окна и их АЧХ

Ширина окна определяется типом окна и желаемым эффектом фильтрации процесса на частотах, превышающих некоторый предел. В частности, на рисунке 2.4 показано решение, обеспечивающее ослабление сигнала не менее, чем в 2 раза:

- для прямоугольного окна  $\Omega_\phi = 3.8$  (рад),
- для треугольного окна  $\Omega_\phi = 5.6$  (рад).

Задаваясь реальной частотой  $\omega_\phi$ , соответствующей желаемому эффекту, оцениваем рекомендуемую ширину фильтра:

$$T_\phi = \Omega_\phi / \omega_\phi$$

Для примера зададимся частотой  $\omega_\phi = 0,5$ . Для сглаживания входного массива выбираем треугольный фильтр (Бартлетта).

$$T_\phi = \Omega_\phi / \omega_\phi = 5.6 / 0.5 = 11,2 \text{ (с)}.$$

Для прямоугольного фильтра:

$$T_\phi = \Omega_\phi / \omega_\phi = 3.8 / 0.5 = 7,6 \text{ (с)}.$$

Для настройки фильтра нужно знать его ширину, выраженную числом тактов расчёта процесса  $N_\phi$ :

$$N_\phi = \text{integer}(T_\phi / \Delta_0)$$

Округление делаем в пользу нечётного варианта, т.к. в этом случае результат фильтрации будет поставлен в соответствие строгому определению середины интервала. Получаем:

$N_\phi = 11$  для треугольного, рисунок 2.5.

$N_\phi = 7$  для прямоугольного фильтров, рисунок 2.6.



Рис. 2.5. Исходный сигнал после треугольного окна



Рис. 2.6. Исходный сигнал после прямоугольного окна

Наряду с задачей фильтрации скользящим окном здесь фактически имеет место ещё одна задача, проиллюстрированная на рисунке 2.7.

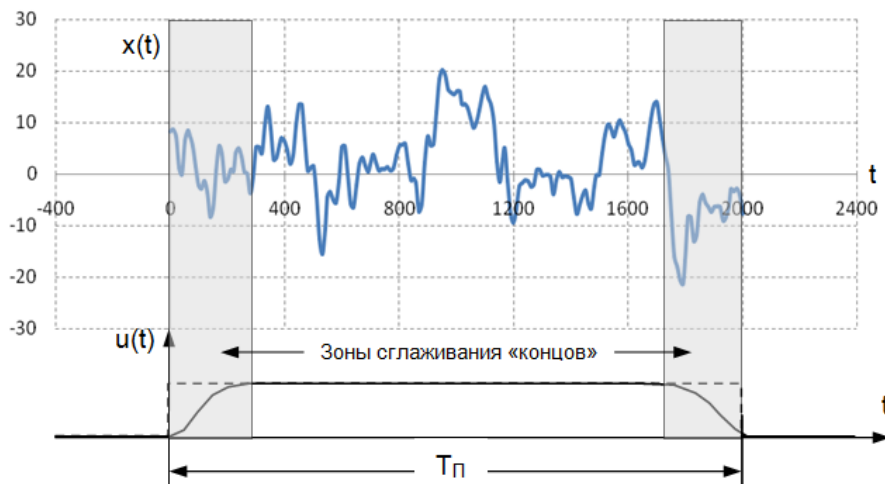


Рис. 2.7. Сущность задачи сглаживания границ процесса

Можно считать входной массив процесса  $x(t)$  фрагментом реального процесса, полученным с помощью фиксированного прямоугольного фильтра. Негативные свойства такого фильтра обсуждались ранее. Они проявляются главным образом в образовании боковых гармоник, существенно искажающих частотные свойства процесса. Базовая частота этой гармоники равная  $\omega_{\Phi} = 2\pi/T_{\Phi}$ , а также кратные ей частоты  $2\omega_{\Phi}$  и  $4\omega_{\Phi}$  накладываются на интересующую нас область низких и средних частот. Поэтому с целью ослабления этого эффекта применяется специальная процедура

сглаживания «хвостов» процесса, связанная с заменой прямоугольного окна на окно с косинусоидальными вставками по концам. Увеличение ширины зоны сглаживания, с одной стороны, снижает эффект гармоник, но с другой – сокращает объём полезной для идентификации информации. Примем ширину равной 20% от общей длины выборки (по 10% с каждого конца процесса).

Результатом работы на этой стадии является отфильтрованный массив данных входного процесса, представленный на рисунке 2.8.



Рис. 2.8. Исходный сигнал после процедуры сглаживания концов

После этого можно приступить непосредственно к вычислению спектральной плотности.

Фурье-анализ на сегодняшний день, без сомнения, самый распространенный инструмент анализа, который применяется во всех отраслях науки и техники. Рассмотрим выражение для дискретного преобразования Фурье:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) * \exp\left(-j * \frac{2 * \pi}{N} * n * k\right), \quad k = 0..N - 1;$$

Так как вычисление спектральной плотности требуется на каждом шаге работы адаптивной системы в реальном масштабе времени, а входной для БПФ массив данных изменяется на одно значение, можно оптимизировать работу, используя алгоритм рекуррентного преобразования Фурье, так как он является наиболее соответствующим высоким требованиям по быстродействию при вычислении комплексных коэффициентов Фурье или других спектральных параметров и позволяет получать оценку текущего спектра сигнала в реальном масштабе времени. Дискретное преобразование Фурье либо быстрое преобразование Фурье, наиболее распространенное при обработке сигналов, уступает ему.

Рекуррентное преобразование Фурье (РПФ) является методом цифрового динамического спектрального анализа, который позволяет получать оценку текущего спектра сигнала в реальном масштабе времени. Метод разрабатывался для нужд синтетической телефонии [73]. Известно также предложение использовать его в радиолокационных системах [74]. Основным достоинством РПФ по сравнению с другими методами этого семейства, является повышенное быстродействие при вычислении комплексных коэффициентов Фурье или других спектральных параметров. Однако отсутствие сведений о динамических погрешностях оценки текущего спектра сигнала существенно ограничивает применения метода в измерительных системах. Полученная в результате преобразования Фурье спектральная плотности представлена на рисунке 2.10.

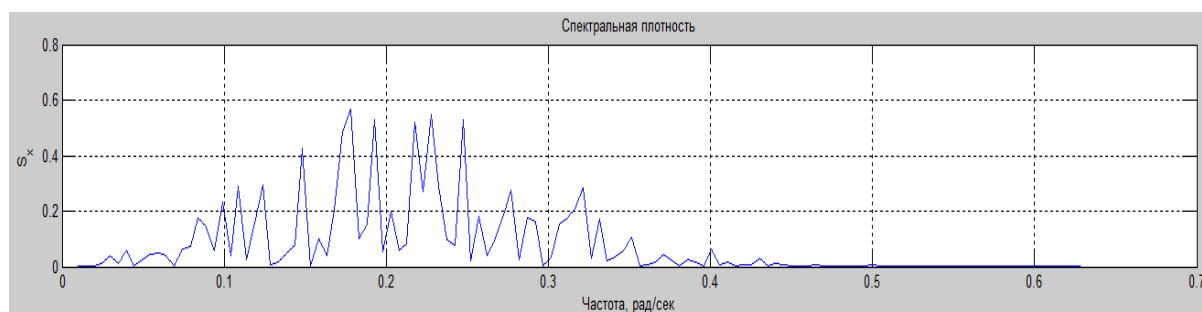


Рис. 2.10. Спектральная плотность входного сигнала

Для сглаживания полученной функции спектральной плотности существуют специальные оконные функции. В системе воспользуемся окном Ханна, являющимся разновидностью треугольного окна с жёстко фиксированной шириной, равной 5. Весовые коэффициенты фильтра Ханна равны 0, 0.25, 0.5, 0.25, 0. Фактически усреднение ведётся по трём точкам. Результат приписывается центральной точке скользящего окна. Отфильтрованная спектральная плотность входного сигнала приведена на рисунке 2.11.

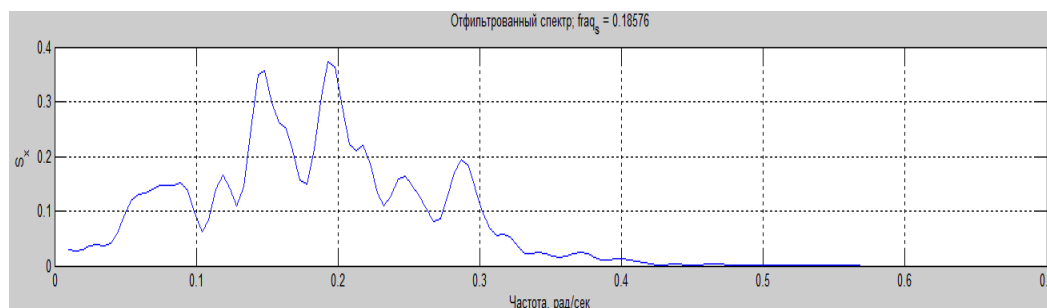


Рис. 2.11. Отфильтрованная спектральная плотность входного сигнала

Когда спектральная плотность процесса определена, необходимо вычислить среднюю частоту. Дискретная формула для расчета средней выглядит следующим образом:

$$\xi_i = \frac{x_{i-1} - x_i}{2}; \quad \omega_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i \Delta S_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_i}.$$

Определив значение средней частоты для примера приведенного на рисунках, в результате получаем значение равное 0,19 рад/с.

Работая таким образом, алгоритм вычисляет значение средней частоты на каждом шаге. По полученным значениям принимается решение об изменении постоянной времени координатного регулятора  $T_n$ . Так как средняя частота является величиной обратной по отношению к инерционности, то при увеличении её значения необходимо пропорционально уменьшить постоянную времени регулятора.

Как отмечалось выше, для корректной оценки величины изменения инерционности объекта свойства регулятора не должны влиять на эту оценку. Исключение влияния свойств регулятора достигается стабилизацией значения показателя, оценивающего запас устойчивости системы. Это реализуется при помощи коррекции коэффициента усиления регулятора  $k_p$ .

Для оценки запаса устойчивости построим корреляционную функцию процесса. Как и в случае с оценкой инерционности объекта перед непосредственно расчетом корреляционной функции необходимо выполнить сглаживание входного процесса оконными функциями. Корреляция (корреляционная зависимость) - статистическая взаимосвязь двух или нескольких случайных величин (либо величин, которые можно с некоторой допустимой степенью точности считать таковыми).

Как отмечается в работе [80], анализ данных о случайных процессах в промышленных системах управления позволяет представить модель случайного процесса в виде следующей структуры:

$$Z(t) = B(t) + \sum_{i=1}^n C_i(t) + X(t) + N(t).$$

Здесь  $B(t)$  - постоянная или медленно изменяющаяся непериодическая функция;  $C(t)$  - гармонические функции с фиксированными периодами;  $X(t)$  -случайный процесс с нулевым математическим ожиданием;  $N(t)$  - случайная помеха измерения.



Компонент  $B(t)$  обусловлен медленными, постепенными изменениями условий работы или характеристик технологического оборудования и свойств сырья, например, медленным изменением нагрузки агрегата по заданному графику, старением катализатора в химических реакторах, отложением солей на поверхностях нагрева теплообменников, медленным изменением зольности и влажности топлива.

Гармонические компоненты  $C(t)$  формируются в результате самых разнообразных периодических явлений и операций: суточной периодичности производственного процесса, периодических технологических циклов у потребителей продукции рассматриваемой системы управления, периодических переключений оборудования.

Случайный компонент  $X(t)$  формируется в результате одновременного действия множества независимых или слабо связанных друг с другом факторов, сравнимых по эффекту своего участия в образовании  $X(t)$ .

Помеха измерения  $N(t)$  представляет собой комбинацию различных случайных процессов, которые возникают в чувствительных элементах, в каналах связи, в измерительных устройствах и преобразователях. В большинстве случаев шум измерения можно считать Гауссовским случайным процессом, являющимся по отношению к измеряемому процессу белым шумом. Обычно стараются расчленить процесс на указанные компоненты и в отдельности изучить каждую из них.

Компонент  $B(t)$  может быть определен с помощью методов фильтрации. Вид этого компонента в большинстве случаев можно определить посредством изучения диаграмм, записанных в сжатом масштабе времени.

Для определения гармонических компонент  $C(t)$  можно применить один из известных методов выделения скрытых периодичностей, например, посредством корреляционных функций, взаимных корреляционных функций, инверсных корреляционных функций.

Помеха измерения  $N(t)$  может быть выделена одним из известных методов фильтрации [75].

Компонент  $X(t)$ , остающийся после выделения из  $Z(t)$  составляющих  $B(t)$ ,  $C(t)$ ,  $N(t)$ , представляет собой стационарный случайный процесс, характеристики которого могут быть определены методами статистики стационарных случайных процессов.

Естественно, не каждый случайный процесс содержит все перечисленные компоненты. Например, компонент  $B(t)$ , если он постоянный, можно считать равным

нулю в выходной координате астатической системы автоматической стабилизации, так как регулятор поддерживает регулируемую величину в среднем на заданном уровне. Большинство процессов не содержит и периодических компонентов. При планировании эксперимента по оценке статистических характеристик случайного процесса чаще всего определяющими являются свойства компонента  $X(t)$ , поэтому здесь в первую очередь рассматривается именно этот компонент. Анализ свойств физических фильтров, формирующих компонент  $X(t)$ , многочисленные проверки закона распределения  $X(t)$  на нормальность позволяют считать его распределение во многих случаях близким к нормальному [76].

Существует большое число методов вычисления корреляционных функций. В этой работе используются прямые методы, получившие наибольшее распространение [77, 78, 78].

Корреляционная функция  $R_x(\tau)$  стационарного эргодического случайного процесса  $X(t)$  с нулевым математическим ожиданием выглядит следующим образом:

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) * x(t + \tau) * dt,$$

где  $T$  - длина реализации;  $\tau$  - корреляционный сдвиг.

Аналогично определяется взаимная корреляционная функция  $R_{xy}(\tau)$  стационарных и стационарно связанных эргодических случайных процессов  $X(t)$  и  $Y(t)$  с нулевым математическим ожиданием:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) * y(t + \tau) * dt .$$

Эти корреляционные функции представляют собой неслучайные функции. На практике длина реализации  $T$  ограничена, поэтому вычисляемые корреляционные функции являются случайными функциями. Они называются оценками корреляционных функций и в этой работе имеют обозначение  $R_x^*(\tau, T)$ ,  $R_{xy}^*(\tau, T)$ .

Оценка корреляционной функции, вычисленная по экспериментальным данным, обычно представляет ряд дискретных отсчетов в фиксированных точках  $t_i$ . При этом оценка взаимной корреляционной функции может быть получена по непрерывно-шаговому или выборочно-шаговому алгоритмам, которые имеют вид:

$$R_{xy}^*(k\Delta\tau, T) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) * y(t + k\Delta\tau) * dt ;$$

$$R_{xy}^*(k\Delta\tau, N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t_a) * y(i\Delta t_b + k\Delta\tau) .$$

Для сглаживания полученной корреляционной функции можно использовать ранее описанные прямоугольное или треугольное окна, а также воспользоваться специальными корреляционными окнами – окном Тьюки или Парзена. В отличие от рассматривавшихся ранее скользящих окон все корреляционные окна фиксированы (рисунок 2.12, рисунок 2.13, таблица 2.1). Их ширина  $T_\Phi$  равна времени корреляции  $\tau_k$ , оцениваемому по  $R(\tau)$ . Оценка  $\tau_k$  производится в процессе расчёта корреляционной функции по правилу, характерному для оценки времени регулирования. В этой связи присутствие в перечне окон прямоугольного окна можно считать формальным, т.к. его применение не изменяет вид  $R(\tau)$ .

Для сглаживания корреляционных функций выбираем окно Тьюки, поскольку оно обладает незначительным просачиванием сигнала на гармониках и меньшей (нежели у окна Парзена) полосой пропускания. Для треугольного окна характерна близость к свойствам окна Тьюки, но просачивание более выражено.

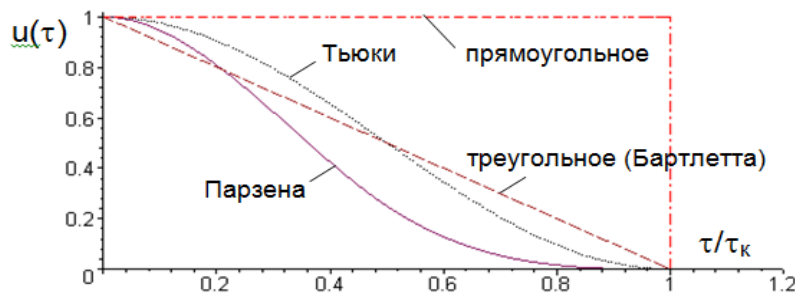


Рис. 2.12. Корреляционные окна

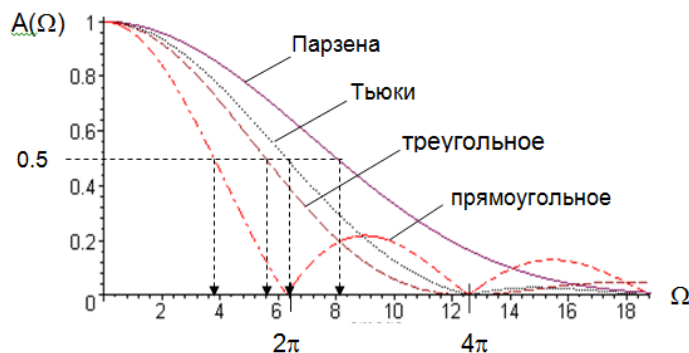


Рис. 2.13. Частотные характеристики корреляционных окон

Таблица 2.1. Сравнительные характеристики корреляционных окон

Уровень подавления	Относительная частота $\Omega = \omega_{\phi} \tau_k$ на уровне подавления			
	Прямоуг.	Бартлетта	Тьюки	Парзена
25 %	2,55	3,66	4,14	5,22
50 %	3,80	5,60	6,28	8,01
75 %	4,95	7,58	8,54	11,1
90 %	5,70	9,27	10,4	14,0
95 %	6,61	10,1	11,2	15,7

По вычисленной таким образом корреляционной функции найдем эквивалентную степень затухания  $\psi_3 = 1 - A_3/A_1$ , где  $A_3$  – амплитуда третьей полуволны, а  $A_1$  – первой. Вместо степени затухания может использоваться и другой показатель – эквивалентное перерегулирование, вычисляемый по формуле –  $\Pi = A_2/A_1 * 100\%$ .

Стабилизацию показателя, оценивающего запас устойчивости системы, реализуем с помощью коррекции коэффициента усиления регулятора  $k_p$ . В силу нелинейного характера зависимости структура системы параметрической подстройки реализована с замкнутым контуром. Когда значение эквивалентной степени затухания вычислено, оно поступает на вход параметрического регулятора. Регулятор, сравнив вычисленное значение степени затухания с заданным, изменяет значение параметра  $k_p$  основного (координатного) регулятора. В качестве закона регулирования был выбран ПИ-закон, как обеспечивающий наибольшее быстродействие и точность. Таким образом, в системе образовался ещё один контур – контур стабилизации эквивалентной степени затухания (рисунок 2.14.)

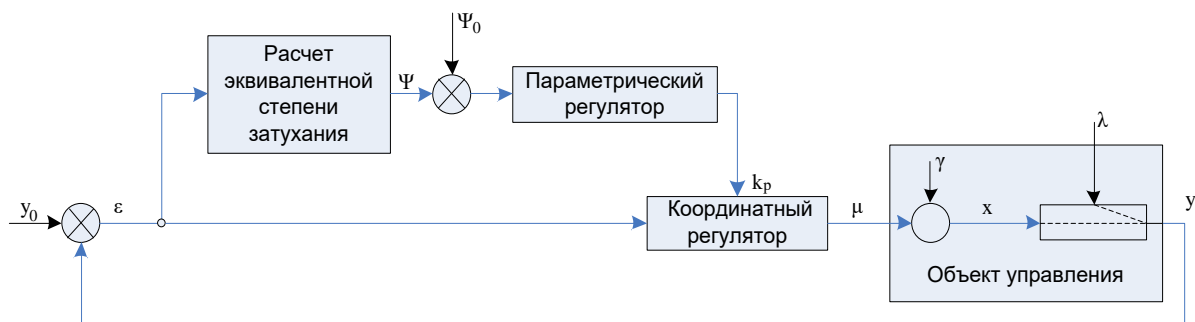


Рис. 2.14. Структура адаптивной системы с управлением параметром  $k_p$  регулятора

Исключение влияния контуров подстройки коэффициента усиления и постоянной времени регулятора достигаются за счет разделения по частотам работы этих контуров.

Ещё одна задача, которую необходимо решить в рамках разработки адаптивной системы управления, связана с включением в алгоритм функций оперативной

диагностики работоспособности параметрического контура системы управления. Это гарантирует защищённость системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре и способствует возможности применения алгоритма в переменных режимах работы оборудования.

Данный алгоритм должен анализировать некие показатели качества работы системы, не участвующие в расчете параметров настройки технологического регулятора, т.е. не зависящие от параметрического контура. На основании этого анализа необходимо делать выводы о текущем состоянии адаптивной системы и, в случае распознавания по ряду признаков аварийной ситуации, предпринимать действия для предотвращения её дальнейшего развития. Таким образом, система диагностики является некоторой надстройкой над адаптивным алгоритмом (рисунок 2.15.)

Можно предъявить следующие требования к алгоритму диагностики:

1. Слежение за работой параметрического контура, т.е. отслеживание некоторого показателя качества процесса.
2. Безударный переход к исходным настройкам системы.
3. Блокирование работы параметрического контура по внешней команде.

Реализация и выбор конкретных показателей, характеризующих работу комплекса, будут рассмотрены в третьей главе.

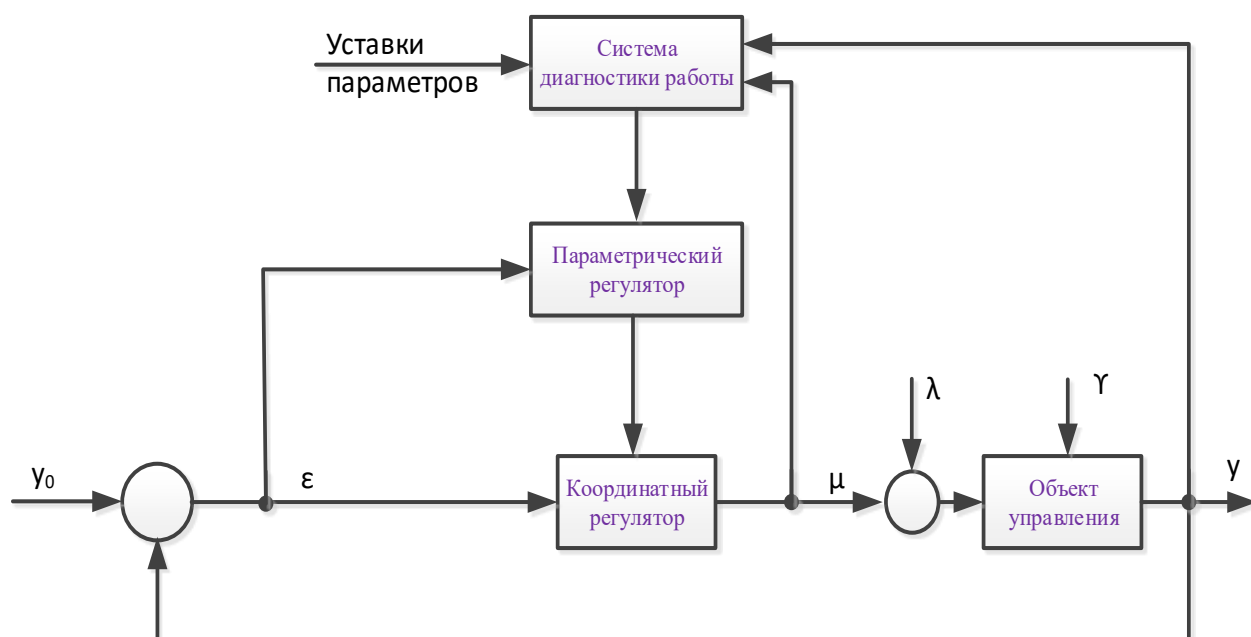


Рис. 2.15. Структурная схема подсистемы диагностики

## 2.4. Алгоритм работы адаптивной системы

Результирующая структура системы представлена рисунке 2.16.

Таким образом, результирующий алгоритм работы контура управления параметрами регулятора адаптивной системы будет выглядеть следующим образом.

Входными параметрами алгоритма являются выход объекта управления и задание технологическому регулятору. По ним вычисляется величина ошибки управления.

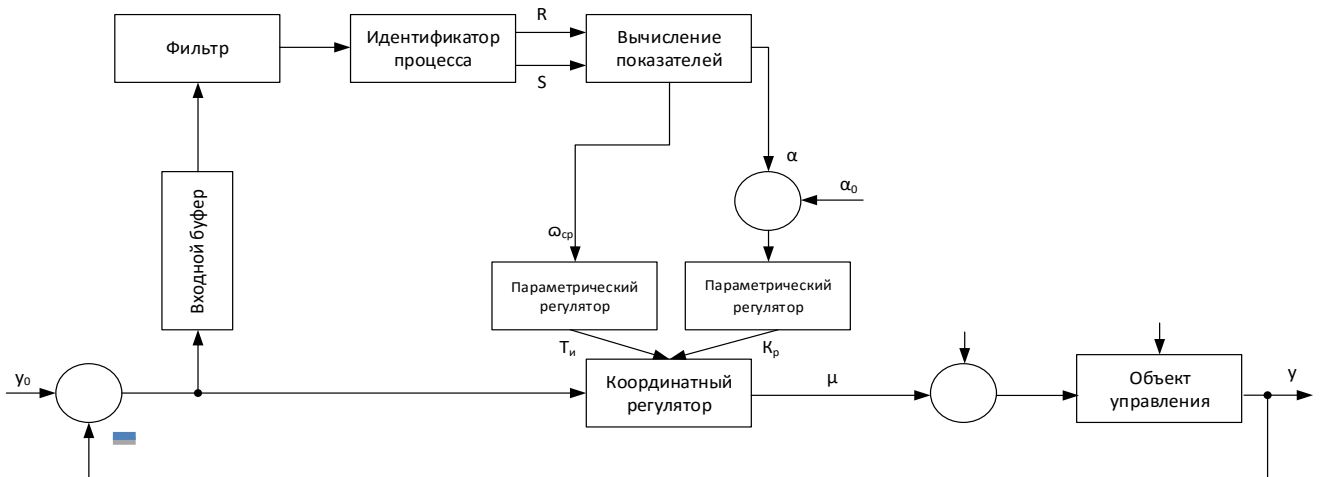


Рис. 2.16. Структура системы адаптивного управления

1. Добавление точки. На первом шаге своей работы алгоритм заполняет буфер входных данных. Работая в заданном наладчиком частотном диапазоне, система добавляет значения процесса ошибки управления в свой буфер данных с определенной периодичностью. Эта периодичность определяет верхнюю границу частотного диапазона и задается кратностью добавления точек времени выполнения. Размер буфера определяет нижнюю границу диапазона. Параметрами этого шага являются период цикла работы и размер массива данных.

Таким образом, первый этап представлен следующей последовательностью шагов:

- а. Вычисление величины ошибки управления.
- б. Вычисление прошедшего времени.
- с. Если значение времени кратно шагу, заданному пользователем, разрешить дальнейшие расчеты, иначе завершить работу.
- д. Увеличить массив исходных данных, добавив новое значение сигнала рассогласования.

- е. Если длина массива больше длины заданной пользователем, удалить самое старое значение и разрешить продолжение работы, иначе завершить работу.

2. Фильтрация. На втором этапе выполняется процедура сглаживания буфера. Переход ко второму этапу осуществляется только после заполнения буфера входных данных. Для получения необходимой информации о свойствах объекта из данных процесса должны быть исключены ненужные частоты. Это достигается процедурой фильтрации, которая выполняется при помощи скользящих окон. Параметром шага является частота фильтрации скользящим окном.

Таким образом, второй этап представлен следующей последовательностью шагов:

- а. Вычисление арифметического среднего массива исходных данных.
- б. Выбор коэффициента фильтра в зависимости от типа используемого фильтра (для прямоугольного  $\Omega_{\phi} = 3.8$ , для треугольного  $\Omega_{\phi} = 5.6$ ).
- с. Расчет ширины фильтра в соответствии с частотой фильтрации, заданной пользователем,  $T_{\phi} = \Omega_{\phi} / \omega_{\phi}$ .
- д. Сглаживание скользящим окном.

3. Сглаживание концов. Поскольку сам буфер является прямоугольным окном, ему присущи недостатки этого типа фильтра. Для их ослабления используется процедура "сглаживания концов". Параметром является значение ширины косинусоидальных вставок по бокам окна.

Таким образом, третий этап представлен следующей последовательностью шагов:

- а. Формирование косинусоидального окна в соответствии с шириной боковых вставок.
- б. Применение косинусоидального окна.

4. Вычисление спектральной плотности. На основании отфильтрованных данных вычисляется спектральная плотность. Для нахождения спектральной плотности используется один из вариантов преобразования Фурье. Для работы алгоритма на этом этапе уточняющие параметры не требуются.

