

На правах рукописи



КАРАСЕВ Виктор Сергеевич

**АДАПТИВНОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПО ОПЕРАТИВНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ
ОШИБКИ УПРАВЛЕНИЯ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Кондрашин Анатолий Васильевич**

Официальные оппоненты:

Кобзев Александр Архипович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», профессор кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника»;

Пикина Галина Алексеевна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Защита состоится 3 апреля 2020 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Karasev.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Копылова
Лариса Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное состояние технологических процессов в генерирующей теплоэнергетике и характерное направление их развития отличаются динамичным изменением типов основных агрегатов, применением более эффективных способов извлечения и использования теплоты в основном технологическом цикле тепловых электрических станций (ТЭС).

Существенно изменились в последние годы требования к маневренности энергоблоков, к расширению регулировочных диапазонов котлов и турбин, обуславливающих проявление нестационарных свойств оборудования. На это накладываются новые, более жёсткие требования к участию энергоблоков в первичном и вторичном регулировании частоты и активной мощности энергосистем.

Технические решения, использовавшиеся ранее при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), были рассчитаны главным образом на стабилизацию процессов в квазистационарных режимах. В современных же условиях возникает обоснованная потребность применения автоматики, обладающей способностью автоматической настройки регуляторов в условиях неполной информации как о свойствах оборудования, так и об особенностях режимов его эксплуатации.

Сложность и взаимосвязанность технологических процессов в теплоэнергетике, повышенная инерционность динамических каналов, нестационарность режимов и многофакторные случайные воздействия на оборудование не позволяют использовать известные принципы адаптации автоматических регуляторов, основанные главным образом на идентификации объектов в режимах реального времени.

Перспективным становится применение алгоритмов, опирающихся на обоснованную априорную информацию о специфических особенностях теплофизических процессов в оборудовании, позволяющую предложить и применить в системах регулирования оперативные косвенные показатели, полезные для адаптации регулятора. Отказ от идентификации и переход на оперативные качественные показатели, оцениваемые по текущим значениям ошибки управления, создают предпосылки не только эффективной подстройки регуляторов, но и оперативной функциональной диагностики автоматических систем регулирования (АСР).

Важным достоинством такого подхода является отказ от поисковых принципов оптимизации АСР и применение алгоритмов, обеспечивающих автоматическую подстройку параметров регуляторов по характерным особенностям наблюдаемых показателей качества управления,

критериально связанных с теплофизическими особенностями управляемых процессов.

Таким образом, задача разработки адаптивного способа управления, опирающегося на объективную прикладную специфику объекта и протекающих в нём процессов, является актуальной и перспективной.

Цель работы. Целью данной работы является разработка принципов построения адаптивной системы, работающей по оперативному значению ошибки управления и ориентированной на повышение эксплуатационной надёжности и долговечности теплоэнергетического оборудования, а также реализация алгоритма данной системы на базе микропроцессорного устройства.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается путем решения двух взаимосвязанных задач диссертационной работы, а именно:

1. Анализа специфических особенностей динамических свойств теплоэнергетического оборудования в переменных режимах эксплуатации, отличающихся ограниченной прогнозируемостью и неполной наблюдаемостью.

2. Разработки способов:

а) оперативной оценки дрейфа характеристик объекта с помощью косвенных показателей, учитывающих изменения статических и динамических параметров объекта;

б) применения косвенных показателей в задаче адаптивной коррекции параметров регулятора, гарантирующей стабилизацию запаса устойчивости системы регулирования в непрогнозируемых условиях эксплуатации;

с) настройки адаптивной системы и диагностики её функционального состояния.

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.

Научную новизну представляют:

1. Способы оперативного извлечения косвенных показателей, отражающих изменения динамических и статических свойств управляемого объекта в условиях действия шумов, естественных для сложного объекта управления, путем применения спектральных методов анализа сигнала ошибки управления.

