

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

БАХИРЕВ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент КАВАЛЕРОВ Борис Владимирович

Пермь – 2018

Оглавление

Список применяемых сокращений	4
Введение	5
Глава 1. Проблема качества вырабатываемой электроэнергии на электростанциях с конвертированными газотурбинными установками	14
1.1. Процесс производства электроэнергии на электростанциях с конвертированными газотурбинными установками	16
1.2. Газотурбинная установка как объект управления	21
1.3. Анализ принципов реализации традиционных САУ ГТУ для ГТЭС	24
1.4. Современные тенденции развития адаптивного управления и перспективы его применения в электроэнергетике	29
1.5. Выводы по первой главе	38
Глава 2. Разработка системы адаптивного управления	40
2.1. Математическое описание метода адаптивного управления с эталонной моделью	41
2.2. Математическое описание беспоиcкового метода идентификации в реальном времени	50
2.3. Структура адаптивной САУ ГТУ	54
2.4. Выводы по второй главе	55
Глава 3. Программная реализация адаптивного управления	57
3.1. Алгоритм построения подсистемы адаптации	57
3.2. Программный моделирующий комплекс «КМЭС»	64
3.3. Модули адаптивного управления	68
3.4. Программный комплекс предварительной настройки модулей	71
3.5. Выводы по третьей главе	74
Глава 4. Сравнительный анализ методов адаптивного управления	75
4.1. Первичная проверка	75
4.2. Вторичная проверка	87
4.3. Выводы по четвертой главе	103
Заключение	105
Список использованной литературы	107

Приложение А Результаты расчетов постоянных времени турбокомпрессора и свободной турбины	118
Приложение Б Статические характеристики газотурбинной установки	119
Приложение В Акт внедрения результатов кандидатской (диссертационной) работы Бахирева Ивана Владимировича (АО «ОДК-Авиадвигатель»)	120
Приложение Г Акт внедрения результатов кандидатской (диссертационной) работы Бахирева Ивана Владимировича в учебный процесс	122

Список применяемых сокращений

АСУ – автоматизированная система управления;

БАИАМ – беспойсковый алгоритм идентификации с адаптивной моделью;

ГТД – газотурбинный двигатель;

ГТУ – газотурбинная установка;

ГТЭС – газотурбинная электростанция;

НМ – настраиваемая модель;

ПМК – программный моделирующий комплекс;

ПН – параметрическая настройка;

ПНИПУ – Пермский национальный исследовательский политехнический университет;

САУ – система автоматического управления;

СТГ – синхронный турбогенератор;

СН – сигнальная настройка;

СО – симметричный оптимум;

СТ – свободная турбина;

ТК – турбокомпрессор;

ТТВД – турбовентиляторный двигатель;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

ЭМ – эталонная модель;

ЭЭС – электроэнергетическая система.

Введение

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений электроэнергетики является использование конвертированных авиационных двигателей для создания электростанций мощностью до 25 МВт и более. За рубежом более чем 40 фирм занимаются выпуском подобных газотурбинных энергетических установок. В России изготовлением газотурбинных установок (ГТУ) для электроэнергетики занимаются, прежде всего, предприятия, разрабатывающие и изготавливающие авиационные и судовые газотурбинные двигатели, а также ГТУ, создаваемые специально для электроэнергетики, среди них можно назвать: АО «ОДК-Климов» (Санкт-Петербург), АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь), АО «НПЦ газотурбостроения „Салют“» (Москва), ПАО «ОДК-Сатурн» (Рыбинск), НПП «Мотор» (Уфа), СНТК имени Н. Д. Кузнецова (Самара) и др.

На базе таких ГТУ строятся газотурбинные электростанции (ГТЭС), которые предназначены для обеспечения электроэнергией промышленных и бытовых потребителей. Один генерирующий блок ГТЭС состоит из газотурбинной установки (ГТУ), редуктора, синхронного турбогенератора (СГ) и автоматизированной системы управления (АСУ) ГТЭС, содержащей системы автоматического управления (САУ) ГТУ и СГ. ГТЭС может быть как одноблочной, так и состоять из нескольких блоков, включенных параллельно. ГТЭС могут работать автономно, параллельно между собой или параллельно с энергосистемой.

ГТУ в составе ГТЭС выступает в качестве привода электрогенератора, поэтому качество производимой электроэнергии, в частности, максимальное отклонение частоты, зависит от используемых законов управления и от характеристик САУ ГТУ. Между САУ ГТУ и САУ СГ существует существенное взаимовлияние, но главную роль в поддержании частоты играет САУ ГТУ, поэтому для повышения качества электроэнергии по частоте необходимо в первую очередь совершенствовать законы управления ГТУ.

Необходимо отметить, что в настоящее время для газотурбинных электростанций в основном используются двухвальные ГТУ, конвертированные из соответствующих авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), связь между газогенератором и свободной турбиной в которых является газодинамической. Это позволяет избежать передачи монтажных, термических и вибрационных воздействий от блока привода, но затрудняет управление.

В настоящее время наиболее распространенным подходом при создании САУ ГТУ является использование селекторов. Это обеспечивает возможность управления по каждой переменной состояния отдельно. Но вследствие этого структура управляющего устройства является переменной, что влечет за собой ряд недостатков.

Первый недостаток – это возможность возникновения «заброса» по регулируемой координате в результате переключения между контурами регулирования. Это обусловлено тем, что динамические характеристики ГТУ различаются для различных каналов регулирования.

Второй недостаток – при внешнем возмущении реакция системы может быть различной, при незначительном отличии переменных состояния. Это также обусловлено переменной структурой регулятора, так как последовательность задействованных контуров управления при переходном процессе будет зависеть от вектора состояния.

Третий недостаток – связан с тем, что в процессе эксплуатации из-за износа происходит изменение статических характеристик ГТУ. Многие контуры управления включают в себя табличные настройки коэффициентов регуляторов. В свою очередь, ГТУ в качестве объекта управления проявляет сложные нелинейные свойства обусловленные взаимосвязями внутренних параметров. Это находит свое отражение в табличных настройках коэффициентов регуляторов. В силу наличия внутренних взаимосвязей при изменении характеристик одного параметра может возникнуть снижение качества регулирования для других контуров.

Четвертый недостаток – САУ ГТУ, построенные на базе авиационных прототипов, не учитывают динамику электросистемы и взаимодействие с электрогенератором, что дополнительно ухудшает качество управления по частоте.

В силу указанных недостатков качество вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте снижается, прежде всего, при автономном режиме работы ГТЭС. Происходит увеличение максимальных отклонений частоты и длительности переходных процессов за пределы, установленные ГОСТом. В дополнение к этому процесс настройки регуляторов оказывается весьма затратным по времени и топливу. Ведь поскольку система является существенно нелинейной, требуется провести множество экспериментов, учитывающих возможные варианты поведения электрической части системы.

Научные исследования в этом направлении как в России, так и за рубежом, как правило, рассматривают только один контур регулятора САУ: стабилизации частоты вращения свободной турбины, а в качестве объекта в большинстве случаев выступают газотурбинные двигатели авиационного применения, специфика электроэнергетических ГТУ не учитывается. В свою очередь, методы адаптивного управления широко известны, но практически не используются для автоматизации управления авиационными ГТУ при производстве электроэнергии.

