На правах рукописи

БАХИРЕВ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОТУРБИННЫМИ УСТАНОВКАМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Специальность: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

Кавалеров Борис Владимирович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Паздерин Андрей Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Муравьева Елена Александровна,
доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизированных технологических и информационных систем филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (в г. Стерлитамаке)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»**

Защита диссертации состоится 21 декабря 2018 г., в 14:00 часов в ауд. 345 на заседании диссертационного совета Д 212.188.04 Пермского национального исследовательского политехнического университета по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (http://pstu.ru/).

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.188.04
кандидат технических наук, доцент В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из активно развиваемых в настоящее время направлений электроэнергетики является производство электроэнергии при помощи конвертированных авиационных двигателей, такие газотурбинные электростанции (ГТЭС) предназначены для обеспечения электроэнергией промышленных и бытовых потребителей. Один генерирующий блок ГТЭС содержит газотурбинную установку (ГТУ) и синхронный электрогенератор (СГ), поэтому автоматизированная система управления (АСУ) ГТЭС содержит системы автоматического управления (САУ) ГТУ и СГ. ГТЭС может быть как одноблочной, так и состоять из нескольких блоков, включенных параллельно, ГТЭС могут работать автономно или параллельно с энергосистемой.

ГТУ выступает в качестве привода электрогенератора, поэтому качество производимой электроэнергии, в частности максимальное отклонение и длительность отклонения частоты, существенно зависят от используемых законов управления и структуры САУ ГТУ. Между САУ ГТУ, САУ СГ и внешней электрической системой существует сильное взаимовлияние, при этом главную роль в поддержании частоты при автономной работе ГТЭС играет САУ ГТУ. Поэтому для повышения качества электроэнергии по частоте необходимо совершенствовать законы управления ГТУ с учетом динамики всей электрической системы.

В настоящее время качество вырабатываемой электроэнергии по частоте при автономной работе ГТЭС во многих режимах не соответствует требованиям отраслевых и государственных стандартов. В дополнение к этому процесс настройки регуляторов САУ ГТУ весьма затратен по времени и топливу, поскольку САУ ГТУ является существенно нелинейной и испытывает влияние разнообразных возмущений со стороны электрической системы. Поэтому для качественной настройки САУ ГТУ требуется проведение множества экспериментов, учитывающих разнообразные возмущения со стороны электрической системы.

Ситуация осложняется тем, что для привода СГ используются двухвальные конвертированные авиационные ГТУ, в которых нет механической связи между валами, что затрудняет управление такими объектами, поэтому процессы регулирования затягиваются и снижаются возможности отработки внешних возмущений со стороны электрической системы.

В свою очередь, применяемые в настоящее время САУ ГТУ наследуют селективную структуру авиационных прототипов САУ, к недостаткам которых можно отнести: «забросы» регулируемых координат, вызванные различием динамических характеристик ГТУ для отдельных каналов регулирования САУ ГТУ при переключениях между ними; существенно различающиеся реакции ГТУ на изменения нагрузки при незначительном отличии основных регулируемых переменных состояния; необходимость периодической настройки контуров управления, вызванную изменением параметров САУ ГТУ в результате износа и изменением режимов работы ГТЭС.

Сложившаяся проблемная ситуация может быть преодолена за счет

использования адаптивного подхода при построении алгоритмов управления АСУ ГТЭС. Адаптивный подход позволит, с одной стороны, повысить качество переходных процессов по частоте за счет использования методов адаптивного управления САУ ГТУ с учетом нелинейных и нестационарных свойств ГТЭС, а с другой стороны – снизить время и трудоемкость настройки и испытаний САУ ГТУ за счет самонастройки САУ. Поэтому создание специальной подсистемы адаптивного управления САУ ГТУ позволит повысить качество электроэнергии при разнообразных режимных ситуациях в электроэнергетической системе и сократить затраты на настройку и испытания САУ ГТУ.

Таким образом, **актуальным** является повышение качества вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте и сокращение затрат на настройку и испытания САУ ГТУ на основе создания подсистемы адаптивного управления, входящей в состав АСУ ГТЭС.

Степень разработанности темы. Методы адаптивного управления сегодня в недостаточной мере используются при построении АСУ ГТЭС. Системы управления ГТУ, адаптивные системы управления и режимы работы электроэнергетических систем рассматриваются в работах А.В. Батенина, Ю.А. Борцова, В.А.Веникова, В.М.Винокура, Ф.Д. Гольдберга, О.С. Гуревича, С.Д. Землякова, Б.В. Кавалерова, А.А. Красовского, Е.А. Муравьевой, А.В. Паздерина, Н.Д. Поляхова, В.В. Путова, В.Я. Ротача, В.Ю. Рутковского, Ю.Н. Хижнякова, J.L. Aguero, M.C. Beroqui, G.P. Liu, J. Mu, D. Rees и др. В научных исследованиях, посвященных совершенствованию методов управления ГТУ, можно выделить два основных направления: непосредственное решение проблем управления в рамках существующей структуры САУ ГТУ и разработка новых контуров управления, например, нейро-нечетких, адаптивных, робастных взамен уже существующих. Недостаточная проработанность темы обусловлена тем, что при разработке САУ в качестве объекта управления в основном рассматриваются авиационные газотурбинные двигатели, а специфика САУ ГТУ для ГТЭС практически не исследуется. В настоящее время для ГТЭС используются в основном переработанные САУ авиационными ГТУ, при их построении не учитываются особенности разнообразных возмущений со стороны электрической системы.

Объект исследования: процесс производства электроэнергии газотурбинными электростанциями с учетом возмущений электрической системы.

Предмет исследования: методы и алгоритмы адаптивного управления САУ ГТУ, входящей в состав АСУ ГТЭС.

Цель работы: улучшение показателей качества вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте на основе адаптивного управления с идентификацией ГТУ как объекта управления в реальном времени. Сопутствующей целью является сокращение затрат на настройку и испытания САУ ГТУ.

Сформулированная цель определяет следующие **задачи исследований:**

1. Разработать методы адаптивного управления для САУ электроэнергетическими ГТУ с учетом возмущений в электрической системе.
2. Разработать метод идентификации ГТУ в реальном времени для

адаптивного управления ГТУ с учетом возмущений в электрической системе.

3. Разработать систему адаптивного управления ГТУ для АСУ ГТЭС.

4. Выполнить программную реализацию подсистемы адаптивного управления ГТУ.

5. Провести обоснование разработанных методов адаптивного управления с учетом динамики электрической системы.

Цель и задачи работы обусловили выбор следующих **методов исследования**: методы теории автоматического управления, методы математического моделирования, методы идентификации.

Научная новизна

1. Предложена модификация метода построения адаптивного управления, разработанного Ю.А.Борцовым, Н.Д.Поляховым, В.В.Путовым, заключающаяся в новом способе определения величины сигнального воздействия и желаемого поведения объекта управления.

2. Предложена модификация метода идентификации объекта в реальном времени, разработанного В.Ю.Рутковским и С.Д.Земляковым, отличающаяся возможностью проведения идентификации в замкнутом контуре с прерыванием процесса идентификации.