2. Принципы применения косвенных показателей в системе адаптивного управления теплоэнергетическими процессами в условиях переменных режимов работы оборудования, отличающимися

алгоритмической цифровой реализацией блоков параметрического управления технологическим регулятором.

3. Методика диагностирования работы системы, гарантирующая защищённость системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре за счёт ослабления или полного исключения влияния этого контура при диагностировании нештатной ситуации или при ухудшении качества работы регулятора.

Практическая ценность заключается в том, что:

1. Разработаны и реализованы на базе ПТК алгоритмы адаптивного управления, интегрированные в его иерархическую структуру. Их применение позволяет стабилизировать показатели запаса устойчивости АСР на заданном уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений.

2. Разработаны алгоритмы, связанные 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 способствуют возможности применения алгоритма в переменных режимах работы оборудования.

3. Предложены способы инициализации адаптивной системы. Их использование существенно сокращает время ввода системы в эксплуатацию на теплоэнергетических объектах.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Способ построения адаптивной системы управления, обеспечивающей сохранение запаса устойчивости путем оперативной оценки показателей, отражающих эксплуатационные изменения статической и динамической характеристик выбранного класса объекта управления.

2. Принципы и методика самодиагностики работы адаптивной системы, обеспечивающие оперативную оценку функциональной работоспособности адаптивной системы и коррекцию алгоритма в случае диагностируемых видов отказов.

3. Методика настройки предложенных алгоритмов.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

в части формулы специальности, объединяющей вопросы математического, информационного, алгоритмического и машинного обеспечения создания автоматизированных технологических процессов и производств и систем управления ими, включающей методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмиза-

цию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем, внедрение, сопровождение и эксплуатацию человекомашинных систем, в диссертационном исследовании разработано математическое и программное обеспечение программно-технических средств адаптивных систем управления;

в части области исследования:

– п. 3: «Методология, научные основы и формализованные методы построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП)»;

– п. 13: «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации»;

– п. 14: «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования, (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.» соответствуют методика диагностирования работы параметрического контура адаптивной системы».

Апробация результатов работы. Основные положения и отдельные результаты работы докладывались и обсуждались на семнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, МЭИ, 2011), на VI ежегодной международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» (Иваново, ИГЭУ, 2011), на девятнадцатой ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, МЭИ, 2013).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 7 публикациях. Из общего числа статей 3 опубликованы в издании, рекомендованном ВАК.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использованы в работе системы автоматического управления температурой перегретого пара блока №1 Южной ТЭЦ филиала «Невский» ОАО «ТГК-1» г. Санкт-Петербург.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Она содержит 140 страниц основного текста, включающего 84 рисунка, 14 таблиц, перечень литературы из 76 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана новизна и практическая значимость полученных результатов.

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

Обзор текущего рынка регуляторов, показывает, что подход, отличающийся использованием априорной информации о специфике объекта и взаимосвязях в нем, представлен слабо. Обширный список современных работ по адаптивным системам, содержится в статье «Обзор адаптивных систем управления» Манчини А.Р, а также в работе Терехова В.А. и Тюкина И.Ю. «Адаптивные системы управления: проблемы и тенденции». В последней, в частности, лишь обозначена перспектива разработки адаптивных систем управления функционально сложными техническими объектами и технологическими процессами в условиях неконтролируемых изменений собственных свойств и свойств внешней среды.

Практически нет работ, отражающих принципы использования априорной информации о технологических особенностях процессов в сложных объектах управления. В этой связи можно выделить работу Кондрашина А.В. «Беспоисковые самонастраивающиеся системы автоматического управления и перспективы их применения в теплоэнергетике». В ней предложен способ анализа особенностей процессов в произвольном сечении распределённого по длине объекта управления и их учёта для организации адаптивного управления, обеспечивающего повышение эксплуатационной надёжности и долговечности теплоэнергетического оборудования. Изложенное выше даёт основания поставить задачу анализа природы неполной прогнозируемости параметров динамической модели в условиях, характерных для рассматриваемого в работе теплоэнергетического класса процессов и на основе многофакторного анализа сформулировать принципы построения блоков параметрического управления технологическим регулятором, способных решать задачи адаптации, с учетом прикладной специфики объекта.