Создание алгоритмов адаптивного управления газотурбинными установками с целью повышения качества вырабатываемой электроэнергии, возможно благодаря научно-техническим достижениям последних лет.

При создании адаптивной системы управления могут быть выделены два основных варианта использования методов адаптации. В первом случае адаптивная САУ ГТУ изначально разрабатывается, опираясь на выбранную базу методов адаптации. Это позволяет использовать достоинства адаптивных систем полностью, но процесс разработки, наладки, внедрения в таком случае потребует значительного количества времени и ресурсов.

Во втором случае существующая неадаптивная САУ дополняется вновь разработанной подсистемой адаптации. Это в какой-то мере ограничивает

возможности адаптивного управления, поскольку сохраняется существующая, как правило – селективная, структура регулятора, и подсистема адаптации будет отвечать за улучшение качества переходных процессов только по конкретной переменной состояния. Однако в рамках решаемых в диссертации задач этот второй подход выглядит предпочтительным, так как требует меньше времени и ресурсов на внедрение, что повышает его практическую значимость, и в то же время позволяет повысить показатели качества по частоте вырабатываемой электроэнергии, сохраняя качество регулирования по другим переменным состояния неизменным. С одной стороны выбранный в диссертации подход является модификацией существующей САУ ГТУ, с другой стороны – разработкой нового типового модуля (подсистемы адаптивного управления) АСУ ГТЭС.

Таким образом, создание подсистемы адаптивного управления АСУ ГТЭС позволит разрешить актуальную проблемную ситуацию, связанную с повышением качества производимой ГТЭС электроэнергии по частоте, при разнообразных режимных ситуациях в электроэнергетической системе (ЭЭС), и одновременно сократить затраты ресурсов на настройку и внедрение системы управления ГТУ.

В силу вышеуказанных причин актуальной задачей следует признать повышение качества вырабатываемой электроэнергии по частоте и сокращение затрат на настройку и испытания САУ ГТУ на основе создания подсистемы адаптивного управления, входящей в состав автоматизированной системы управления газотурбинной электростанцией.

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

Предмет исследования: методы и алгоритмы адаптивного управления и их программная реализация

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.

Разработка программных продуктов производилась на языках *Delphi* и *C++*.

Теоретической и методологической основой исследований являются работы 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.

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».

Результаты диссертационной работы нашли отражение в 4 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Разработка программных продуктов производилась на языках *ObjectPascal*, *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».

На защиту выносятся:

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

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

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

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.

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

В первой главе диссертации проводится анализ проблемной ситуации. Приведены данные натурных испытаний, подтверждающие несоответствие производимой ГТЭС электроэнергии требованиям ГОСТа. Рассматривается АСУ

ГТЭС, ГТУ как объект управления. Исследуются принципы построения существующих САУ ГТУ, основанные на принципах селективного управления. Проводится анализ публикаций отечественных и зарубежных авторов, посвященных управлению ГТУ, адаптивному управлению.

Во второй главе диссертации представлены модифицированные для САУ ГТУ методы адаптивного управления с учетом возмущений в электрической системе, позволяющие повысить качество вырабатываемой ГТЭС электроэнергии по частоте. Разрабатывается модифицированный для САУ ГТУ метод идентификации в реальном времени, обеспечивающий возможность проводить идентификацию в замкнутом контуре с прерыванием процесса идентификации. Здесь же дается математическое описание разработанных алгоритмов адаптивного управления, математическое описание разработанного алгоритма идентификации в реальном времени. Приведено обоснование варианта создания адаптивной САУ ГТУ на основе дополнения штатной САУ подсистемой адаптивного управления. Приводится новая структура САУ ГТУ для автоматизированной системы управления ГТЭС, включающая подсистему адаптивного управления ГТУ. Главная особенность подсистемы адаптивного управления состоит в том, что она не требует модификации каналов управления штатной САУ ГТУ, тем самым экономится время на разработку, испытания и доводку адаптивной системы управления.

В третьей главе разрабатывается алгоритм построения подсистемы адаптивного управления. В соответствии с этим алгоритмом выполняется программная реализация подсистемы адаптивного управления, которая встраивается в состав штатной селективной САУ ГТУ, приведено описание программных модулей адаптивного управления и программного моделирующего комплекса для предварительной проверки модулей адаптивного управления. Программный моделирующий комплекс «КМЭС» дает возможность испытать разработанные алгоритмы в условиях различных динамических процессов в электроэнергетической системе.

В четвертой главе диссертации представлены результаты апробации методов идентификации в реальном времени и методов 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, приведены результаты математического моделирования, подтверждающие целесообразность использования подсистемы адаптивного управления в составе полной штатной САУ ГТУ. Результаты моделирования подтверждают обоснованность принятых решений.

Глава 1. Проблема качества вырабатываемой электроэнергии на электростанциях с конвертированными газотурбинными установками

Преимущества использования конвертированных, то есть создаваемых на основе авиационных прототипов, газотурбинных установок хорошо известны: создаваемые на их основе ГТЭС отличаются низкой стоимостью, быстрой окупаемостью, малыми габаритами, высокой мобильностью, приемистостью и практически полной автоматизацией управления работой двигателя. Немаловажное значение имеет также возможность эксплуатации в широком диапазоне климатических условий. Дополнительно следует отметить короткие сроки строительства и детально отработанную на основе авиационных прототипов технологию производства. Поэтому перспективы использования таких электростанций очень широки: это и работа в удаленных условиях эксплуатации, к которым относится большинство территории России, например, добыча полезных ископаемых, но также и электроснабжение малых населенных пунктов, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) поселков и городов, а также воинских частей, разнообразных объектов военной и гражданской инфраструктуры. Необходимо также подчеркнуть важную роль малой энергетики в обеспечении надежности электроснабжения и общей энергетической безопасности страны.

Однако эксплуатация указанных электростанций сталкивается и с рядом проблем. Среди них, например, отмечаются: аварийные отключения при значительных изменениях электрической нагрузки, понижающих общий ресурс работы ГТУ; изменения режимов работы связанные с отключениями, например, при переходе с параллельного на автономный режим; потеря устойчивости из-за взаимовлияния между устройствами управления ГТУ и электрогенератора. Эти и схожие проблемы во многом обусловлены физикой процессов работы электроэнергетических ГТУ, где нет жесткой механической связи между валами, а наличествует только газодинамическая связь, что существенно затрудняет управление таким объектом. Поэтому возрастают требования к системе автоматического управления (САУ) такими ГТУ. Это означает, что САУ ГТУ должны обеспечивать требуемое качество переходных процессов по частоте

вращения свободной турбины, приводящей во вращение электрогенератор, при разнообразных режимных ситуациях в ЭЭС.