3. Разработана оригинальная система адаптивного управления ГТУ для АСУ ГТЭС, отличающаяся минимальными изменениями в исходной структуре САУ ГТУ при значительном влиянии на качество вырабатываемой электроэнергии по частоте.

Практическая ценность работы определяется следующим. Разработаны оригинальные программные модули для реализации подсистемы адаптивного управления ГТУ, позволяющие получить новую структуру адаптивной САУ ГТУ. Получены свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ. Использование полученных методов и алгоритмов адаптивного управления позволяет:

- улучшить показатели качества производства электроэнергии по частоте на 5% по максимальному отклонению и на 20% по длительности переходного процесса;

- эксплуатировать регуляторы САУ ГТУ без перенастройки их параметров при изменении статических характеристик объекта управления и различных возмущениях со стороны электросистемы;

- экономить рабочее время (в 2 раза и более) и топливо, необходимые для настройки регуляторов САУ ГТУ при натурных испытаниях и в режиме нормальной эксплуатации ГТЭС.

Результаты диссертации внедрены в производственной практике АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь) и в учебном процессе Пермского национального исследовательского политехнического университета в программах: аспирантуры профиль – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», дисциплина «Адаптивные алгоритмы в управлении» и магистратуры профиль «Электромеханика», дисциплина «Математическое моделирование систем управления».

<u>На защиту выносятся:</u>

1. Модифицированные для САУ ГТУ методы адаптивного управления с учетом возмущений в электрической системе, позволяющие повысить качество вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте (п.3, 10).

2. Модифицированный для САУ ГТУ метод идентификации в реальном времени, обеспечивающий возможность проводить идентификацию в замкнутом контуре с прерыванием процесса идентификации (п.3, 10).

3. Новая структура САУ ГТУ для автоматизированной системы управления ГТЭС, включающая подсистему адаптивного управления ГТУ и новый алгоритм ее построения (п.3, 11).

4. Результаты апробации методов идентификации в реальном времени и адаптивного управления в производственной деятельности ОА «ОДК-Авиадвигатель», установившие улучшение показателей качества вырабатываемой электроэнергии по частоте на 5% по максимальному отклонению и на 20% по длительности переходного процесса (п. 10, 13).

<u>Область исследования</u> соответствует **пп. 3, 10, 11 и 13** паспорта научной специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)».

<u>Апробация работы</u>. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на V Международной Интернет-конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (Пермь, 2012 г.); III Международной научной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (Пермь, 2014 г.); VIII Всероссийской научно-технической конференции «Инновационная энергетика» (Пермь, 2014 г.); I и II Международных научно-технических конференциях «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (Пермь, 2015, 2016 гг.); X Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (Пермь, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: задачи и пути их решения» (Россия, Вологда, 25 мая 2016 г.); Международной научно-технической конференции "Климовские чтения – 2016. Перспективные направления развития авиадвигателестроения" (Санкт-Петербург, 2016 г).

Результаты диссертационной работы нашли отражение в 4 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Разработка программных продуктов производилась на языках *Object Pascal* , *C++* и *Java*.

Исследования по теме диссертации проводились в рамках реализации договора между ОАО «ПРОТОН-Пермские моторы» и Минобрнауки РФ от 07.09.2010 «Разработка методологии и программно-технических средств интеллектуализации единого центра многоцелевых испытаний газотурбинных установок до 40МВт» по постановлению Правительства РФ от 9.04.2012 №218. Приведенные в диссертации результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ № 13.832.2014/К «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными

газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

Часть проведенных исследований выполнялась при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки России (проект 8.4157.2017/ПЧ «Разработка, проектирование и изготовление опытного образца универсального стенда модельных испытаний турбины перспективных двигателей»).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах из них 13 в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе 2 в зарубежных изданиях, индексируемых в *Scopus*, 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 92 наименования, и приложений. Основная часть работы содержит 122 страницы, 13 таблиц и 65 рисунков. Приложения содержат примеры расчетов характеристик и копии документы о внедрении результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту. Подчеркнуто, что научно-технические достижения последних лет создают объективные возможности для создания методов адаптивного управления газотурбинными установками с целью повышения качества вырабатываемой электроэнергии с учетом возмущений внешней электросистемы.

В первой главе рассматривается проблемная ситуация, существующая в процессе производства электроэнергии газотурбинными электростанциями, создаваемыми на базе конвертированных авиационных двигателей (рисунок 1).

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: ГТУ – газотурбинная установка, УУ ГТУ – устройство управления ГТУ, СГ – синхронный турбогенератор, УУ СГ – устройство управления СГ, ЭЭС – электроэнергетическая система, УУ ГТЭС – устройство управления ГТЭС.

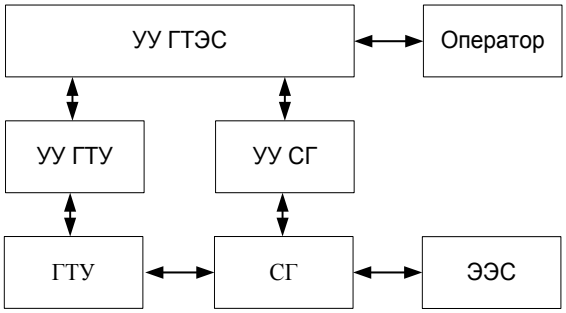

Рисунок 1 – Структурная схема АСУ одноблочной ГТЭС

Выделен перечень типовых возмущений внешней электросистемы, связанный с характерными динамическими режимами электроэнергетической системы (ЭЭС), среди них: пуск мощного асинхронного двигателя или группы асинхронных двигателей; короткое замыкание или перегрузка в распределительной или питающей сети и их устранение, отключение линии электропередачи с последующим успешным или неуспешным автоматическим повторным включением; отключение и включение одного или нескольких

генераторов ГТЭС; различные последовательности аварийных событий и противоаварийных управляющих воздействий: короткие замыкания и их устранение, отключения и последующие подключения двух и более линий электропередачи, действие противоаварийной автоматики, форсировка возбуждения электрогенераторов и др.; несимметричные короткие замыкания при срабатывании или отказе противоаварийной автоматики и их устранение; переход с автономного режима работы ГТЭС на параллельный режим работы или работу на мощную сеть и наоборот; изменение момента сопротивления нагрузки в связи с изменением механической нагрузки электродвигателей и др.