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.

При всей значимости физико-химических, тепломеханических, электромеханических и электротехнических процессов в технологическом оборудовании тепловых электрических станций особая роль отводится тепломассообмену, проявляющему себя как в замкнутых объёмах рабочих тел с изменяющимися теплофизическими параметрами, так и в оболочках каналов, участвующих в теплообмене между теплоносителями.

Аккумулирующие способности оборудования, проявляющиеся в динамических режимах, принято оценивать постоянными времени.

В частности, для замкнутого объёма сжимаемого рабочего тела аккумуляция массы может быть оценена постоянной времени T_p , являющейся функционалом, учитывающим влияние постоянных конструктивных (K), физических (p -давление, t -температура), режимных (G -расход) факторов, а также степени открытия регулирующего органа (μ) на изменение плотности рабочего тела (ρ) на входе (‘) и выходе (‘’) канала:

$$T_p = f \left\{ K, G, \rho \left[p(G), t(G) \right] \right\}, \quad \text{где } G = \varphi \left\{ K, p', p'', t', t'', \mu \right\} \quad (1)$$

Подобным же образом можно учесть и эффект аккумуляции энергии в замкнутом объёме сжимаемого рабочего тела.

Для оболочек каналов, через которые осуществляется теплообмен между средами, характерен эффект аккумуляции теплоты, который также можно описать постоянной времени, учитывающей конструктивные особенности оболочки (K), её теплофизические свойства (c_m – теплоёмкость), коэффициенты теплоотдачи на внутренней и на наружной поверхностях теплообмена (α), а также расходы рабочих тел, омывающих оболочку внутри и снаружи:

$$T_m = f \left\{ K, G, c_m, \alpha \left[G, \rho(G) \right] \right\} \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что постоянные времени зависят не только от режима работы, но и от множества других конструктивных и физических факторов, 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).

Обобщая результаты этого анализа, подчеркнём, что изменение теплофизических параметров процесса и зависимых 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 распределенный объект представлять моделью вида

$$W_o(p) = k_o * e^{-\tau_o * p} * \prod_{j=1}^n \frac{1}{\beta_j * T_o * p + 1}, \text{ при } \sum_{j=1}^n \beta_j = 1 \quad (3)$$

в которой общий эффект аккумуляции T_o распределен по элементам цепи с учетом доли каждого j -го элемента, оцениваемой весовым параметром β_j , зависящим от конструктивных параметров участка (объема, массы металла и массы находящегося в этом объеме теплоносителя).

На рис. 1 сопоставлены два множества нормированных переходных функций теплообменников с равным числом выделенных в них и последовательно соединенных элементарных (сосредоточенных) участков.

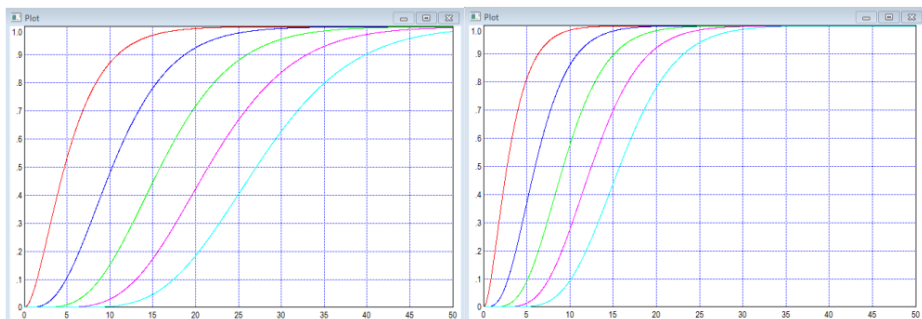


Рис.1. Распределённость объекта и влияние теплофизических и режимных факторов на эффект аккумуляции (инерционности)