В силу этого в настоящее время не удастся обеспечить требуемые показатели качества, а именно отклонения частоты СГ и длительность таких отклонений даже при сбросах-набросах частичной мощности при автономной работе ГТЭС. Понятно, что здесь значительную роль играют физические ограничения двухвальных ГТУ как объектов регулирования, но немаловажны также и недостатки параметрической настройки существующих регуляторов ГТУ. При настройке регуляторов необходимо иметь информацию не только о ГТУ, но и поведении электрогенератора и всей ЭЭС, а в идеале иметь модель текущей режимной ситуации в ЭЭС. Поэтому при другой режимной ситуации текущая настройка САУ ГТУ может вызывать существенное ухудшение показателей качества вырабатываемой электроэнергии по частоте. Поэтому в настоящее время при настройке САУ ГТУ фактически применяется компромиссная настройка, причем на настройку САУ тратится значительное время при проведении испытаний ГТЭС и вводе их в эксплуатацию. Находит применение и табличная настройка отдельных параметров регуляторов, для которых удастся построить соответствующие зависимости. В результате, с одной стороны, страдает качество итоговой настройки регуляторов САУ ГТУ, а с другой – велики затраты на испытания САУ, пуско-наладку ГТЭС, ввод в эксплуатацию. Поэтому актуальным является поиск возможностей сократить сроки настройки и испытаний САУ ГТУ при одновременном повышении качества вырабатываемой электроэнергии по частоте и, как минимум, сохранении показателей качества по напряжению. Возможности для разрешения проблемной ситуации открывает использование методов адаптивного управления. При этом регуляторы САУ смогут сами автоматически подстраиваться к текущей режимной ситуации в ЭЭС.

Понятно, что при выборе настройки регуляторов САУ, а также и при разработке адаптивного управления следует исследовать все основные характерные режимы работы ГТЭС в тех или иных условиях эксплуатации. На практике это сделать затруднительно, на помощь здесь приходит математическое

моделирование. В этом вопросе настоящая диссертация опирается на результаты, полученные ранее в рамках научной школы профессора В.М.Винокура в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ), где с конца 90-х годов прошлого века разработаны, введены в эксплуатацию и внедрены на предприятиях программные моделирующие комплексы (ПМК) для моделирования ЭЭС произвольной структуры и состава структурных элементов. Структура модели может свободно модифицироваться в ходе компьютерного эксперимента, программы защищены свидетельствами о регистрации и опираются на лицензированное программное обеспечение. Основным инструментом настоящих исследований является разработанный в ПНИПУ и внедренный на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь) ПМК «КМЭС», который включает в себя не только структурно-модифицируемую модель ЭЭС, но и многоэлементные модели ГТУ, применяемые на предприятии для разработки и настройки САУ электроэнергетическими ГТУ, подробно ПМК «КМЭС» будет рассмотрен в соответствующем разделе диссертации.

1.1. Процесс производства электроэнергии на электростанциях с конвертированными газотурбинными установками

Одним из активно развивающихся направлений электроэнергетики является создание электростанций мощностью до 25 МВт и более. Как отмечено выше, такие электростанции в качестве приводов электрогенераторов все чаще используют газотурбинные двигатели, конвертированные для наземного использования.

Газотурбинные электростанции предназначены для обеспечения электроэнергией промышленных и бытовых потребителей. Один блок ГТЭС, как правило, состоит из газотурбинной установки, редуктора, синхронного турбогенератора и систем управления ГТУ и СГ. ГТЭС может быть как одноблочной, так и состоять из нескольких блоков, включенных параллельно. Существующие ГТЭС могут работать автономно или параллельно с энергосистемой [1,2]. Структурная схема АСУ типовой одноблочной ГТЭС приведена на рисунке 1.1.

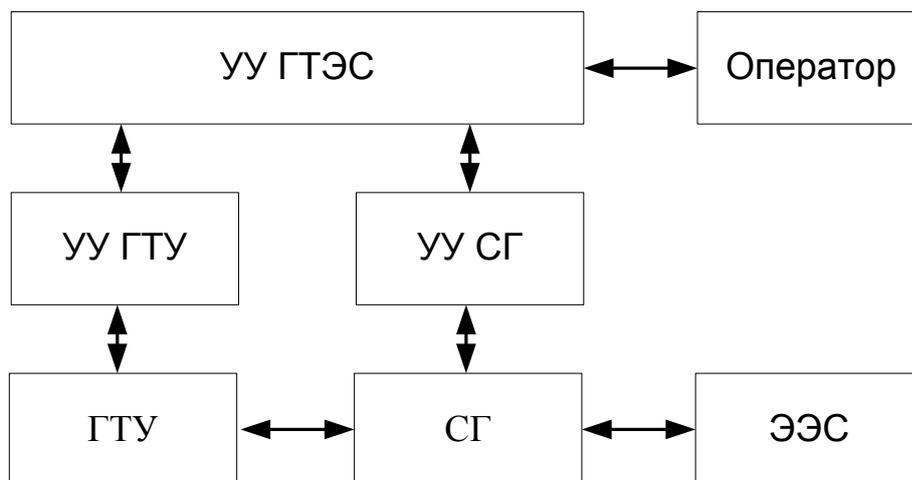


Рисунок 1.1 – Структурная схема АСУ одноблочной ГТЭС

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения: ГТУ – газотурбинная установка, УУ ГТУ – устройство управления газотурбинной установкой, СГ – синхронный генератор, УУ СГ – устройство управления синхронным генератором, ЭЭС – электроэнергетическая система, УУ ГТЭС – устройство управления газотурбинной электростанцией.

ГТУ выступает в качестве привода электрогенератора, поэтому качество производимой электроэнергии, в частности максимальное отклонение частоты, зависит от используемых законов управления. Требования, предъявляемые в ГОСТ[3–5], являются достаточно жесткими. Например, согласно ГОСТ Р 50783-95 «Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания»[3] максимальное переходное отклонение напряжения при сбросе-набросе 100% симметричной нагрузки должно составлять до 30%, а максимальное время восстановления – 5 с. В случае изменения нагрузки на 50% максимальное время восстановления напряжения составляет 3 с. Переходное отклонение частоты при сбросе-набросе 100% симметричной нагрузки не должно превышать 10%, а максимальное время восстановления – 5 с. Данные требования зачастую не достижимы при существующих методах управления как по

отклонению, так и по времени переходного процесса. Это обусловлено тем, что ГТУ и СГ образуют единую динамическую систему, и для обеспечения требуемого качества электроэнергии необходимо учитывать динамику изменения нагрузки [6–9]. Но динамика изменения нагрузки СГ и ГТУ зависит от множества факторов, в том числе от конкретного режима работы ГТЭС, схемно-режимной ситуации ЭЭС, вида переходного процесса [1].

Поэтому возникает вопрос, в каких переходных режимах целесообразно рассматривать поведение ГТЭС при проведении дальнейших исследований? Для этого необходимо выделить ограниченный перечень типовых переходных процессов, вызванных возмущениями электросети, такой, чтобы он мог охватить все характерные режимы работы ГТЭС, важные для поддержания заданных показателей качества вырабатываемой электроэнергии.

Выделим следующий перечень типовых возмущений внешней электросети [1,10], связанный с характерными динамическими режимами 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.

Рассмотренное выше множество характерных возмущений в ЭЭС является открытым и должно быть дополнено при необходимости проведения

дополнительных исследований. Вполне понятно, что на практике многие из перечисленных режимов не воспроизводимы, поэтому необходимо использовать физическое или математическое моделирование [1].