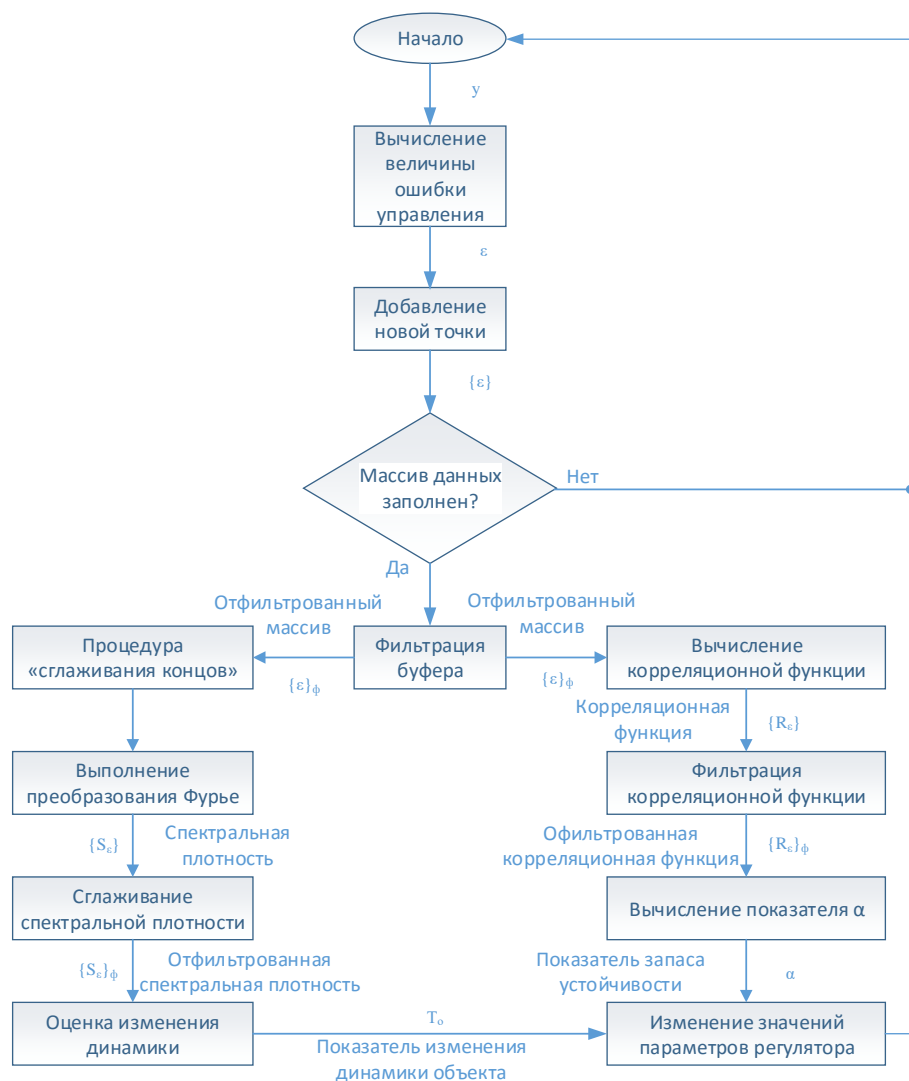


Рис. 2.17. Блок-схема алгоритма адаптивного управления

Четвертый этап предполагает выполнение следующих шагов:

использование какого-либо алгоритма преобразования Фурье (быстрое преобразование, рекуррентный алгоритм) на отфильтрованном и сглаженном массиве данных для получения спектральной плотности.

5. Сглаживание спектральной плотности. Перед началом следующих расчетов спектральная функция подвергается операции сглаживания для уменьшения колебательности итоговых показателей. Для сглаживания используется специальное окно фиксированной ширины. Для достижения лучшего результата сглаживание может быть выполнено несколько раз. Параметром шага задается количество «проходов» фильтром.

Таким образом, пятый этап представлен следующей последовательностью шагов:

- а. Сглаживание скользящим окном.
- б. Повторение предыдущего шага количество раз, заданное пользователем.



6. Оценка изменения динамики. Из спектральной плотности находится средняя частота процесса. По изменению значения этого показателя вычисляется необходимая величина изменения постоянной времени технологического регулятора.

Таким образом, шестой этап представлен следующей последовательностью шагов:

а. Вычисление средней частоты процесса  $\omega_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \zeta_i \Delta S_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_i}$ .

б. Вычисление изменения динамики объекта как величины обратной изменению средней частоты.

7. Вычисление корреляционной функции. На основании отфильтрованных данных вычисляется корреляционная функция. Параметром этого шага является величина сдвига автокорреляционной функции.

Седьмой этап включает в себя вычисление корреляционной функции:  
$$R_{xy}^*(k\Delta\tau, N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t_a) * y(i\Delta t_b + k\Delta\tau).$$

8. Фильтрация корреляционной функции. Фильтрация проводится для уменьшения колебательности итогового показателя, оценивающего запас устойчивости. Процедура выполняется при помощи специальных корреляционных окон. Все корреляционные окна фиксированы, так что дополнительные параметры на этом шаге не требуются.

Восьмой этап представлен таким образом:

сглаживание полученной корреляционной функции фиксированным окном Бартлетта.

9. Вычисление показателя  $\alpha$ . Для исключения влияния свойств регулятора вычисляется и стабилизируется значение показателя, оценивающего запас устойчивости, альфа.

Девятый этап включает в себя следующие действия:

вычисление показателя альфа как отношения второго экстремума к первому корреляционной функции.

10. Изменение параметров регулятора. Анализируя изменение средней частоты, алгоритм обратно пропорционально изменяет значение времени интегрирования технологического регулятора. Стабилизация показателя альфа реализуется с помощью

коррекции коэффициента усиления регулятора. В замкнутом контуре управления коэффициентом регулятора в качестве закона управления выбран ПИ-закон.

Таким образом, десятый этап представлен следующей последовательностью шагов:

а. Изменение времени интегрирования технологического регулятора на величину, вычисленную на шестом этапе.

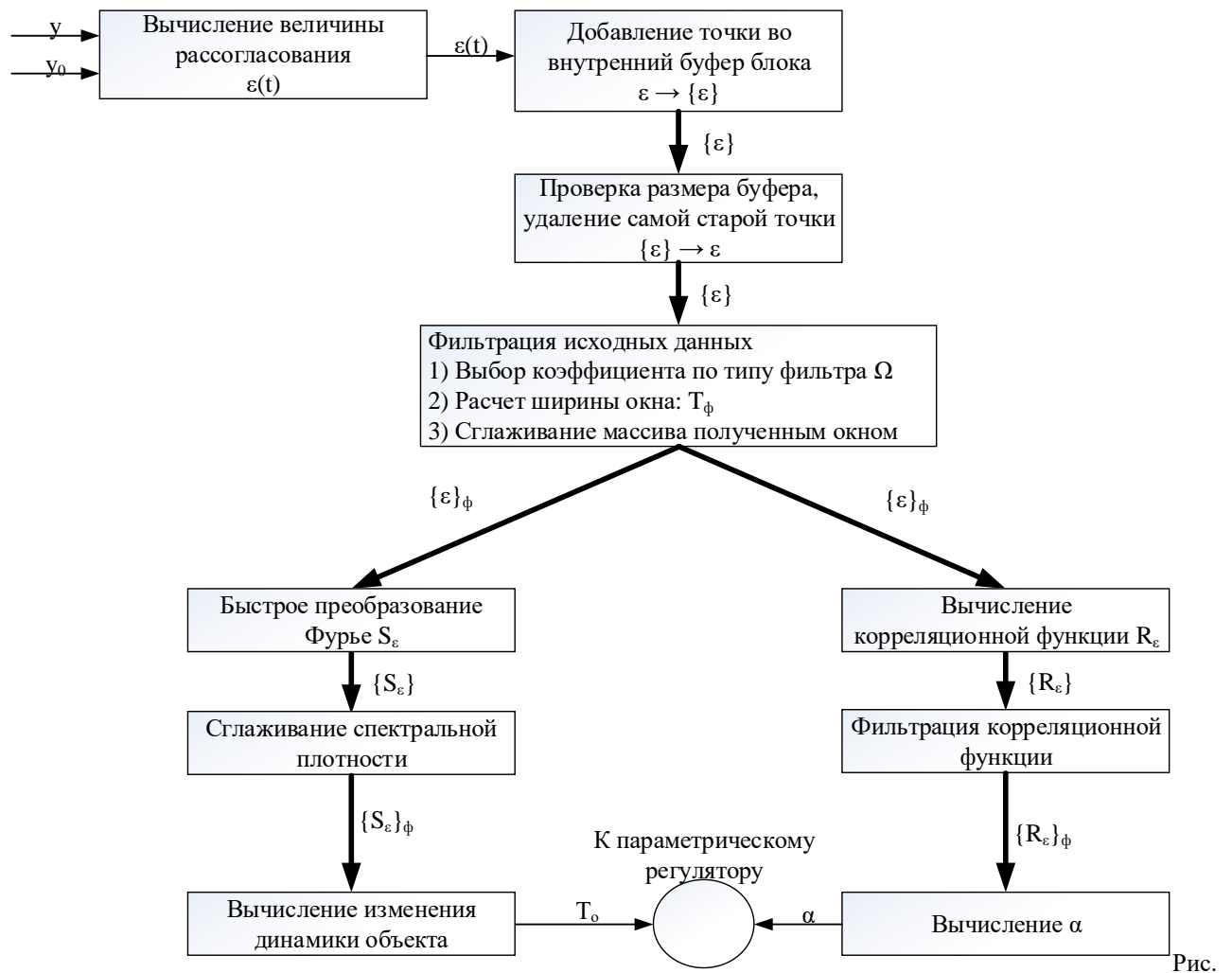
б. Изменение коэффициента усиления технологического регулятора путем воздействия на него параметрическим регулятором, работающим по отклонению текущего значения показателя альфа, вычисленному на девятом этапе, от заданного пользователем значения.

Представим полученный алгоритм в виде блок-схемы, рис. 2.18.

Перечень параметров алгоритма приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Перечень параметров алгоритма

№	Обозначение	Наименование параметра
1.	$y$	Выход объекта управления
2.	$y_0$	Задание технологическому регулятору
3.	$\epsilon$	Величина ошибки управления
4.	$\{\epsilon\}$	Массив, содержащий значения ошибки управления
5.	$\{\epsilon\}_\phi$	Массив, содержащий значения ошибки управления, прошедший процедуру фильтрации
6.	$\{S_\epsilon\}$	Спектральная плотность ошибки управления
7.	$\Omega$	Тип фильтра
8.	$T_\phi$	Ширина фильтра
9.	$\{S_\epsilon\}_\phi$	Спектральная плотность ошибки управления, прошедшая процедуру сглаживания
10.	$T_0$	Величина изменения динамики объекта управления
11.	$\{R_\epsilon\}$	Корреляционная функция
12.	$\{R_\epsilon\}_\phi$	Корреляционная функция, прошедшая процедуру сглаживания
13.	$\alpha$	Показатель, характеризующий запас устойчивости



2.18. Алгоритм адаптивного управления

## 2.5. Экспериментальные исследования работы системы

Исследования зависимости средней частоты от постоянной времени объекта проведем на виртуальном стенде, имеющем все необходимые имитационные возможности. Часть структуры стенда, связанная с задачей моделирования объекта управления с переменной динамикой, схематично представлена на рисунке 2.19.

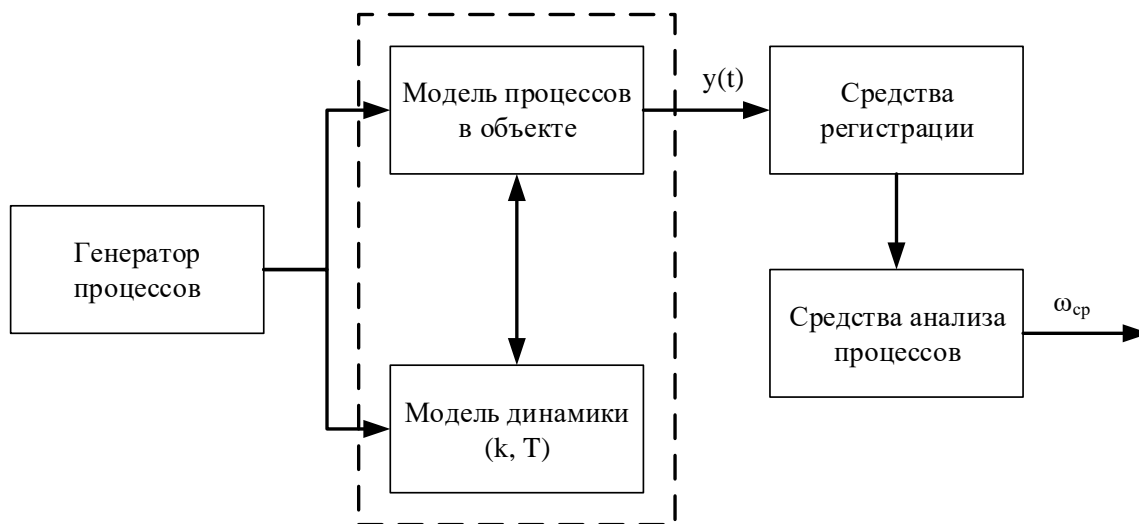


Рис. 2.19. Структура фрагмента стенда с моделью объекта

Тестовый случайный сигнал формируется генератором белого шума (с нормализацией процессов). Необходимые частотные свойства обеспечиваются формирующим фильтром. Объект управления смоделируем инерционным звеном второго порядка. Такой тип модели обладает важным для практики качеством – дифференцируемостью переходной функции.

Имитационный эксперимент был разбит на три последовательных этапа.

Задача первого этапа – проверка работоспособности и предварительная настройка online-алгоритмов обработки случайных процессов, обеспечивающих необходимую фильтрацию и оценку средней частоты случайного процесса  $\omega_{\text{ср}}$  в разомкнутой системе, представленной моделью объекта управления  $W_o(s)$ .

Значение постоянной времени объекта  $T$  в расчете носило относительный характер, согласующийся с частотными свойствами входного случайного процесса, и изменялось дискретно с шагом 1. На рисунке 2.20 функция  $\omega_{\text{ср}} = f(T)$  представлена как теоретическим (расчетным), так и экспериментальным вариантами.

Сравнение графиков позволяет сделать следующие выводы:

- использованные в эксперименте online-алгоритмы эффективны;
- в области малых значений  $T$  наблюдается некоторое завышение значения средней частоты, являющееся естественным следствием влияния обязательной процедуры сглаживания исходного процесса.

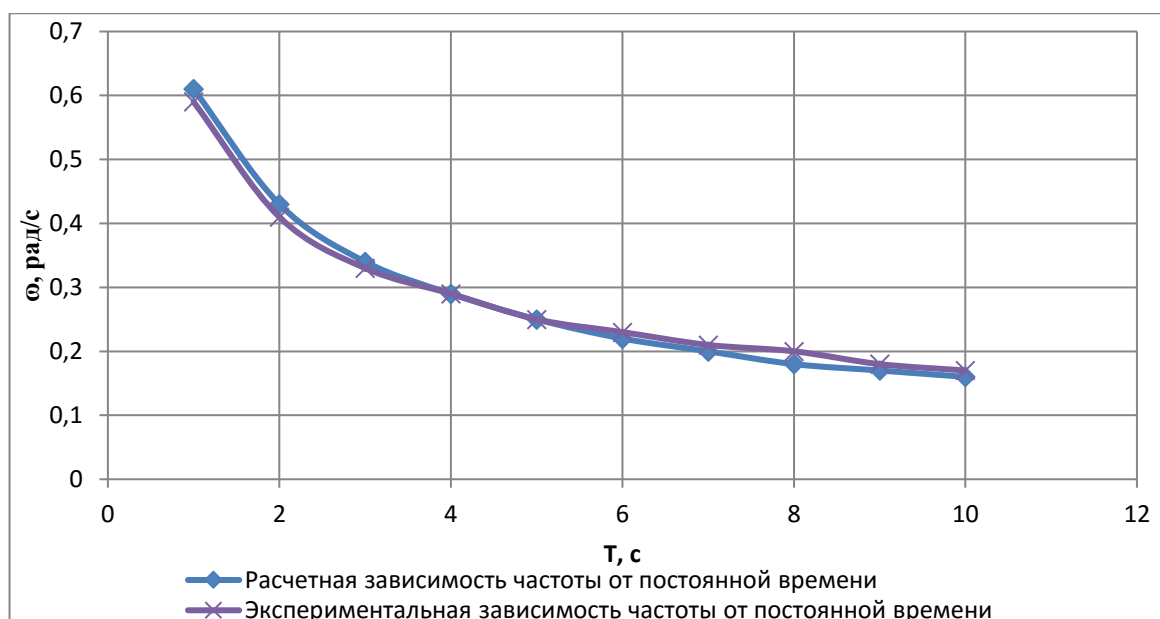


Рис. 2.20. Зависимость частоты от постоянной времени

Таким образом, полученные на первом этапе результаты подтвердили ожидаемый эффект и дали основания для перехода ко второму этапу – проверке возможности применения алгоритмов оценки  $\omega_{\text{ср}}$  в замкнутой системе управления. Определенное опасение было связано с наличием в замкнутой АСР резонансной частоты, оказывающей существенное влияние на процесс фильтрации случайных процессов. С другой стороны, именно доступ к оценке этой частоты и является главной особенностью предлагаемого подхода, так как регулятор в астатической системе практически полностью подавляет процессы на низких частотах, а объект – на высоких. В ходе имитационных экспериментов с замкнутой системой с ПИ-регулятором была получена зависимость  $\omega_{\text{ср}}$  от  $T$ , представленная на рис. 2.21.

Анализ полученной зависимости подтверждает факт ожидавшейся связанности свойств ошибки управления со свойствами объекта. Однако при этом проявились и некоторые особенности, связанные со спецификой алгоритмов оценки значения  $\omega_{\text{ср}}$ . В частности, обращает на себя внимание начальная область этой функции, отличающаяся неустойчивым характером связи с параметром инерционности  $T$ .

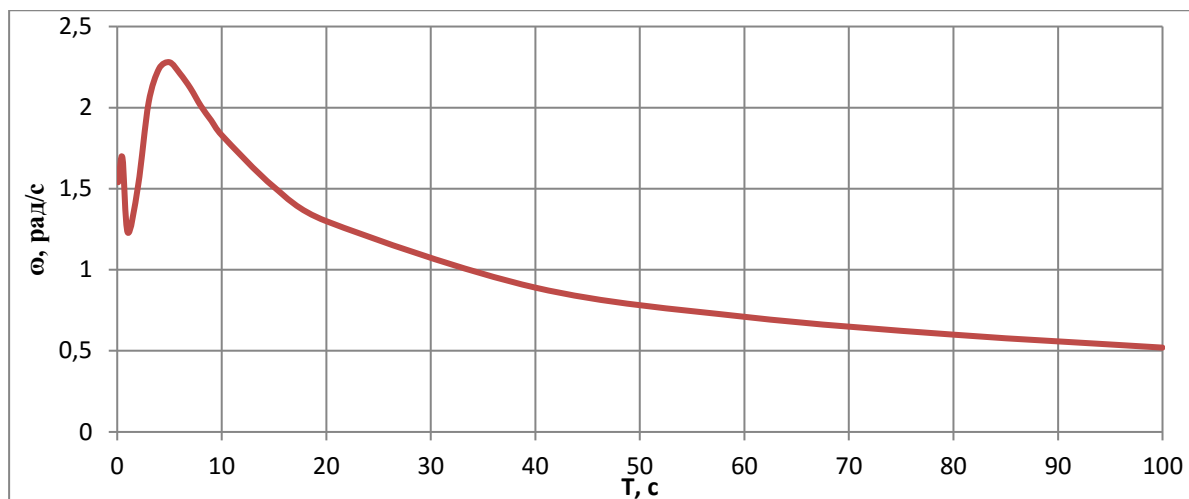


Рис. 2.21. Зависимость частоты системы от постоянной времени объекта

Это можно объяснить соизмеримостью длины интервала, определяющего массив значений обрабатываемой части сигнала ошибки управления  $\varepsilon(t)$ , с периодом, соответствующим резонансной частоте системы. Это обстоятельство должно быть принято во внимание в процессе настройки системы, требующей естественного разделения частот основного и параметрического контуров.

В ходе третьего этапа значение постоянной времени  $T$  было непостоянным, а изменялось по синусоидальному закону:

$$T(t) = T_0 + A_T \sin(\omega_T t).$$

Это вызывало естественные изменения в значении резонансной частоты системы, оцениваемой через среднюю частоту сигнала по ошибке управления. Пример, иллюстрирующий возможность оперативного наблюдения постоянной времени объекта  $T(t)$  по результатам расчета средней частоты  $\omega_{cp}(t)$  процесса  $\varepsilon(t)$ , представлен на рис. 2.22. Для удобства анализа обе функции были приведены к относительному виду:

$$\frac{T(t)}{T_0} = 1 + \frac{A_T}{T_0} \sin(\omega_T t).$$

Анализ графиков (рис. 2.22) показывает, что при изменении постоянной времени объекта по синусоиде величина, обратная средней частоте, также пропорционально изменяется по синусоиде, но с запаздыванием, объясняющимся необходимостью предварительной буферизации массива исходных данных.

Увеличение размера буфера, с одной стороны, повышает точность оценки средней частоты (с увеличением достоверность возрастает), а с другой - вызывает задержку во времени. Возникает необходимость компромисса между точностью и запаздыванием расчета. Однако специфика теплоэнергетических объектов такова, что

изменения в самом объекте, связанные с изменением его постоянной времени, достаточно инерционны. Это позволяет считать несущественным эффект смещения во времени расчетного показателя процесса.

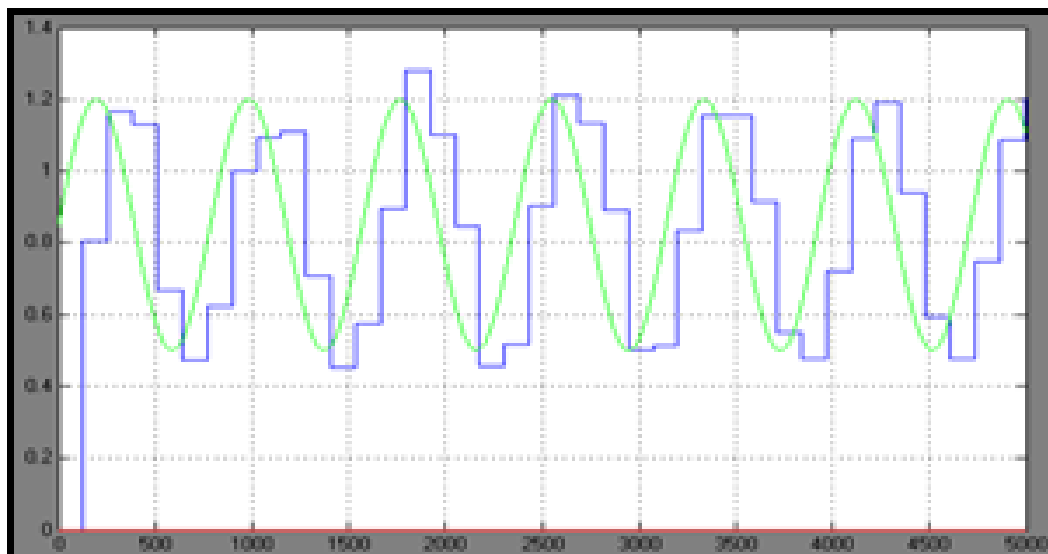


Рис. 2.22. Зависимость средней частоты и постоянной времени объекта от времени

На основании результатов предварительных исследований был реализован блок подстройки параметров регулятора, отслеживающий отклонения средней частоты от своего базового значения (соответствующего начальному этапу работы системы) и приводящий ему в соответствие значение постоянной интегрирования  $T_{\text{и}}$  регулятора.

Известно, что нарушение баланса между  $T$  и  $T_{\text{и}}$  может привести к изменению запаса устойчивости системы. Поэтому для оценки эффективности адаптации было решено использовать традиционный показатель – степень затухания процессов  $\psi$ . Специфика оценки заключалась в том, что анализу подвергались не детерминированные, а случайные процессы. Поэтому для оценки  $\psi$  было решено использовать особенности корреляционной функции ошибки управления.

В ходе эксперимента изменялась постоянная времени объекта  $T_o$ , наблюдалась эквивалентная степень затухания  $\psi$ . Результаты эксперимента представлены на рис. 2.23. Анализ графиков (рис. 2.23) показывает, что при увеличении постоянной времени объекта в системе без параметрической подстройки степень затухания процесса (запас устойчивости) существенно уменьшается (практически приводит к потере устойчивости), а в системе с подстройкой, благодаря параметрическому контуру, требуемая степень затухания сохраняется. Это подтверждает ожидаемый эффект предлагаемого способа коррекции и открывает возможность его промышленной апробации.

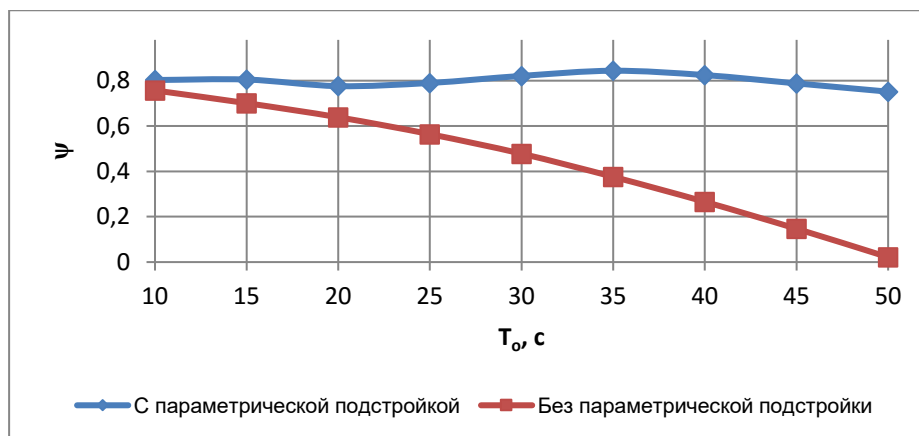


Рис. 2.23. Зависимость степени затухания от постоянной времени объекта.

Структура системы в программе MATLAB представлена на рисунке 2.20. Окно настроек блока представлено на рисунке 2.24.

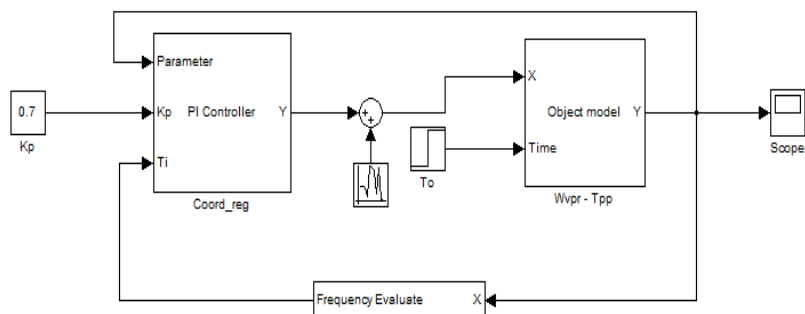


Рис. 2.24. Структура системы в программе MATLAB

На вход блока подстройки подается ошибка управления  $\varepsilon$ . В блоке могут изменяться следующие параметры:

1. Step – шаг по времени сохранения значений входного сигнала во внутреннем массиве для их последующей обработки.
2. Buffer length – длина внутреннего массива. Эти два параметра определяют область рассматриваемых частот.
3. Filter type – выбор прямоугольного или треугольного скользящего окна.
4. Filtered frequency – фильтруемая частота. Исходя из значения этого параметра, рассчитывается ширина скользящего окна.
5. Hann width – ширина зоны сглаживания косинусоидальным окном для подавления боковых гармоник.
6. Use fft filter – подключение спектрального фильтра.
7. Fft filter ratio – количество проходов фильтром по спектральной плотности для достижения лучшего результата.



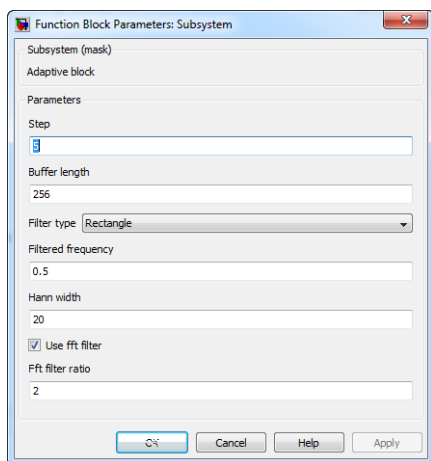


Рис. 2.25. Зависимость степени затухания от постоянной времени объекта

Таким образом, были получены следующие выводы:

5. Технологически обоснованы критерии, характеризующие статические и динамические свойства объекта.
6. Найдены показатели, характеризующие эти критерии, и математически обоснована их связь с ними.
7. Выведены формулы расчета найденных показателей по оперативному сигналу ошибки управления.
8. На действующей модели проведены исследования подтвердившие справедливость выдвигаемых положений.
9. Основные положения главы отражены в публикации [1] в издании по списку ВАК.

Можно обозначить следующие задачи исследования:

1. Выполнить анализ структуры ПТК, для выявления наиболее оптимального, с точки зрения внедрения адаптивной системы, уровня.
2. Предложить алгоритм работы подсистемы диагностики функционирования основной системы.
3. Протестировать работу системы на тренажере реальной системы управления.

### **3. РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ПТК**

#### **3.1. Постановка задачи**

Рассмотрим реализацию предложенных в предыдущей главе принципов адаптации на базе ПТК. В связи с распределенным характером структуры АСУ ТП реализация предложенной адаптивной системы возможна на различных уровнях ПТК. Для выбора конкретного уровня необходимо рассмотреть типовую структуру ПТК, а также проанализировать плюсы и минусы каждого из возможных вариантов. Определившись с уровнем, можно предложить реализацию алгоритма функционирования системы, представленного в предыдущей главе, в разделе 2.3, с учетом специфики сделанного выбора. При этом становится возможным сделать и выбор конкретного ПТК, удовлетворяющего аппаратным и программным требованиям алгоритма. Кроме алгоритма, отвечающего за адаптацию, необходимо также спроектировать подсистему оперативной диагностики работоспособности параметрического контура системы управления, требования к которой были определены во второй главе. Данная подсистема необходима для предупреждения развития различных аварийных ситуаций, способных возникнуть в процессе работы, за счет ряда контрмер, специфичных для каждой такой ситуации. Подсистема диагностики также выдвигает ряд требований к аппаратной и программной базе ПТК. Результатом данной главы является протестированный на тренажере комплекс, способный осуществлять адаптивное управление технологическим процессом и диагностику собственной работы.

#### **3.2. Анализ структуры ПТК**

Программно-технический комплекс предназначен для непрерывного измерения и контроля параметров (давления, температуры, расхода, уровня, параметров вибрации, силы и напряжения постоянного и переменного тока и др.) при управлении технологическими процессами.

ПТК используется в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП), в диспетчерских системах, системах телемеханики, системах технического учёта энергоресурсов и т.д., производящих измерение, оперативный контроль технологических параметров, управление технологическим оборудованием, автоматическое управление и регулирование технологических процессов, выполнение

противоаварийных защит и блокировок технологических процессов, архивирование значений параметров и событий.

Структура большинства ПТК представлена следующими компонентами:

- Рабочие станции
- Контроллеры

Рабочие станции представляют собой персональные компьютеры с системным блоком промышленного исполнения, источником бесперебойного питания (ИБП) и периферийным оборудованием для ввода/вывода информации. В целом предназначены для конфигурирования элементов ПТК, обработки и хранения данных, обеспечения интерфейса «человек-машина».

Наиболее часто используемым контроллером в ПТК «ТЕКОН» является контроллер МФК1500. Контроллер может использоваться как в системах автономного управления, так и в составе распределенных АСУ ТП.