Отличие множеств выражено явным эффектом масштабирования процессов по времени по отношению к некоторому *номинальному* состоянию. Можно утверждать, что с учетом (1) и (2) масштабный коэффициент M_T зависит от множества режимных (p) и теплофизических (tf) факторов Θ :

$$T_o(t) = T_o^{HOM} \cdot M_T(\Theta_p, \Theta_{tf}, t) \quad (4)$$

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 τ_e , также наследующего масштабирующий эффект M_T , можно прийти к выводу о том, что в процессе эксплуатации относительная величина запаздывания является константой:

$$\frac{\tau_o}{T_o} = \frac{\tau_{тр} + \tau_e}{T_o} \approx \frac{\tau_e}{T_o} = \frac{M_T \cdot \tau_e^{HOM}}{M_T \cdot T_o^{HOM}} = \frac{\tau_e^{HOM}}{T_o^{HOM}} = const, \quad (5)$$

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

Итоги анализа, выраженные соотношениями (4) и (5), позволяют воспользоваться известным результатом решения задачи оптимального управления по Винеру, в соответствии с которым для объектов рассмат-

риваемого типа (с запаздыванием и с самовыравниванием), работающих при характерных для теплоэнергетики низкочастотных возмущениях, оптимальным является классический ПИ-регулятор с параметрами:

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

Здесь k_o – коэффициент усиления объекта, k_p^* – коэффициент усиления регулятора, T_i^* – постоянная интегрирования.

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

$$k_p^*(t) \cdot k_o(t) = \frac{R(\psi)}{\tau_o/T_o}; T_i^*(t) = f [M_T(t) \cdot T_o^{\text{ном}}], \quad (6)$$

в котором $R(\psi)$ – параметр, отвечающий за запас устойчивости. Условия оптимальности (6), позволяют явно разделить задачу наблюдения за изменяющимися свойствами объекта управления на две задачи:

- 1) задачу оперативной оценки фактического запаса устойчивости, представленного в (6) параметром ψ ;
- 2) задачу оценки текущего значения масштабирующего фактора M_T .

Решение первой задачи акцентировано 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 .

Приступая к решению первой задачи, отметим, что из соотношения (6) следует очевидная возможность оценки статического коэффициента усиления основного канала объекта через его связь с запасом устойчивости, выраженным степенью затухания процесса ψ :

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

Решение задачи параметрической подстройки регулятора может быть сведено к поиску такого корректирующего значения $M_k(t)$, которое бы гарантировало стабилизацию фактического запаса устойчивости $\psi(t)$ на заданном уровне ψ_o :

$$k_p^*(t) = M_k(t) \cdot k_p^{\text{ном}}, \quad \text{где } M_k(t) = f [\psi(t), \psi_o] \quad (7)$$

В условиях обычных режимов функционирования АСР такой прямой способ оценки ψ не применим и, следовательно, должен быть предложен некий косвенный способ, основанный на наблюдениях реального случай-

ного процесса. Один из возможных вариантов, предлагаемый в этой работе, использует результат аналитического исследования элементарных процессов в АСР, выполненного А.В. Кондрашиным на одном из частных примеров. В качестве наблюдаемого процесса использовалась ошибка управления. В соответствии с выводами, полученными в процессе этого исследования, оказалось возможным выявить полезные закономерности в корреляционной связи между ошибкой управления и её второй производной, представленной на рис.2. Суть способа оценки, ис-

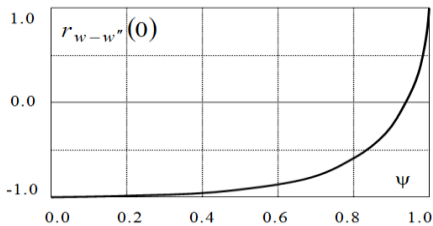


Рис.2. Связь коэффициента корреляции ошибки управления и её второй производной с показателем запаса устойчивости АСР

пользуемого в работе, основана на параметрах 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 в регулятор. Сама же систе-