В качестве примера на рисунке 1.2 показана структурная схема ЭЭС, которая могла бы использоваться при моделировании вышеперечисленных режимов работы. Для моделирования этих режимов используются следующие элементы СГ – синхронный генератор; ГТУ – газотурбинная установка; К – 3-х фазный ключ; Н – статическая 3х фазная нагрузка; АД – асинхронный двигатель; СД – синхронный двигатель; Л – линия электропередачи (реактор); Тр – трансформатор; Сеть – сеть переменного тока. Поэтому один из основных методов исследований в настоящей диссертации – математическое моделирование. С помощью модели возможно воспроизвести те или иные режимы работы для их всестороннего исследования и проверки алгоритмов управления ГТУ. Структура, показанная на рисунке 1.2, позволяет воспроизвести разнообразные проектируемые и существующие, введенные в эксплуатацию ГТЭС: Лукьявинская ГТЭС (3×12 МВт), Сосьвинская ГТЭС (6×2,5 МВт), Агидель (2×4МВт) и др., при увеличении числа энергоблоков увеличивается количество ГТУ и СГ соответственно.

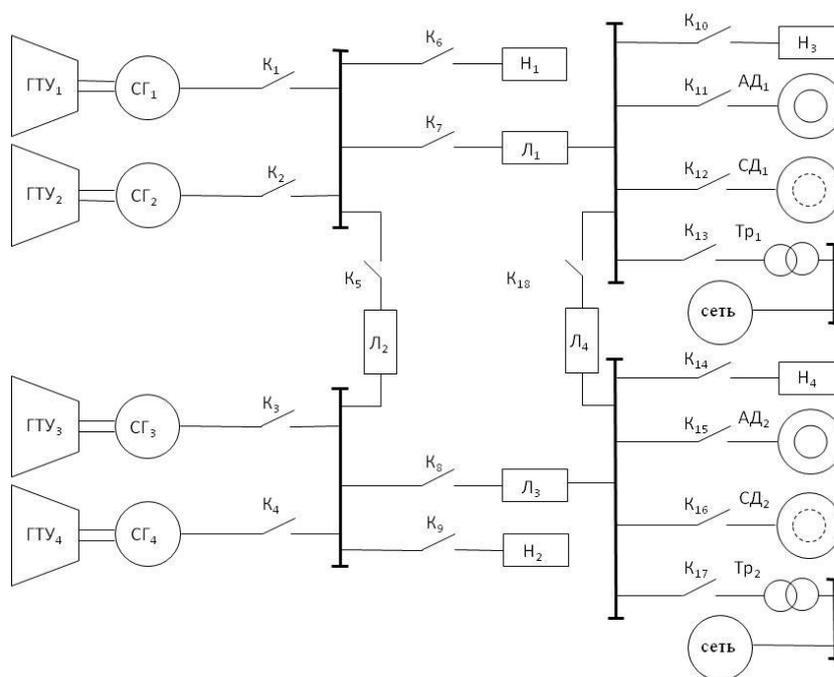


Рисунок 1.2 – Структурная схема ЭЭС

Выше отмечалось, что в настоящее время даже при сбросах-набросах частичной нагрузки показатели качества электроэнергии по частоте не выполняются. Проиллюстрируем это на примерах, полученных на испытательном полигоне ГТЭС в Перми. Параметры регистрировались специальной автоматизированной системой, нагрузка осуществлялась на поле сопротивлений, размещенных открыто. Испытывалась ГТЭС в заводской комплектации и с заводскими настройками (АО «ОДК-Авиадвигатель».)

В случае изменения нагрузки на 25% от номинальной для ГТЭС 6 МВт (с 1,5 до 3МВт) время переходного процесса может достигать 14 с (рисунок 1.3). В случае изменения нагрузки с холостого хода до 1 МВт, что составляет 16,7% от номинальной нагрузки, время переходного процесса – 7с, а отклонение частоты вращения свободной турбины составляет 11,2%. Показатели качества – время восстановления и переходное отклонение– не укладываются в рамки, отведенные для 100% изменения нагрузки (рисунок 1.4) [3,5].