Алгоритм функционирования адаптивной системы, представленный во второй главе, выдвигает ряд требований к аппаратной платформе своей реализации. В первую очередь эти требования касаются объема оперативной памяти и скорости центрального процессора, но, как было показано выше, ПТК «Текон» предоставляет и объем памяти (32 МБ) и процессор (500 МГц), характеристик которых достаточно для реализации предлагаемых алгоритмов. Кроме самих контроллеров в ПТК «Текон» располагает различными типами рабочих станций, что увеличивает сферу возможных вариантов реализации рассматриваемой адаптивной системы. Таким образом, рассмотренный выше ПТК «Текон» подходит для реализации адаптивного алгоритма, так как имеет как развитую архитектуру, позволяющую внедрить разрабатываемую систему на различных уровнях, так и мощную аппаратную базу, чей потенциал достаточен для обеспечения работы блока подстройки.

### **3.3. Программные средства ПТК и информационные потоки**

Для принятия решения о целесообразности того или иного выбора места внедрения адаптивной системы в структуре ПТК необходимо также, кроме самой структуры комплекса, рассмотреть и программное обеспечение, на базе которого будут выполняться разрабатываемые алгоритмы, в том числе и информационные потоки между его компонентами. Типовая структура ПТК «Текон» изображена на рисунке 3.2.

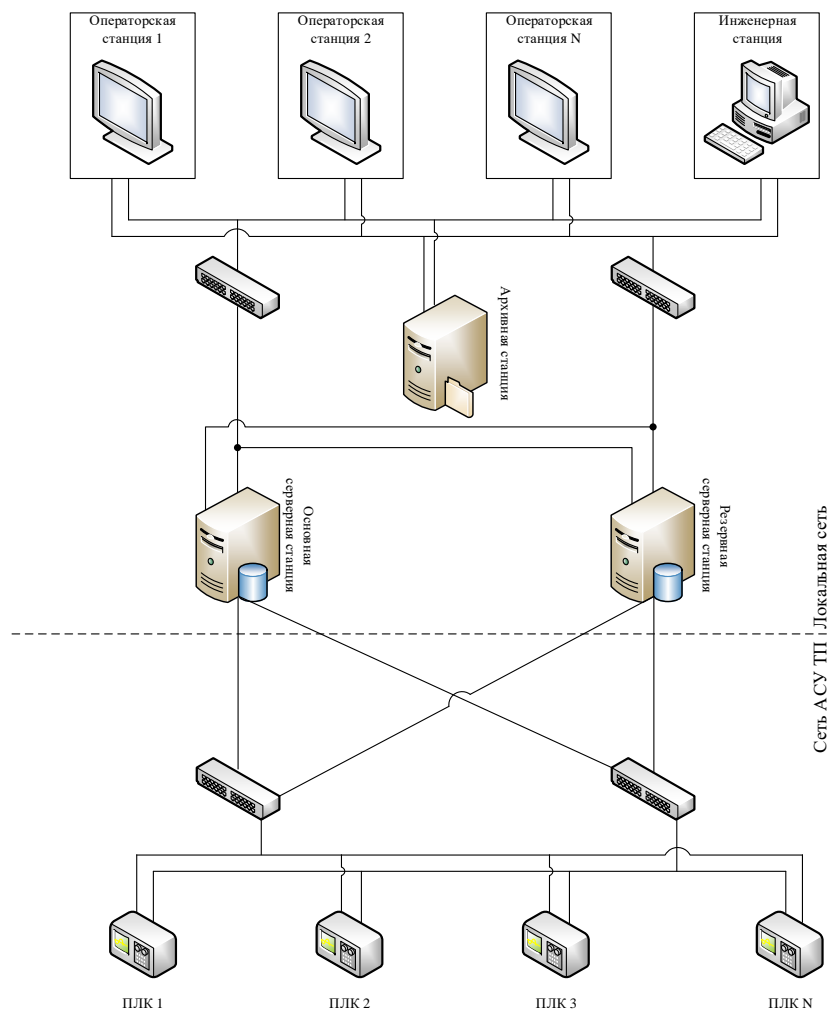


Рис. 3.2. Типовая структура ПТК «Текон»

### 3.3.1. Системное программное обеспечение

К системному относится ПО, определяющее функционал аппаратной части устройств ПТК: операционные системы, драйверы, библиотеки и т.п. Разработчиком СПО предусматривается пользовательский интерфейс, позволяющий конфигурировать его для конкретных целей.

Системное ПО в комплексе «Текон» представлено различными сервисами, функционирующими на базе операционной системы Linux. К этим сервисам относятся следующие службы и программы:

Виртуальная машина ISA Graf – программа, отвечающая за выполнение технологических программ. Именно на базе этого сервиса могут быть реализованы алгоритмы адаптивной системы.

Сервисы хранимых и инициативных переменных, сервис, отвечающий за опрос и запись модулей ввода/вывода, сервис связи с верхним уровнем ПТК и т.д. – системные службы, необходимые для корректной работы ПТК.

Следует отметить, что виртуальная машина не единственный возможный вариант внедрения проектируемых алгоритмов. Данный вариант предполагает разработку «функционального блока» и включение его в библиотеку контроллера. В дальнейшем пользователь сможет добавлять в технологическую программу блок адаптивного регулятора, наряду с другими блоками системы управления.

Ещё одним вариантом внедрения может быть разработка дополнительного сервиса. В этом случае адаптивные свойства приобретает не технологическая программа, а весь контроллер. Настройка такого сервиса, т.е. «привязка» его к конкретным переменным технологических программ, может осуществляться через соответствующим образом доработанный пользовательский интерфейс контроллера (в случае ПТК «Текон» это будет Web-интерфейс, предоставляющий доступ к настройкам всех сервисов контроллера).

### **3.3.2. Прикладное программное обеспечение**

Верхний уровень, в ПТК «Текон» представлен человеко-машинным интерфейсом (операторским интерфейсом), позволяющим просматривать текущую информацию о состоянии технологического процесса и системы в целом, а также формировать управляющие воздействия. Человеко-машинный интерфейс — инструмент, который представляет данные о ходе процесса человеку-оператору, что позволяет оператору контролировать процесс и управлять им. Операторские станции подключаются к локальной сети.

Также к локальной сети подключается сервер данных и архивная станция. Сервер данных выполняет связующую роль между компонентами верхнего и нижнего уровня системы. Обмен данными между операторским интерфейсом и сервером с архивной станцией чаще всего осуществляется через SDK сервера — библиотеку, обеспечивающую доступ к данным.

Для повышения надежности и обеспечения бесперебойности работы SCADA-системы сервер может быть установлен на двух станциях, которые объединяются в резервный комплекс. При этом у каждой станции, на которой выполняется компонент "Шлюз", как правило, резервируются и сетевые интерфейсы.

На базе сервера ПТК «ТЕКОН» может также функционировать т.н. «расчетное ядро» ICORE, осуществляющее выполнение технологических программ. ICORE —

программное ядро выполнения технологических программ. Ядро выполняется в составе сервера SCADA системы ТЕКОН. Данный компонент на «верхнем» уровне SCADA системы совмещает в себе функции расчета и обмена данными между различными источниками данных. Процесс конфигурирования программного ядра осуществляется с использованием тех же компонентов, что и конфигурирования контроллеров. Основным отличием от контроллера является возможность использования любых переменных, доступных в сервере, на котором исполняется ICore.

Из выше сказанного можно сделать вывод о том, что программное обеспечение ПТК «Текон» позволяет разрабатывать достаточно гибкие схемы управления технологическим процессом. При этом разные части таких систем могут выполняться на разных уровнях комплекса. К примеру, ответственная часть системы может выполняться на базе системного программного обеспечения (на контроллере), а часть на рабочей станции сервера, предоставляющей более богатые вычислительные возможности. Таким образом, программное обеспечение комплекса не накладывает существенных ограничений на реализацию адаптивного алгоритма. Плюсы и минусы различных вариантов рассматриваются далее в главе.

### **3.4. Варианты архитектуры системы**

Проанализировав структуру ПТК и рассмотрев его программное обеспечение на примере комплекса «ТЕКОН», перейдем к рассмотрению возможных вариантов распределения адаптивной системы на сетевых ресурсах.

Адаптивную систему можно условно разделить на следующие компоненты:

- а. технологический регулятор;
- б. параметрический регулятор;
- в. идентификатор;
- г. буфер, накапливающий данные для идентификатора;
- д. система диагностики.

Вполне очевидно, что технологический регулятор должен выполняться на контроллерном уровне сетевой структуры ПТК, так он требует наибольшей надежности и скорости обмена с модулями ввода и вывода контроллера. Остальные компоненты системы могут работать на различных сетевых ресурсах, в зависимости от своего предназначения и предъявляемых аппаратных требований.

Параметрический регулятор на основании показателей, вычисленных идентификатором, управляет параметрами настройки основного регулятора. Параметрический регулятор является наименее требовательным к аппаратным ресурсам. Данный компонент может одинаково хорошо функционировать на любом сетевом уровне ПТК.

Идентификатор выполняет обработку входного массива данных и вычисляет спектральную и корреляционную функции, на основании которых определяются характеризующие текущее состояние объекта показатели, а именно изменение динамики и запас устойчивости. Так как система управляет двумя параметрами координатного регулятора, идентификатор вычисляет две функции. Таким образом, основная нагрузка при работе идентификатора приходится на центральный процессор, выполняющий преобразования, и оперативную память, хранящую весь объем данных, накопленный буфером. Буфер, накапливающий данные для идентификатора, работает в основном с оперативной памятью. Так как объем данных может достигать значительных объемов, для эффективной работы буфера необходим достаточно большой объем памяти, что затрудняет использование технологического контроллера для реализации алгоритмов работы с массивами.

Также следует отметить, что в соответствии со схемой алгоритма, представленной в главе 2, идентификатор и буфер обмениваются между собой массивами данных. В связи с этим размещать эти компоненты желательно на одном сетевом аппаратном ресурсе, а обмен данными между ними осуществлять через разделяемую память для снижения нагрузки на сеть.

Первым рассмотрим вариант размещения буфера и идентификатора на уровне рабочих станций. Параметрический регулятор, как отмечалось выше, может функционировать и на базе контроллера и на базе рабочей станции. При данном подходе используется дополнительное программное обеспечение, реализующее необходимые функции адаптивной системы. Дополнительное программное обеспечение устанавливается на одну из рабочих станций, например на инженерную станцию. Достоинствами такого решения является большая вычислительная мощность, предоставляемая персональным компьютером по сравнению с контроллером, а также большие объемы доступной памяти. К недостаткам можно отнести малую надежность из-за отсутствия резервирования и слабую интеграцию с остальной частью ПТК.

Вторым вариантом является реализация компонентов адаптивной системы на уровне станции серверов. В этом случае компоненты адаптивной системы реализуются на базе расчетного ядра шлюза ICore, аналогичного ядру контроллера. При таком подходе программная реализация системы управления с адаптивной системой такая же, как и для ядра контроллера. Преимуществом является более высокая производительность ПК по сравнению с контроллером и более высокая надежность по сравнению с реализацией системы на базе инженерной станции, благодаря резервированию станций сервера.

Наконец, выполнение алгоритмов адаптивной системы может быть реализовано непосредственно в контроллере. Это возможно в случае достаточно простой системы автоматического регулирования, если число технологических регуляторов невелико. При таком подходе дополнительные персональные компьютеры для работы системы не требуются, однако они по-прежнему нужны для рабочих станций, являющихся частью ПТК.

Помимо перечисленных преимуществ первых двух подходов следует отметить и возможность подключения адаптивной системы «на горячую» к работающей АСУ, без необходимости перекомпилировать технологические программы и перезапускать контроллеры, в случае если все компоненты адаптивной системы реализуются на рабочих или серверных станциях.

Также следует иметь в виду, что для нормального функционирования системы необходима достаточно мощная аппаратная база. В первую очередь это относится к вычислительной мощности и объему памяти, предоставляемому системой. Современные персональные компьютеры, которые используются в качестве автоматизированных рабочих мест оператора или станций шлюза, обладают необходимой производительностью и объемом памяти. Таким образом, станция шлюза является наиболее подходящей для реализации параметрического контура данной адаптивной системы. Тем не менее, многие современные контроллеры АСУ ТП также могут использоваться для выполнения алгоритмов системы. В качестве примера можно привести промышленный многофункциональный контроллер фирмы «ТЕКОН» МФК 1500.

Для окончательного выбора конкретного уровня был выполнен вычислительный эксперимент, учитывающий коммуникационные нагрузки и операционную



загруженность процессоров в условиях использования МФК «Текон». Целью данных испытаний было выяснить степень нагрузки на память и центральный процессор, налагаемых параметрическим контуром. Как было сказано выше, при работе алгоритмов блока идет интенсивная работа с памятью, связанная с обработкой массивов, и центральным процессором, связанная с выделением характерных особенностей из исходных данных.

Смоделировав работу системы на базе контроллера «ТЕКОН» МФК 1500, были получены результаты, отраженные в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты нагрузочного эксперимента

Наименование параметра	МФК 1500 без тех. программы	МФК 1500 с тех. программой	Расчетное ядро ICore
Время цикла работы тех. программы	25 мс	84 мс	12 мс
Максимальное время цикла	28 мс	89 мс	15 мс
Необходимый размер памяти для блока адаптивной настройки	17 кВ – при настройках входных массивов 512 и 300 точек для расчета спектральной плотности и корреляционной функции соответственно		

Технологическая программа контроллера, использовавшегося в эксперименте, (АСР котла к.А, АСР котла к.Б) 4 блока Троицкой ТЭЦ, содержит 63 регулятора (импульсных и аналоговых). Блоки импульсного регулятора, которых в проекте большинство, подробно описаны далее в этой главе. В каждом типе регулятора, помимо собственно закона управления, реализованы различные механизмы, оперирующие как памятью, так и процессором. К этим механизмам можно отнести динамические и статические балансировки, формирование различных признаков и статуса, механизмы управления с использованием операторского интерфейса и т.д. Размер одного импульсного регулятора составляет 283 байта. Умножив количество контроллеров на размер каждого, определим примерный размер технологической программы:  $283 * 63 = 17829 \approx 18 \text{ кВ}$ .

При реализации алгоритма управления параметрами координатного регулятора на базе станции сервера также встает задача выбора шага по времени обмена данными с контроллером, на котором выполняется технологическая программа. Данные из контроллера вычитываются с определенной периодичностью. Цикл обмена данными

представляет собой последовательное вычитывание значений переменных контроллера и запись этих значений в кэш-память станции сервера, после чего они становятся доступны для клиентов сервера, в том числе и для блока управления параметрами регулятора. Время цикла обмена, ограничено снизу временем цикла технологической программы. Сверху время обмена данными ограничено таймаутом достоверности, по истечении которого значениям переменных выставляется признак недостоверности. Значение выбранного шага по времени имеет большую важность для корректной работы адаптивной системы, так как налагает ограничения на частотный диапазон, в котором работает алгоритм, и должно выбираться в соответствии с этим диапазоном. Проведенные испытания показали, что для технологической программы Троицкого энергоблока минимальное время опроса составляет 50 мс.

Таблица 3.3. Результаты нагрузочного эксперимента

Номер	TimeOut получения данных	Время паузы опроса контроллера	Кол-во объектов	Кол-во переменных	%CPU	Максимальное время вычитывания
1	20000	50	290	3720	37	65
2	20000	50	314	4239	40	764
3	10000	50	1751	10356	45	682
4	10000	50	329	4124	19	60
5	10000	50	405	4813	25	682
6	10000	50	578	10900	10	138
7	10000	50	229	4281	5	57,5
8	10000	50	749	8567	18	504
9	10000	50	639	8420	13	179
10	10000	50	245	4585	5	60
11	10000	50	456	8292	5	60

В таблице 3.3 приведены результаты измерений времени вычитывания данных из различных контроллеров. Часть контроллеров реализует задачи управления, часть – задачи технологических защит, а оставшиеся используются для сбора данных. Столбец «Время паузы опроса контроллера» содержит значения паузы между циклами обмена данными станции сервера и контроллера. Столбец «Максимальное время вычитывания» содержит фактическое значение времени работы цикла получения данных.

Таким образом, наиболее предпочтительным является уровень станции серверов, так как именно он обеспечивает наибольшую надежность, производительность и гибкость.

Существует два пути реализации предложенной системы:

- создание сложных моделей регуляторов на базе имеющихся блоков в АСУ ТП. Эта проблема активно обсуждается в научных изданиях, посвященных АСУ ТП.
- создание готовых FBD-блоков. В этом случае разработчик создает подпрограмму регулятора и включает ее в базовый набор FBD-модулей АСУ ТП.

Первый путь доступен для пользователей SCADA систем, его можно реализовать в рамках FBD-библиотеки. Второй путь дает свободу выбора языка программирования и включения любых подпрограмм, но доступен только разработчикам регуляторов или SCADA-систем.

В данном случае был выбран второй подход, так как он также обеспечивает объектный принцип проектирования систем управления.

В итоге по результатам проведенных исследований был выбран ПТК «Текон», так как этот комплекс соответствует всем требованиям разрабатываемого алгоритма адаптивной системы.

### **3.5. Надежность комплекса**

Для обеспечения бесперебойной и корректной работы адаптивного комплекса используются механизмы резервирования и зеркализации. Так как уровнем внедрения был выбран уровень станции серверов, то бесперебойная работа системы осуществляется благодаря резервированию сервера данных, а значит, и расчетного ядра ICore, функционирующему на его базе. При отказе одного из серверов резервной пары данные контроллеров будут вычитываться вторым. Записи об отказе и последующем переключении активности заносятся в журнал архивной станции. Целостность данных основного и резервного расчетных ядер обеспечивается механизмом зеркализации. В рамках этого механизма основное расчетное ядро в конце каждого цикла расчета отправляет значения всех своих переменных резервному, что исключает потерю данных больше, чем на один цикл при переключении активности. Переключение активности серверов может происходить как при отказе одного из них, так и по требованию персонала станции. Таким образом, задача бесперебойной работы обеспечивается

механизмами резервирования и зеркализации ПТК «ТЕКОН», но остаётся решить задачу контроля за работой параметрического комплекса. Кроме самого сервера резервируются и сетевые интерфейсы станции, на базе которой они функционируют. Отказ обоих серверов резервной пары приводит к остановке работы всего ПТК.

### **3.6. Подсистема диагностики работы адаптивного комплекса**

Подсистема диагностики необходима для анализа работы параметрического контура системы и предупреждения развития возможных аварийных ситуаций. Подобные ситуации могут возникать при работе системы в переходных режимах, следовательно, при диагностировании неблагоприятного режима адаптивная система должна блокироваться. Диагностирование и блокировка обеспечиваются подсистемой диагностики. Данная подсистема должна анализировать некие показатели качества работы системы, не участвующие в расчете параметров настройки технологического регулятора, т.е. не зависящие от параметрического контура. На основании этого анализа необходимо делать выводы о текущем состоянии адаптивной системы и в случае распознавания по ряду признаков аварийной ситуации предпринимать действия, необходимые для предотвращения её дальнейшего развития. Таким образом, подсистема диагностики должна быть спроектирована на основе «библиотеки шаблонов», в которой содержатся признаки для каждого типа возможных ситуаций и набор действий для предотвращения возникновения и развития конкретной ситуации.

Как отмечалось в разделе 2.3 второй главы, можно предъявить следующие требования к системе диагностики:

1. Слежение за работой параметрического контура, т.е. отслеживание некоторого показателя качества процесса.
2. Безударный переход к исходным настройкам системы.
3. Блокирование работы параметрического контура по внешней команде.

Таким образом, блок диагностики располагает определенным набором признаков для различных типов ситуаций. Для каждого типа ситуации существует решение, предотвращающее дальнейшее развитие данной аварийной ситуации.

Таблица 3.3. Библиотека шаблонов

	Признаки ситуации	Действия, предотвращающие ситуацию или её дальнейшее развитие
	Выход амплитуды колебаний технологического параметра за уставки	Ослабление влияния параметрического контура на координатный
	Выход технологического параметра за уставки	Блокирование работы основного регулятора в соответствующем направлении. Ослабление влияния параметрического контура
	Постоянное переключение выхода регулятора «Больше – Меньше»	Уменьшение значения коэффициента усиления технологического регулятора
	Выход значений параметров настройки основного регулятора за уставки	Срабатывание сигнализации (операторский интерфейс) и запись события в журнал архивной станции

В качестве первого показателя качества процессов в системе используется амплитуда колебаний технологического параметра. Допустимый диапазон колебаний амплитуды задается пользователем. При ухудшении качества процессов блок диагностики уменьшает коэффициент усиления в канале параметров настройки основного контура, т.е. ослабляет влияние параметрического контура. При достижении этим коэффициентом нуля параметры настройки возвращаются к своим исходным значениям. Событие возврата к исходным настройкам сохраняется в журнал архивной станции.

Вторым показателем является выход технологического параметра за заданные уставки. При этом работа технологического регулятора в соответствующем направлении блокируется. Третьим показателем служит признак потери устойчивости системой, формирующийся на основе анализа работы регулятора. Решением в такой ситуации является уменьшение коэффициента усиления технологического регулятора. В обоих случаях ослабляется влияние параметрического контура на работу основного.

Изменение параметров настройки основного контура осуществляется в определённом диапазоне, заданном наладчиком-экспертом. При выходе значений этих параметров за предупредительную уставку в объектном окне SCADA адаптивной системы выводится предупреждение и формируется соответствующее событие для сохранения в журнале архивной станции. На основе этой информации эксперт-наладчик в дальнейшем может проанализировать работу адаптивной системы и скорректировать её параметры.

Кроме перечисленных показателей отказов предусмотрена возможность блокирования работы параметрического контура по внешней команде, а также команда перехода к исходным настройкам. Это необходимо для отключения адаптивной системы, например, в переходных режимах. По команде перехода к исходным настройкам осуществляется безударный возврат к настройкам с заданной наладчиком скоростью, т.н. «динамическая балансировка».

На основании представленной таблицы определим параметры настройки блока диагностики:

1. Диапазон изменения параметров настройки, т.е. предупредительные уставки.
2. Диапазон амплитуды колебаний технологического параметра, при выходе за который блокируется работа параметрического контура и происходит возврат к исходным настройкам.
3. Значение уставок и выхода технологического регулятора.
4. Команды блокирования работы и отката к исходным настройкам.

Наиболее простым методом подстройки ПИД-регулятора к изменяющимся режимным факторам объекта управления является выбор заранее рассчитанных коэффициентов регулятора по определенному показателю. Принцип такой системы очень прост. Зная заранее возможные изменения режима работы системы, выполняют идентификацию объекта для нескольких разных режимов и для каждого из них находят параметры регулятора. Значения этих параметров записывают в таблицу. В процессе функционирования системы измеряют величину, которая характеризует режим работы системы, и в зависимости от её значений выбирают из таблицы значения коэффициентов ПИД-регулятора. Описанную систему можно рассматривать как систему с двумя контурами регулирования. Однако контур, служащий для подстройки параметром, является разомкнутым. По этой причине такие системы характеризуются высоким быстродействием и отсутствием ложного срабатывания.

Недостатком этого метода являются большие затраты на предварительную идентификацию, необходимую для составления таблицы. Однако эту проблему частично можно решить посредством применения специальных программ для автоматической идентификации объекта, после выполнения которых полученные параметры заносятся в таблицу. Такой принцип управления коэффициентами регулятора

целесообразно использовать в тех случаях, когда заранее известны виды и величины дестабилизирующих факторов, которые к тому же можно измерить.

Для обеспечения наиболее эффективного управления предложенная адаптивная система может работать согласованно с выбором коэффициентов регулятора по таблице рассмотренной выше. Итоговая структура системы приведена на рисунке 3.2.

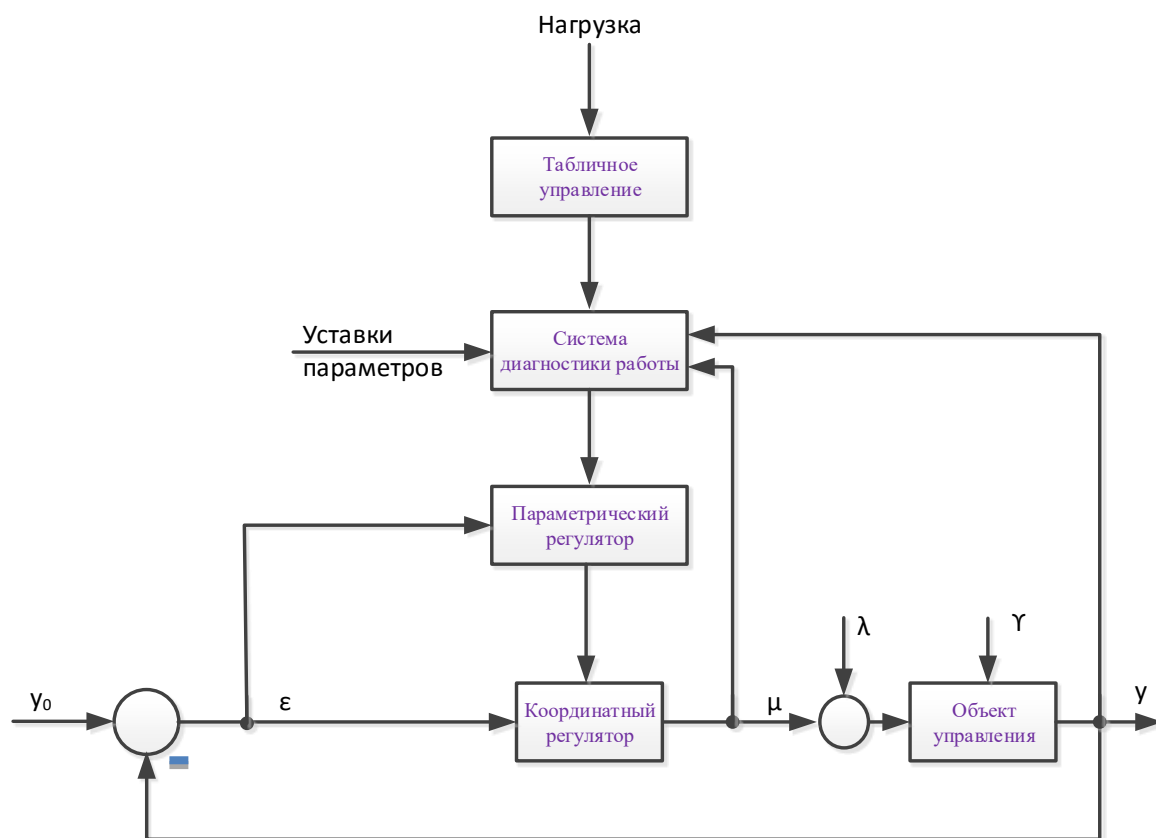


Рис. 3.2.

Структура системы

Алгоритм работы подсистемы диагностики приведен на рисунке 3.3.

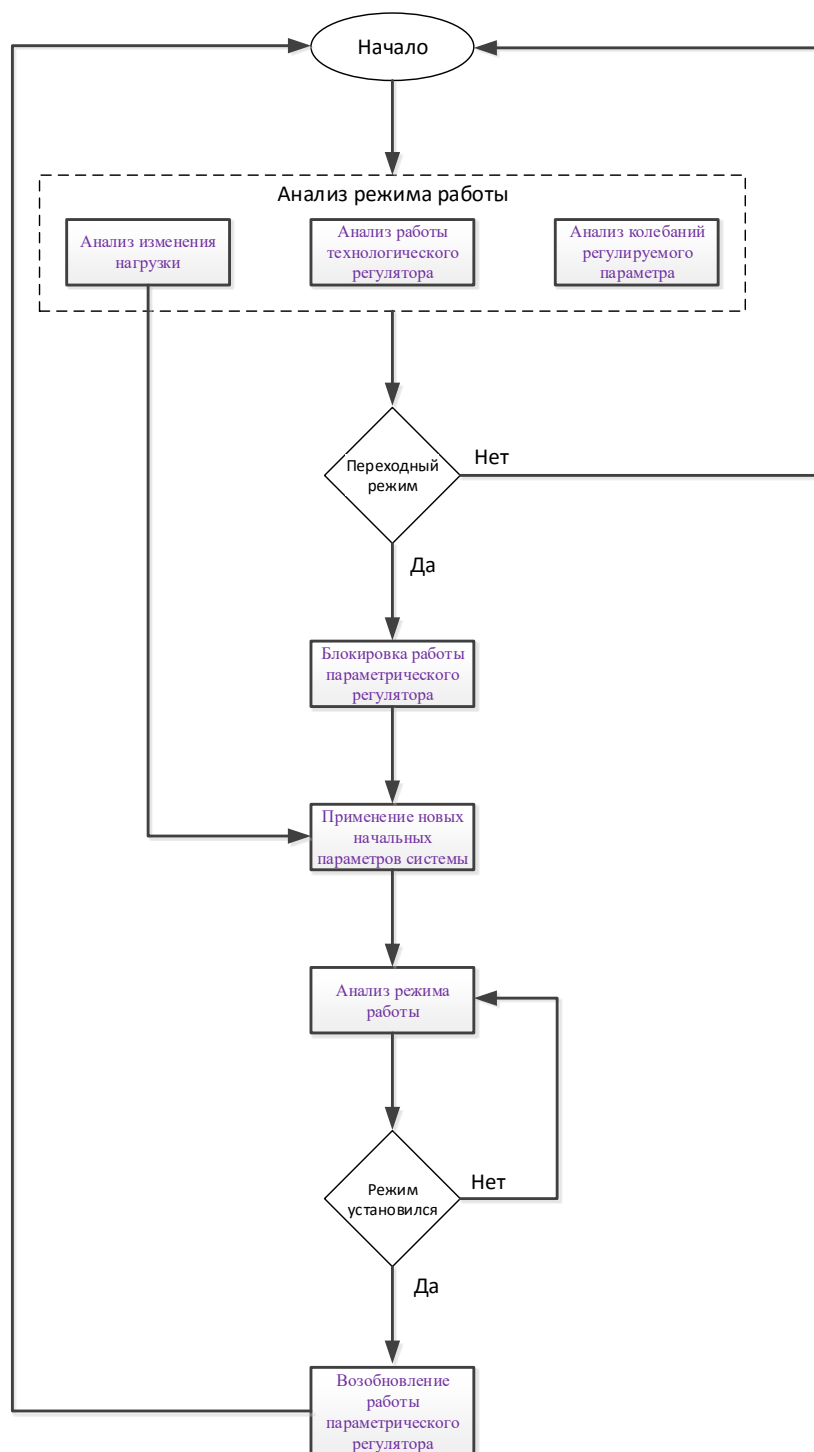


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма системы диагностики.

Алгоритм работает следующим образом.