ма 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 ω_p :

$$\rho_\varepsilon(\tau) = e^{-a \cdot |\tau|} \cdot \left[\cos(\omega_p \cdot \tau) - \frac{a}{\omega_p} \cdot \sin(\omega_p \cdot \tau) \right]. \quad (8)$$

Модель (8) применяется для описания естественного в АСР процесса - ошибки управления $\varepsilon(t)$. Она обладает важным для астатических систем свойством - нулевым значением спектра на нулевой частоте. В работе проведено исследование, подтверждающее устойчивую связь между параметрами корреляционной функции (a , ω_p) и величиной запаса устойчивости ψ_0 . Колебательный характер корреляционной функции $\rho_\varepsilon(\tau)$ позволяет провести аналогию между её видом (рис.3) и свойствами функции веса колебательной системы 2-го порядка. В результате такого сравнения предложено в качестве меры, оценивающей запас устойчивости, использовать отношение

$$\alpha = A_2/A_1 \quad (9)$$

Таким образом, условие стабилизации запаса устойчивости уместно вместо варианта (7) представить в виде

$$k_p^*(t) = M_k(t) \cdot k_p^{\text{НОМ}}, \text{ где } M_k(t) = f[\alpha(t) - \alpha_o]. \quad (10)$$

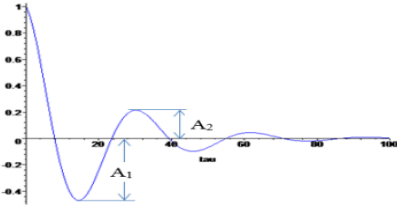


Рис. 3. К определению параметра α , оценивающего запас устойчивости АСР

параметром T_o . В качестве оцениваемого свойства при этом можно предложить либо прямой показатель – значение резонансной частоты ω_p системы, либо косвенно связанную с ней среднюю частоту ω_{cp} процесса (рис.4).

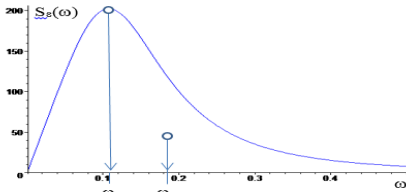


Рис.4. К оценке частотных параметров системы и процесса

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

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, соответствующему значению резонансной частоты, 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.

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

$$\omega_{cp} \approx \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i \cdot \Delta S_i(\bar{\omega}_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta S_i(\bar{\omega}_i)}, \text{ где } \bar{\omega}_i = \frac{\omega_{i-1} + \omega_i}{2}. \quad (11)$$

Завершая представление материала, объясняющего принятые решения, сгруппируем все параметры, имеющие отношение к параметрической коррекции регулятора в одноконтурной АСР и сведём их в таблицу 1, а общую схему организации вычислений, свойственных алгоритму параметрической коррекции (адаптации), представим на рис.5.

Таблица 1. Перечень параметров алгоритма

Обозначение	Наименование параметра
y	Управляемая переменная (выход объекта управления)
y_0	Задание технологическому регулятору
ε	Текущее значение ошибки управления
$\{\varepsilon\}$	Массив значений ошибок управления
$\{\varepsilon\}_\Phi$	Фильтрованный массив значений ошибок управления
$\{S_\varepsilon\}$	Спектральная плотность ошибки управления
$\{S_\varepsilon\}_\Phi$	Фильтрованная спектральная плотность ошибки управления
T_o	Величина изменения динамики объекта управления
$\{R_\varepsilon\}$	Корреляционная функция ошибки управления
$\{R_\varepsilon\}_\Phi$	Корреляционная функция, прошедшая процедуру сглаживания
α	Показатель, характеризующий запас устойчивости