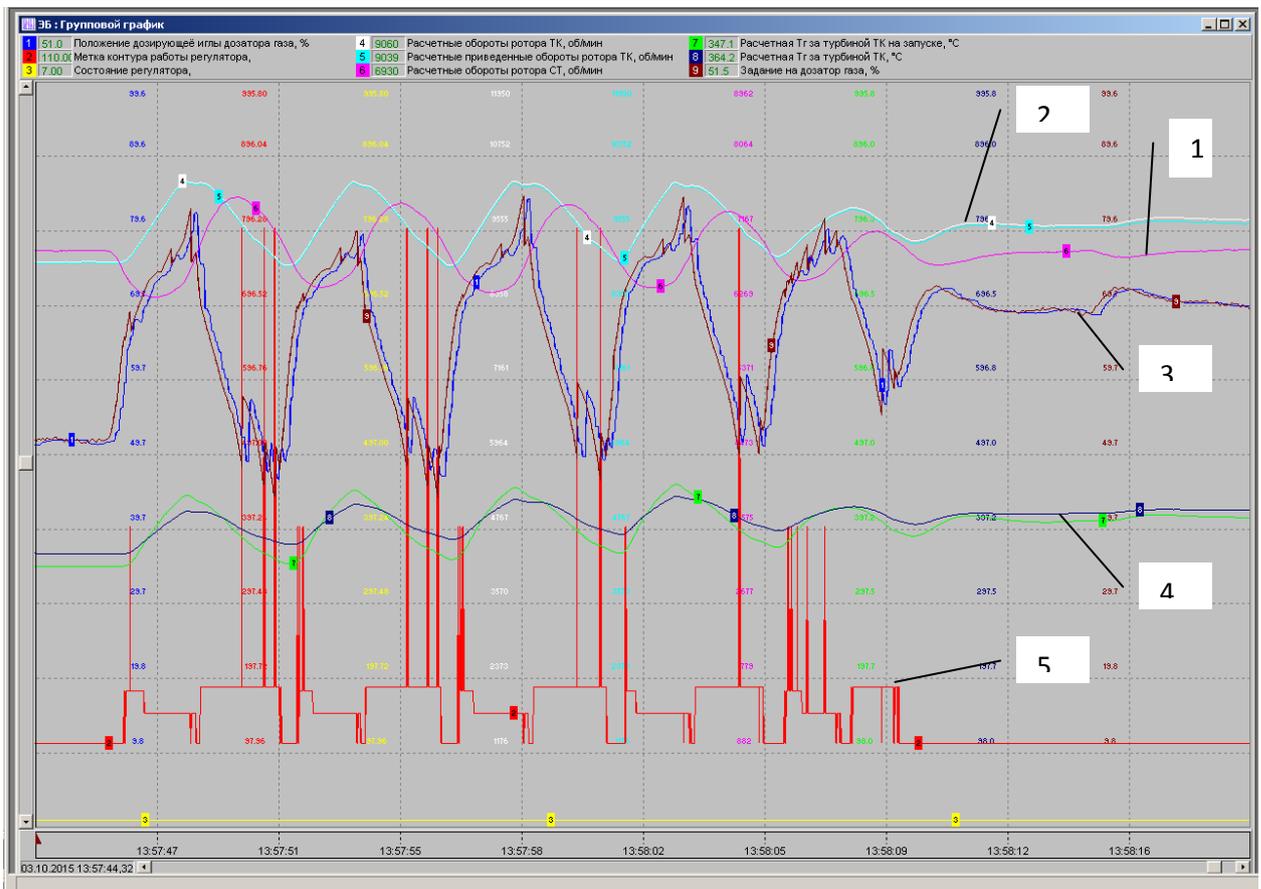


Рисунок 1.3 – Переходные процессы ГТЭС при изменении нагрузки 25%

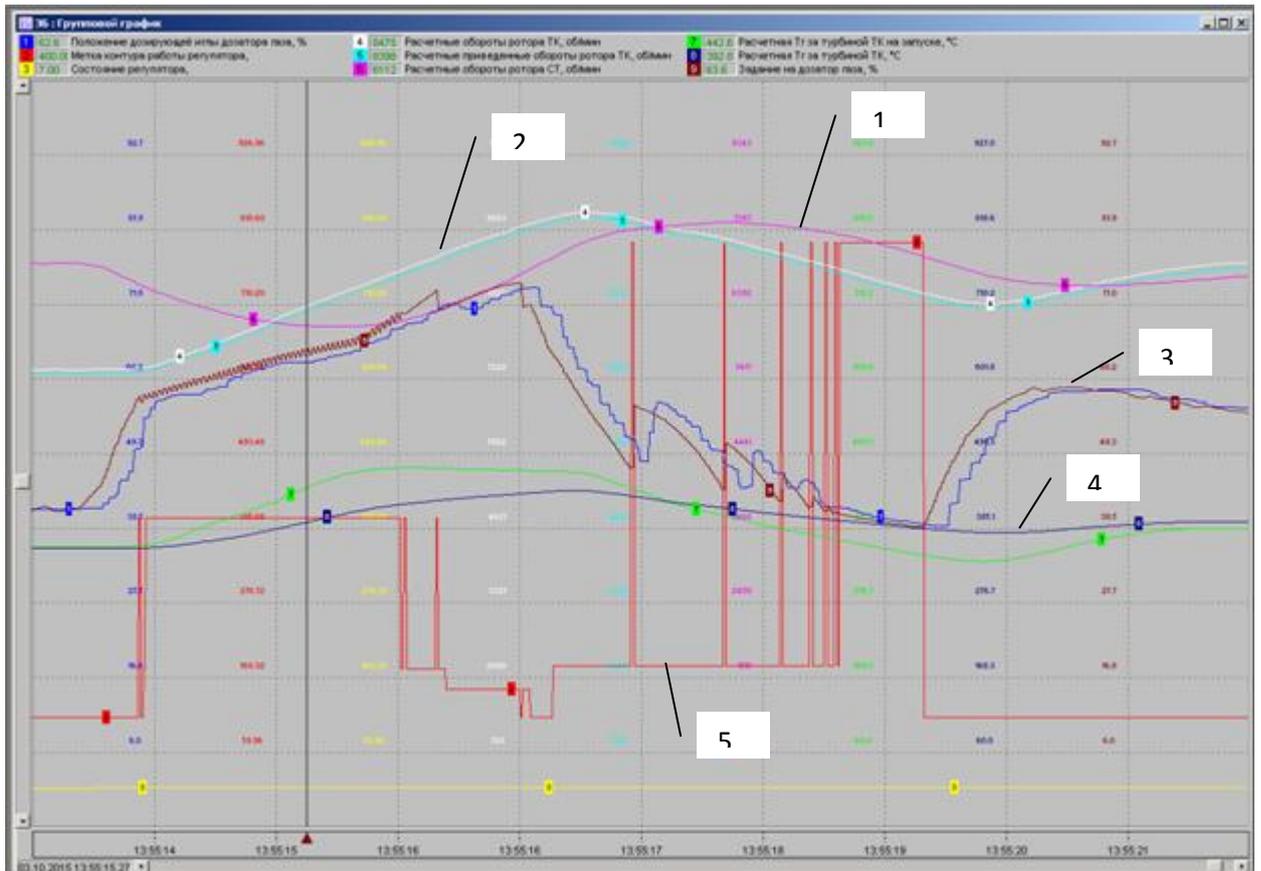


Рисунок 1.4 – Переходные процессы ГТЭС при изменении нагрузки 16,7%

На рисунках 1.3, 1.4 приняты следующие обозначения: 1 – частота вращения свободной турбины, 2 – частота вращения турбокомпрессора, 3 – положение дозирующей иглы дозатора газа, 4 – температура газа за турбиной, 5 – метка контура регулятора.

Исходя из приведенных данных, существующую систему автоматического управления ГТУ необходимо модернизировать для повышения качества вырабатываемой электроэнергии по частоте, при, как минимум, сохранении показателей качества по напряжению. Прежде всего, для этого необходимо учесть особенности ГТУ как объекта управления.

1.2. Газотурбинная установка как объект управления

Газотурбинные установки, входящие в состав ГТЭС, как правило, созданы на базе авиационных двигателей, например ПС-90 или Д-30. В силу того, что ГТУ используются для генерации электроэнергии в наземных условиях, они обладают

рядом отличительных особенностей относительно авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Прежде всего, для газотурбинных электростанций используются двухвальные ГТУ, связь между газогенератором и свободной турбиной которых является газодинамической. Это позволяет избежать передачи монтажных, термических и вибрационных воздействий от блока привода[11]. Важной особенностью ГТУ является значительное количество выходных переменных при всего двух управляющих переменных: расход топлива и расход воздуха. При этом для ГТУ, используемых в ГТЭС, положение механизации турбокомпрессора, отвечающего за подачу воздуха, как правило, определено заранее для всего рабочего диапазона. Это обусловлено необходимостью получения желаемого соотношения между расходом топлива и вырабатываемой мощностью.

На предприятиях авиационного двигателестроения имеются сложные поэлементные модели ГТУ. Но они, во-первых, предназначены в первую очередь для конструирования ГТУ, а во-вторых – являются конфиденциальными. Поэтому для исследования САУ применяются упрощенные модели, информация по структуре которых имеется в открытых источниках.

Таким образом, газотурбинная установка как объект управления может быть представлена следующей упрощенной моделью[12-16] (рисунок 1.5).