1. Анализ режима работы. Данный шаг алгоритма объединяет анализ работы технологического регулятора, колебаний регулируемого параметра и показателя, характеризующего текущий режим работы. Первые два алгоритма работают на основании библиотеки шаблонов, рассмотренной выше. Последний на основании показателя режима работы, используя кусочно-линейную интерполяцию, вычисляет



новые значения параметров технологического регулятора и формирует признак перехода на новую нагрузку.

2. Признак переходного режима. Если система работает в установившемся режиме, блок диагностики не предпринимает никаких действий и возвращается к первому шагу. В случае если диагностируется переходный режим работы, алгоритм переходит к следующему шагу.

3. Блокировка работы параметрического регулятора. Управление параметрами технологического регулятора блокируется до перехода в стационарный режим.

4. Применение новых начальных параметров. В случае перехода на новую нагрузку начальные параметры технологического регулятора изменяются в соответствии с зависимостью, описанной в таблице.

5. Анализ режима работы. Алгоритм анализирует показатели и переходит к следующему шагу после того, как режим установится.

6. Возобновление работы параметрического регулятора.

### **3.7. Реализация адаптивной системы**

#### **3.7.1. Выбор языка программирования**

Выбор языка программирования в первую очередь зависит от целевой платформы, на которой будет исполняться данная реализация адаптивной системы. Например, если в качестве уровня внедрения системы был бы выбран нижний уровень (уровень контроллера), то задачи выбора не стояло бы вовсе, так как среда выполнения контроллера функционирует на базе операционной системы Linux, что уже фактически ограничивает выбор языка программирования. Кроме того, в качестве расчетного ядра среды выполнения используется виртуальная машина Isa GRAF. Библиотека, поставляемая с данной виртуальной машиной для написания собственных блоков, такова, что для реализации алгоритмов адаптивной системы единственным доступным языком является язык C.

Так как уровнем внедрения был выбран уровень «Шлюза», то это существенно расширяет возможный выбор языка программирования. В итоге был выбран «родной» для «Шлюза» и расчетного ядра «ICore» язык C#. Такой выбор обеспечивает более тесную интеграцию сервера, расчетного ядра и выполняющейся на их базе адаптивной системы. Выбор C# обеспечивает не только более тесную интеграцию расчетного ядра и

предлагаемой системы, но и снижает время разработки, позволяя сосредоточиться непосредственно на реализации алгоритмов адаптации.

### 3.7.2. Реализация алгоритма системы

Реализацию системы выполним в виде функциональных блоков и включим их в базовый набор библиотеки блоков TACSFBL (библиотека функциональных блоков «ТеконАвтоматика»). В соответствии со стандартом Международной электротехнической комиссии IEC 61131-3, функциональные блоки – это логические блоки с "памятью" (т.е. у них есть статические данные). Функциональный блок позволяет передавать параметры в программе пользователя, т.е. он пригоден для программирования часто повторяющихся сложных функций, например, регулирования по замкнутому контуру или выбора режима работы. Так как у функционального блока есть память (экземплярный блок данных), то есть возможность обратиться к его параметрам (например, к выходам) в любое время и в любой точке программы пользователя.

В соответствии со сказанным выше (в главе 2), блок будет содержать входы, выходы и локальные переменные, представленные в таблицах 3.4, 3.5, 3.6.

Таблица 3.4. Входные переменные блока подстройки

Физическая переменная	Обозначение	Тип	Описание
X	Храс	LREAL	Ошибка управления
CycleRatio	Шаг	DINT	Шаг добавления в буфер
MaxT	Tв	TIME	Верхняя уставка времени интегрирования
MinT	Tн	TIME	Нижняя уставка времени интегрирования
MinKsi	Ksi	LREAL	Аварийное значение степени затухания
RegStat	Стат		Статус технологического регулятора
RegOut	Ур		Выход технологического регулятора

Таблица 3.5. Выходные переменные блока подстройки

Физическая переменная	Обозначение	Тип	Описание
Ti	Ти	TIME	Время интегрирования
Ksi	Ksi	LREAL	Степень затухания
Status	Стат	INT	Статус

Таблица 3.6. Локальные переменные блока подстройки

Физическая переменная	Тип	Описание
InitialTi	TIME	Эталонное значение $T_i$
KsiBufferLength	INT	Длина буфера для вычисления степени затухания
TiBufferLen	INT	Длина буфера для вычисления средней частоты
FilterKind	INT	Тип фильтра (0 - прямоугольный, 1 - треугольный)
FilterFreq	LREAL	Частота фильтрации
HannWidth	DINT	Ширина зоны сглаживания косинусоидальным окном для подавления боковых гармоник
UseFftFilter	BOOL	Команда использования фильтра БПФ
FftFilterRatio	DINT	Кратность фильтрации БПФ

Алгоритм работы блока описывается следующей схемой, изображенной на рисунке 3.3.

В начале работы проверяется кратность текущего цикла значению переменной CycleRatio. Если значение кратно, то текущее значение  $X_{рас}$  добавляется в память внутреннего буфера. На следующем шаге выполняется проверка равенства текущей длины внутреннего буфера и заданного в переменной TiBufferLength значения. До тех пор пока внутренний буфер не заполнен, вычисления не производятся, а на соответствующих выходах блока сохраняются заданные по умолчанию значения.

На вход  $X_{рас}$  блока подается сигнал рассогласования основного задания и текущего значения технологического параметра, сохраняющийся во внутреннем буфере блока, имеющем длину TiBufLen, заданную пользователем. Далее по оперативному сигналу ошибки управления находятся текущие спектральная плотность и корреляционная функция.

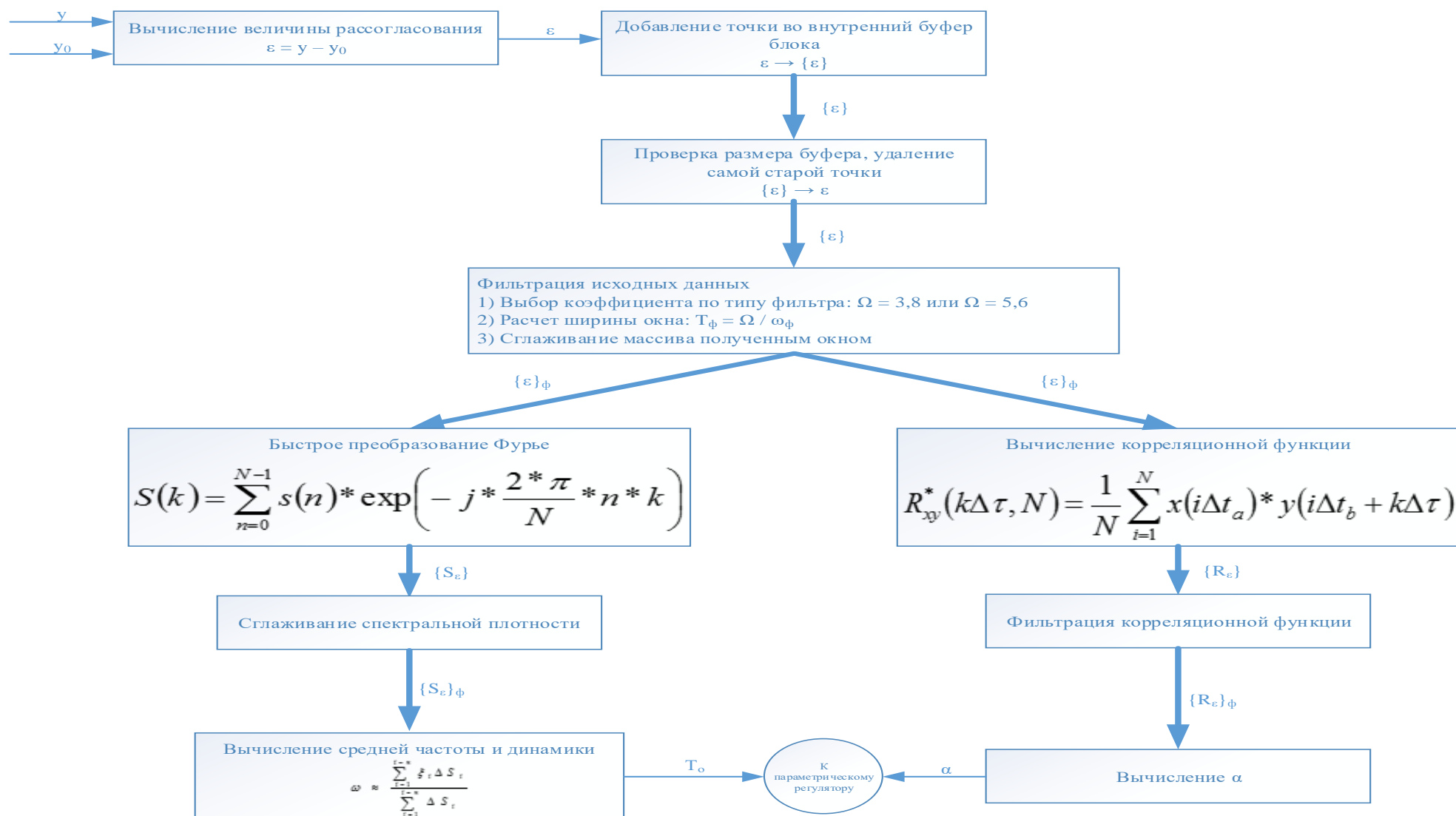


Рис. 3.3. Адаптивный алгоритм работы блока подстройки

Как было показано в предыдущей главе, для нахождения спектральной плотности используется один из вариантов преобразования Фурье. Перед обработкой внутреннего буфера преобразованием Фурье производится его сглаживание оконными функциями. Выбор прямоугольного или треугольного фильтра задается в переменной *FilterType*, особенности того и другого фильтра обсуждались в разделе 2.3 второй главы. Расчет ширины фильтра на основании частоты заданной в переменной *FilterFreq* осуществляется по формуле  $N_T = \text{integer} \frac{\pi}{\omega_{min} \Delta_0} = \text{integer} \frac{\omega_{max}^H}{\omega_{min}}$ . После фильтрации процесса необходимо провести сглаживание его боковых гармоник. Сглаживание «хвостов» производится фиксированным прямоугольным окном с косинусоидальными вставками по концам. Как было принято в предыдущей главе, ширина вставок составляет 20% (10% с каждого конца). Полученный в результате процесс обрабатывается преобразованием Фурье. Если в переменной *UseFftFilter* записано значение ИСТИНА, полученный процесс спектральной плотности сглаживается специальными оконными функциями. В данной системе используется окно Ханна, являющееся разновидностью треугольного окна с жёстко фиксированной шириной, равной 5. Процедура сглаживания спектральной плотности может быть выполнена несколько раз для достижения лучшего результата. Кратность фильтрации задается переменной *FftFilterRatio*. После определения спектральной плотности вычисляется средняя частота процесса. Определяя изменение средней частоты, алгоритм обратно пропорционально изменяет значение времени интегрирования технологического регулятора.

Для исключения влияния свойств регулятора стабилизируется значение эквивалентной степени затухания. Для оценки степени затухания вычисляется корреляционная функция по значениям внутреннего буфера, имеющего длину *KsiBufLength*. Как и в случае с оценкой инерционности объекта перед непосредственно расчетом корреляционной функции выполняется сглаживание входного процесса оконными функциями. Для сглаживания полученной корреляционной функции можно использовать ранее описанные прямоугольное или треугольное окна, а также воспользоваться специальными корреляционными окнами - окном Тьюки или Парзена. Как отмечалось во второй главе в разделе

2.3, в данном случае было выбрано окно Тьюки, поскольку оно обладает незначительным просачиванием сигнала на гармониках и меньшей (нежели у окна Парзена) полосой пропускания. По полученной функции, используя формулу  $\psi_{\Sigma} = 1 - A_3/A_1$ , вычисляется эквивалентная степень затухания. Стабилизация значения эквивалентной степени затухания  $\psi_{\Sigma}$ , оценивающей запас устойчивости системы, реализуется с помощью коррекции коэффициента усиления регулятора  $k_p$ . В силу нелинейного характера зависимости структура системы параметрической подстройки реализована с замкнутым контуром. Когда значение эквивалентной степени затухания вычислено, оно поступает на вход параметрического регулятора. Регулятор, сравнив вычисленное значение степени затухания с заданным, изменяет значение параметра  $k_p$  основного (координатного) регулятора. В качестве закона регулирования выбран П-закон, как обеспечивающий наибольшее быстроедействие.

Входы Стат и  $Y_p$  используются подсистемой диагностики для ослабления влияния работы параметрического контура на координатный.

Блок подстройки используется в связке с блоком технологического регулятора. Алгоритмический блок регулятора предназначен для управления регулирующим исполнительным механизмом постоянной скорости с целью поддержания регулируемого параметра технологического процесса, как в ручном, так и в автоматическом режиме. Назначение параметров типового регулятора описано в таблицах 3.7., 3.8. и 3.9.

Работа блока выглядит следующим образом. Регулируемый параметр подается на вход  $X$  алгоритмического блока. Вход  $Z_x$  предназначен для подключения сигнала признака недостоверности регулируемого параметра или других параметров, участвующих в работе регулятора. В том случае, если на этот вход поступает единица,  $d_0$  в Стат принимает значение 1. Режим работы регулятора при появлении признака недостоверности изменяется в соответствии с технологическими требованиями при проектировании регулятора.

Вход  $X_2$  предназначен для подключения внешнего корректирующего сигнала (например, сигнала от корректирующего регулятора). Вход  $X_2$  масштабируется с помощью коэффициента масштабирования  $K_m$ .

Таблица 3.7. Входные переменные технологического регулятора

Обозначение	Физическая переменная	Тип	Наименование
X	X1	REAL	Регулируемый параметр
Zx	X1_ned	BOOL	Недостоверность аналоговых входов
X2	X2	REAL	Сигнал коррекции
Kм	Ksc1	REAL	Масштабный коэффициент
Wбал	Wbal	DINT	Вариант балансировки: 0 – без балансировки 1 – статическая 2 – динамическая
Vбал	Vbal	REAL	Скорость динамической балансировки
Xмин	Xmin	REAL	Ограничение задания минимум
Xмкс	Xmax	REAL	Ограничение задания максимум
Tф	Tf	TIME	Время фильтра
Xзон	Xzon	REAL	Зона нечувствительности
Kп	Kp	REAL	Коэффициент пропорциональности
Tи	Ti	TIME	Время интегрирования
Kд	Kd	REAL	Коэффициент усиления дифференциатора
Tд	Td	TIME	Время дифференцирования
Cзпм	Czpm	BOOL	Запрет меньше
Cзпб	Czpb	BOOL	Запрет больше
Xвнш	Xvn	REAL	Значение выхода при внешнем управлении
Cвнш	Cvn	BOOL	Команда внешнего управления
Cавт	C_auto	BOOL	Перевод регулятора в режим «Автоматический» внешней командой
Cруч	C_manual	BOOL	Перевод регулятора в режим «Ручной» внешней командой
Xим	Xim	REAL	Положение исполнительного механизма
Zим	Xim_ned	BOOL	Недостоверность положения ИМ
Tим	Tim	TIME	Время исполнительного механизма
Cотк	Co	BOOL	Концевой выключатель «Клапан открыт»
Cзак	Cz	BOOL	Концевой выключатель «Клапан закрыт»
Tимп	Timp	TIME	Минимальное время импульса ШИМ

Таблица 3.8. Выходные переменные технологического регулятора

Обозначение	Физическая переменная	Тип	Наименование
Y <sub>вых</sub>	Y	REAL	Выходной сигнал
R <sub>б</sub>	Rb	BOOL	Выход «Больше» встроенного алгоритма ШИМ
R <sub>м</sub>	Rm	BOOL	Выход «Меньше» встроенного алгоритма ШИМ
Стат	Stat	DINT	Статус
Y <sub>здн</sub>	Y1		Локальное задание
Y <sub>общ</sub>	Y2		Общее задание
Y <sub>рас</sub>	Y3		Рассогласование

Алгоритмический блок позволяет с операторской станции задавать значение локального задания, которое транслируется на выход Y<sub>здн</sub>. Сигнал на входе X<sub>2</sub> суммируется с локальным заданием и формирует общее задание. Значение общего задания на выходе Y<sub>общ</sub> вычисляется по следующей формуле:

$$Y_{\text{общ}} = X_2 * K_m + Y_{\text{лздн}}.$$

Сигнал общего задания может быть ограничен, для чего необходимо на входах  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  установить, соответственно, нижнюю и верхнюю границы диапазона.

Разница между сигналом общего задания  $Y_{\text{общ}}$  и регулируемым параметром  $X$  выводится на выходе  $Y_{\text{рас}}$  – рассогласование:

$$Y_{\text{рас}} = Y_{\text{общ}} - X.$$

Для обеспечения безударного переключения при изменении режимов работы регулятора в алгоритмическом блоке предусмотрены три режима работы балансировки:

- отсутствие балансировки;
- статическая балансировка;
- динамическая балансировка.

Вид балансировки задается на входе  $W_{\text{бал}}$  в соответствии с правилами, приведенными в таблице «входы». В том случае, если предполагается использование динамической балансировки, на входе  $V_{\text{бал}}$  следует задать скорость балансировки в  $\frac{\text{ед.рег.пар.}}{\text{сек.}}$ .

Для устранения высокочастотных пульсаций сигнала рассогласования предназначен фильтр – апериодическое звено первого порядка. Время фильтра устанавливается на входе  $T_{\text{ф}}$ .

Звено формирования зоны нечувствительности регулятора работает по следующей зависимости:

$$\text{Если } |Y_{\text{рас}}(\text{вход})| \leq \frac{X_{\text{зон}}}{2}, \text{ то } Y_{\text{рас}} = 0,$$

$$\text{Если } |Y_{\text{рас}}(\text{вход})| > \frac{X_{\text{зон}}}{2}, \text{ то } Y_{\text{рас}} = \left( |Y_{\text{рас}}(\text{вход})| - \frac{X_{\text{зон}}}{2} \right) * \left( \text{sign}(Y_{\text{рас}}) \right),$$

где  $X_{\text{зон}}$  – вход алгоритмического блока, на котором задается величина зоны нечувствительности;

Работа звена описывается зависимостями, приведенными ниже.

Для исполнительного механизма постоянной скорости, имеющего передаточную функцию вида:

$$W_{\text{им}}(p) = \frac{1}{T_{\text{им}} * p};$$

где  $T_{\text{им}}$  – полное время хода исполнительного механизма в сек.



ПДД<sup>2</sup> звено совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости реализует следующую передаточную функцию:

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{п}} * \left(1 + \frac{1}{T_{\text{и}} * p}\right) + k_{\text{д}} * \frac{T_{\text{д}}^2 * p}{(T_{\text{д}} * p + 1)^2},$$

где

$K_{\text{п}}$  - коэффициент пропорциональности;

$T_{\text{и}}$  - время интегрирования;

$K_{\text{д}}$  - коэффициент дифференцирования;

$T_{\text{д}}$  - время дифференцирования;

Входы  $C_{\text{зпб}}$  и  $C_{\text{зпм}}$  предназначены для запрета работы регулятора в сторону «больше» и «меньше» при появлении внешних команд.

Вход  $X_{\text{внш}}$  предназначен для подключения внешнего сигнала (через звено переключения режима работы регулятора) к ШИМ при наличии «1» на входе  $C_{\text{внш}}$ . На выходе  $R_{\text{б}}$  или  $R_{\text{м}}$  в зависимости от полярности сигнала на  $X_{\text{внш}}$  формируются импульсы со скважностью, соответствующей величине сигнала на  $X_{\text{внш}}$ .

На входы  $C_{\text{отк}}$ ,  $C_{\text{зак}}$  подается информация о срабатывании концевых выключателей открытого и закрытого положения исполнительного механизма. При появлении информации о срабатывании концевого выключателя работа алгоритма в соответствующем направлении блокируется.

Сигналы требования от технологических защит, блокировок или других источников подключаются на вход  $C_{\text{ком}}$ . Описание работы алгоритма в зависимости от состояния входа  $C_{\text{ком}}$  приведено в таблице «входы».

Последним звеном в алгоритмическом блоке является широтно-импульсный модулятор (ШИМ), который формирует на выходе управляющие импульсы соответствующей длительности и скважности, которые через модуль дискретного вывода управляют исполнительным механизмом постоянной скорости (например, МЭО). Выходные импульсы на открытие и закрытие формируются, соответственно, на выходах  $R_{\text{б}}$  или  $R_{\text{м}}$ . На входе  $T_{\text{имп}}$  задается минимальная длительность импульса ШИМ.

Вывод информации о состоянии алгоритмического блока осуществляется через выход Стат. Все признаки сформированы в виде дискретных сигналов и упакованы. Расшифровка назначения каждого бита упаковки приведены в таблице «выходы».

Типовая схема использования блока подстройки совместно с регулятором приведена на рисунке 3.5.

Также контролировать работу блока Tuning возможно, используя операторский интерфейс. Для блока подстройки были разработаны мнемосимвол и окно управления, представленные на рисунках 3.6 и 3.7.

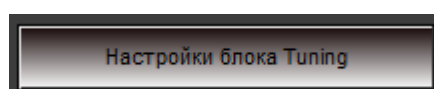


Рис.3.6. Мнемосимвол блока подстройки

<b>KKS</b>	
<b>Наименование</b>	
Пост. времени <b>999,9</b>	Эталон. пост. времени <b>999,9</b>
:GI_X.Един. из	▲ ▼
Средняя частота <b>999,9</b>	
Степень затухания <b>999,9</b>	
ГРАФ	✂ БЛОК КВИТ

Рис. 3.7. Объектное окно блока подстройки

Окно управления позволяет просматривать текущие значения постоянной времени, степени затухания и средней частоты. Также окно управления позволяет изменять значение начального значения постоянной времени и задавать настройки расчета средней частоты и степени затухания. Отображаемые графики, включают в себя графики массивов исходных данных, их отфильтрованные варианты, графики спектральной плотности и степени затухания, а также тренд изменения постоянной времени. Настройка отображения тех или иных графиков и параметры их отображения производится там же. Присутствует возможность блокировать работу блока Tuning, при этом в журнал архивной станции заносится событие ручной блокировки. В верхней части окна выводится наименование и описание экземпляра блока Tuning.

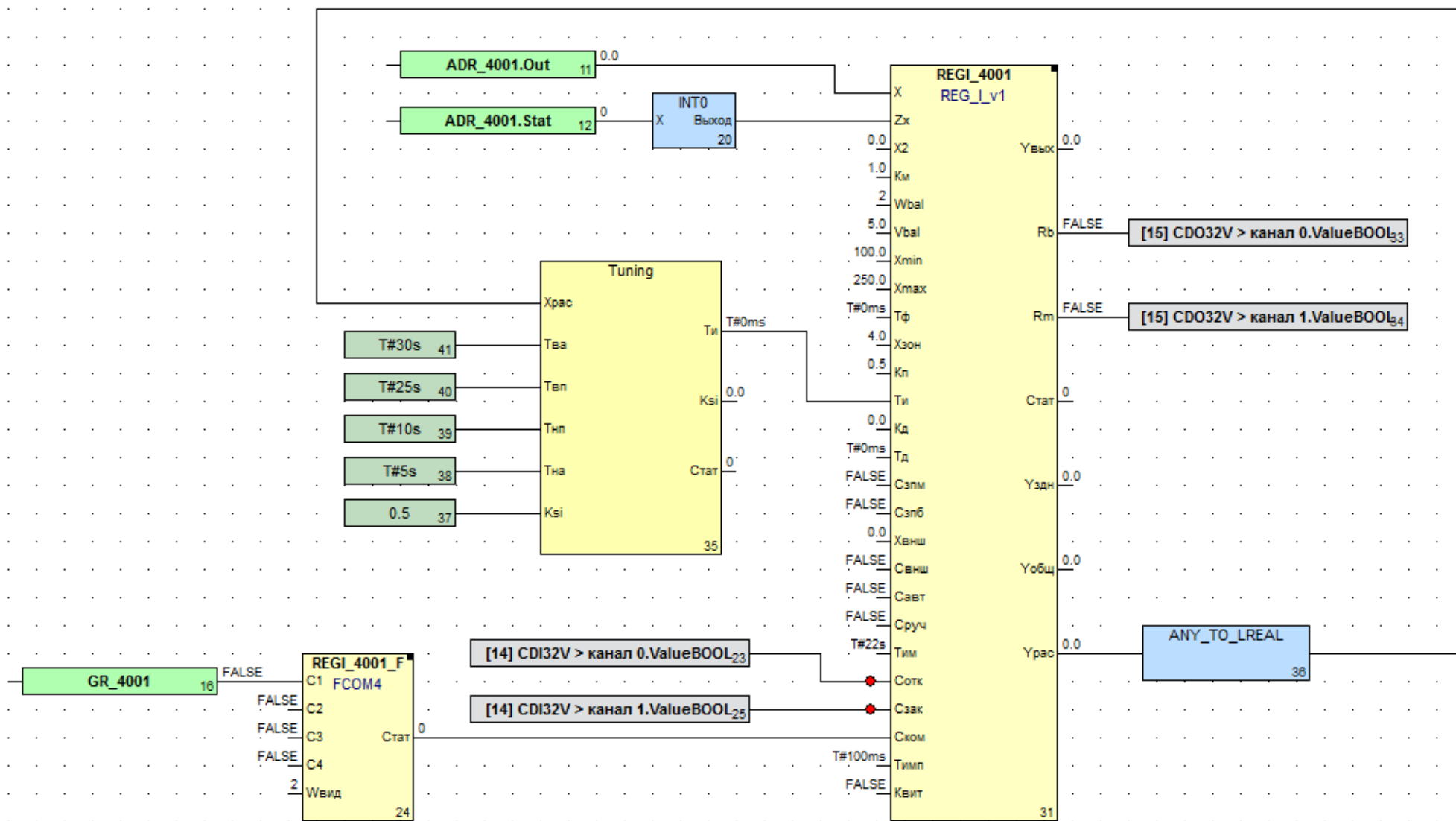


Рис. 3.5. Типовая схема совместного использования регулятора с блоком адаптивной подстройки

### **3.8. Проверка работы блока подстройки**

Для проверки работоспособности блока адаптивной подстройки были проведены испытания на тренажере АСУ ТП пятого энергоблока Троицкой ГРЭС, мощностью 300 МВт.

#### **3.8.1. Описание тренажера**

Тренажер включает в себя виртуальный контроллер, сервер данных, архивную станцию, операторский интерфейс и модель объекта управления.

Технологическая программа выполняется на базе виртуального контроллера производства ООО «ТеконАвтоматика», представляющего модель реальных контроллеров, производимых ЗАО «Промконтроллер». Виртуальный контроллер поддерживает тот же набор сервисов, что и реальный контроллер.

Модель пароводяного тракта котла, используемая в виртуальной системе, разработана на основе архивных данных, полученных в процессе пуско-наладочных работ на пятом энергоблоке Троицкой ГРЭС, мощностью 300 МВт, проводимых в период с декабря 2011 по март 2012 года.

Система управления пароводяного тракта котла, используемая в виртуальной системе, является точной копией реальной системы управления. Методы наладки данной системы полностью соответствуют реальным методам, используемым в период пуско-наладочных работ.

Операторский интерфейс, представленный в виртуальной системе, представляет собой копию реального операторского интерфейса.

Компоненты сервера данных и архивной станции используются такие же, как и на реальных объектах.

В качестве аппаратной части используется обычный персональный компьютер.

Структура тренажера представлена на рисунке 3.7.

В качестве среды моделирования используется «Modeo» - программный продукт ООО «ТеконАвтоматика».

Система Modeo предоставляет человеку графический интерфейс, используя который исследователь создает модель из виртуальных элементов с

некоторой степенью условности так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов. Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона сложности.

Исходными данными для построения модели в Modeo являются структурно-функциональная схема моделируемой системы, процесса или объекта и описывающие их дифференциально-алгебраические уравнения. Вместо таких уравнений должны быть заданы операторы или функции, характеризующие отдельные элементы моделируемой системы, например, передаточные функции для линейных элементов и статические характеристики для нелинейных элементов.

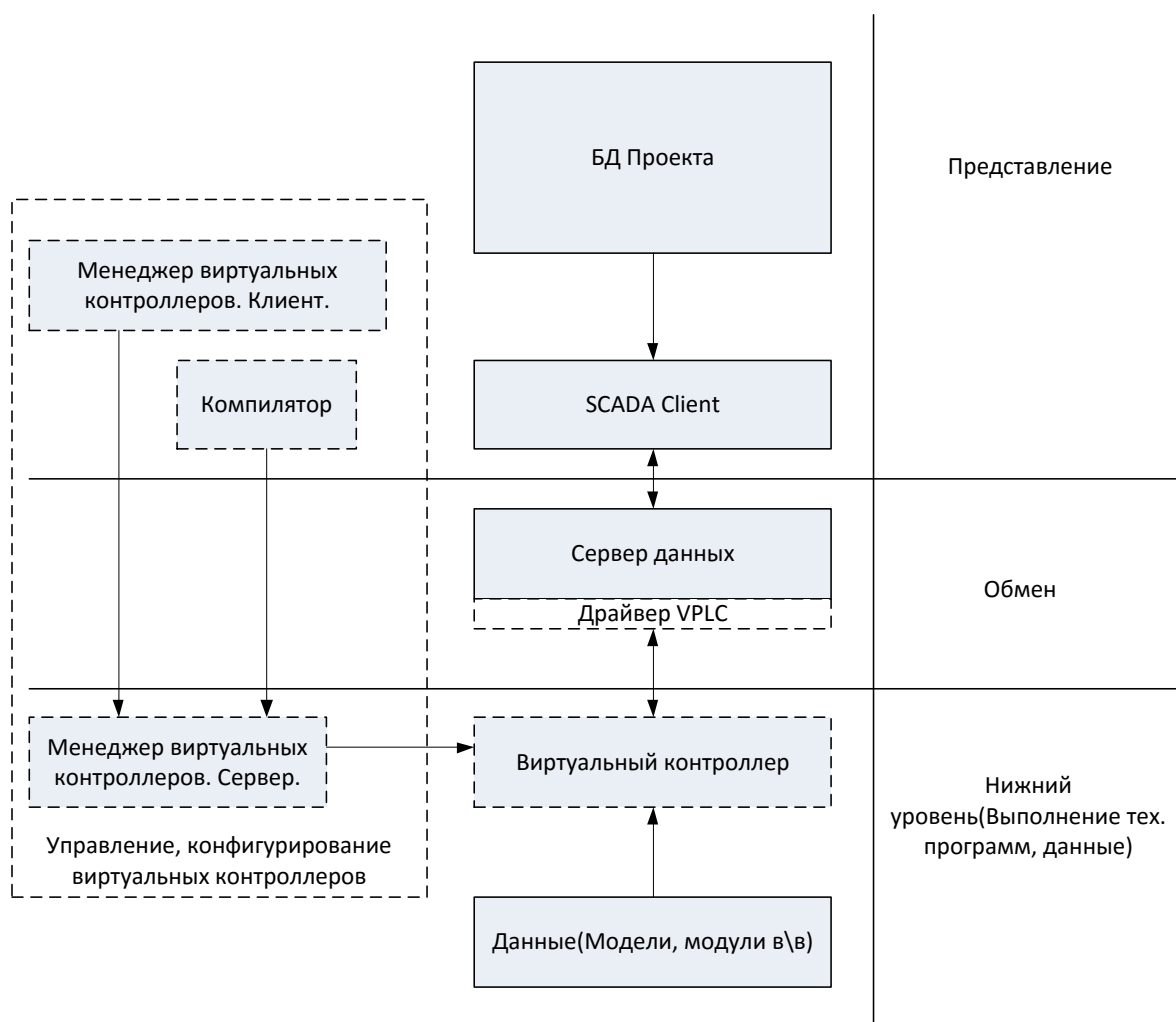


Рис. 3.7. Структура тренажера

Существенным преимуществом Modeo по сравнению с другими моделирующими пакетами является тесная интеграция с остальными продуктами группы компаний «Текон». При использовании Modeo

пользователю необходимо лишь изменить тип модулей ввода/вывода, используемых в технологической программе, задав виртуальный вместо реального в редакторе программ. Никаких других изменений в технологическую программу, выполняющуюся на контроллере, вносить не требуется.