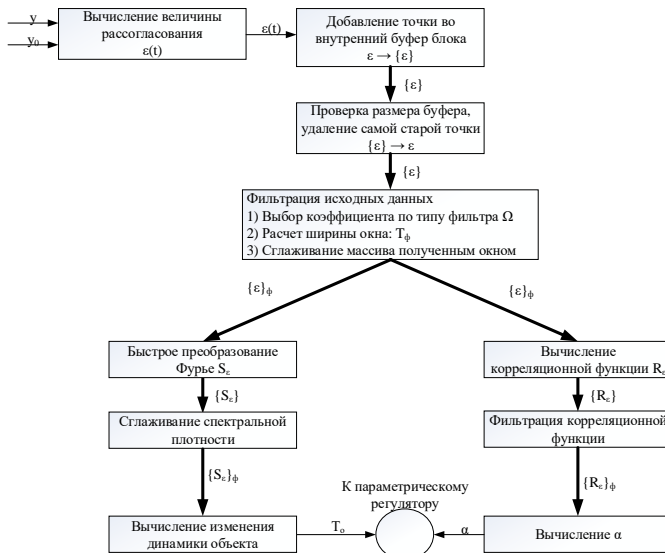


Рис. 5. Схема организации вычислений в блоке подстройки параметров регулятора

Существенной новизной предлагаемой адаптивной системы является наличие не только блока вычисления характеристик случайного процесса $\varepsilon(t)$, но и блока диагностики функционирования параметрической настройки системы. Это гарантирует защищённость системы от непредвиденных вариантов развития процессов в параметрическом контуре и

способствует расширению диапазона его применимости в переменных режимах работы оборудования.

Важно, что процесс диагностики опирается на оперативные сведения, не участвующие в расчете параметров настройки технологического регулятора, т.е. не зависящие от параметрического контура. Функциональные возможности этого блока обсуждаются в третьей главе диссертации.

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. Для выбора конкретного уровня необходимо рассмотреть типовую структуру ПТК, а также проанализировать достоинства и недостатки каждого из возможных вариантов.

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.

Решение, предложенное во второй главе, основано на наблюдении свойств только одного процесса – сигнала по ошибке управления $\varepsilon(t)$. Это существенно снижает требования к ресурсам программно-технических комплексов. Следует отметить, что в соответствии со схемой, представленной на рис.5, 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.

Для окончательного выбора конкретного уровня был выполнен вычислительный эксперимент, учитывающий коммуникационные нагрузки и операционную загруженность процессоров в условиях использования ПТК «Текон».

Результаты моделирования системы представлены в табл.2. Выявлено явное предпочтение уровня станции серверов, выражающееся в максимальной гибкости (благодаря возможности выполнения алгоритмов на базе различных компонентов системы) и надежности (благодаря наличию резервирования) решения, при минимальных значениях времени, требующегося для расчета показателей.

Кроме алгоритма, отвечающего за адаптацию, необходимо также, реализовать алгоритмы подсистемы оперативной диагностики работо-

способности параметрического контура системы управления. Данная подсистема необходима для предупреждения развития различных аварийных ситуаций, способных возникнуть в процессе работы, за счет ряда контрмер, специфичных для каждой такой ситуации. Различные ситуации распознаются по заложенным в алгоритм подсистемы шаблонам и предотвращаются за счет выполнения определенных действий.

Таблица 2. Результаты нагрузочного эксперимента по определению вычислительных возможностей ПТК

Наименование	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	17 кВ – при настройках входных массивов 512 и 300 точек для расчета спектральной плотности и корреляционной функции соответственно		

К системе диагностики можно предъявить следующие требования:

1. Слежение за работой параметрического контура.
2. Безударный переход к исходным настройкам системы.
3. Блокирование работы параметрического контура по внешней команде.