Внешние возмущения вызывают отклонения в частоте вращения ГТУ, что снижает качество вырабатываемой электроэнергии по частоте, время возникновения возмущений заранее неизвестно, при этом образуется единая динамическая система, включающая в себя помимо нескольких ГТУ также синхронные генераторы и другие элементы ЭЭС. Возникающие в такой системе перетоки мощности приводят к возникновению колебаний частоты, значительным отклонениям частоты по величине и длительности. Задача стабилизации частоты вращения возложена наряду с другими функциями на САУ ГТУ. Очевидно, что выбор эффективных алгоритмов управления САУ требует исследования основных характерных режимов ЭЭС, при этом такие исследования в режиме нормальной эксплуатации ГТЭС и, прежде всего разнообразные аварийные режимы, практически невыполнимы. Поэтому такие исследования выполняются на полунатурных и компьютерных стендах с использованием математической модели ЭЭС, а полученные результаты настройки САУ в дальнейшем проходят выборочную проверку при натурных экспериментах для установленных программой испытаний отдельных режимов. Большое число и особенности рассматриваемых возмущений со стороны ЭЭС и связанные с этим противоречивые требования к параметрам САУ приводят к тому, что существующие САУ ГТУ не в состоянии обеспечить требования ГОСТ к качеству электроэнергии по частоте. В качестве примера на рисунке 2 показаны результаты натурных испытаний при которых переходный процесс по частоте при наброс нагрузки превосходит 15 с. Здесь обозначено: 1 – частота вращения свободной турбины ГТУ, 2 – частота вращения турбокомпрессора, 3 – положение дозирующей иглы дозатора газа, 4 – температура газа за турбиной, 5 – метка контура регулятора.

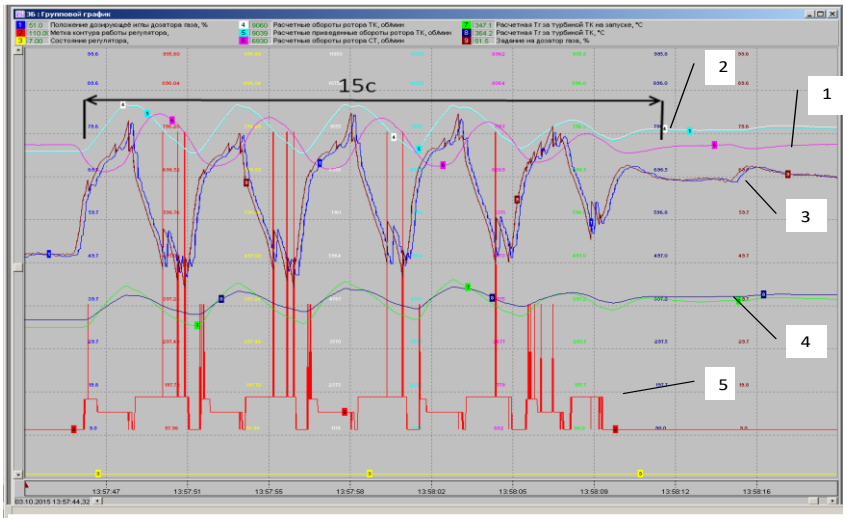

Рисунок 2 – Натурные испытания САУ ГТЭС 6 МВт при наброс нагрузки с 1,5 МВт на 3 МВт

Существующие устройства управления САУ ГТУ наследуют

принципы построения авиационных ГТУ и выполняются по селективной схеме. Селектор изменяет структуру САУ в зависимости от ее состояния (рисунок 3). На рисунке выделен контур управления частотой вращения свободной турбины $n_{СТ}$.

Показано, что существующие САУ ГТУ имеют сложную многомерную структуру, в которой взаимодействие контуров может оказывать существенное влияние, как на процессы стабилизации, так и на характеристики переходных режимов. В частности, параллельное воздействие нескольких сигналов (контуров) на один исполнительный орган может приводить к появлению нежелательных процессов. Следует отметить, что динамические характеристики ГТУ оказываются различными для отдельных каналов управления (рисунок 3). Это означает, что структура и параметры регуляторов также должны быть различны.

Сделан вывод о том, что возможности дальнейшего улучшения характеристик селективных САУ с точки зрения повышения качества электроэнергии в настоящее время выглядят в значительной степени исчерпанными. В связи с этим возникает задача поиска альтернативных вариантов построения САУ.

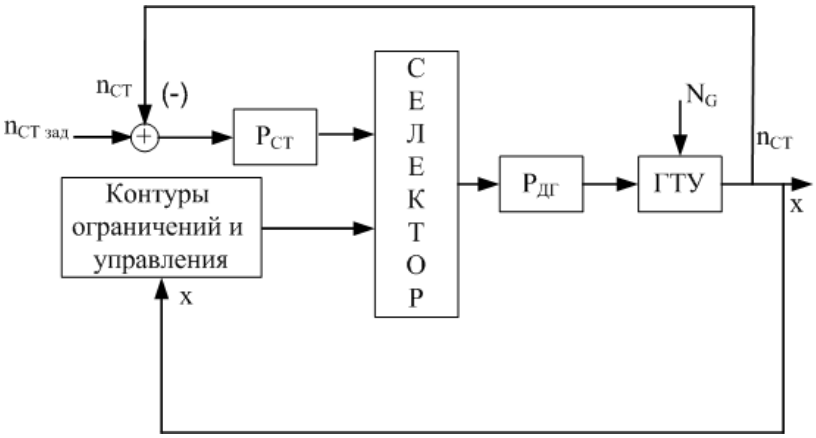

Рисунок 3 – Обобщенная схема штатной САУ ГТУ, $Р_{СТ}$ – регулятор свободной турбины, $Р_{ДГ}$ – регулятор дозатора газа

Анализируются существующие методы управления газотурбинными установками таких авторов как: И.Ю. Тюкин, В.А.Терехов, B.E. Ricketts, N. Chiras, C. Evans, D. Rees, I.T. Nabney, D.C. Cressy, научных коллективов из ОАО НПП «Темп» им. Ф. Короткова, ЗАО "Научно-производственная фирма "Система-Сервис" и ряда других. Зачастую в современных исследованиях, проводящихся в этом направлении, изучают возможности нечеткого и нейросетевого математического аппарата или совершенствование селективной структуры классическими методами. При этом в большинстве исследований не учитываются существующие ограничения по изменению переменных состояния, которые учтены в реальных системах управления ГТУ, не учитываются разнообразные возмущения со стороны электрической системы. Поэтому такие исследования представляют в основном только теоретический интерес.

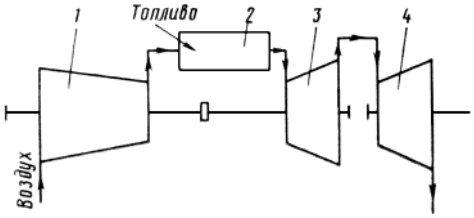

Рисунок 4 – Схема двухвальной ГТУ: 1 - компрессор; 2 - камера сгорания; 3 - компрессорная турбина; 4 - свободная турбина

Для выявления особенностей динамики элекроэнергетических ГТУ производится анализ ГТУ как нелинейного и нестационарного объекта управления (рисунки 4,5), эти свойства наряду с внешними возмущениями ЭЭС и селективной

структурой САУ также влияют на качество вырабатываемой электроэнергии. Для газотурбинных электростанций в основном используются двухвальные ГТУ, где связь между газогенератором и свободной турбиной которых является газодинамической. Это позволяет избежать передачи монтажных, термических и вибрационных воздействий от блока привода, но влечет и ряд недостатков и, прежде всего, установка становится существенно инерционной, при этом сложно стабилизировать частоту вращения свободной турбины при разнообразных возмущениях со стороны электросистемы.