### 3.8.2. Модель объекта

Модель пароводяного тракта котла, используемая в тренажере, разработана на основе архивных данных, полученных в процессе пуско-наладочных работ на пятом энергоблоке Троицкой ГРЭС, мощностью 300 МВт, проводимых в период с декабря 2011 по март 2012 года.

Модель объекта управления включает в себе информацию о технологических параметрах и динамике изменения, необходимых для реализации системы управления. Также в модели учитывается связь динамики каналов с объемом, скоростью среды, режимами течения и другими факторами, которые были рассмотрены в предыдущей главе.

Структура модели объекта управления представлена на рисунке 3.8.

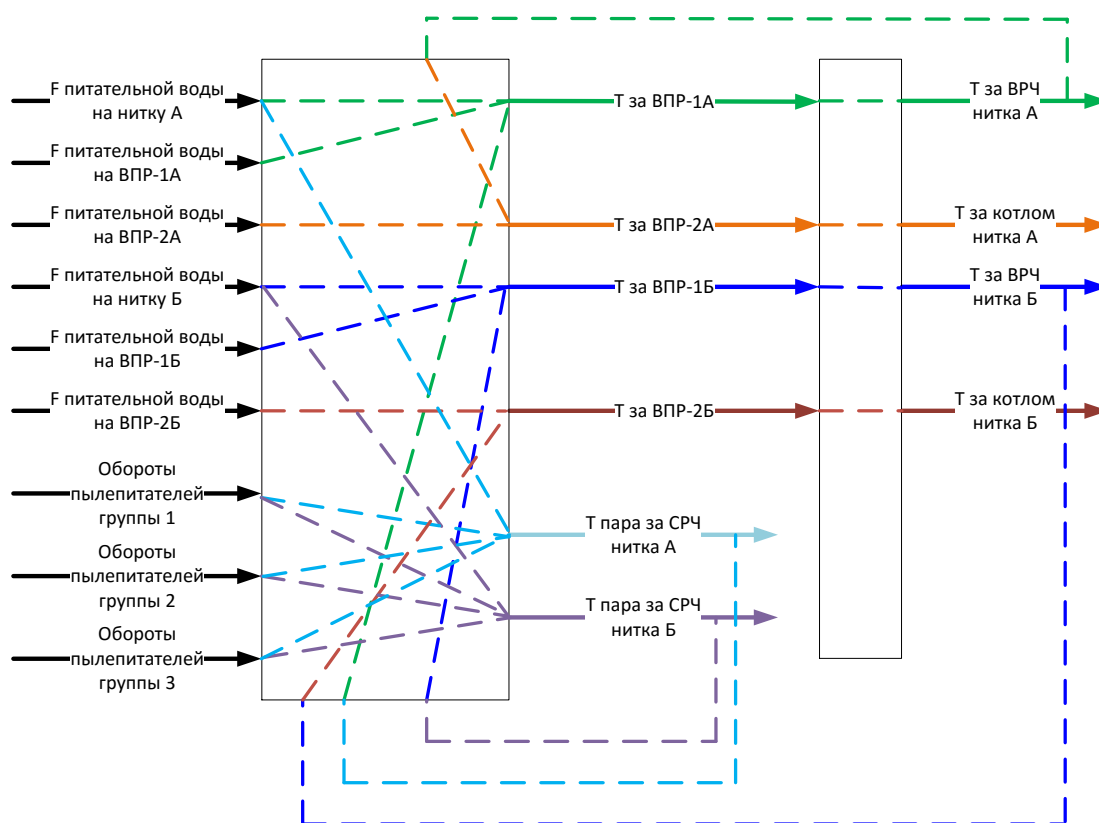


Рис. 3.8. Структура модели объекта управления

Ниже представлена поэтапная методика идентификации кривых на примере канала «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» (нитка А).

На первом этапе необходимо из архива технологических событий с помощью утилиты просмотра архива выделить кривую (или семейство кривых), несущую в себе наиболее достоверную информацию о динамике технологического процесса. Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» представлена на рисунке

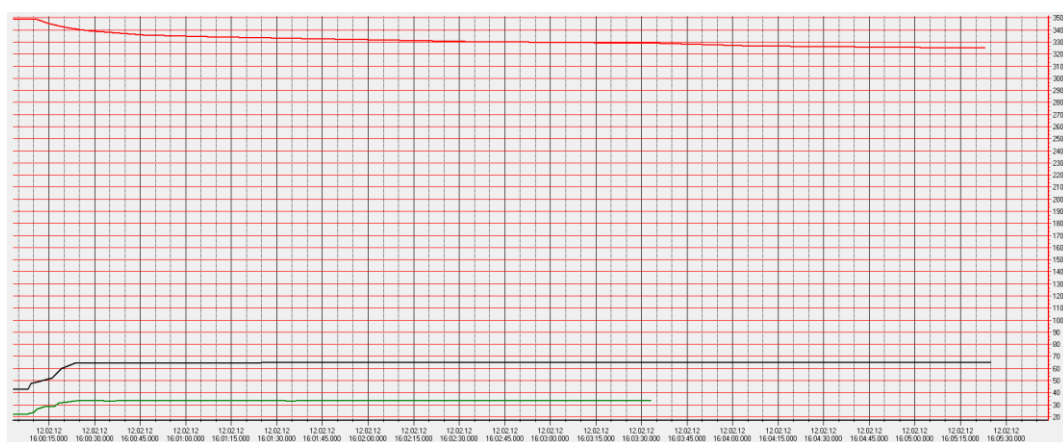


Рис. 3.9. Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском»

Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском».

- температура пара за первым впрыском;
- положение регулирующего органа клапана первого впрыска;
- расход воды на первый впрыск.

На втором этапе формируется массив исходных данных с момента подачи возмущения до момента установления процесса и осуществляется экспорт в среду обработки данных. В данном случае в качестве среды обработки данных использовалась среда Microsoft Excel.

На третьем этапе необходимо осуществить обработку исходных данных. Данные из архива событий имеют не пригодный для идентификации вид ввиду несоответствия форматов данных и отсутствия равномерного шага по времени.

На четвертом этапе необходимо построить графики кривых разгона. В качестве метода аппроксимации используется сплайн-аппроксимация (рисунки 3.10 и 3.11).

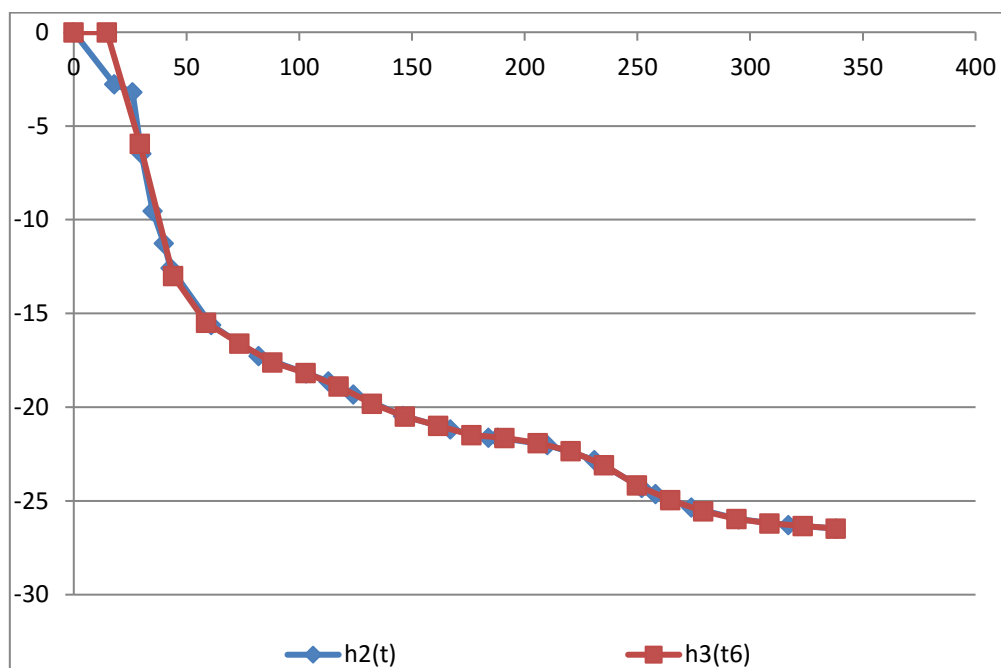


Рис. 3.10. Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» - кривая «Температура за первым впрыском»

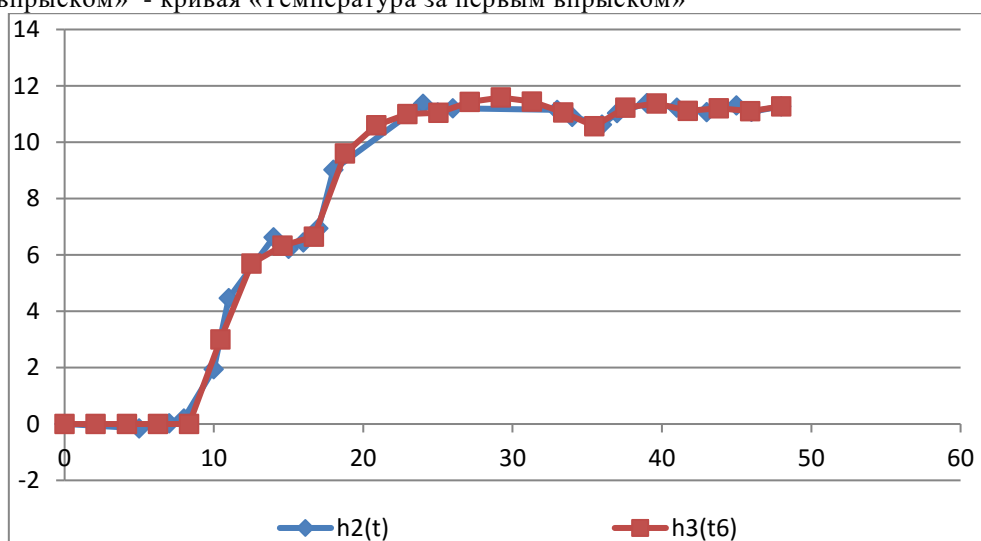


Рис. 3.11. Кривая разгона «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» - кривая «Расход питательной воды на впрыск»

На пятом этапе необходимо сформировать массивы расчетных данных для идентификации кривых разгона. В данном случае используется программа Piton.

На шестом этапе производится идентификация кривых разгона с помощью программы Piton. Результаты идентификации представлены на рисунках 3.12. и 3.13.



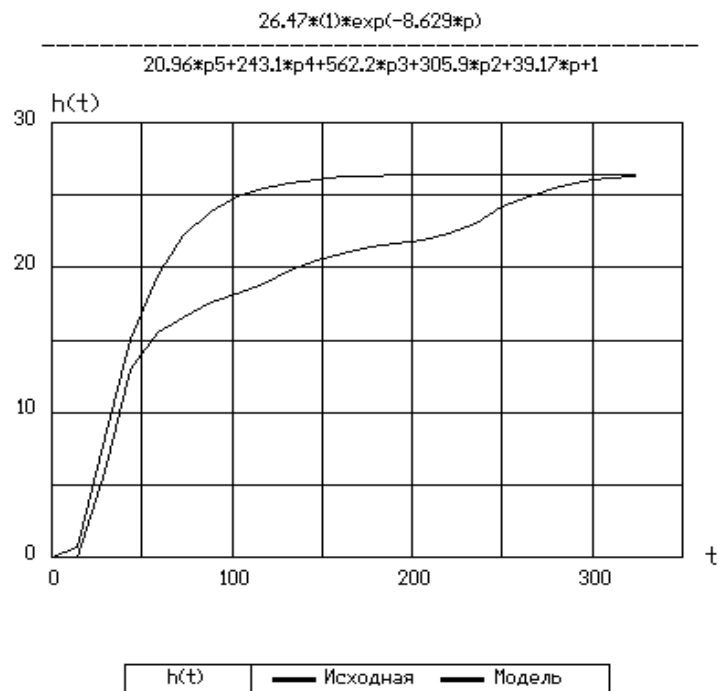


Рис. 3.13. Результат идентификации кривой разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» - кривая «Температура за первым впрыском»

В результате идентификации получена передаточная функция:

$$W_1(p) = \frac{26.47}{20.96p^5 + 243.1p^4 + 652.2p^3 + 305.9p^2 + 39.17p + 1} e^{-8.629p}$$

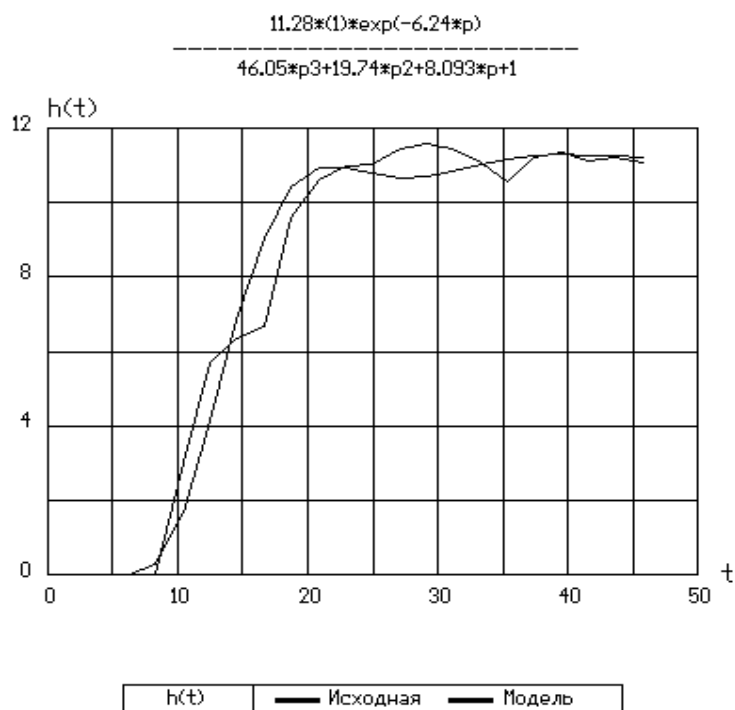


Рисунок 3.13. Результат идентификации кривой разгона по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском» - кривая «Расход питательной воды на впрыск»

В результате идентификации получена передаточная функция:

$$W_2(p) = \frac{11.28}{46.05p^3 + 19.74p^2 + 8.093p + 1} e^{-6,24p}.$$

Итоговая передаточная функция по каналу «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском»:

$$W_{FB-TB1}(p) = \frac{W_1(p)}{W_2(p)} = \frac{46.05p^3 + 19.74p^2 + 8.093p + 1}{20.96p^5 + 243.1p^4 + 652.2p^3 + 305.9p^2 + 39.17p + 1} e^{-8.629p}.$$

Аналогичную последовательность действий (пункты 1-6) повторяем для остальных каналов модели (нитка А). В итоге имеем следующие передаточные функции:

Канал «Расход питательной воды на впрыск 1 - температура пара за первым впрыском»:

$$W_{FB-TB1}(p) = \frac{46.05p^3 + 19.74p^2 + 8.093p + 1}{20.96p^5 + 243.1p^4 + 652.2p^3 + 305.9p^2 + 39.17p + 1} e^{-8.629p},$$

- канал «Расход питательной воды на котел - температура пара за первым впрыском»

$$W_{FK-TB1}(p) = \frac{449.9p^2 + 33.35p + 1}{4992p^3 + 590.1p^2 + 36.27p + 1} e^{-5.38p},$$

- канал «Температура пара за СРЧ - температура пара за первым впрыском»

$$W_{TCR-TB1}(p) = \frac{6218p^2 + 140.2p + 1}{661200p^3 + 13470p^2 + 138.6p + 1} e^{-17.33p},$$

- канал «Температура пара за первым впрыском - температура пара за первым ВРЧ»

$$W_{TB1-TBRC}(p) = \frac{80.57p + 1}{2238p^2 + 118.9p + 1} e^{-22,19p},$$

- канал «Расход питательной воды второй впрыск - температура пара за вторым впрыском»

$$W_{FK-TB2}(p) = \frac{32.92p^2 + 11.71p + 1}{10553.4p^4 + 6751.2p^3 + 955.7p^2 + 49.7p + 1},$$

- канал «Температура пара за ВРЧ - температура пара за вторым впрыском»

$$W_{T_{\text{ВРЧ}}-T_{\text{В2}}}(p) = \frac{10060p^2 + 160.6p + 1}{167000p^3 + 8951p^2 + 154p + 1},$$

- канал «Температура пара за вторым впрыском - температура пара за КОТЛОМ»

$$W_{T_{\text{В2}}-T_{\text{К}}}(p) = \frac{30.51p + 1}{6420p^2 + 136.3p + 1} e^{-21.8p},$$

- канал «Расход воды на котел - температура пара за СРЧ»

$$W_{F_{\text{К}}-T_{\text{СРЧ}}}(p) = \frac{8.981p + 1}{3241p^3 + 808.9p^2 + 47.37p + 1} e^{-8.892p},$$

- канал «Обороты пылепитателей групп 1,2,3 - температура пара за СРЧ»

$$W_{U-T_{\text{СРЧ}}}(p) = \frac{67.64p^2 + 16.79p + 1}{344531p^4 + 117136p^3 + 4663p^2 + 103.05p + 1} e^{-8.892p}.$$

### 3.8.3. Результаты проверки

Проверка корректности работы системы проводилась на регуляторах впрыска.

Регулятор первого впрыска РВ-1 (рисунок 3.14) предназначен для поддержания заданного значения температуры за верхней радиационной частью, воздействующего на регулирующий клапан первого впрыска.

Регулятор получает следующие импульсы:

1. Основной импульс – по температуре пара за ВРЧ.
2. Опережающий импульс - по температуре пара за первым впрыском.

Схема регулирования двухконтурная: стабилизирующий ПИД-регулятор температуры пара за первым впрыском и корректирующий ПИД-регулятор температуры пара за ВРЧ. Корректирующий регулятор получает сигнал от датчика «Температура пара за ВРЧ». Стабилизирующий регулятор получает сигнал от датчика «Температура пара за первым впрыском» и сигнал с выхода корректирующего регулятора.

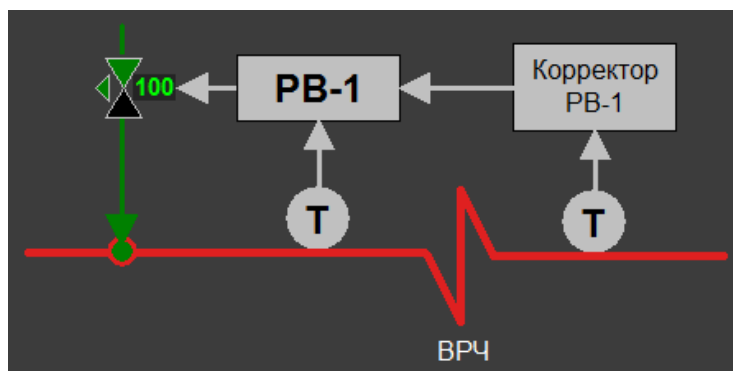


Рис. 3.14. Регулятор первого впрыска PB-1

Регулятор второго впрыска PB-2 предназначен для поддержания постоянной температуры пара за котлом, воздействуя на регулирующий клапан второго впрыска.

Регулятор получает следующие импульсы:

1. Основной импульс – по температуре острого пара за ШПП-III.
2. Опережающий импульс - по температуре острого пара за вторым впрыском.

Схема регулирования двухконтурная: стабилизирующий ПИД–регулятор температуры острого пара за вторым впрыском и корректирующий ПИД–регулятор температуры острого пара за котлом.

Корректирующий регулятор получает сигнал от датчика «Температура острого пара за ШПП-III». Стабилизирующий регулятор получает сигнал от датчика «Температура пара за вторым впрыском» и сигнал с выхода корректирующего регулятора.

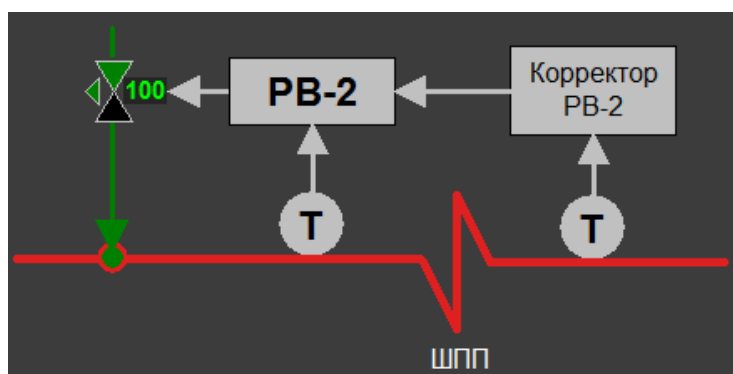


Рис. 3.14. Регулятор второго впрыска PB-2

Блок адаптивного использовался для регулирования температуры пара за котлом, изменяя параметры настройки корректирующего регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления.

Объектное окно настроек регуляторов впрыска приведены на рисунке 3.15.

Рег.второго впр.РВ-2А			
<b>Настройки аналогового регулятора</b>		<b>Настройки импульсного регулятора</b>	
Коеф. масштаб. сигнала коррекции	1,0	Коеф. масштаб. сигнала коррекции	1,0
Тип балансировки (0-нет, 1-стат, 2-дин.)	0	Тип балансировки (0-нет, 1-стат, 2-дин.)	0
Скорость динамич. балансир., ед./сек.	0,1	Скорость динамич. балансир., ед./сек.	0,1
Ограничение задания минимальное	400,0	Ограничение задания минимальное	300,0
Ограничение задания максимальное	600,0	Ограничение задания максимальное	600,0
Время фильтра, сек.	0,0	Время фильтра, сек.	0,0
Зона нечувствительности полная	1,2	Зона нечувствительности полная	2,6
Коэффициент пропорциональности	1,0	Коэффициент пропорциональности	-0,3
Время интегрирования, сек.	8,0	Время интегрирования, сек.	30,0
Коэффициент дифференцирования	0,0	Коэффициент дифференцирования	0,0
Время дифференцирования, сек.	0,0	Время дифференцирования, сек.	0,0
Ограничение выхода минимальное	300,0	Время хода исполнит. механизма, сек.	23,0
Ограничение выхода максимальное	600,0	Время импульса ШИМ миним., сек.	0,2
		Наличие питающего напряжения	Есть

ГРАФ			КВИТ			БЛОК
руч	Рег. параметр	Локал. задание	Рег. параметр	Локал. задание	руч	
АВТ	564,4	0,0	439,3	0,0	АВТ	
Выход	Общее задание 545,0		Общее задание 396,5		УП, %	
396,5	Рассогласование -19,4		Рассогласование -42,8		56	
Кп:		Ти:		Кп:		Ти:

Рис. 3.15. Объектное окно настроек регуляторов впрыска

Проверка параметрических контуров, отвечающих за настройку коэффициента усиления и постоянной времени, осуществлялась как по отдельности, так и совместно.

На первом этапе эксперимента изменялась постоянная времени объекта и наблюдалась реакция параметрического контура, ответственного за подстройку времени интегрирования регулятора.

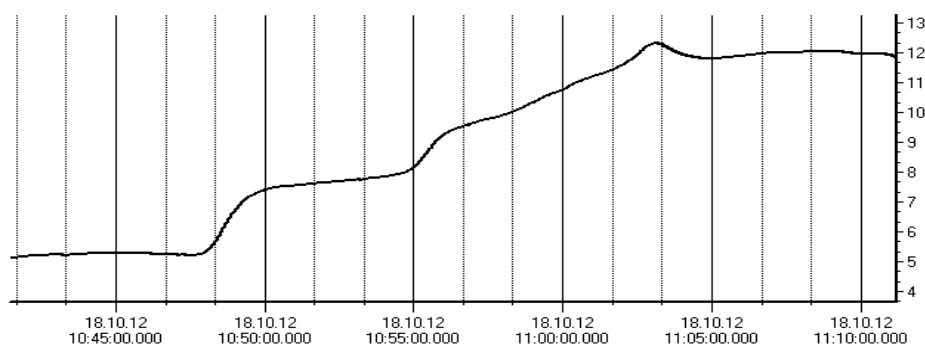


Рис. 3.16. Изменение постоянной времени блоком подстройки

Как видно из графика (рисунок 3.16.), время интегрирования регулятора изменилось пропорционально изменению постоянной времени объекта (в два

раза). Из этого можно сделать вывод о корректной работе контура, следящего за динамикой объекта управления.

Далее в эксперименте изменялась коэффициент усиления объекта и наблюдалась реакция параметрического контура, ответственного за подстройку коэффициента регулятора.

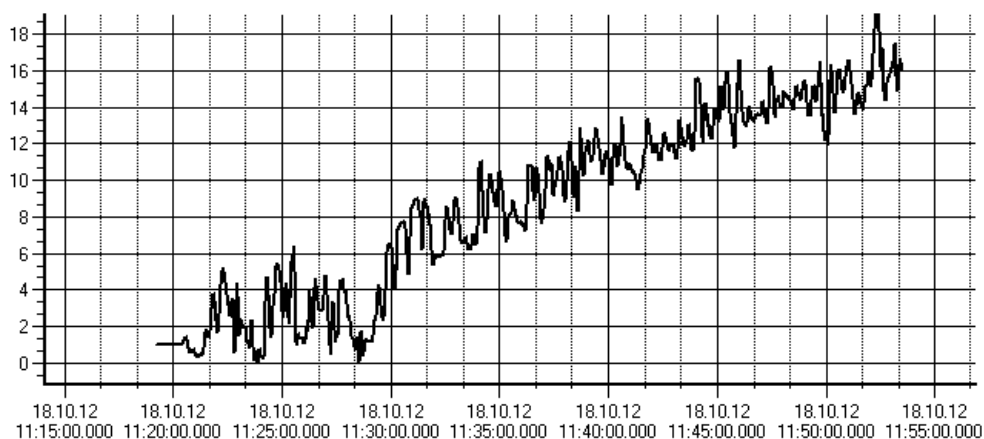


Рис. 3.17. Изменение коэффициента регулятора блоком подстройки

Из графика (рисунок 3.17) видно, что коэффициент регулятора изменился обратно пропорционально изменению коэффициента объекта (в десять раз). Из этого можно сделать вывод о корректной работе контура, следящего за статикой объекта управления. Высокочастотные составляющие процесса объясняются отсутствием фильтра в канале.

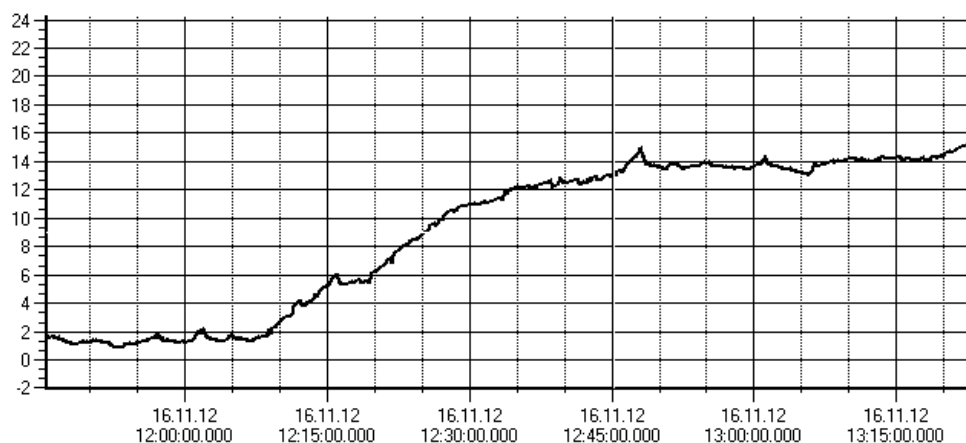


Рис. 3.18. Изменение коэффициента регулятора блоком подстройки

Совместные испытания параметрических контуров проводились в два этапа: сначала у объекта управления изменялась постоянная времени, а затем коэффициент усиления.

При изменении постоянной времени объекта в два раза коэффициент регулятора не изменился, как это видно из графика на рисунке 3.19.

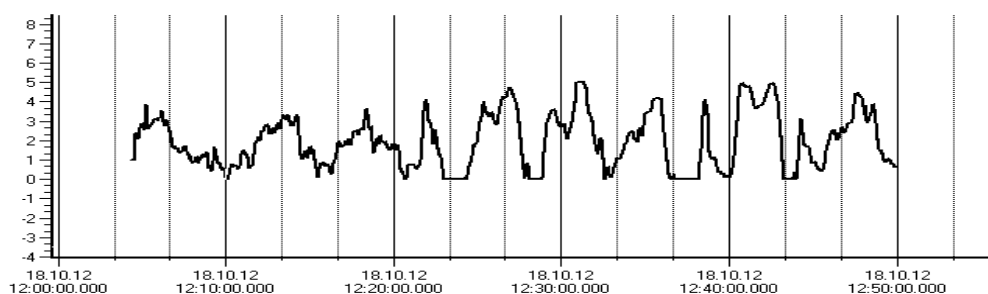


Рис. 3.19. Изменение коэффициента регулятора блоком подстройки

При этом время интегрирования увеличилась в два раза пропорционально времени объекта (рисунок 3.20.)