Описанный набор обеспечивает полное покрытие возможных сценариев развития внештатных ситуаций. Дальнейшее расширение приведет к лишь уменьшению времени реакции системы. Набор шаблонов для определения тех или иных ситуаций и мер для предотвращения развития различных ситуаций представлен в виде таблицы 3. Для каждого варианта шаблона разработано решение, предотвращающее дальнейшее развитие соответствующей аварийной ситуации

Таблица 3. Библиотека шаблонов

№	Признаки ситуации	Действия, предотвращающие дальнейшее развитие ситуации
1	Выход амплитуды колебаний технологического параметра за уставки	Ослабление влияния параметрического контура на координатный
2	Выход технологического параметра за уставки	Блокирование работы основного регулятора в соответствующем направлении. Ослабление влияния параметрического контура
3	Постоянное переключение выхода регулятора «Больше – Меньше»	Уменьшение значения коэффициента усиления технологического регулятора
4	Выход значений параметров настройки основного регулятора за уставки	Срабатывание сигнализации (операторский интерфейс) и запись события в журнал архивной станции

Четвертая глава посвящена разработке методики инициализации разработанной адаптивной системы и дает подробное описание назначения всех переменных разработанного функционального блока.

Специфика адаптивной автоматической системы регулирования (ААСР), требует применения процедур, не характерных для наладки обычных одномерных АСР. Это обусловлено тем, что ААСР фактически становится многомерной (трёхмерной), т.к. вектор управляемых переменных включает в себя не только $y(t)$ – основную координату системы (объекта управления), но и два вычисляемых параметра ошибки управления $\varepsilon(t)$ – среднюю частоту $\omega_{cp}(t)$ и характеристику затухания корреляционной функции $\alpha(t)$. Управляющими воздействиями для них являются положение регулирующего органа, коэффициент усиления и постоянная интегрирования регулятора.

Методикой настройки ААСР предусматривается выполнение трёх шагов, обеспечивающих последовательную оптимизацию координатного и параметрического регуляторов. При обосновании значений параметров расчетных алгоритмов адаптивной системы используются традиционные для теории АСР методы, основанные на частотном анализе систем.

Исследования работы адаптивной системы управления теплоэнергетическими объектами проводились на первом блоке Южной ТЭЦ-22 филиала «Невский» ОАО «ТГК-1» г. Санкт-Петербург. Система работала совместно с регулятором перегретого пара, представляющим собой каскадную систему со стабилизирующим и корректирующим регулятором. Контуры адаптации образуют ещё один иерархический уровень, отвечающий за сохранение запаса устойчивости системой управления. В процессе испытаний система работала в режиме отслеживания параметров объекта управления, без изменения параметров настройки регуляторов нижних уровней.

Как отмечалось выше, параметры объекта управления зависят, в том числе, и от режимных факторов. В ходе исследований был согласован график изменения нагрузки блока. Нагрузка изменялась от минимального до максимального значения, что отражалось на изменении свойств объекта управления. Задачей параметрического контура системы управления являлось отслеживание данных изменений. Адаптивный контур был введен в работу до начала изменения мощности, так чтобы к моменту начала испытаний процедура инициации уже была завершена, и система управления была готова к работе.

Реализованный алгоритм беспойсковой самонастраивающейся системы обеспечивает стабилизацию степени затухания на заданном

уровне в условиях изменяющихся характеристик объекта и действующих на него возмущений. На рис. 6 показано, как изменяется значение степени затухания с адаптацией (1) и без адаптации (2) при изменении постоянной времени объекта управления (нестационарная динамика).

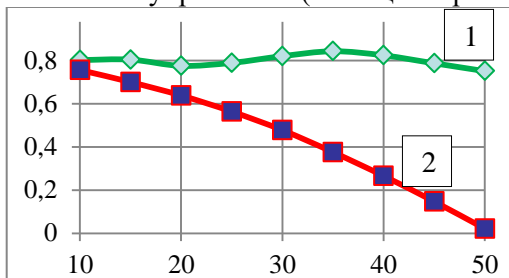


Рис. 6. Влияние динамической нестационарности объекта на степень затухания процесса в АСР с адаптацией и без адаптации.

При изменении режима в системе без адаптации степень затухания процесса (запас устойчивости) существенно уменьшается (практически приводит к потере устойчивости), а в адаптивной системе, благодаря параметрическому контуру, заданная степень затухания сохраняется.