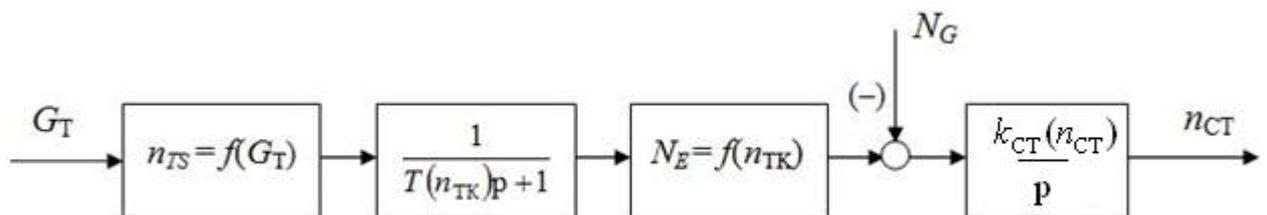


Рисунок 1.5 – Структура модели

На рисунке 1.5 приняты следующие обозначения: $n_{TS} = f(G_T)$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая зависимость между оборотами турбокомпрессора (об/мин) и расходом топлива (кг/ч); $T(n_{TK})$ – зависящая от текущего значения частоты вращения турбокомпрессора постоянная времени турбокомпрессора; $N_E = f(n_{TK})$ – нелинейная статическая характеристика,

отражающая зависимость между вырабатываемой мощностью (кВт) свободной турбины ГТУ и частотой вращения турбокомпрессора (об/мин); N_G – мощность нагрузки генератора (кВт); $k_{CT}(n_{CT}) = \frac{3600}{4\pi^2 n_{CT} J}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от n_{CT} ; J – приведенный к валу суммарный момент инерции свободной турбины; n_{CT} – частота вращения свободной турбины (об/мин).

Уравнения, соответствующие динамическим звеньям, на рисунке 1.5 выглядят следующим образом[12]:

а) уравнение частоты вращения ротора турбокомпрессора:

$$\frac{dn_{TK}}{dt} = (n_{TS} - n_{TK}) / T, \quad (1.1)$$

б) уравнение частоты вращения свободной турбины:

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = k_{CT}(n_{CT})(N_E - N_G). \quad (1.2)$$

Структура на рисунке 1.5 выбрана по следующим соображениям. Явный аperiodический характер переходных процессов по частоте вращения турбокомпрессора определяет аппроксимацию турбокомпрессора аperiodическим звеном первого порядка. Идеальное интегрирующее звено представляет свободную турбину ГТУ, в силу того, что частота вращения свободной турбины, при разбалансе мощностей, изменяется практически по линейному закону (переходный процесс отклоняется от линейного в случае длительных промежутков времени). В случае стабилизации частоты вращения свободной турбины, произведение $n_{CT}J$ в уравнении (1.2) можно считать параметром, так как отклонения n_{CT} невелики. По этой же причине вместо моментов в уравнении (1.2) указаны мощности. Дозатор топлива может дополнять структуру, показанную на рисунке 1.5, если не отнесен к структуре регулятора.

По результатам экспериментов в разомкнутом контуре[12] было замечено расхождение между мощностями сложной поэлементной модели и полученной модели. Это расхождение, по-видимому, вызвано тем, что часть газов от сгорания

топлива попадает непосредственно на свободную турбину [17]. Для учета этой особенности в уравнение (1.2) была добавлена производная n_{TK} , таким образом, уравнение (1.2) приняло вид:

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = k_{CT}(n_{CT}) \left(\left(1 + k_e \frac{dn_{TK}}{dt} \right) N_E - N_G \right). \quad (1.3)$$

По результатам исследования [16], которые проводились для уточнения модели, реальное дифференцирующее звено заменило производную в уравнении (1.3):

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = k_{CT}(n_{CT}) \left(\left(1 + k_e \frac{dn_{TK}}{dt} - T \frac{dN'_E}{dt} \right) N_E - N_G \right), \quad (1.4)$$

где N'_E – выход реального дифференцирующего звена.

Данная модель (1.1), (1.4) демонстрирует точность, сопоставимую в основных режимах со сложной поэлементной моделью, построенной на основании физических принципов функционирования ГТУ и учитывающей внутренние нелинейные зависимости переменных [18]. Для дальнейшего увеличения точности модели следует учесть перекрестные связи между n_{CT} и n_{TK} .

1.3. Анализ принципов реализации традиционных САУ ГТУ для ГТЭС

САУ ГТУ для ГТЭС имеет сложную многомерную структуру. Процессы стабилизации и характеристики переменных режимов могут подвергаться существенному влиянию из-за взаимодействия контуров управления САУ ГТУ. В частности, нежелательные процессы [18] могут возникать при параллельном воздействии нескольких контуров (сигналов) на один исполнительный орган. В силу данных обстоятельств, необходимо, организовывать взаимодействие отдельных контуров (каналов) в комплексной схеме управления на основании рациональных принципов.

Рассмотрим пример регулятора ГТУ [18] (рисунок 1.6). Эта структура упрощенная, построена по данным открытых источников.

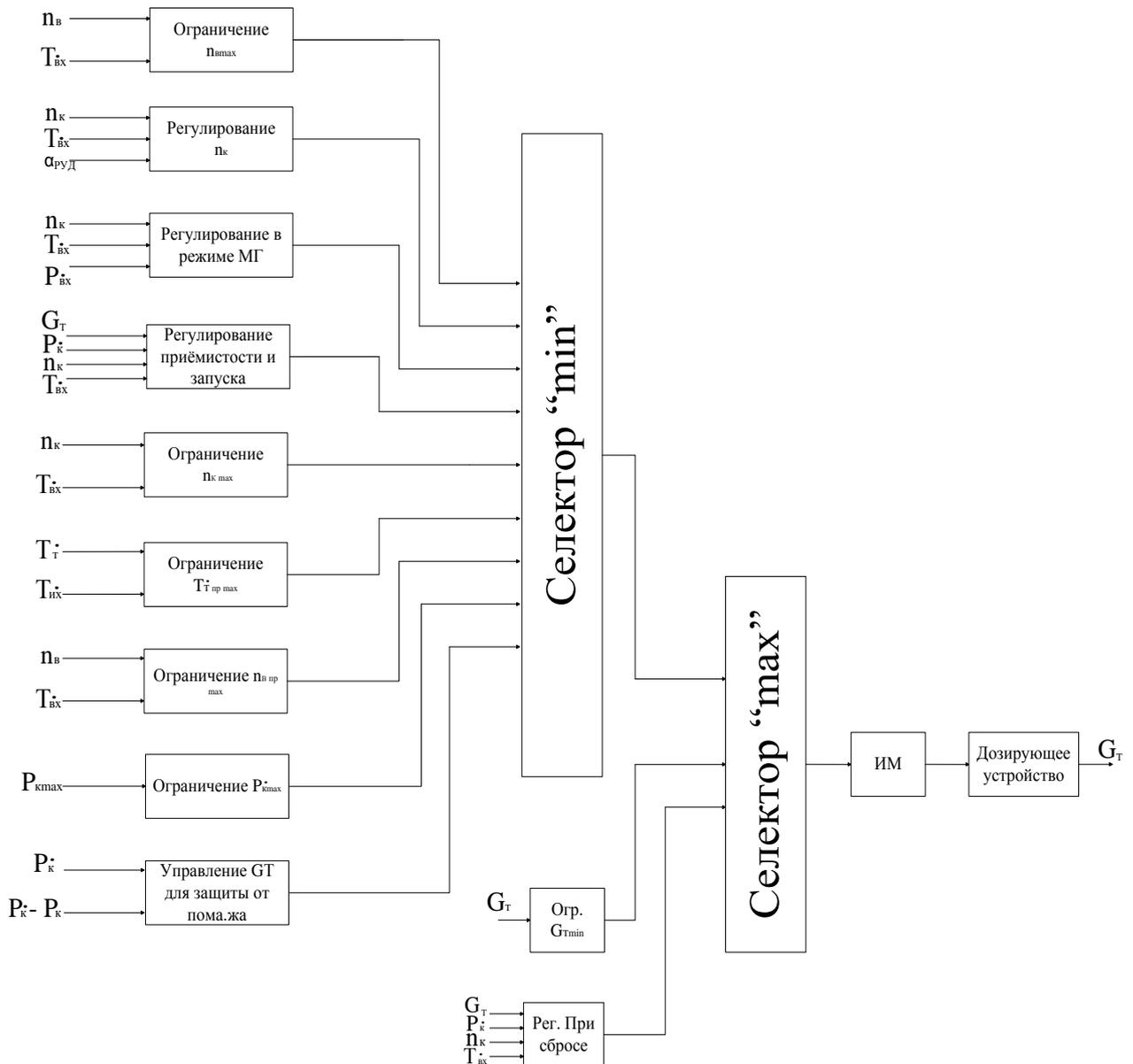


Рисунок 1.6 – Структурная схема последовательного селектирования каналов управления устройства регулирования