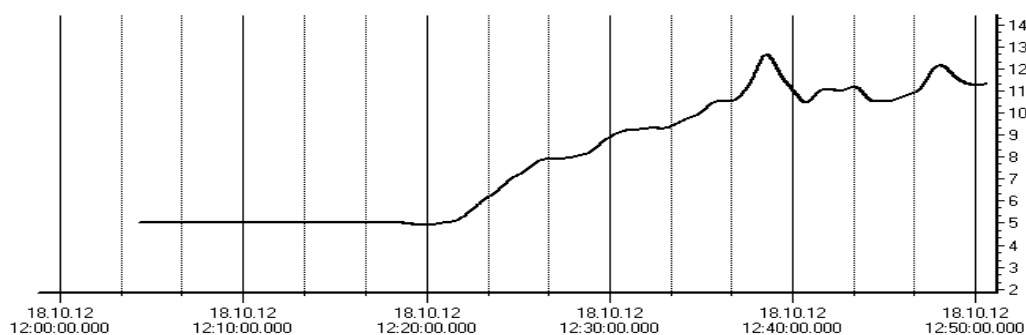


Рис. 3.20. Изменение постоянной времени блоком подстройки

При изменении коэффициента усиления объекта в десять раз коэффициент регулятора изменился, как это видно на графике на рисунке 3.21.

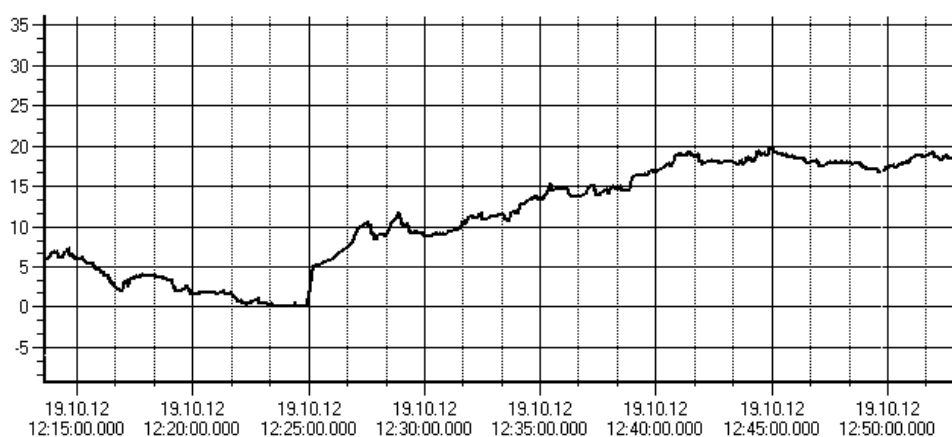


Рис. 3.21. Изменение коэффициента регулятора блоком подстройки

Время интегрирования регулятора при этом после увеличения вернулось к начальному значению (3.22.)

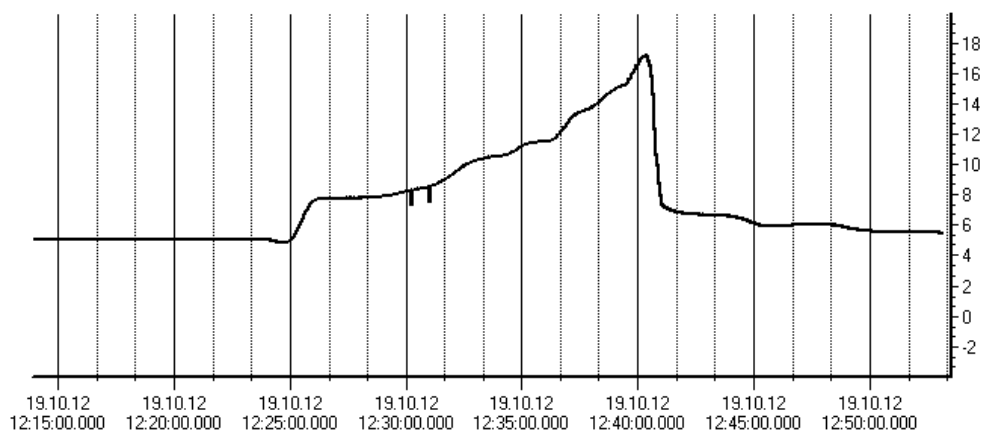


Рис. 3.22. Изменение постоянной времени блоком подстройки

Таким образом, делаем вывод что, реализованный алгоритм беспоисковой самонастраивающейся системы обеспечивает стабилизацию степени затухания на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений.

В данной модели для управления температурой перегретого пара используется структура со стабилизирующим и корректирующим регулятором. Блок Tunning управляет параметрами главного регулятора. При использовании блока управления Tunning совместно с системой с исчезающим сигналом из промежуточной точки блок управляет параметрами дифференциатора рис. 4.1.



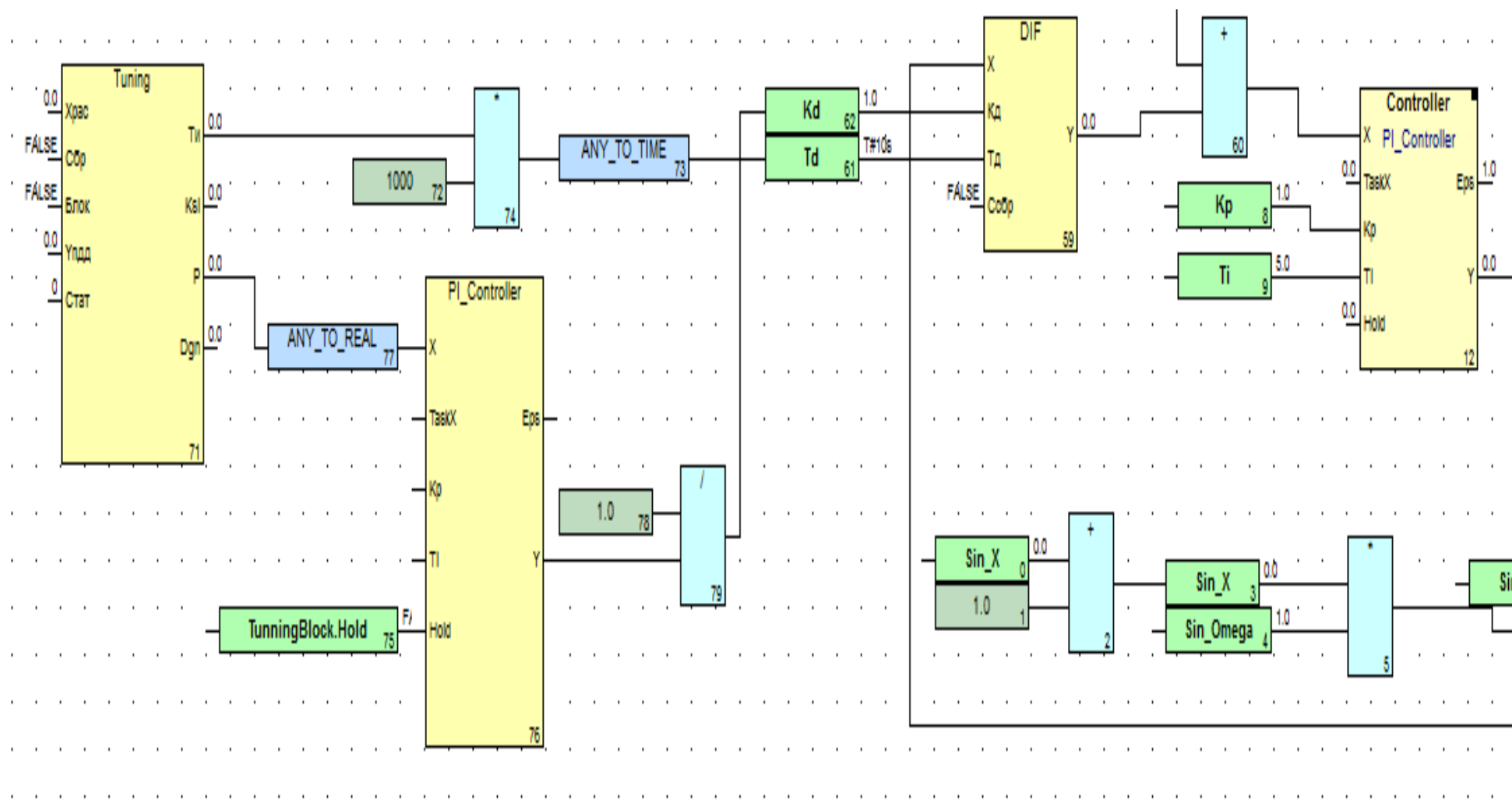


Рис. 3.23. Схема с дифференциатором

При изменении динамики объекта пропорционально изменяется время дифференцирования. Коэффициент дифференцирования изменяется обратно-пропорционально.

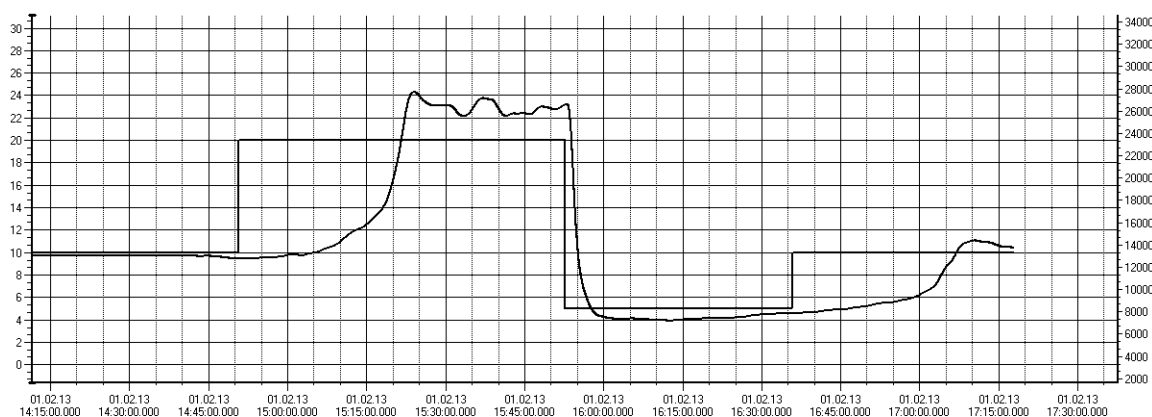
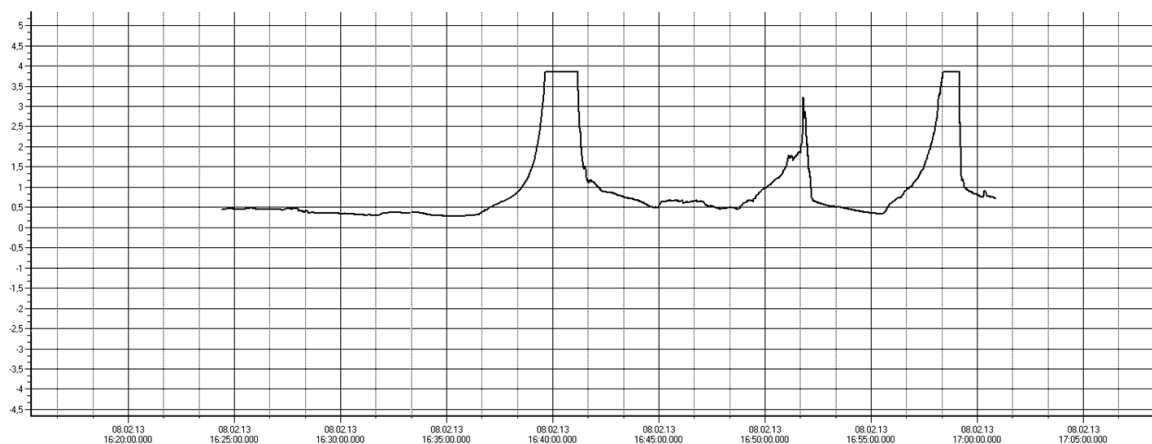


Рис. 3.24. Изменение времени дифференцирования при изменении постоянной времени объекта.



(светлый – изменение кр; темный – изменение альфы; тренд получен при изменении ко объекта – никак не получится настроить контур отслеживающий кр – есть сильные колебания параметра альфа даже при неизменном ко)

Рис. 3.25. Изменение коэффициента дифференцирования при изменении коэффициента усиления объекта.

Как отмечалось в разделе 3.6 этой главы, предъявляются следующие требования к системе диагностики:

1. Слежение за работой параметрического контура, т.е. отслеживание некоторого показателя качества процесса.
2. Безударный переход к эталонным настройкам системы.
3. Блокирование работы параметрического контура по внешней команде.

Команда блокирования работы прекращает добавление значений во внутренний буфер и замораживает значения выходных переменных (рисунок 3.22)

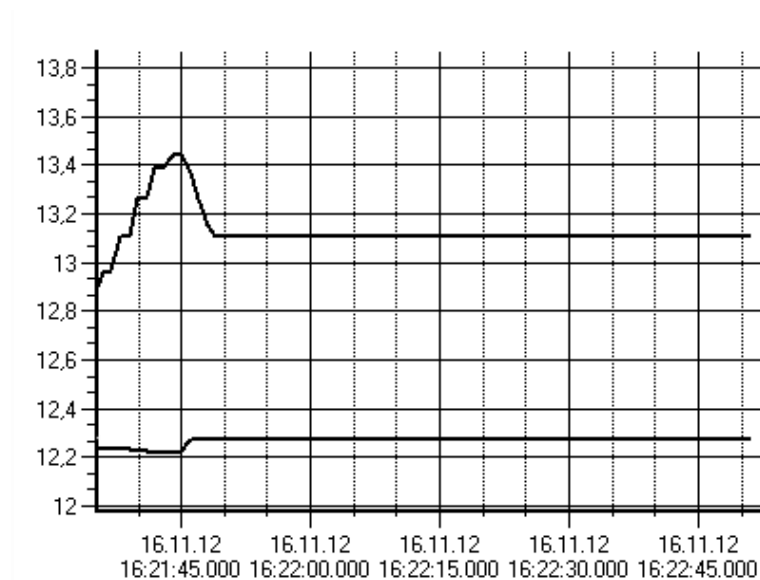


Рис. 3.26. Команда блокирования работы блока подстройки

Команда сброса вынуждает блок подстройки очистить внутренний буфер и присвоить локальным и выходным переменным их начальные значения. При этом значения выходных переменных изменяются не ступенькой, а с заданной наладчиком скоростью (рисунок 3.24.) Это предотвращает резкие срабатывания технологического регулятора при подаче команды сброса.

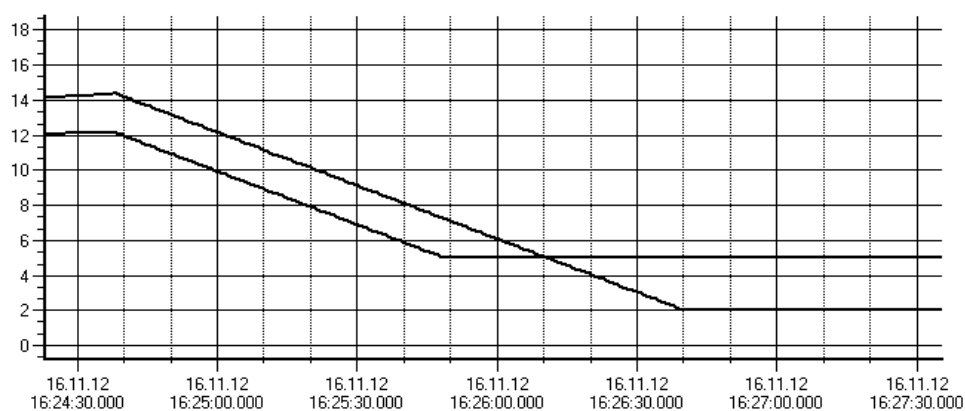


Рис. 3.27. Команда сброса работы блока подстройки

Более подробно работа этой подсистемы рассматривается в четвертой главе.

### 3.8.4. Экономическая эффективность

Реализованный алгоритм беспойсковой самонастраивающейся системы обеспечивает стабилизацию степени затухания на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений. На рисунке 3.22 показано, как изменяется значение степени затухания при изменении параметров объекта управления.

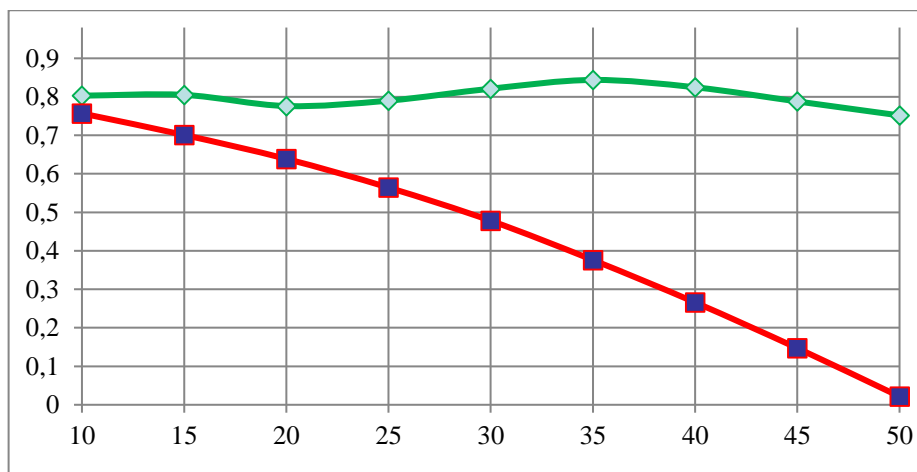


Рис. 3.28. Подстройка времени интегрирования технологического регулятора

Анализ графиков (рис. 4.22) показывает, что с увеличением постоянной времени объекта в классической системе степень затухания процесса (запас устойчивости) существенно уменьшается (практически приводит к потере устойчивости), а в адаптивной системе, благодаря параметрическому контуру, заданная степень затухания сохраняется.

Это открывает возможность оптимизации процессов управления по технологически обоснованному критерию, ориентированному на повышение эксплуатационной надёжности и долговечности теплоэнергетического оборудования. Это очень актуально прежде всего для пароперегревателей современных энергетических котлов.

Система регулирования температуры перегретого пара состоит, как правило, из нескольких последовательно включенных каскадов регулирования и предназначена для поддержания оптимального температурного режима всего пароперегревательного тракта. Особую роль выполняет последний регулятор температуры, который должен обеспечить поддержание заданного значения температуры перегретого пара в выходном коллекторе независимо от нагрузки.

Необходимость регулирования температура первичного пара определяется следующими факторами [124]:

- чрезмерное увеличение температуры первичного пара может привести к ухудшению температурного режима и снижению срока службы пароперегревателя;
- уменьшение температуры первичного пара, например на  $10^{\circ}\text{C}$ , эквивалентно перерасходу топлива на 0,2%.

Температура перегрева пара для котла зависит от тепловосприятия пароперегревателя и паровой нагрузки. При постоянной паровой нагрузке тепловосприятие определяется топочным режимом. Изменения паровой нагрузки приводят к перераспределению тепловосприятия между конвективной и радиационной частями пароперегревателя и изменению температуры пара на выходе.

К АСР температуры перегрева первичного пара предъявляются следующие требования:

- поддержание в СНР величины отклонения температуры первичного пара  $\Delta T_{пе}$  от номинальной температуры  $T_{пе}^{НОМ}$  – не более  $\pm 1\%$ , например, для параметров пара  $P_{пе}=13\text{Мпа}$  и  $T_{пе}^{НОМ}=540^{\circ}\text{C}$  величина  $\Delta T_{пе} \leq \pm 5^{\circ}\text{C}$  (согласно ПТЭ);
- при ступенчатом изменении нагрузки на 10% от исходной номинальной, максимальное отклонение  $\Delta T_{пе} \leq \pm 8^{\circ}\text{C}$ ;
- при ступенчатом изменении нагрузки на 10% величина интегрального квадратичного критерия не должна превышать  $5000(^{\circ}\text{C})^2 \cdot \text{с}$ .

Объект регулирования в данной АСР конструктивно представляет собой участок регулирования первичного пароперегревателя, который образуется частью поверхностей перегрева от места ввода охлаждающей воды до выходного коллектора, в котором необходимо поддерживать заданную температур  $T_{пе}$ .

В условиях действия случайных возмущений общеизвестные показатели качества переходных процессов не применимы. В классе линейных систем можно ограничиться двумя наиболее распространёнными характеристиками процессов – математическим ожиданием и дисперсией. Математическое ожидание характеризует стационарное состояние процесса, т.е. статику системы. Дисперсия же отражает динамику процессов, и поэтому является главным показателем точности управления.

Технический эффект АСУ ТП энергоблока во многом связан с повышением надежности работы котла. Благодаря АСУ ТП снижается уровень колебаний температур и давлений пара (а следовательно, и металла), а это благотворно влияет на работу жаропрочных сталей поверхностей нагрева котла [125].

Надежность поверхностей нагрева определяется двумя составляющими: безотказностью и долговечностью. Безотказность поверхностей нагрева характеризуется средним числом остановов котла в единицу времени, происходящих из-за повреждения поверхностей нагрева. Причиной такого останова (внезапного отказа) является наличие ослабленных элементов металла (из-за дефектов металла, конструкции, неправильной эксплуатации), которые исчерпали свой ресурс значительно раньше нормального срока. После такого останова поврежденный участок поверхности нагрева (обычно небольшой) заменяется и работоспособность восстанавливается.

Долговечность поверхности нагрева характеризуется сроком ее службы до полной замены. Причиной такой замены является исчерпание ресурса службы у основной массы металла из-за накопления необратимых процессов разрушения. Поскольку замена некоторых участков поверхности нагрева новыми при ликвидации внезапных отказов касается лишь малой доли всего металла поверхности нагрева, то обычно срок службы металла до замены не связан со средним числом внезапных отказов. Это позволяет анализировать безотказность и долговечность раздельно.

Безотказность котла зависит от дисперсии температур пара. Число ослабленных элементов поверхностей нагрева обычно не связано с уровнем колебаний температур пара. Однако уровень колебаний влияет на срок службы ослабленного элемента до его внезапного отказа. Если уровень колебаний снижается (например, при введении авторегулятора), то те же ослабленные элементы будут выходить из строя реже, число остановов блока в год уменьшится, т. е. появится технический эффект. Для определения эффекта необходимо иметь зависимости между безотказностью и статистическими характеристиками уровня колебаний температур пара – дисперсией и средним уровнем температур.

Технический эффект по безотказности котла от изменения дисперсии  $D$  выражается изменением среднегодового числа отказов котла  $\Delta\omega$ , 1/год:

$$\Delta\omega = (\Delta\bar{n}_c^B - \Delta\bar{n}_c^H) * k,$$

где  $\bar{n}_c^B$  – число отказов среднего котла, которое было бы в расчетном году при базовой дисперсии  $D^B$  1/год;  $\Delta\bar{n}_c^H$  – число отказов среднего котла в расчетном

году при новой дисперсии  $D^H$  1/год;  $k$  – коэффициент, учитывающий различие потоков отказов данного котла и среднего котла. Значения  $\bar{n}_c^B$  и  $\Delta\bar{n}_c^H$  определяются по соответствующему семейству ведущих функций потока отказов графически.

Таким образом, можно выделить следующие преимущества использования системы:

- снижение потока отказов;
- снижение количества остановов;
- достигается лучшая экономичность, дополнительная выработка, безопасность.

Таким образом, были получены следующие выводы:

4. Проанализирована структура ПТК, определен уровень внедрения адаптивной системы.
5. Разработана подсистема диагностики функционирования основной системы и выполнена её реализация с помощью языка C#.
6. В соответствии с уровнем в структуре ПТК выбран язык программирования C# и с его помощью реализованы разработанные блок-схемы алгоритмов.
7. Протестирована работа системы на тренажере реальной системы управления.

## 4. МЕТОДИКА НАЛАДКИ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

### 4.1. Постановка задачи

Система автоматического регулирования технологического процесса представляет собой совокупность регулируемого объекта и автоматического регулятора, взаимодействующих друг с другом в процессе совместного функционирования. Характер протекающего в регулируемом объекте технологического процесса, конструктивные особенности оборудования, требования к качеству производимого продукта или энергии, а также условия эксплуатации определяют методику наладки системы управления. В данном случае в систему добавляется ещё один контур – параметрический контур настройки технологического регулятора, что усложняет общую наладку системы.

Специфика адаптивной автоматической системы регулирования, порождает нехарактерные для наладки таких систем процедуры, требующие понимания их сути. Прежде всего это обусловлено тем, что одноконтурная АСР, соответствующая классу одномерных систем, фактически становится многомерной (трёхмерной). Теперь вектор управляемых переменных включает не только  $y$  – основную координату системы (объекта управления), но и два вычисляемых параметра ошибки управления как случайного процесса  $\varepsilon(t)$  – среднюю частоту  $\omega_{cp}(t)$  и характеристику затухания корреляционной функции  $\alpha(t)$ , косвенно связанную с параметром  $\psi(t)$ , отвечающим за запас устойчивости АСР. Управляющими воздействиями для них являются:

- положение регулирующего органа;
- коэффициент усиления регулятора;
- постоянная интегрирования регулятора.

### 4.2. Параметры блока адаптивной подстройки системы регулирования

В 1998 году Международная электротехническая комиссия МЭК ввела стандарт программирования управляющих систем IEC 61131-3, включающий пять языков: два вербальных, два графических и один комбинированный.

Как было показано в третьей главе, в части 3.7.2, реализация алгоритма выполнена в виде функционального блока, имеющего входы, выходы и



собственную память, в которой хранятся результаты вычислений между циклами работы технологической программы.

В третьей главе, в разделе 3.7.2, был представлен блок адаптивной подстройки технологического регулятора. Перечень его параметров был приведен в третьей главе в таблицах 3.4, 3.5, 3.6.

Все параметры блока разделены на три группы, а именно:

- входные переменные;
- локальные переменные;
- выходные переменные.

Выходные переменные соответствуют рассчитанным алгоритмом показателям.

Как было показано во второй главе, расчетное значение постоянной времени вычисляется по начальному значению, заданному пользователем в переменной InitialTi, с учетом изменения величины средней частоты процесса. Рассчитанная таким образом постоянная времени может либо подключаться непосредственно к соответствующему входу регулятора (рисунок 4.1.), либо заводится на него через блок PER, обеспечивающий возможность переключения между рассчитанным и заданным значениями постоянной времени (рисунок 4.2.). Реализация блока PER позволяет осуществлять переключения между различными значениями с заданной скоростью изменения выходной величины, т.н. динамической балансировкой.

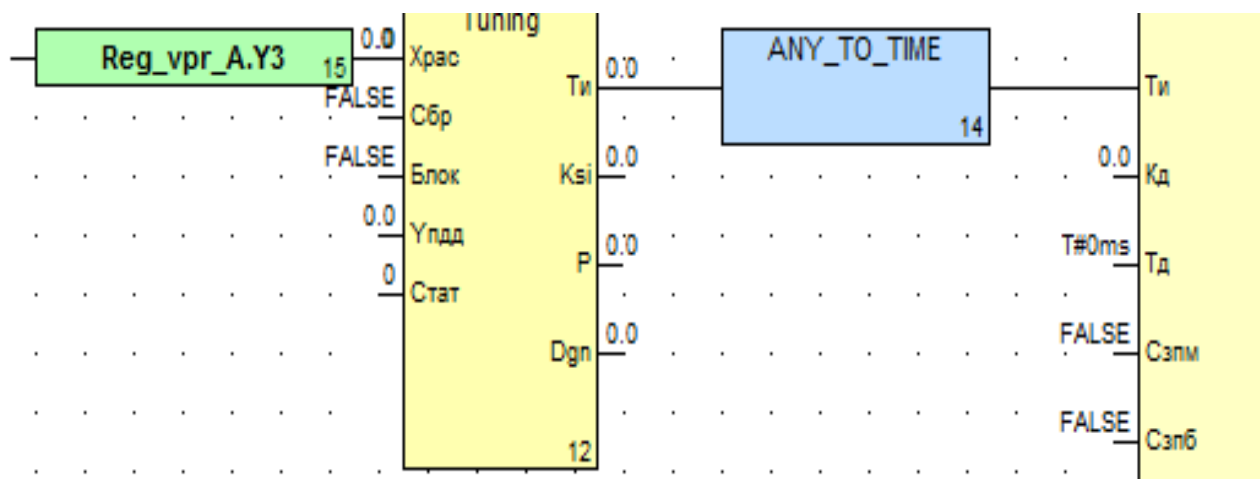


Рис. 4.1. Пример подстройки постоянной времени

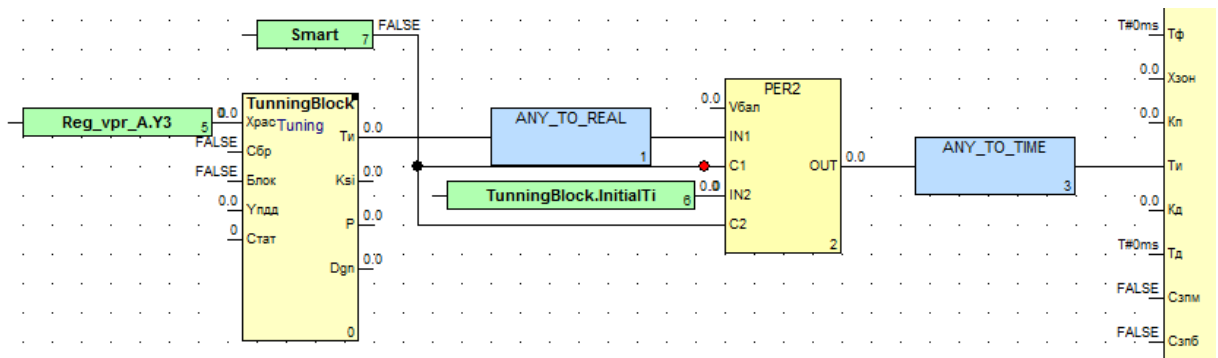


Рис. 4.2. Пример подстройки постоянной времени с балансировкой при откате к эталонным настройкам

Во втором случае в качестве переменной управляющей переключениями блока PER может использоваться значение переменной, подаваемое на вход  $C_{сбр}$  блока Tunning. В этом случае откат к эталонным настройкам будет протекать с плавным изменением величины постоянной времени с одновременным сбросом внутренних переменных блока подстройки. В любом случае рассчитанное алгоритмом значение времени интегрирования подается на вход  $T_i$  технологического регулятора.

Управление коэффициентом усиления технологического регулятора осуществляется дополнительным параметрическим контуром. В качестве регулируемого параметра этому контуру выступает рассчитанный блоком показатель запаса устойчивости системы.

Типичная схема параметрического контура представлена на рисунке 4.3.