На рисунке 4 показано устройство, а на рисунке 5 структурная схема упрощенной нелинейной динамической модели ГТУ, здесь приняты следующие обозначения: $n_{TS} = f(G_{\text{Т}})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование расхода топлива (кг/час) в обороты турбокомпрессора (об/мин); $T(n_{\text{ТК}})$ – постоянная времени турбокомпрессора, зависящая от текущей частоты вращения турбокомпрессора; $N_E = f(n_{TK})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование частоты вращения турбокомпрессора (об/мин) в мощность свободной турбины (кВт); N_G – мощность нагрузки (кВт); $k_{\text{СТ}}(n_{\text{СТ}})$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от $n_{\text{СТ}}$; J – суммарный приведенный к валу свободной турбины момент инерции; $n_{\text{СТ}}$ – частота вращения свободной турбины (об/мин). Упрощенная модель (рисунок 5)демонстрирует точность, сопоставимую в основных режимах со сложной поэлементной моделью, построенной на основании физических принципов функционирования ГТУ и учитывающей внутренние нелинейные зависимости переменных и перекрестные связи.

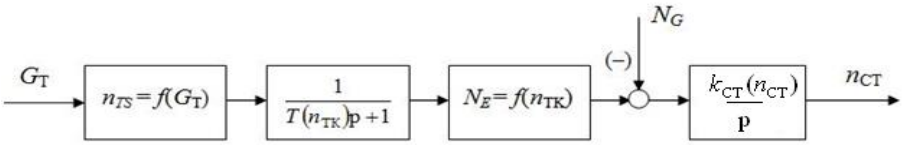

Рисунок 5 – Структурная схема двухвальной ГТУ как объекта управления.

В результате анализа проблемной ситуации сформулирована цель и поставлены задачи, необходимые для достижения цели.

<u>Во второй главе</u> приведено математическое описание используемых моделей, существующих и разрабатываемых в диссертации методов адаптивного управления и идентификации в реальном времени. Применение рассматриваемой группы методов широко освещается в работах Ю.А. Борцова, Н.Д. Поляхова, В.В. Путова, А.А.Красовского, В.Ю.Рутковского, С.Д. Землякова и др.

Показано, что методы адаптации могут быть использованы, во-первых, для построения новой адаптивной САУ ГТУ и, во-вторых, для разработки отдельной типовой подсистемы адаптивного управления, которая предназначена для использования в составе уже существующей САУ ГТУ. В случае создания отдельной подсистемы адаптивного управления для штатной САУ ГТУ время разработки и испытаний существенно меньше, возможна разработка типовой подсистемы адаптивного управления для всего мощностного ряда ГТЭС, повышается безопасность отладки и испытаний САУ ГТУ, поскольку сигнал от подсистемы адаптивного управления становится возможно вводить постепенно,

исследуя его влияние на работоспособность САУ ГТУ в составе ГТЭС. В результате, в диссертации обоснован выбор в пользу разработки отдельной подсистемы адаптивного управления для контура стабилизации частоты вращения.

Показано, что методы адаптивного управления, разработанные Ю.А. Борцовым, Н.Д. Поляховым и В.В. Путовым для электроприводов, могут быть успешно применены для управления ГТУ после учета ряда особенностей ГТУ как объекта управления и внесения соответствующих модификаций в эти методы. Матрицы и вектора в дальнейшем выделены полужирным шрифтом, скаляры выделены курсивом. Движение ГТУ с учетом нестабильности свойств записывается в виде дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathrm{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, ..); \;\; \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x_0}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ – n-мерная функция состояния системы; $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ m-мерная функция управляющих воздействий; $\boldsymbol{\xi}$ – вектор ограниченной размерности меняющихся параметров; $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$ – n-мерная функция внешних возмущений; $\mathbf{x_0}$ – начальное состояние. В такой форме записывается полная поэлементная модель ГТУ, которая используется при проектировании мощностного ряда ГТУ различного, в том числе наземного применения.

Описание нелинейной нестационарной модели ГТУ представим в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\,\mathbf{u} + \mathbf{f}(t), \qquad (2)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t)); \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t))$ – функциональные матрицы соответствующих размеров. Здесь предполагается управляемость пары (**A**, **B**). Описание (2) должно сопровождаться указанием границ изменения элементов матриц **A**, **B**. В такой форме на основе исследования сложной поэлементной модели ГТУ (1) получена нелинейная модель для исследования методов управления (рисунок 3). Эта модель представляет собой совмещение линейной модели и нелинейных зависимостей, полученных экспериментально.

В состав модели ГТУ целесообразно включить регуляторы согласно рисунку 4. Эти регуляторы оптимально настроены. Передаточные функции регуляторов имеет следующий вид: $W_{\text{СТ}}(\text{р}) = k_{\text{П}} \dfrac{k_i + k_f \text{р}}{k_i + \text{р}}$ – регулятор частоты вращения свободной турбины $n_{\text{СТ}}$ ГТУ (так же выполняет функции фильтра), $W_G(\text{р}) = \dfrac{1 + T_{\text{Д}}\text{р}}{\text{р}} k_{\text{Д}}$ – регулятор дозатора газа ГТУ. Вектор управления $\mathbf{u} = \left[u_1, u_2\right]^{\text{Т}}$ введем в состав расширенного вектора состояния уравнения (2): $\mathbf{x} = \left[x_1, x_2, x_3, x_4\right]^{\text{Т}}$, где: $x_1 = n_{\text{СТ}}$, $x_2 = n_{\text{ТК}}$ – частота вращения турбокомпрессора, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа, x_4 – выход интегратора регулятора $n_{\text{СТ}}$. Тогда уравнение (2) запишется в виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\,\mathbf{g} + \mathbf{f}(t), \qquad (3)$$

где в векторе $\mathbf{g} = \left[0, 0, 0, g\right]^{\text{Т}}$ элемент $g = n_{\text{СТзад}}$ – сигнал задания частоты вращения свободной турбины. С учетом вида матриц $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ запишем:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12}(x_1,x_2,t) & 0 & 0 \\ a_{21}(x_2,x_3,t) & a_{22}(x_2,t) & a_{23}(x_2,x_3,t) & a_{24}(x_2,x_3,t) \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{34} \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2(x_2,x_3,t) \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $f_1(t) = k_{\text{СТ}}(x_1,t)N_G(t)$.

Темп изменения элементов матриц достаточно быстрый, связан напрямую с темпом изменения частоты вращения турбокомпрессора и свободной турбины. В зоне переключения механизации ГТУ темп изменения параметров скачкообразный, что дополнительно осложняет управление ГТУ. Кратность изменения составляет от 1,5 до 25 (для ГТУ мощностью 6 МВт).