В современных системах считается целесообразным взаимодействие каналов управления осуществлять с точки зрения автономности. Переключение каналов осуществляется с помощью специальных селектирующих устройств. В типовом регуляторе ГТУ, как правило, контуры регулирования выполняют следующие задачи (названия «ротор турбокомпрессора» и «ротор газогенератора» здесь и далее являются синонимами): стабилизацию частоты вращения свободной турбины и ротора газогенератора (турбокомпрессора); ограничения минимальной и максимальной частоты вращения свободной турбины и ротора газогенератора (турбокомпрессора); поддержания ускорения на сбросе и при разгоне, при

снижении и при увеличении режима; ограничения G_T/P_K , температуры за турбиной, давления воздуха за компрессором, расхода топлива на основных режимах и при запуске; подачи топлива на розжиге.

Контур управления и ограничений, зачастую, являются регуляторами первого или второго порядка. Коэффициенты регуляторов иногда задаются таблично, чтобы учесть нелинейный характер объекта управления.

Селекторы минимума и максимума ограничивают регулируемые параметры сверху и снизу в структуре, представленной рисунке 1.6.

Управление с селекторами является самым частым выбором для управления, как авиационными газотурбинными двигателями, так и ГТУ наземного применения. Селектор является логическим элементом, который изменяет структуру замкнутой системы на основании ее текущего состояния[18]. Для ограничения параметра состояния двигателя, наиболее близкого к своему предельно допустимому значению, применяются алгебраические селекторы. Алгебраические селекторы минимума или максимума используются для ограничения параметров сверху или снизу соответственно. Таким образом, также могут быть различными параметры и структура регуляторов.

Один из первых запатентованных селективных регуляторов [19] ГТУ включал в себя четыре контура управления. Это были контуры: контур контроля запуска, управления частотой вращения турбины, ограничения ускорения и ограничения температуры за турбиной. В регулировании на основных режимах участвуют следующие контуры.

1.3.1. Контур стабилизации частоты вращения свободной турбины

Этот контур наиболее важен, поскольку именно он поддерживает частоту вращения внешнего вала (свободной турбины) ГТУ, и, следовательно, через редуктор и СГ.

На рисунке 1.7 приведена типовая[20] структура регулятора.

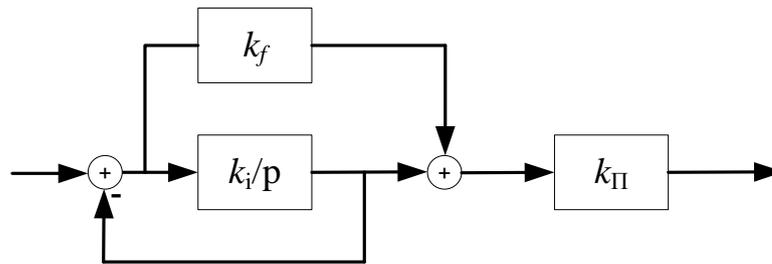


Рисунок 1.7 – Структура регулятора частоты вращения свободной турбины

Здесь: k_i , k_f , k_{Π} – коэффициенты усиления интегратора, форсировки, пропорциональности, соответственно. Передаточная функция регулятора частоты имеет вид:

$$W(p) = k_{\Pi} \frac{1 + \frac{k_f}{k_i} p}{1 + \frac{1}{k_i} p}. \quad (1.5)$$

Регулятор (1.5) является интегро-дифференцирующим звеном и, так же выполняет функцию фильтра. Он отвечает за стабилизацию частоты вращения свободной турбины. В составе большинства известных САУ ГТУ, например, для ГТЭС 6МВт, переходные процессы которой рассмотрены в разделе 1.1, у этого регулятора применяется компромиссная настройка для всего диапазона работы, то есть все коэффициенты в (1.5) постоянны.

1.3.2. Контур ограничения минимальной частоты вращения ротора газогенератора

Данный контур называется также контуром малого газа, участвует как в процессе запуска турбины, так и при работе на основных режимах.

1.3.3. Контур ограничения температуры за турбиной

Измерение и контроль температуры газа в камере сгорания необходимы, поскольку температура определяет ресурс, экономические и тяговые показатели двигателя. Измерение температуры газа в камере сгорания является затруднительным, поэтому осуществляется контроль температуры газа на выходе из двигателя. Данный контур является одним из самых важных.

1.3.4. Основные недостатки селективного управления

Несомненное достоинство управления с селективного управления, предопределившее их широкое распространение в производственной практике, – это автономная настройка каждого контура регулирования. Этот подход значительно упрощает процесс создания системы управления при ограничении различных параметров.

Первый недостаток – это возможность возникновения «заброса» по регулируемой координате в результате переключения между контурами регулирования. Это обусловлено тем, что динамические характеристики ГТУ различаются для различных каналов регулирования.

Второй недостаток – при внешнем возмущении реакция системы может быть различной, при незначительном отличии переменных состояния. Это также обусловлено переменной структурой регулятора, так как последовательность задействованных контуров управления при переходном процессе будет зависеть от вектора состояния.

Третий недостаток – связан с тем, что в процессе эксплуатации из-за износа происходит изменение статических характеристик ГТУ. Многие контуры управления включают в себя табличные настройки коэффициентов регуляторов. В свою очередь, ГТУ в качестве объекта управления проявляет сложные нелинейные свойства обусловленные взаимосвязями внутренних параметров. Это находит свое отражение в табличных настройках коэффициентов регуляторов. В силу наличия внутренних взаимосвязей при изменении характеристик одного параметра может возникнуть снижение качества регулирования для других контуров.

Четвертый недостаток – САУ ГТУ, построенные на базе авиационных прототипов, не учитывают динамику электросистемы и взаимодействие с электрогенератором, что дополнительно ухудшает качество управления по частоте.

Указанные недостатки также затрудняют настройку регуляторов САУ ГТУ, что увеличивает время ввода новых ГТЭС в эксплуатацию, удорожает этот

процесс, и негативно сказывается на качестве вырабатываемой электроэнергии по частоте. 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. Поэтому перспективным выглядит применение методов адаптивного управления для самонастройки отдельных коэффициентов регуляторов.