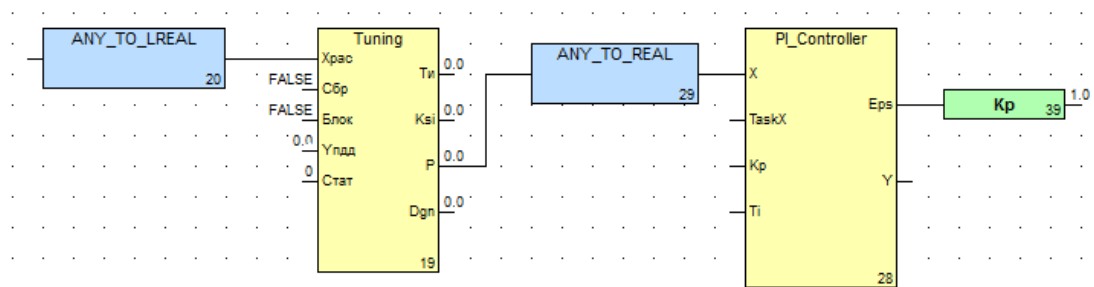


Рис. 4.3. Пример подстройки коэффициента усиления

В качестве закона регулирования в параметрическом контуре следует выбрать ПИ или И-закон регулирования. «И» составляющая необходима для устранения статической ошибки управления, которой не должно быть при управлении коэффициентом усиления технологического регулятора.

### 4.3. Методика инициализации адаптивной системы подстройки

Инициализация адаптивной системы выполняется поэтапно.

Во избежание наложения резонансных явлений, характерных для замкнутых систем, требуется прежде всего принять концептуальное решение о частотном размежевании контуров. Для этого следует принять во внимание те технологические особенности, которые явились обоснованием возможности применения обсуждаемого здесь варианта адаптивной системы, а именно:

- синхронность изменения всех связанных между собой теплофизических процессов под влиянием внешних или внутренних факторов;
- относительную инерционность теплофизических процессов;
- предопределённость нелинейного характера статических свойств объекта управления не только режимными, но и конструктивными факторами, прежде всего связанными с характеристиками регулирующих органов.

А это позволяет распределить задачи, реализуемые контурами управления, по степени снижения быстродействия следующим образом:

- координатный контур

$$K_1 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \mu \rightarrow y,$$

- параметрический контур

$$K_2 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha \rightarrow k_p \rightarrow \mu \rightarrow y,$$

- параметрический контур

$$K_3 = y \rightarrow \varepsilon \rightarrow \omega_{cp} \rightarrow T_u \rightarrow \mu \rightarrow y.$$

Все характерные для  $K_1$  обстоятельства достаточно хорошо изучены и могут быть должным образом использованы в процессе начальной настройки алгоритма регулятора  $R_1$  в одноконтурной АСР. При этом должны быть учтены все необходимые технологические требования  $T_\varepsilon$  к качеству управления. Результатами оптимизации  $K_1$ , т.е. проекции  $T_\varepsilon$  на параметры ПИ-алгоритма при фиксированных начальных (базовых) свойствах объекта управления  $W_0$ , являются не только оптимальные (базовые) значения параметров  $k_{p0}$  и  $T_{u0}$ , но и значения показателей  $(\omega_{cp})_0$  и  $\alpha_0$ , оценивающих свойства основного процесса  $\varepsilon(t)$ :

$$R_1^{(0)} : T_\varepsilon \xrightarrow{B_1} \begin{Bmatrix} k_p^{(0)} \\ T_u^{(0)} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} \alpha^{(0)} \\ \omega_{cp}^{(0)} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Алгоритм управления, реализуемый в контуре  $K_2$ , призван обеспечить стабилизацию заданного запаса устойчивости, оцениваемого значением косвенного показателя  $\alpha$ , на уровне  $\alpha^{(0)}$ . В качестве алгоритма регулятора  $R_2$  принято решение использовать П-закон. Это объясняется желанием иметь относительно высокое быстродействие. Характерный для такого алгоритма статизм не имеет принципиального значения, т.к. может быть нейтрализован системой третьего уровня. Неотъемлемой частью функций  $R_2$  являются online-оценивание косвенного показателя запаса устойчивости  $\alpha$  на основе обработки ограниченных по длине реализаций случайного процесса:

$$E_2 = \{\varepsilon_i\}, \forall i \in [1, N_2] \quad (2)$$

Принципиальное значение имеет и шаг квантования  $T_{02}$ , влияющий на длительность накопления данных в буфере программы. Накопленный массив исходных данных  $E_2$  проходит через фильтр  $\Phi_2$  с целью удаления малоинформативной информации на частотах, не имеющих отношения к решению задач в контуре  $K_2$ .

Следует отметить, что для более полной оценка влияния параметров алгоритмов  $\Phi_2$  и  $A_2$  на точность управления необходимо исходить не только из общего алгоритма регулятора  $R_2$

$$R_2 : \begin{cases} E_2(t) \xrightarrow{\Phi_2} \hat{E}_2(t) \xrightarrow{A_2} \hat{\alpha}(t) \xrightarrow{B_2} M_{kp}(t) \\ B_2 : M_{kp}(t) = 1 + k_2 \cdot [\hat{\alpha}(t) - \alpha^{(0)}], \\ k_p(t) = M_{kp}(t) \cdot k_p^{(0)} \end{cases} \quad (4)$$

но и из зависимости запаса устойчивости системы (в формате эквивалентной степени затухания переходных процессов  $\psi$ ) от коэффициента усиления регулятора  $R_1$ .

Параметрами  $R_2$  являются:

- типы фильтров  $\Phi_2$  и  $A_2$ ,
- размеры буферных массивов  $N_2$  и  $n_2$ ,
- коэффициент усиления  $k_2$ .

Изложенное здесь для контура  $K_2$  в полной мере может быть отнесено и к контуру  $K_3$ .

$$R_3 : \begin{cases} E_3(t) \xrightarrow{\Phi_3} \hat{E}_3(t) \xrightarrow{A_3} \omega_{cp}(t) \xrightarrow{B_3} M_{Ti}(t) \\ B_3 : M_{Ti}(t) = k_3 \int_0^t [\omega_{cp}(\varphi) - \omega_{cp}^{(0)}] \cdot d\varphi, \\ T_i(t) = M_{Ti}(t) \cdot T_i^{(0)} \end{cases} \quad (5)$$

Существенным отличием контура  $K_3$  является решение, направленное на упоминавшееся выше размежевание резонансных частот контуров и заключающееся в выборе И-алгоритма  $B_3$ , обладающего пониженной рабочей частотой и астатическим качеством управления.

Параметрами регулятора  $R_3$  являются:

- типы фильтров  $\Phi_3$  и  $A_3$ ,
- размеры буферных массивов  $N_3$  и  $n_3$ ,
- коэффициент усиления  $k_3$ .

Методикой настройки адаптивной системы предусматривается выполнение трёх шагов, обеспечивающих последовательную оптимизацию регуляторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . При обосновании значений параметров алгоритмов  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  используются традиционные для теории АСР методы, основанные на частотном анализе систем.

На основании выше сказанного была разработана процедура инициализации адаптивной системы подстройки.

1. Объем работы при инициализации системы подстройки делится на четыре этапа:
  - a. подготовка;
  - b. инициализация контура динамики;
  - c. инициализация контура статики;
  - d. испытания системы.
2. При выполнении подготовительных работ перед инициализацией следует:
  - a. ознакомиться со схемой системы регулирования;
  - b. ознакомиться с особенностями работы оборудования (условиями пуска и останова, поведением оборудования при переменных режимах, действием защит, основными возмущениями, влияющими на работу оборудования);

- с. ознакомиться с заданными для объектов параметрами настройки технологических регуляторов;
  - d. определить характеристики РО;
  - е. наладить систему измерений для автоматической записи параметров;
3. При инициализации контура, отслеживающего изменение динамики объекта, необходимо:
- определить частотный диапазон функционирования алгоритма вычисления средней частоты на основании особенностей работы оборудования и свойств объекта управления, т.е.  $\omega_{min}$  и  $\omega_{max}$ .

Частотный диапазон выбирается, исходя из свойств объекта управления и периода изменений режима работы оборудования, при этом следует учитывать следующие замечания:

- При изменении динамики объекта выбранного частотного диапазона может оказаться недостаточно, следовательно, частотный диапазон следует выбирать с некоторым запасом.
- Для исключения влияния параметрических контуров друг на друга они должны быть развязаны по частотам. При этом контур, отвечающий за расчет постоянной времени, должен быть более инерционным. Таким образом, возможно, потребуется увеличить размер массива исходных данных для расчета спектральной плотности.

Проведя эксперимент по изучению реакции адаптивной системы на гармонические изменения динамики объекта получили следующие частотные характеристики блока идентификации, в зависимости от размера буфера данных (рис. 4.5 и 4.6).

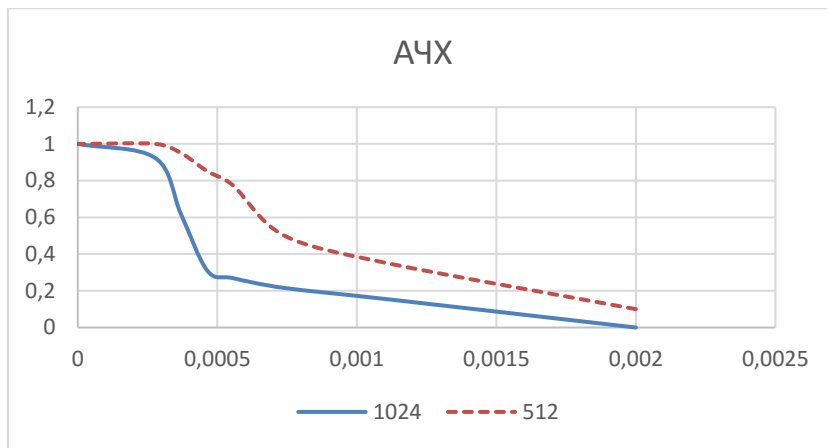


Рис. 4.4. Амплитудно-частотная характеристика

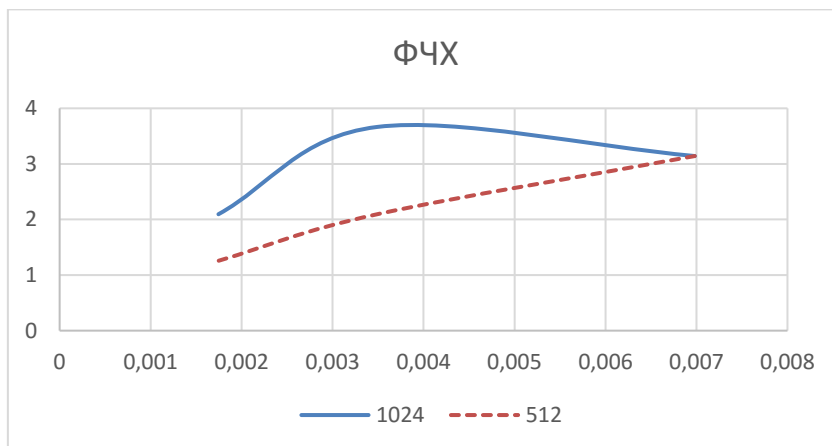


Рис. 4.5. Фазо-частотная характеристика

Сравнение частотных характеристик позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением размера буфера данных возрастает инерционность адаптивной системы;
- при больших значениях размера буфера данных и высокочастотных изменениях свойств объекта управления адаптивная система может оказаться неэффективной и ухудшать качество управления;

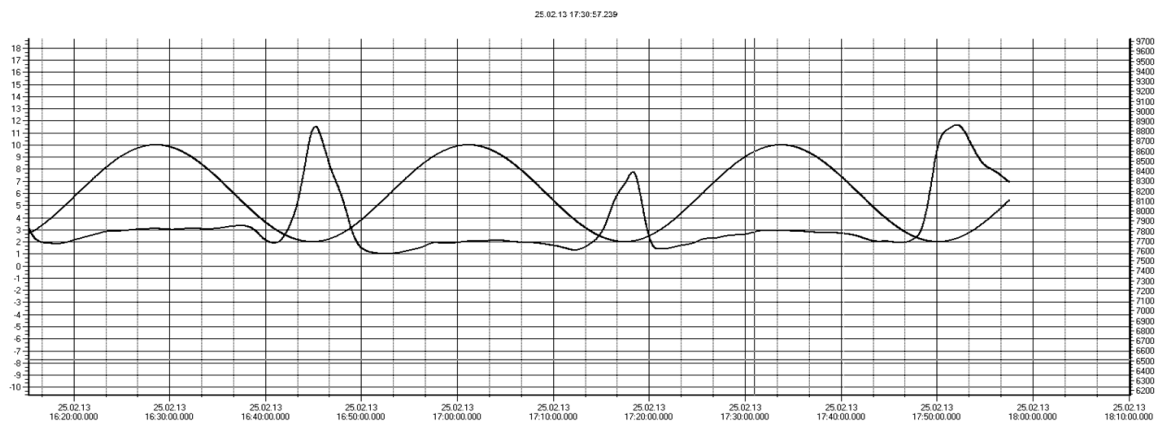


Рис. 4.6. Пример работы системы в противофазе (Тренды изменения динамики объекта и реакции адаптивной системы).

Учитывая, что изменение свойств объекта управления должно повлечь за собой также изменения частотного диапазона, он выбирается с некоторым запасом, т.е. реализуется робастное управление. Дословно термин "робастное управление" означает "грубое управление", т.е. управление с определенным запасом, например, по устойчивости. Практическая ценность задачи робастного управления связана с тем, что синтезированная по критериям устойчивости система управления может иметь малую чувствительность к изменению параметров или большую. В первом случае говорят о грубости системы или о ее робастности, во втором случае система практически неработоспособна, так как малейший уход параметров ведет к потере устойчивости. Постановка задачи робастного управления связана с требованием сохранения работоспособности системы при наличии неопределенностей в ее описании.

Таким образом, на основании выше сказанного были получены номограммы выбора размера буфера и шага по времени по частоте изменения свойств объекта управления.

- б. выставить размер буфера данных *TiBufferLength* и шаг добавления в буфер *CycleRatio* в соответствии выбранному частотному диапазону.

Используя материал второй главы, проанализируем длину массива исходных данных процесса. Она определяется, исходя из границ частотного диапазона. Количество точек в массиве связано с минимальной и максимальной частотой следующими соотношениями:

$$\omega_{\min} = \frac{\pi}{T_n} = \frac{\pi}{N_r \cdot \Delta_0} ; \quad \omega_{\max}^H = \frac{\pi}{\Delta_0} .$$

Следовательно,

$$N_r = \text{int eger} \frac{\pi}{\omega_{\min} \cdot \Delta_0} = \text{int eger} \frac{\omega_{\max}^H}{\omega_{\min}} .$$

Следует учитывать, что увеличение размера массива исходных данных увеличивает инерционность расчета и задержку начала функционирования алгоритма, так как перед началом работы должен заполниться входной буфер.

Выбор размера буфера данных *TiBufferLength* и шаг добавления в буфер *CycleRatio* происходит по соответствующим номограммам (рис. 4.6).



При уменьшении шага по времени добавления точек в буфер увеличивается верхняя граница частотного диапазона, но при этом также увеличивается и объем памяти, необходимый для работы алгоритма. При увеличении шага по времени высокие частоты начинают фильтроваться буфером данных.

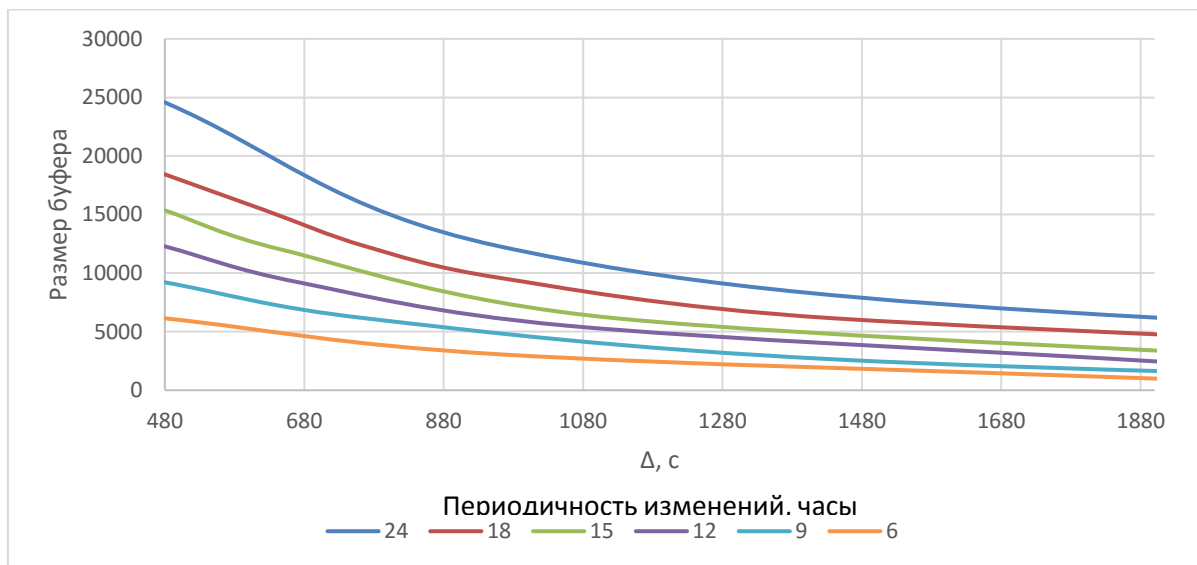


Рис. 4.6. Номограмма выбора параметров адаптивного алгоритма по гармоническим колебаниям свойств объекта

- с. по полученной в результате расчета спектральной плотности принять решение о необходимости корректировки частотного диапазона (соответственно, параметров длины массива *TiBufferLength* и шага работы *CycleRatio*).

Как видно из графика спектральной плотности на рисунке 4.7, частотный диапазон явно следует сместить в сторону бóльших частот. Для этого увеличим шаг по времени добавления данных в буфер, при этом уменьшив размер самого буфера.

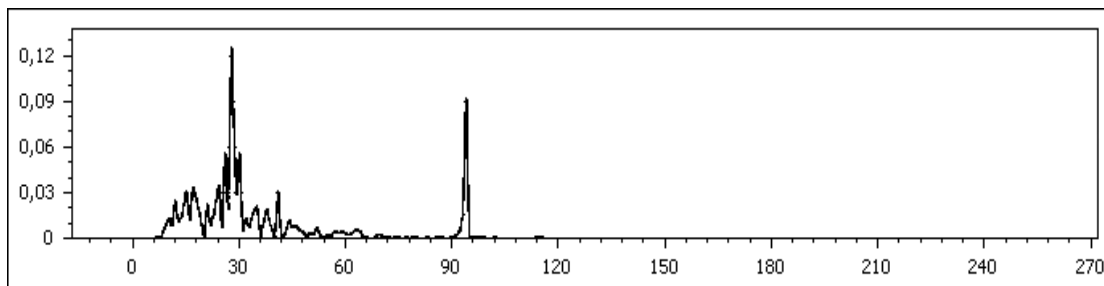


Рис. 4.7. Спектральная плотность. Размер буфера равен 512, шаг 20 с.

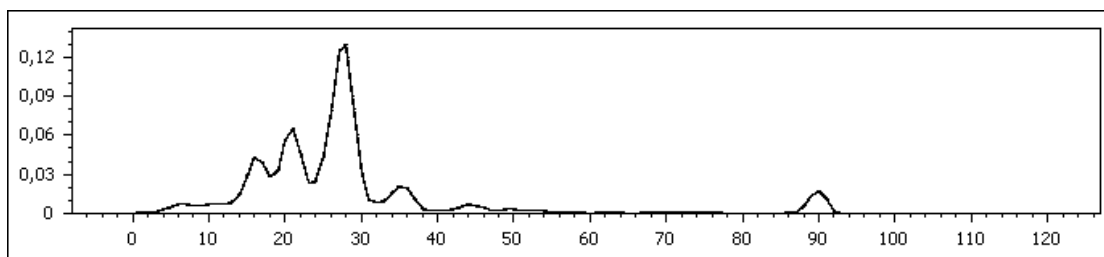


Рис. 4.8. Спектральная плотность. Размер буфера равен 256, шаг 40 с.

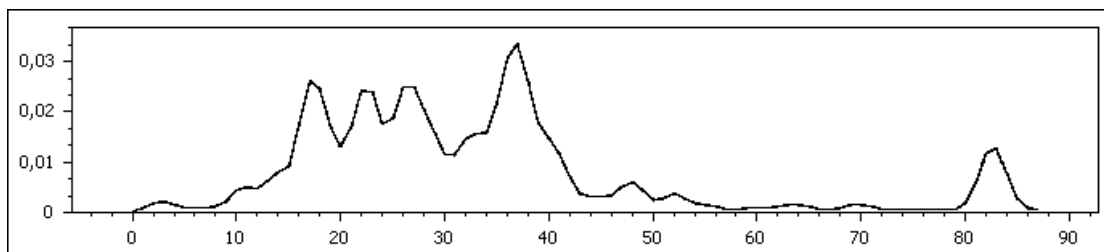


Рис. 4.9. Спектральная плотность. Размер буфера равен 128, шаг 80 с.

Как видно из рисунков 4.8 и 4.9, верхняя граница диапазона частот уменьшается с увеличением шага добавления данных, при этом нижняя граница остается неизменной за счет пропорционального изменения размера буфера. Фактически этими действиями мы увеличиваем масштаб интересующего нас диапазона.

- d. выбрать тип фильтра, задав значение переменной *FilterKind*, и определить его параметры, т.е. частоту фильтрации, указав её значение в переменной *FilterTFreq*.

Процедура фильтрации исходного массива данных занимает важное место в настройке. Параметрами настройки сглаживающего окна являются его тип и частота фильтрации. Фильтр исходного массива, содержащего значения оперативной ошибки управления, должен быть выбран таким образом, чтобы получившийся, в результате преобразования Фурье график спектральной плотности содержал только интересные для расчета частоты. Преимущества и недостатки различных фильтров обсуждались в главе 2.3. Свойства оконных фильтров, использующихся в блоке подстройки, приводились там же. По материалам, приведенным в 2 главе, можно сделать вывод, что прямоугольное окно более простое, но его АЧХ менее совершенна, т.к. порождает боковые гармоники, существенно искажающие спектр фильтрованного процесса в области средних и высоких частот. Частотная характеристика треугольного фильтра по этой причине более благоприятна, но имеет удвоенное значение кратной частоты для гармоник. На

рисунке 4.10 показан график спектральной плотности без фильтрации. Для целей расчета второй пик на этом графике интереса не представляет. На рисунке 4.11 показана спектральная плотность отфильтрованного сигнала ошибки управления.

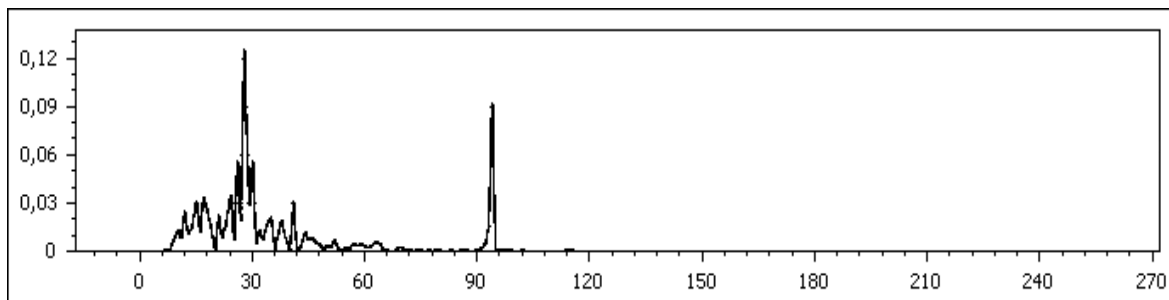


Рис. 4.10. Спектральная плотность без применения сглаживающих окон

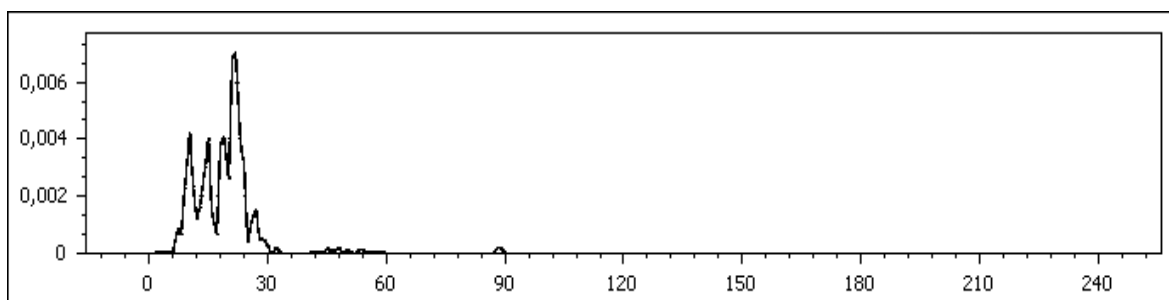


Рис. 4.11. Спектральная плотность с применением треугольного сглаживающего окна исходного массива

- е. определить необходимость процедуры сглаживания спектральной плотности, установив в параметр *UseFftFilter* значение «ИСТИНА» либо «ЛОЖЬ», и её кратность, задав значение в переменной *FftFilterRatio*.

По полученной в результате преобразования Фурье спектральной плотности будет рассчитана средняя частота процесса. Для расчета средней частоты целесообразнее использовать сглаженный график спектральной плотности. В соответствии с материалом второй главы для сглаживания спектра используется треугольное скользящее окно фиксированной ширины. При этом для достижения лучшего эффекта сглаживание может выполняться несколько раз. На рисунке 4.9 показан график сглаженной спектральной плотности. Следует отметить, что желательно выполнять процедуру сглаживания спектральной плотности хотя бы один раз.

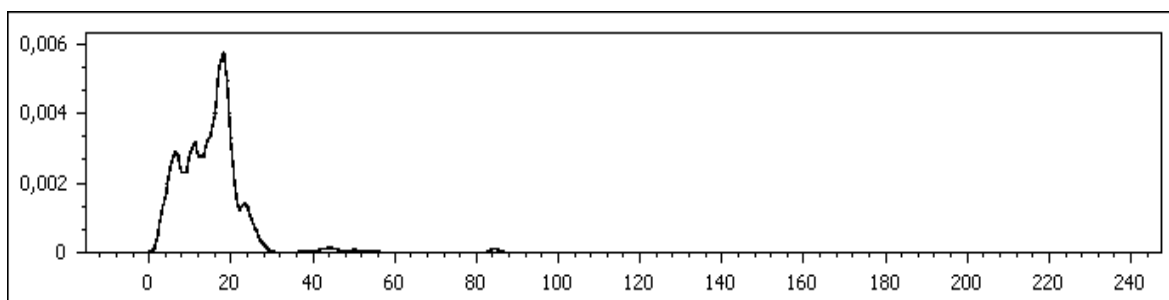


Рис. 4.12. График сглаженной спектральной плотности

- f. проверить работу контура и при необходимости скорректировать параметры настройки

После того как блок подстройки проработает какое-то время, для определения дальнейших действий следует руководствоваться соображениями, приведенными ниже. Если полученное в результате расчета значение времени интегрирования технологического регулятора изменяется со временем в незначительных пределах, настройку первого контура можно считать законченной. Если полученная постоянная времени изменяется в больших пределах, следует вернуться к началу процедуры настройки и либо выбрать другой частотный диапазон, либо скорректировать параметры фильтра.

На рисунке 4.13 показан тренд постоянной времени при неизменных свойствах объекта управления. Тренд времени интегрирования регулятора при увеличении постоянной времени объекта в два раза показан на рисунке 4.14. При уменьшении на рисунке 4.15. При периодических изменениях свойств объекта управления адаптивная на рисунке 4.16. В итоге при изменении постоянной времени объекта управления алгоритм подстройки пропорционально изменяет время интегрирования регулятора, благодаря чему качество управления сохраняется.