Тренд на рис. 7 показывает изменение нагрузки блока от минимума до максимума. Тренды на рис. 8 отображают изменение нагрузки блока (тренд 1), а также соответствующие ей изменения динамических характеристик объекта управления (тренд 2), вычисленные алгоритмом на основе характерных особенностей сигнала ошибки управления, а именно расчета средней частоты. Наблюдаемая асимметричность тренда при наборе и снижении нагрузки является устойчивым свойством алгоритма.

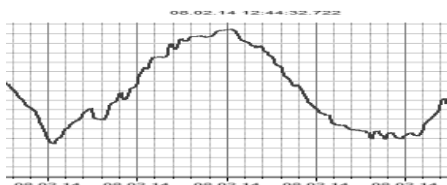


Рис. 7. Изменение нагрузки от минимума до максимума.

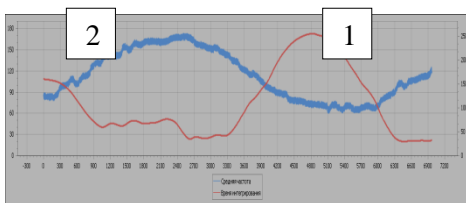


Рис. 8. Слежение за изменением нагрузки блока.

Проанализировав графики, можно сделать вывод о том, что реализованный алгоритм беспойсковой самонастраивающейся системы, обеспечивает слежение за изменяющимися характеристиками объекта, и обеспечивает стабилизацию степени затухания на заданном уровне.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ текущего состояния проблемы адаптивного управления.

2. Для энергетических объектов со сложным технологическим циклом обоснована возможность применения адаптивной системы, учитывающей их прикладную теплофизическую специфику. Это позволило разделить задачи адаптации в условиях изменения статических и динамических характеристик объекта.

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 стабилизировать показатели запаса устойчивости системы в условиях непредвиденно изменяющихся свойств объекта управления и тем самым повысить эффективность и качество работы регуляторов технологических процессов. При этом предлагаемые алгоритмы обладают гибкой настройкой и методикой их наладки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Карасев, В.С. Реализация беспоисковой самонастраивающейся системы автоматического управления / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Вестник ИГЭУ. – 2012 - №1. – С. 5 - 9.

2. Карасев, В.С. Методика инициализации беспоисковой самонастраивающейся системы автоматического управления / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Вестник ИГЭУ. – 2013 - №3. – С. 18 - 23.

3. Карасев, В.С. Функциональная диагностика системы управления: постановка задачи и её решение / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016 - №8(181). – С. 79 – 88.

Публикации в других изданиях

4. Карасев, В.С. Реализация нечеткого регулятора на базе интеллектуальных модулей «Теконник» / Автоматизация технологических процессов и производств. «Тинчуринские чтения»

КГЭУ : тез. докл. науч. конф., Казань, 28 – 29 апреля 2010 г.- Казань, 2010. – Том 2. – С. 96.

5. Карасев, В.С. Разработка методов повышения эффективности систем управления теплоэнергетическим оборудованием МЭИ / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Контроль, автоматизация и управление в энергетике : тез. докл. науч.-техн. конф., Москва, 24 - 25 февраля 2011 г.- Москва, 2011. – Том 3. – С. 209 - 210.

6. Карасев, В.С. Разработка методов повышения эффективности систем управления теплоэнергетическим оборудованием ИГЭУ / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Повышение эффективности энергетического оборудования: мат. науч.-практ. конф., Иваново, 6–8 дек. 2011 г.- Иваново, 2011. - С. 355-357.

7. Карасев, В.С. Разработка методов повышения эффективности систем управления теплоэнергетическим оборудованием МЭИ / В.С. Карасев, А.В. Кондрашин // Контроль, автоматизация и управление в энергетике : тез. докл. науч.-техн. конф., Москва, 27 - 28 февраля 2013 г.– Том 4. – С. 161.

КАРАСЕВ Виктор Сергеевич

АДАПТИВНОЕ ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПО ОПЕРАТИВНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ОШИБКИ
УПРАВЛЕНИЯ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать _____ Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № _____

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