Выделим в правой части (3) линейную стационарную часть так, чтобы описание имело бы вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\ \mathbf{g} + \boldsymbol{\sigma}_\varphi\ , \tag{4}$$

где $\boldsymbol{\sigma}_\varphi = \mathbf{F}(\mathbf{x},\mathbf{u},\boldsymbol{\xi},\mathbf{f},\ t) - \mathbf{A_0x} - \mathbf{B_0u}$ – нелинейная нестационарная часть; $\mathbf{x}$ – 4-мерный вектор состояния; $\mathbf{g}$ – 4-мерный вектор задающих воздействий: $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{B}_0$ – (4×4)-мерные постоянные матрицы, характеризующие линейную стационарную часть, которые могут быть приближением, полученным линеаризацией и усреднением во времени элементов матриц, либо обозначать желаемое поведение объекта. Тогда считаем линейную стационарную часть эталонной моделью (ЭМ): $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_\text{м}$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_\text{м}$, где $\mathbf{A}_\text{м}$ – гурвицева матрица (устойчива). Уравнение (4) представим в виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{34} \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} g + \begin{bmatrix} \sigma_{f1}(x_1,x_2,t) \\ \sigma_{f2}(x_2,x_3,t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Добавим к (3) уравнение адаптивного регулятора в виде

$$\mathbf{u} = \mathrm{U}\ (\mathbf{v},\mathbf{K},\mathbf{z},\mathbf{g}), \tag{5}$$

где $\mathbf{g} = \mathbf{g}(t)$ – 4-мерный вектор сигналов задания; $\mathbf{K} = \mathbf{K}(t)$ – матрица настраиваемых параметров; $\mathbf{z} = \mathbf{z}\ (t)$ – 4-мерный вектор дополнительных (сигнальных) воздействий. Здесь $\mathbf{K}$ и $\mathbf{z}$ – средства адаптации: параметрическая настройка (ПН) и сигнальная настройка (СН).

Пусть задана эталонная модель вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_\text{М}\mathbf{x}_\text{М} + \mathbf{B}_\text{М}\mathbf{g} + \mathbf{f}(t), \tag{6}$$

реакция которой благодаря оптимальной настройке регуляторов на возмущающее воздействие $\mathbf{f}(t)$ соответствует ГОСТ. Возмущающее воздействие $\mathbf{f}(t)$ полагаем известным и равным измеренной активной мощности СГ. Требуется построить закон управления $\mathbf{u}\ (t)$, выраженный через минимизацию функционала качества на решениях системы (4), (6), такой, что при любых $\boldsymbol{\xi} \in \mathbf{M}$, $\mathbf{x}\ (t_0)$, $\mathbf{x}_\text{м}(t_0)$, где $\mathbf{M}$ – область изменения нелинейных параметров, выполнялось неравенство

$$\|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_\text{М}\ (t)\| = \|\ \mathbf{e}\ (t)\| \le \varepsilon_0 \tag{7}$$

для любых $t \ge t_a$, $t_a = t_0 + \theta_a$, $t_0 \ge 0$, где θ_a – время адаптации, или предельное соотношение

$$\lim_{t\to\infty} \| \mathbf{e}(t) \| = 0 . \tag{8}$$

для сигнальной адаптации

$$\mathbf{z}(t) = -h\,\mathrm{sgn}(\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{Pe});\ h > 0, \tag{9}$$

для параметрической настройки

$$\dot{\boldsymbol{\delta}} = -\ \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{Pev}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma};\ \boldsymbol{\Gamma} = \mathrm{diag}\{\gamma_1,\ldots,\gamma_{n+m}\};\ \gamma_i > 0. \tag{10}$$

В силу того, что, как показали исследования, высокочастотные колебания, возникающие в результате скользящего режима сигнальной адаптации (9), являются недопустимыми для исполнительного механизма дозатора газа ГТУ, преобразуем (9) к виду:

$$\mathbf{z}(t) = -\ h\,\mathrm{sigma}(\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{Pe});\ h>0, \tag{11}$$

где $\mathrm{sigma}(x) = \dfrac{1}{1+e^{-x/k}} - 0{,}5 = 0{,}5\dfrac{1-e^{-x/k}}{1+e^{-x/k}}$ – сигмоидальная функция, коэффициент k = const>0 определяет угол наклона касательной к сигма-функции в нуле, тангенс угла наклона касательной будет равен $\dfrac{1}{2k}$. При $k \to +0$ сигмоидальная функция стремится к функции знака $\lim\limits_{k\to+0} \mathrm{sigma}(x) = \mathrm{sgn}(x)$.

Для достижения (8) при использовании (11) необходимо дополнить ЭМ статическими характеристиками, поскольку зависимость между расходом топлива и частотой вращения турбокомпрессора является нелинейной. Показано, что математический аппарат идентификации в реальном времени, разработанный В.Ю.Рутковским, С.Д. Земляковым и А.А.Красовским, после учета особенностей системы управления и объекта управления может быть использован для создания НМ. Рассмотрим алгоритм настройки линейной модели (6) в процессе управления. Алгоритм настройки будет иметь следующий вид:

$$\dot{\mathbf{A}}_{\text{м}} = \boldsymbol{\Delta}\mathbf{z}(\mathbf{Kx})^{\mathrm{T}}, \dot{\mathbf{B}}_{\text{м}} = \boldsymbol{\Delta}\mathbf{z}(\mathbf{Dg})^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\Delta}\mathbf{z} = \boldsymbol{\Delta}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}_{\text{м}}\boldsymbol{\Delta}\mathbf{x} = \boldsymbol{\Delta}\mathbf{A}\mathbf{x} + \boldsymbol{\Delta}\mathbf{B}\mathbf{g} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{\Delta}\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{м}}, \boldsymbol{\Delta}\mathbf{A} = \mathbf{A} - \mathbf{A}_{\text{м}}, \boldsymbol{\Delta}\mathbf{B} = \mathbf{B} - \mathbf{B}_{\text{м}} \tag{14}$$

где **K**, **D** – положительно-определенные диагональные матрицы заданных постоянных коэффициентов. Все векторы $\mathbf{x}$, $\mathbf{x}_{\text{М}}$, $\mathbf{g}$, $\dot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}_{\text{М}}$ считаются непосредственно наблюдательными (измеряемыми). Устойчивость процесса идентификации обеспечивается благодаря функции Ляпунова, построенной В.Ю.Рутковским, С.Д. Земляковым и А.А.Красовским.

Как показали исследования, для увеличения точности идентификации и уменьшения параметрического возмущения, обусловленного остановкой процесса идентификации из-за переключения каналов управления, в уравнение (6) можно ввести статические характеристики. В отличие от ЭМ для построения этих статических характеристик достаточно двух точек – холостого хода и номинального режима. Таким образом, уравнение НМ можно представить в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\text{М}} = (\mathbf{A}_{\text{М}}(\mathbf{x}) + \mathbf{A}_{\text{М}}(\boldsymbol{\Delta}\mathbf{z}))\mathbf{x} + (\mathbf{B}_{\text{М}}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_{\text{М}}(\boldsymbol{\Delta}\mathbf{z}))\mathbf{g} + \mathbf{f}(\mathrm{t}) \tag{15}$$

где $\mathbf{A}_{\text{М}}(\mathbf{x}), \mathbf{B}_{\text{М}}(\mathbf{x})$ – матрицы, соответствующие нелинейной модели с упрощенными статическими характеристиками; $\mathbf{A}_{\text{М}}(\mathbf{\Delta z})$, $\mathbf{B}_{\text{М}}(\mathbf{\Delta z})$ – матрицы, изменяющиеся в процессе идентификации согласно (12).