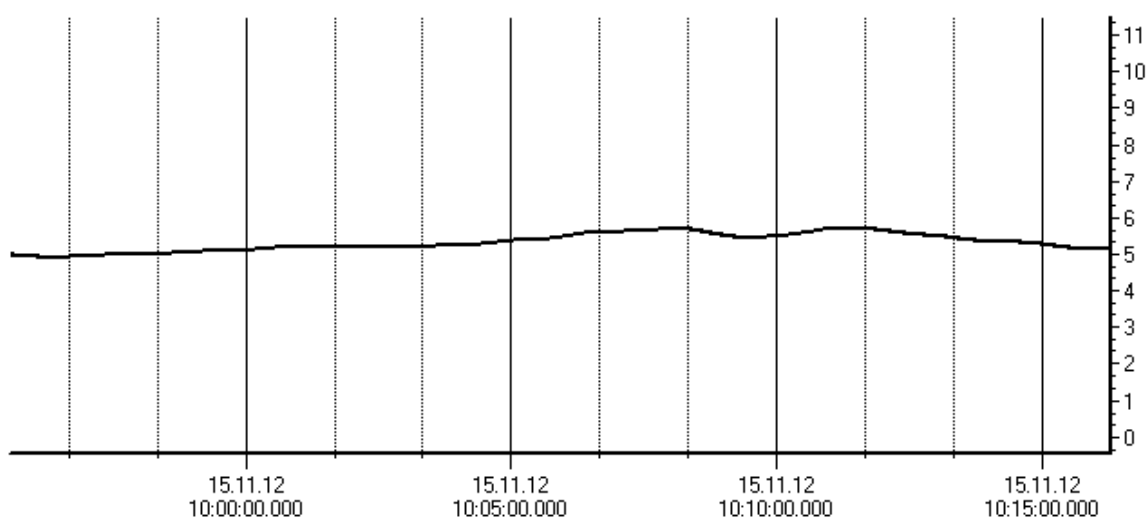


Рис. 4.13. Тренд времени интегрирования при неизменных свойствах объекта управления

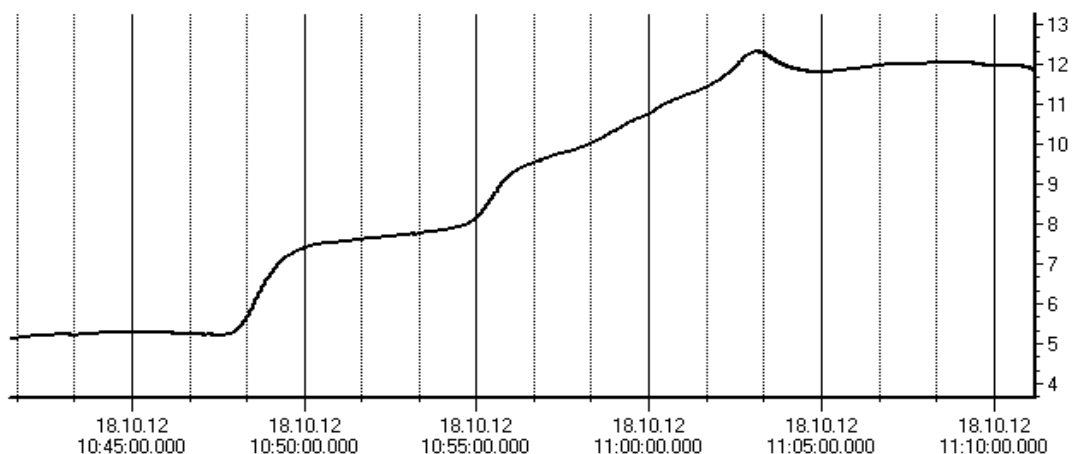


Рис. 4.14. Тренд времени интегрирования при увеличении масштаба времени объекта управления

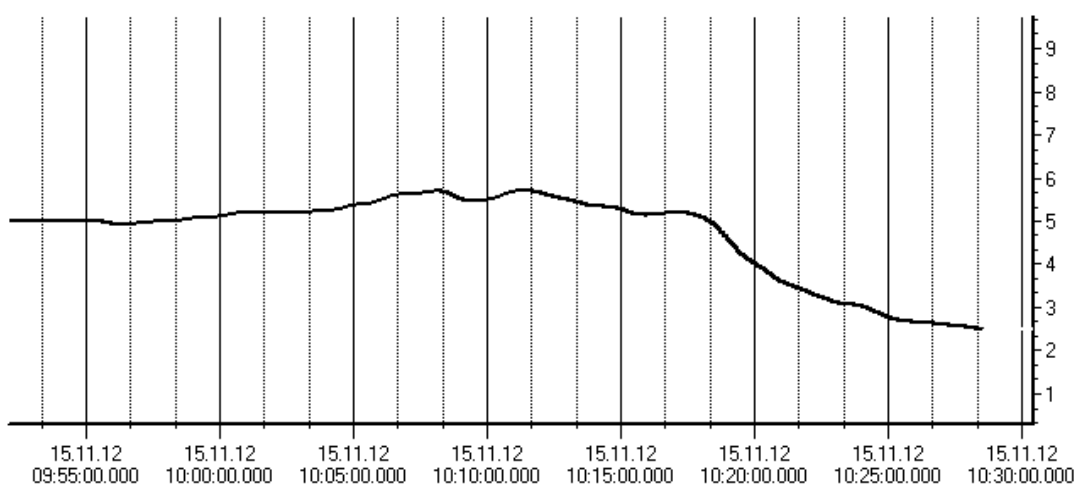


Рис. 4.15. Тренд времени интегрирования при уменьшении масштаба времени объекта управления

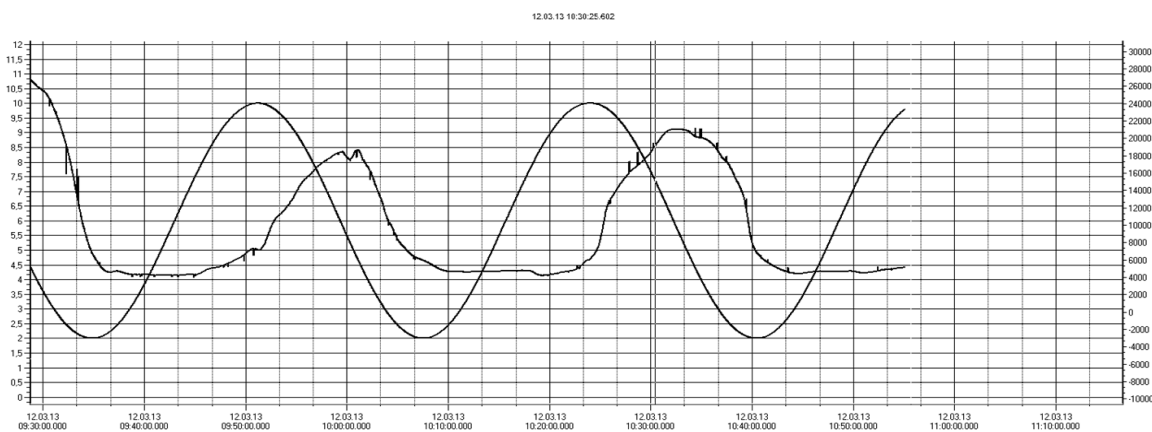


Рис. 4.16. Тренд времени интегрирования при периодических изменениях масштаба времени объекта управления

4. При инициализации контура, отслеживающего изменение статики объекта, следует:

- а. выбрать размер буфера *KpBufferLength* и сдвиг корреляции *CorrelationOffset* таким образом, чтобы полученная функция имела явно выраженную колебательность

При выборе размера массива исходных данных следует руководствоваться рекомендациями приведенными выше. Так как параметрические контуры адаптивного блока должны быть развязаны по частотам, размер буфера данных для вычисления корреляционной функции должен быть меньше размера буфера данных, предназначенного для вычисления спектральной плотности. Подстройкой величины сдвига получим корреляционную функцию с требуемой колебательностью (рисунки 4.17, 4.18 и 4.19).

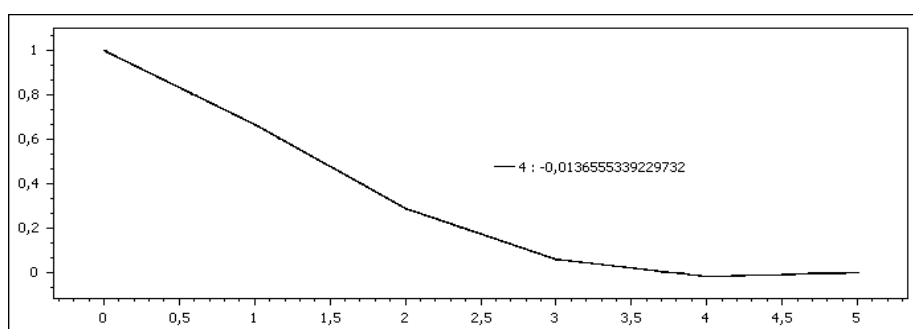


Рис. 4.17. Корреляционная функция, размер массива равен 100, сдвиг 5

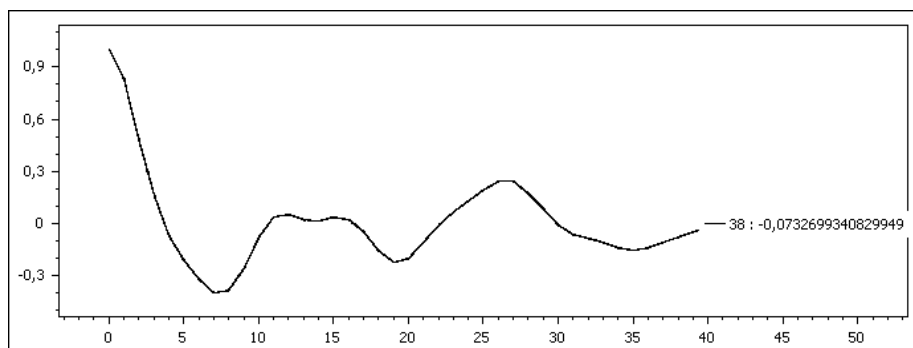


Рис. 4.18. Корреляционная функция, размер массива равен 100, сдвиг 50

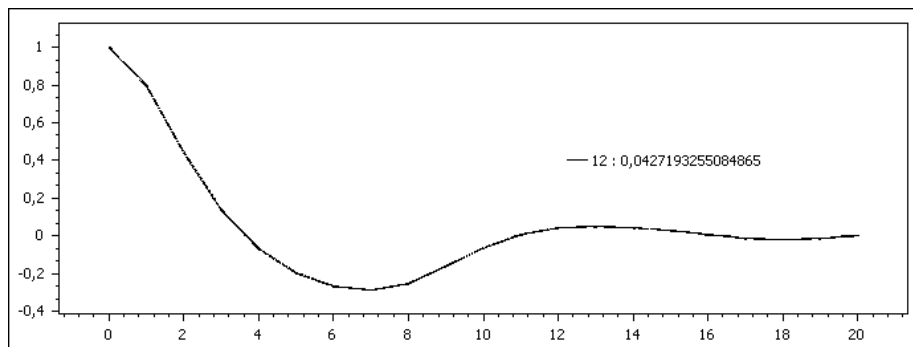


Рис. 4.19. Корреляционная функция, размер массива равен 100, сдвиг 20

- б. выбрать тип фильтра, задав значение переменной *FilterKind*, и определить его параметры, т.е. частоту фильтрации, указав её значение в переменной *FilterKFreq*

Использование фильтра исходного массива может улучшить результат предыдущего этапа (рисунок 4.20.). В качестве фильтра исходных данных применяются те же сглаживающие окна, что и для фильтрации исходных данных первого контура. Таким образом, для выбора параметров этого фильтра можно руководствоваться соображениями, изложенными выше при описании процедуры настройки первого контура.

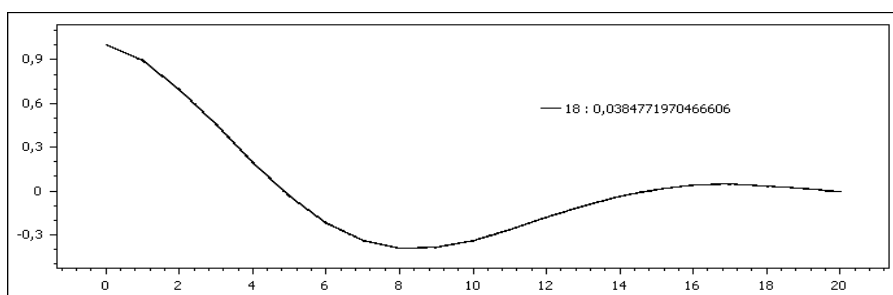


Рис. 4.20. Корреляционная функция, отфильтрованного исходного массива

- с. проверить работу алгоритма расчета перерегулирования или степени затухания и при необходимости скорректировать параметры настройки

После того как блок подстройки проработает какое-то время, для определения дальнейших действий следует руководствоваться соображениями, приведенными ниже. Если полученное в результате расчета значение перерегулирования изменяется со временем в незначительных пределах, настройку расчета показателя качества можно считать законченной. Если полученное значение изменяется в больших пределах, следует вернуться к началу процедуры настройки.

На рисунке 4.21 показан тренд значения перерегулирования при неизменных свойствах объекта управления.



Рис. 4.21. Тренд значения перерегулирования при неизменных свойствах объекта управления

Кроме того, следует провести процедуру сглаживания полученной функции. Как отмечалось в главе 2.3, для сглаживания корреляционной функции можно использовать специальными корреляционными окнами - окном Тьюки или Парзена. В отличие от скользящих окон все корреляционные окна фиксированы. Их ширина вычисляется блоком подстройки автоматически. В алгоритме используется окно Тьюки, поскольку оно обладает незначительным просачиванием сигнала на гармониках и меньшей (нежели у окна Парзена) полосой пропускания. Отключения сглаживания этим окном не предусмотрено.

На рисунке 4.22 показан тренд значения перерегулирования при изменении коэффициента усиления объекта управления в 10 раз.

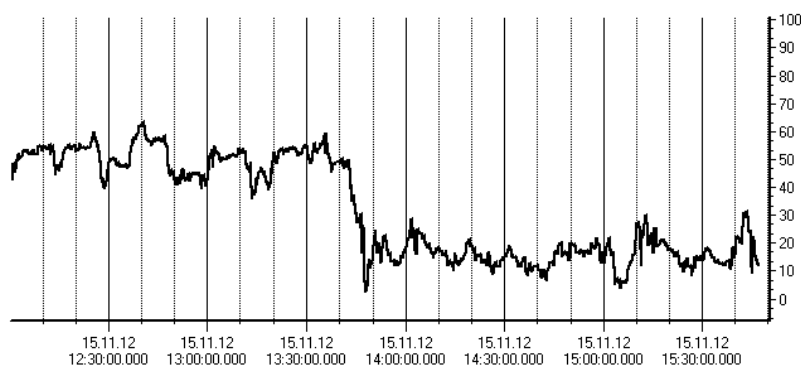


Рис. 4.22. Тренд значения перерегулирования при изменении коэффициента усиления в десять раз

- d. наладить параметрический регулятор, найдя его значения коэффициента усиления  $k_p$  и времени интегрирования  $T_i$ , используя одну из методик настройки ПИ-регулятора

После того как первый этап настройки закончен, можно приступить к наладке параметрического регулятора. В результате при изменении значения эквивалентной степени затухания параметрический регулятор меняет значения коэффициента усиления технологического регулятора. В качестве закона



регулирования в параметрическом контуре следует выбрать ПИ или И-закон регулирования. «И» составляющая необходима для устранения статической ошибки управления, которой не должно быть при подстройке коэффициента усиления технологического регулятора.

Тренд, изображенный на рисунке 4.22, можно воспринимать как кривую разгона объекта управления параметрического контура при нанесении возмущения. По полученной кривой определим параметры регулятора, используя один из методов настройки ПИ-регуляторов. В результате расчета имеем –  $k_p = 0,02$ ,  $T_i = 80$ .

- е. проверить работу контура подстройки коэффициента усиления технологического регулятора и при необходимости скорректировать параметры настройки

Проверим работу контура нанесением возмущения, изменив коэффициент усиления объекта управления в 10 раз.

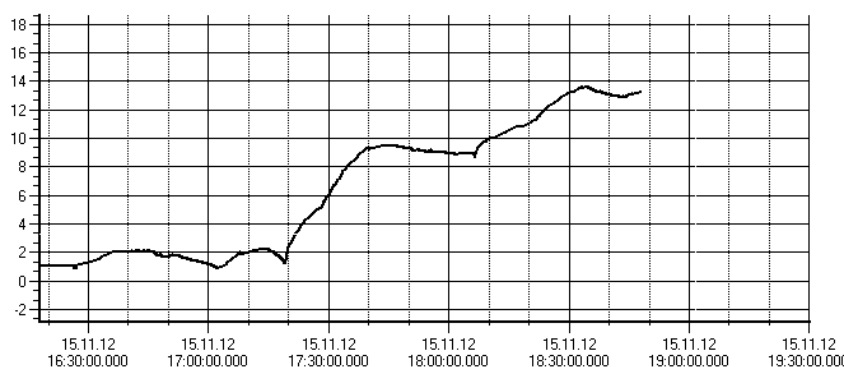


Рис. 4.23. Подстройка коэффициента усиления технологического регулятора

При изменении коэффициента усиления объекта в десять раз коэффициент регулятора изменился, как это видно на графике (рисунок 4.23.) Таким образом, несмотря на изменение свойств объекта, качество управления сохраняется, благодаря адекватному изменению коэффициента технологического регулятора.

- 5. На последнем этапе проводятся испытания системы. Испытанием системы адаптивной подстройки завершаются иницирующие работы. Объем работы при испытаниях зависит от сложности системы регулирования и технологических особенностей оборудования. Испытания должны проводиться при следующих условиях:

- a. Оборудование находится в режиме, на который рассчитывался испытываемый технологический регулятор
- b. Испытываемый регулятор находится в работе и поддерживает заданное значение регулируемой величины
- c. Регулируемый диапазон достаточен для устранения наносимых во время испытаний возмущений
- d. Контура адаптивной системы подстройки развязаны по частотам и не оказывают влияние друг на друга

Так при изменении коэффициента усиления объекта должен изменяться лишь коэффициент технологического регулятора (рисунки 3.24 и 3.25).

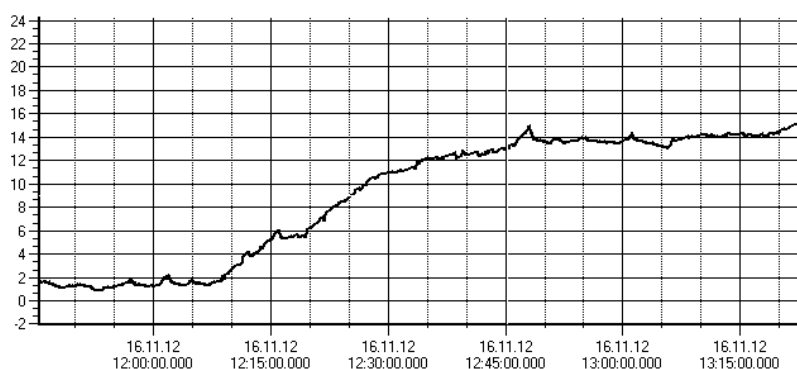


Рис. 4.24. Подстройка коэффициента усиления технологического регулятора

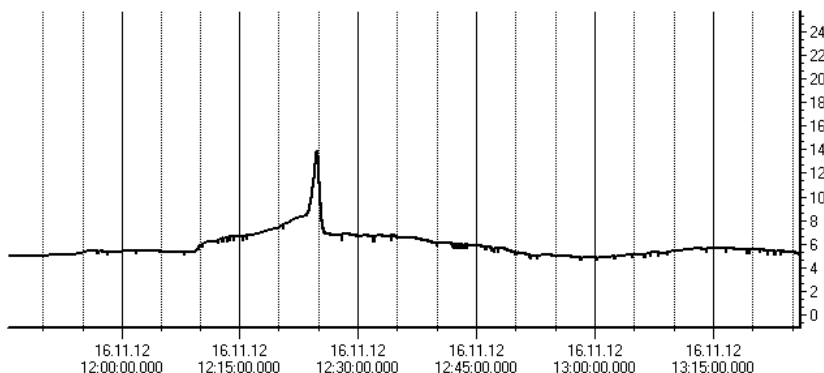


Рис. 4.25. Подстройка времени интегрирования технологического регулятора

Аналогично при изменении постоянной времени объекта изменяется лишь время интегрирования технологического регулятора (рисунки 3.24 и 3.25). Таким образом, получается система, обеспечивающая стабилизацию степени затухания на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений.

После окончания испытаний обрабатываются тренды архивной станции в целях выявления наиболее сильных реакций системы на отдельные возмущения и характера устранения этих реакций регуляторами.

Таким образом, были получены следующие выводы:

10. Представлена задача настройки беспойсковой ААСР.
11. Продемонстрированы методы настройки и наиболее характерные специфические особенности, без учёта которых настройка такой системы может оказаться проблематичной.
12. Основные положения главы отражены в публикации [2] в издании по списку ВАК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан алгоритм адаптивной системы, развивающий идеи, предложенные в [68], и предложена его реализация на базе микропроцессорного устройства. Реализация подобной системы на базе аналоговой аппаратуры вызывала ряд трудностей, появление же микропроцессорных систем управления открыло возможность не только её широкого внедрения, но и совершенствования предложенных алгоритмов. Появилась возможность разработки универсального блока адаптации, применимого для целого класса систем. В этой связи:

1. Проведен обзор рынка регуляторов и сделан анализ проблемы адаптивного управления на сегодня.

2. Для энергетических объектов со сложным технологическим циклом обосновано применение адаптивной системы, учитывающей их прикладную специфику.

3. Подтверждены принципы построения блоков параметрической подстройки технологического регулятора, способные работать на различных уровнях ПТК и решать задачи адаптации, с учетом прикладной специфики объектов.

4. Решена задача диагностирования работы системы, гарантирующая её защищенность от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре путем ослабления или полного исключения влияние этого контура при обнаружении признаков ухудшения его работы.

5. Разработаны и реализованы, на базе ПТК, алгоритмы адаптивного управления. Использование разработанных алгоритмов в системах управления позволяет повысить эффективность и качество работы регуляторов технологических процессов. При этом предлагаемые алгоритмы обладают гибкой настройкой и методикой их наладки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Alevaskis G., Seborg D. E. An extension of the Smith predictor method to multivariable linear systems containing time delays //Int. J. Control. 1973. V. 17. №3. P. 541 551.
2. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology //IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559\_576.
3. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. A survey of adaptive control systems// IRE Trans. on Automatic Control.— 1958.— Vol. AC-6, no. 12.— Pp. 102–108.
4. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. A survey of adaptive control systems // IRE Trans. on Automatic Control.— 1958.— Vol. AC-6, no. 12.— Pp. 102– 108.
5. Bastin G., Gevers M. Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 33, no. 7.— Pp. 650– 658.
6. Bellman R., Kalaba R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations // IRE Trans. on Automatic Control.— 1960.— Vol. AC-5.— Pp. 5–10.
7. Eykhoff P. System Identification. Parameter and State Estimation.— Univ. of Techn. Eindhoven, 1975.
8. Identification of linearly overparametrized nonlinear systems / G. Bastin, R. Bitmead, G. Campion, M. Gevers // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1992.— Vol. 37, no. 7.— Pp. 1073–1078.
9. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design.— Wiley and Sons Inc., 1995.
10. Krstic M., Wang H.-H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica.— 2000.— Vol. 36.— Pp. 595–601.
11. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief. - <http://www.ifac-control.org>.

12. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, soft\_ware, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art //IEEE Control Systems Magazine. Feb.2006. P. 41\_54.
13. Liew A. W.-C., Yan H., Yang M. Pattern recognition techniques for the emerging field of bioinformatics: A review // Pattern Recognition.— 2005.— Vol. 38, no. 11.— Pp. 2055–2073.
14. Ljung L. System Identification: Theory for the User.— Prentice-Hall, 1999.
15. Morosanov I. S. Method of extremum seeking control // Automation and Remote Control.— 1957.— Vol. 18.— Pp. 1077–1092.
16. Morse A. S., Mayne D. Q., Goodwin G. C. Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 37, no. 9.— Pp. 1343–1354.
17. Narendra K. S., Annaswamy A. M. Stable Adaptive systems.— Prentice-Hall, 1989.
18. Narendra K. S., Lin Y.-H. Design of stable model reference adaptive controllers Application of Adaptive Control. London: Academic Press, 1980. P. 100-130.
19. Ostrovskii I. I. Extremum regulation // Automation and Remote Control.— 1957.— Vol. 18.— Pp. 900–907.
20. Pervozvanskii A. A. Continuous extremum control systems in the presence of random noise // Automation and Remote Control.— 1960.— Vol. 21.— Pp. 673– 677.
21. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past,present and future of PID control //Proceedings of the IFAC Workshop, Eds.,Terrassa, Spain, 5\_7 Apr. 2000.
22. Sontag E. Some new directions in control theory inspired by systems biology // Systems Biology.— 2004.— Vol. 1, no. 1.— Pp. 9–18.
23. Stotsky A. A. Lyapunov design for convergence rate improvement in adaptive control //Int. J: of Control. 1993. V. 57. №2. P.501 504.
24. Tsien H. S. Engineering Cybernetics.— McGraw Hill, 1954.— 289 pp.
25. Wittenmark B., Urquhart A. Adaptive extremal control // Proc. of 34-th IEEE Conference on Decision and Control.— New Orleans, LA: 1995.— Pp. 1639–1644.

26. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759\_768.33. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998\_2002: a survey //Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado, 4\_6 June2003. P. 1494\_1499.
27. Александрова И. Д. Расчет параметров динамической настройки регулятора (САР) температуры пара с опережающим скоростным сигналом.// Теплоэнергетика. 1965. №4.
28. Башнин О. И., Семенов В. В., Степура Э. Ф. Аппаратура группового регулирования активной мощности и частоты агрегатов гидроэлектростанций. Электротехника. 1979. № 4. С. 12 14.
29. Бинь Ф. Т., Ротач В. Я., Мань Н. В. Расчет робастной настройки ПИД-регуляторов по огибающим частотных характеристик объекта.// Теплоэнергетика. 1995. № 12.
30. Горяченко В. Д. Методы исследования устойчивости ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977. С. 296.
31. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского. М.: Машиностроение, 1974. С. 328.
32. Давыдов Н. И., Идзон О. М., Смирнова О. В. Определение параметров ПИД-регуляторов по переходной характеристике системы.// Теплоэнергетика. 1995. № 10.
33. Денисенко В. ПИД регуляторы: вопросы реализации. СТА 2008, №1. с. 89
34. Деревницкий Д. П., Рубекин Н. Ф. Адаптивные системы управления непрерывными технологическими процессами в нефтехимии. М.: ЦНИИТЭ-нефтехим, 1975. С. 49.
35. Дрейпер Ч. С., Ли И. Т. Автоматическая оптимизация управляемых систем /Под ред. Б. Н. Петрова.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.— 240 с.
36. Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. М.: ГЭИ. 1956.
37. Живоглядов В. П. Адаптация в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Фрунзе: Илим, 1974. С. 227.

38. Ивахненко А. Г. Задачи экстремального регулирования // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.— 1956.— □ 10.— С. 41–56.
39. Казакевич В. В. Системы экстремального регулирования и некоторые способы улучшения их качества и устойчивости // Автоматическое управление и вычислительная техника.— М.: Машгиз, 1958.— С. 66–96.
40. Казакевич В. В. Способ автоматического регулирования различных процессов по максимуму или по минимуму. Авт. св. □ 66335 от 25.11.1943 // Бюлл. изобретений.— 1946.— □ 10.
41. Кондрашин А.В. Бесписковые самонастраивающиеся системы автоматического управления и перспективы их применения в теплоэнергетике./В сб. "Автоматизация производства".-М: 2001, №4, с.1-10.
42. Кондрашин А.В., Теория автоматического управления. Методические указания и материалы к курсовой работе, 2008.
43. Кондрашин А.В., Технологические основы управления теплоэнергетическими процессами.
44. Красовский А. А. Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией // Современная прикладная теория управления (в 3-х частях). Ч. I. «Оптимизационный подход в теории управления» / Под ред. А. А. Колесникова.— Таганрог: ТРТУ, 2000.— С. 268–311.
45. Лебедев А. А, Чернобровкин Л. С. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1973. С. 616.
46. Лейтес Р.Д., Соболев В.Н. Цифровое моделирование систем синтетической телефонии.- М.: Связь, 1969.-120с
47. Ли Я.-Ц., Ван дер Вальде У. И. Теория нелинейных самонастраивающихся систем // Тр. I-го межд. конгресса ИФАК «Теория дискретных, оптимальных и самонастраивающихся систем».— Т. 2.— М.: Изд.-во АН СССР, 1961.— С. 726–744.
48. Лурье А. И., Постников В. Н. К теории устойчивости регулируемых систем //Прикладная математика и механика. 1994. №8. Вып. 3. С. 246 248.



49. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами // Анализ и синтез нелинейных систем.— СПб.: Наука, 2000.— 549 с.
50. Мышкис А. Д. Линейные дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом. М. Л., Гостехиздат, 1951.
51. Паршева Е. А. Децентрализованное адаптивное управление по выходу многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию //Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №5. С. 14 22.
52. Паршева Е. А., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом //Автоматика и телемеханика. 2001. №1. С. 142 149.
53. Плетнев Г. П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций. М.: Энергоиздат. 1981. -368с.
54. Понтрягин Л.С. О нулях некоторых простых трансцендентных функций //Изв. АН СССР, Сер. мат. 1942, Т.6, №3. С. 115 134.
55. Проект МГУ "Фонд знаний «Ломоносов»" - <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/>
56. Пупков К. А. Проблемы теории и практики интеллектуальных систем //Машиностроение, приборостроение, энергетика /Ред. кол.: А. Н. Тихонов, В. А. Садовничий, В. И. Сергеев и др. М.: Изд-во МГУ, 1994. С. 340.
57. Райбман Н. С., Чадеев В. М. Построение моделей процессов производства. М.: Энергия, 1975. С. 374.
58. Ротач В. Я. По поводу работ, связанных с идентификацией объектов в условиях их нормального функционирования.// Автоматика и телемеханика. 1969. № 6.
59. Ротач В. Я. Расчет каскадных систем автоматического регулирования.// Теплоэнергетика. 1997. № 10.
60. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. М.: Энергоатомиздат. 1985. -294с.
61. Ротач В. Я., Кузищин В. Ф., Ключев А. С. и др. Автоматизация настройки систем управления. М.: Энергоатомиздат. 1984. -272с.

62. Серов В. П., Корольков Б. П. Динамика парогенераторов. М.: Энергия. 1977. -415с.
63. Справочник по теории автоматического управления /Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. С. 712.
64. Стратонович Р.Л. Принципы адаптивного приема. М.: Советское радио, 1973. С. 141.
65. Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах
66. Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Адаптивные системы управления: проблемы и тенденции // Труды всероссийской конференции «Управление и информационные технологии».— Т. 1.— Санкт-Петербург: ИСПО - Сервис, 2003.— С. 145–154.
67. Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Эволюция и проблемы теории адаптивных систем управления. Часть I // Мехатроника, автоматизация, управление.— 2003.—□ 6.— С. 9–18.
68. Устройство для вычисления дискретного «скользящего» преобразования Фурье и его применение в радиолокационной системе. Заявка №0207859 Франция. – Оpubл. Изобретения стран мира, 1987. -№17.-Вып.17.
69. Фельдбаум А. А. Вычислительные устройства в автоматических системах.— М.: Физматгиз, 1959.— 800 с.
70. Фрадков А. Л. О применении кибернетических методов в физике // Успехи Физических Наук.— 2005.— Т. 175, □ 2.— С. 113–138.
71. Хлебцевич Ю. С. Электрический регулятор экономичности. авт. заявка 231496 от 4.04.1940. авт. св. СССР □ 170566 // Бюлл. изобретений.— 1965.—□ № 9.
72. Цыпкин Я. З. Основы теории обучающихся систем.— М.: Наука, 1970.— 252 с.
73. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах.-М.: Наука, 1968. - 199 с.
74. Эффективность АСУ теплоэнергетическими процессами / Ред. А. С. Корецкий, Э. К. Ринкус . – М. : Энергоатомиздат, 1984

75. Ю.Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. М.: Энергоиздат. 1981.-3 04с.

76. Якубович В. А. Методы теории абсолютной устойчивости //Методы исследования нелинейных систем автоматического управления /Под ред. Р. А. Нелепина. М.: Наука, 1975. С. 74 180.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Для представления  
в диссертационный совет

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ результатов кандидатской диссертационной работы Карасева Виктора Сергеевича

Настоящим удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование адаптивной системы управления теплоэнергетическими объектами на базе микроконтроллеров» представленной на соискание ученой степени кандидата, использованы в работе системы автоматического управления температурой перегретого пара блока №1 Южной ТЭЦ филиала «Невский» ОАО «ТГК-1» г. Санкт-Петербург, что позволило повысить эффективность и качество работы регулятора. Представленная система, обеспечивает сохранение запаса устойчивости на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений.

Начальник ЦТАИ  
ТЭЦ-22 филиала «Невский» ОАО «ТГК-1»



А.В. Сопик

Начальник службы АСУ ТП  
ТЭЦ-22 филиала «Невский» ОАО «ТГК-1»

А.М. Журавлёв