ЭМ требует учета нелинейных свойств ГТУ в процессе создания подсистемы адаптации и проведения периодических дополнительных исследований для учета нестационарных свойств ГТУ. Для устранения указанных недостатков необходимо проводить идентификацию ГТУ в процессе управления. Это означает замену ЭМ в схеме управления на настраиваемую модель (НМ).

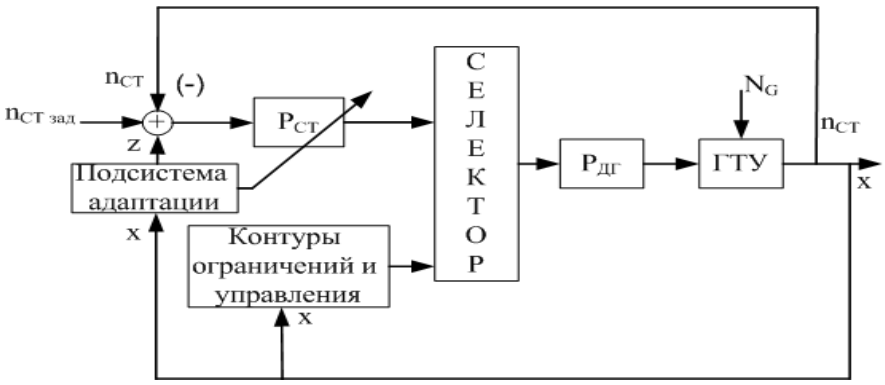

Рисунок 6 – Обобщенная схема штатной САУ ГТУ с подсистемой адаптивного управления

Получена новая структура адаптивной САУ ГТУ для АСУ ГТЭС, включающая подсистему адаптивного управления ГТУ (рисунок 6).

Из структуры САУ ГТУ, представленной на рисунке 6, следует, что подсистема адаптации влияет только на контур стабилизации частоты вращения свободной турбины. Схема селектирования каналов управления и прочие контура ограничения и управления остаются неизменными. Поэтому внедрение подсистемы адаптивного управления в состав штатной САУ ГТУ не требует больших затрат на модернизацию САУ и на проведение предварительных и доводочных испытаний.

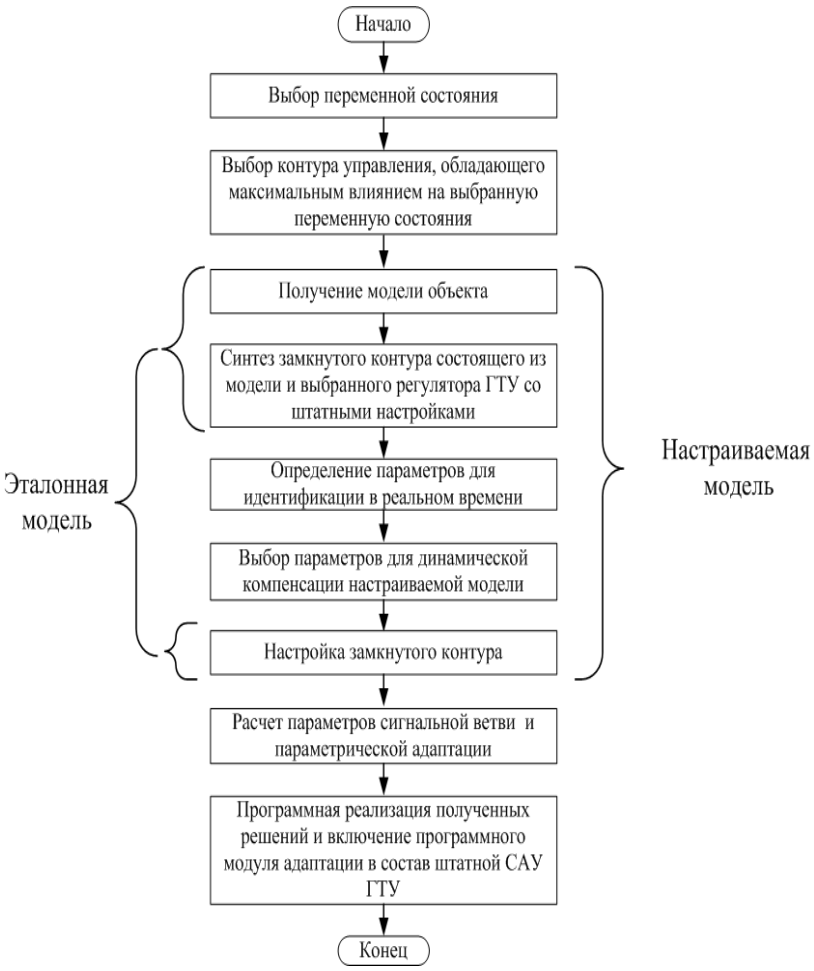

Рисунок 7 – Алгоритм построения модуля адаптации

<u>В третьей главе</u> разработан алгоритм построения подсистемы адаптивного управления, программных модулей подсистемы адаптивного управления и рассмотрена программная реализация их взаимодействия в составе

программного комплекса, имитирующего внешнюю ЭЭС.

Разработанный алгоритм (рисунок 7), регламентирует последовательность проведения действий и расчетов для построения подсистемы адаптивного управления с ЭМ или НМ и ПН(10) или СН(11).

Разработанные программные модули были объединены в программный комплекс для предварительной настройки и отладки алгоритмов адаптации.

В программный комплекс вошли: модуль расчета, модуль моделей и регуляторов ГТУ, модуль настраиваемой модели, модуль эталонной модели, модуль сигнальной адаптации и модуль параметрической адаптации (рисунок 8).

После получения удовлетворительных результатов разработанные программные модули подсистемы адаптивного управления включены в состав штатного регулятора, входящего в программный моделирующий комплекс «КМЭС» (АО «ОДК-Авиадвигатель»). Программный моделирующий комплекс «КМЭС» включает себя модели ГТУ, разработанные на АО «ОДК-Авиадвигатель», и используется на предприятии для разработки САУ ГТУ и их предварительной проверки с учетом динамики электроэнергетической системы. Эти модели ГТУ являются многоэлементными динамическими, они с высокой степенью адекватности описывают физические процессы, протекающие в ГТУ, и демонстрируют высокую степень соответствия экспериментальным данным для ГТЭС. Модели отлажены, верифицированы и успешно эксплуатируются.

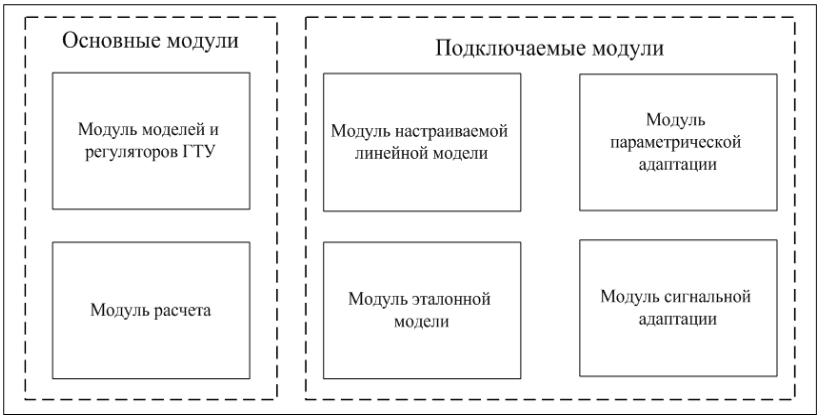

Рисунок 8 – Программный комплекс предварительной настройки адаптивных контуров.

Программный моделирующий комплекс (ПМК) «КМЭС» обладает гибкой структурой, в рамках которой можно конфигурировать модель электрической системы. ПМК «КМЭС» позволяет моделировать все основные перечисленные ранее характерные переходные процессы, вызванные возмущениями в электрической системе, поэтому ПМК позволяет исследовать и тестировать методы адаптивного управления САУ ГТУ автоматизированной системы управления ГТЭС с учетом динамики электрической системы.

В четвертой главе приведены результаты исследования разработанных методов адаптивного управления методами математического моделирования. Первоначальная проверка проводилась на упрощенных моделях газотурбинных двигателей с регулятором частоты вращения свободной турбины. Итоговая проверка проводилась на испытательной базе АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь) на сложных динамических моделях совместно с полным штатным регулятором, который был дополнен разработанной в диссертации подсистемой адаптивного управления.

Для параметрической адаптации с настраиваемой моделью ГТУ-12ПГ-2 в случае рассмотрения одного контура регулирования частотой вращения свободной турбины САУ ГТУ были получены следующие результаты: улучшение максимального отклонения до 40% при набросе нагрузки в сравнении с максимальным отклонением без адаптации и сокращение времени переходного процесса на 8 секунд. Однако дальнейшие исследования показали, что параметрическая адаптация не достаточно эффективна при использовании в составе штатного селективного регулятора ГТУ (рисунок 3), поскольку при передаче селектором приоритета управления другому контуру управления процесс адаптации завершается, и поэтому при возврате приоритета регулятор оказывается настроен не оптимально.

Испытания для сигнальной адаптации проводились со штатным регулятором ГТУ для ГТУ-6П (Д30ЭУ-6) с синхронным генератором ГТГ-6, изменение потребляемой активной мощности производилось ступенями: 1000 – 4000 – 1000 кВт, при cosφ = 0,9. В результате получено улучшение максимального отклонения для метода адаптации с ЭМ – 34%, для НМ – 41% при набросе нагрузки; для ЭМ – 11,5%, для НМ – 12,3% при сбросе нагрузки в сравнении с системой без адаптации. Получено сокращение времени регулирования: ЭМ – 22%, НМ – 24% при набросе нагрузки, ЭМ – 8%, НМ – 12% при сбросе нагрузки. Результаты для СН с эталонной и настраиваемой моделями показаны на рисунке 9, результаты по отдельным экспериментам сведены в таблицу.

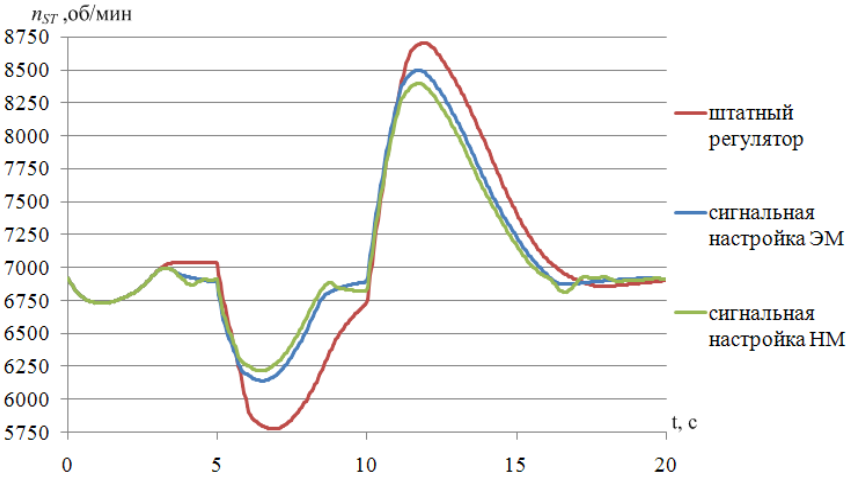

Рисунок 9 – Частота вращения свободной турбины СН ЭМ и СН НМ

Таблица – Сравнение методов адаптивного управления с СН

Вид испытания	Сигнальная настройка, НМ		Сигнальная настройка, ЭМ	
	Макс. отклонение,%	Время п.п., с	Макс. отклонение,%	Время п.п., с
Наброс 50% симметричной нагрузки	до 7%	до 3с	до 6%	до 2,5с
Сброс 50% симметричной нагрузки	до 9%	до 3с	до 7,5%	до 2,5с
Пуск асинхронного двигателя сопоставимого по мощности	до 1,5%	до 3 с	до 1%	до 2 с
Пуск сопоставимого по мощности асинхронного двигателя при параллельной работе двух ГТУ с нагрузкой	до 2%	до 3 с	до 1,4%	до 2 с

Полученные в четвертой главе результаты подтверждены актом внедрения в производственную деятельность АО «ОДК-Авиадвигатель». Разработаны рекомендации по проведению испытаний адаптивных САУ ГТУ на стендах АО «ОДК-Авиадвигатель». В результате испытаний удалось добиться улучшения показателей качества регулирования по каналу частоты вращения свободной турбины ГТУ по максимальному отклонению и по длительности переходного процесса при одновременном сохранении показателей качества по напряжению электрогенератора в сравнении со штатной САУ ГТУ; удалось сократить затраты времени на настройку регуляторов САУ ГТУ за счет использования модуля адаптивного управления, подключаемого параллельно регуляторам штатной САУ ГТУ, что доказывает целесообразность внедрения разработанных методов адаптации в существующие регуляторы штатных САУ ГТУ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны новые методы сигнального и параметрического адаптивного управления газотурбинными установками для АСУ ГТЭС с учетом возмущений в электрической системе, основанные на комплексной оценке текущего состояния ГТУ.
2. Разработан оригинальный метод идентификации в реальном времени для подсистемы адаптивного управления САУ ГТУ, позволяющий задать желаемую реакцию системы на возмущение для ее текущего состояния.
3. Разработана система адаптивного управления ГТУ для АСУ ГТЭС, и соответствующая ей новая структура САУ ГТУ, обеспечивающие адаптивное управление ГТУ при внешних возмущениях со стороны ЭЭС.
4. Выполнена программная реализация системы адаптивного управления САУ ГТУ для использования в составе автоматизированной системы управления ГТЭС.
5. Проведены исследования и обоснование разработанных методов адаптивного управления с учетом динамики электрической системы, подтвердившие правильность принятых решений.

Разработанные в диссертации методы и программы использованы при создании подсистемы адаптивного управления САУ электроэнергетическими ГТУ на базе авиационных двигателей Д-30 и ПС-90 для АО «ОДК-Авиадвигатель». В результате внедрения разработанной подсистемы адаптивного управления достигнуто улучшение показателей качества вырабатываемой электроэнергии по частоте: на 5% по максимальному отклонению и на 20% по длительности переходного процесса, время настройки штатных регуляторов сократилось в 2 раза и более при испытаниях САУ ГТУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях:

1. Алгоритм построения быстрорешаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным/

И.В. Бахирев, Г.А. Килин, А.Ю. Поварницын, Б.В. Кавалеров, К.А. Один //Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2013. – № 3(59). – С.116-118.

2. Идентификация газоперекачивающего агрегата для модельного испытания и настройки системы управления/ Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев**, А.Ю. Поварницын//Вестник Воронеж. гос. ун-та, Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – №1. – С.65–71.
3. Кавалеров, Б. В. Алгоритм поиска нелинейной модели ГТУ для привода ГПА/ Б.В. Кавалеров, Г.А. Килин, **И.В. Бахирев** //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова. – 2014. – №. 2. – С.133-136.
4. **Бахирев, И.В.** Построение модели газотурбинной установки для адаптивного управления/И.В. Бахирев//Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2015. – №. 3. – С. 104-107.
5. **Бахирев, И.В.** Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигмоидальной функцией/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров//Системы управления и информационные технологии, №3.1(61). – 2015. – С.118-123
6. **Бахирев, И.В.** Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигнальной настройкой/ И.В. Бахирев, Ш.Д. Басаргин, Б.В. Кавалеров//Системы управления и информационные технологии, №2(60), 2015. – С. 71-76
7. Зиятдинов, И.Р. Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки/ И.Р. Зиятдинов, Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев** //Фундаментальные исследования. – 2015. – №. 6. – С.235-240.
8. **Бахирев, И.В.** Идентификация в темпе переходного процесса при управлении электроэнергетической газотурбинной установкой/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров// Системы управления и информационные технологии. – №2(64). – 2016. – С.73-77.
9. Кавалеров, Б.В. Нечеткое управление газотурбинной установкой/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев**//Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2016. – 3(71). – С.66–68.
10. Зиятдинов, И.Р. Исследование адаптивного управления газотурбинной электроэнергетической установкой при пуске соизмеримого по мощности асинхронного двигателя/ И.Р. Зиятдинов, Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев**// Фундаментальные исследования. – 2016. – № 12-1. – С. 49-57.
11. Кавалеров, Б.В. Исследование параметрической адаптации регулятора газотурбинной установки электростанции мощностью 6 МВт/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев**, Ш.Д. Басаргин//Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-2. – С. 281-285.

Публикации в изданиях входящих в международные базы цитирования:

12. Kavalerov, B. V. An investigation of adaptive control of the rotation speed of gas turbine power plants/ B. V. Kavalerov, **I. V. Bakhirev**, G. A. Kilin //Russian Electrical Engineering. – 2016. – V. 87. – №. 11. – P. 607-611.

13. Kavalerov B. V. Adaptive control of the rotational frequency of a gas-turbine unit using a tunable model/ Kavalerov B. V., **Bakhirev I. V.**, Kilin G. A //Russian Electrical Engineering. – 2017. – Т. 88. – №. 11. – С. 738-741.

Патенты и свидетельства о регистрации:

14. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. №2015662588 «Автоматизированное получение нейросетевых моделей газотурбинных установок и электроэнергетической системы» («Нейросетевая модель ГТУ-ЭЭС»)./ Бахирев И.В., Килин Г.А., Кавалеров Б.В. Дата приор. 05.10.2015. Дата регистрации 26.11.2015.
15. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. №2016661194 «Моделирование адаптивного регулятора с эталонной моделью газотурбинной установки» («Adaptive_Control_C»)./ Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Дата приоритета 05.08.2016. Дата регистрации 3.10.2016.
16. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ №2016661250. «Моделирование адаптивного регулятора с эталонной моделью газотурбинной установки» («Adaptive_Control_D»)./ Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Дата приоритета 05.08.2016. Дата регистрации 4.10.2016.
17. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. №2017611583 «Идентификация газотурбинной установки в реальном времени» («GTU_Realtime_Identification»)./ Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Дата приоритета 09.12.2016. Дата регистрации 06.02.2017.

Публикации в других изданиях:

18. **Бахирев, И.В.** Нейросетевые модели управления в задачах испытания САУ ГТУ / И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2012) [Электронный ресурс] : материалы IV Междунар. интернет-конф. мол. учен., аспирантов, студентов, (01 нояб. 2012 г. 31 дек. 2012 г.). / М-во обр. и науки РФ, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. - Пермь
19. **Бахирев, И.В.** Применение нейросетевой технологии при испытании и настройке систем управления ГТУ с использованием программного комплекса «ЭлектроДин»/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров, К.А. Один // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – №. 7. – С. 96-104.
20. Кавалеров, Б.В. //Современные тенденции развития адаптивного управления и перспективы его применения для наземных газотурбинных установок/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев** // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике : материалы VII Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. интернет-конф., 13 нояб. 2013 г. / Мин-во образования и науки РФ, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 2013. – С. 132-139.
21. **Бахирев, И.В.** Application of radial basis function networks for interpolating the equation factors of a gas turbine unit model / И.В. Бахирев //Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности. – 2014. –

№ 1. – С. 40-41.

22. Кавалеров, Б.В. Исследование варианта структуры нечеткого ПИД-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев** //Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – №. 1. – С. 16-24
23. О задачах исследования адаптивного управления электростанциями на базе конвертированных авиационных ГТУ/ Б.В. Кавалеров, Е.А. Маталасова, **И.В. Бахирев**, Г.А. Килин //Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – №. 11. – С. 65-77.
24. Об адаптивном управлении газотурбинной электростанцией с эталонной моделью / **И.В. Бахирев**, Б.В. Кавалеров//Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике : материалы I Междунар. науч.-техн. конф. (24-25 сент. 2015 г.),Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2015. – С. 31-37.
25. Кавалеров, Б.В./ Построение упрощенной модели ГТУ с учетом основных физических принципов преобразования энергии»/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев**// Материалы VIII Всерос. (с междунар. участ.) науч.-техн. интернет-конф. «Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике»: материалы конф., Пермь, 2015 г. / Мин-во обр. и науки РФ; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь, 2015. – С. 143-154.
26. **Бахирев, И.В.** Идентификация электроэнергетической газотурбинной установки в процессе управления/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров//«Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике»: материалы II Международной научно-технической конференции. – Пермь 2016. – С. 61-65
27. **Бахирев, И.В.** Управление электроэнергетической газотурбинной установкой с сигнальной настройкой и настраиваемой моделью/ И.В. Бахирев //Наука сегодня: задачи и пути их решения [Текст]: материалы Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: задачи и пути их решения» (Россия, Вологда, 25 мая 2016 г.). – 2016. – С. 13-16.
28. Кавалеров, Б.В. Идентификация электроэнергетической газотурбинной установки в реальном времени/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев** // "Климовские чтения - 2016. Перспективные направления развития авиадвигателестроения": материалы междунар. научно-техн. конф. СПб.– 2016. – С. 223 – 229.
29. Кавалеров, Б.В. Параметрическое адаптивное управление электроэнергетической газотурбинной установкой/ Б.В. Кавалеров, **И.В. Бахирев** //Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. – 2016. – С. 158–160.