1.4. Современные тенденции развития адаптивного управления и перспективы его применения в электроэнергетике

Системы управления, в которых происходит изменение параметров или структуры регулятора вследствие изменения возмущающего воздействия или свойств объекта управления, называют адаптивными. В свою очередь, совокупностью методов теории управления, позволяющих синтезировать адаптивные системы управления, является адаптивное управление.

Адаптивные системы, как правило, классифицируют по следующим признакам [21]:

1. По характеру изменений в управляющем устройстве:

В случае, если изменяются только значения параметров регулятора – адаптивную систему называют самонастраивающейся.

В случае, если изменяется структура самого регулятора адаптивную систему называют самоорганизующейся.

2. По способу изучения объекта:

В случае, если к управляющему воздействию добавляется поисковый сигнал адаптивную систему называют поисковой (к управляющему воздействию добавляется поисковый сигнал);

В случае, если используется эталонная или настраиваемая модель адаптивную систему называют беспойсковой.

3. По способу достижения эффекта самонастройки системы:

В случае, если адаптация достигается с помощью дополнительного сигнала адаптацию называют сигнальной (пассивной);

В случае, если происходит изменение параметров адаптацию называют параметрической (активной).

Активное развитие адаптивного управления во всем мире в последние десятилетия подтверждается результатами поиска среди публикаций в академических журналах и материалах конференций, так поисковый сервис *EBSCO* предлагает около двадцати семи тысяч результатов в промежутке времени от 1966 до 2016 года и порядка двадцати пяти тысяч результатов в промежутке с 2000 до 2016 года. Большое число публикаций принадлежит перу китайских авторов и авторов с Ближнего Востока. В последние несколько лет значительное внимание уделяется разработке самонастраивающихся адаптивных систем с эталонной моделью. Стоит отметить, что часто для синтеза регуляторов и создания моделей используются математический аппарат нейронных сетей и нечеткой логики, поскольку данные подходы предоставляют широкие возможности. Главное различие между ними заключается в том, что нечеткая логика является инструментом для преобразования накопленного опыта в математическую форму, а нейронные сети способны решать задачи классификации, интерполяции и экстраполяции на основании самостоятельно обобщенных данных об объекте.

Наибольший интерес, среди существующих подходов к адаптивному управлению, с точки зрения рассматриваемой проблемы представляют следующие.

1.4.1.Беспоисковое адаптивное управление

В случае, когда желаемое поведение системы при изменении возмущающих и управляющих воздействий считается известным, может быть использовано адаптивное управление с эталонной моделью. Благодаря эталонной модели, повышается устойчивость переходного процесса, а время протекания переходного процесса и траектория движения лучше подвергаются прогнозированию. Часто эталонная модель, представляет собой устойчивую линейную динамическую

систему первого или второго порядка. Существуют различные варианты построения адаптивных систем управления с эталонной моделью. В первую очередь, рассмотрим современные способы получения моделей. В зависимости от известной информации и решаемых задач можно разделить модели на построенные по принципу «черного ящика» и «белого ящика».

1.4.1.1. Модели построенные по принципу «белого ящика»

В случае, когда основой для построения модели выступают знания о физических процессах в системе, используют термин «белого ящика». Часто математические уравнения, отражающие динамику системы, являются нелинейными [23]. Для получения модели удовлетворяющей всем необходимым условиям, используются различные методы линеаризации систем, для упрощения физических уравнений, на основании предположений, о некоторых идеальных условиях. Одна из наиболее часто упоминаемых в иностранной литературе в связи с этим работ – это статья Роуэна (*Rowen*) [23]. Представленная упрощенная математическую модель одновальной ГТУ использовалась для исследования стабильности энергосистемы, развития стратегии диспетчеризации и обеспечения планирования в случае чрезвычайных ситуаций и системных сбоев. Упрощенная модель, использовалась во всем спектре характеристик генератора и соответствующих характеристик турбины. Многие исследователи использовали предложенный Роуэном подход, в качестве базового, для создания моделей ГТУ различной сложности и назначения. В целом данная модель крайне проста, и потому малопригодна.

Использование знаний о физике процессов и конструкционных данных позволило разработать Рикетсу (*Ricketts*) [25] динамическую модель двухвальной ГТУ. Отличительной особенностью модели является учет влияния на динамические характеристики ГТУ нагрева компонентов в процессе работы. Модель была способна предсказать, переходные характеристики и использовалась для разработки адаптивного контроллера.

1.4.1.2. Модели, построенные по принципу «черного ящика»

В случае, когда информации о физических принципах системы нет или недостаточно [21] используются модели построенные по принципу «черного ящика». На основании имеющихся эксплуатационных входных и выходных данных о поведении системы раскрываются отношения между переменными системы. Искусственные нейронные сети (ИНС) являются одним из наиболее широко применяемых методов моделирования по принципу «черного ящика». ИНС является упрощенным описанием процессов работы нейронов мозга. ИНС состоит из взаимосвязанных искусственных нейронов с линейными или нелинейными функциями активации. Нейроны принято объединять в слои, выделяют: входной – принимающий входные данные, скрытый – производящий обработку данных и выходной–выводящий данные, количество скрытых слоев может быть различным. Интерактивный процесс установления взаимосвязей между нейронами называют обучением. В процессе обучения сети определяются изменяемые числа соответствующие каждому входу в нейрон, так же могут меняться параметры функции активации нейрона.

Другим подходом, получившим широкое распространение, для создания моделей и регуляторов является нечеткая логика [25]. В нечеткой системе на входе и выходе используются точные данные. В процессе работы точные данные преобразуются в «фаззификаторе» в соответствующие значения лингвистических переменных, после чего на основании заданной базы нечетких правил и выбранного способа нечеткого вывода получают нечеткие значения выходных лингвистических переменных. Далее нечеткие значения преобразуются в точные в «дефаззификаторе».

1.4.1.2.1. Нелинейная авторегрессионная модель скользящего среднего с экзогенными факторами (*nonlinear autoregressive moving average model with exogenous inputs– NARMAX model*).

В общем виде можно записать уравнение NARMAX модели следующим образом:

$$y(t)=F\{y(t-1),\dots,y(t-n_y),u(t-1),\dots,u(t-n_u),e(t-1),\dots,e(t-n_e)\}+e(t), \quad (1.6)$$

где F – нелинейная функция, зависящая от значений $y(t)$ – выхода, $u(t)$ – входа и $e(t)$ – зашумления соответственно, а n_y, n_u, n_e – являются максимальными запаздываниями. Метод [26], основанный на непараметрическом анализе в частотных и временной областях с ортогональным алгоритмом оценки параметров применяется для синтеза моделей ГТУ, способных достоверно отображать динамику, как при малых, так и при больших амплитудах входных воздействий. Для определения структуры модели используется подход [27], основанный на *error reduction ratio (ERR)* [27], а в качестве критерия остановки процесса применяется информационный критерий Акаике.

1.4.1.2.2. Нейросетевая авторегрессионная модель (*Neural Network AutoRegressive with eXogenous inputs – NNARX*)

В работе [28] доказана возможность аппроксимации однослойной радиально-базисной нейронной сетью любой непрерывной функции при условии, что функцией активации нейронов является гиперболический тангенс или сигмоидальная. *NNARX*-модели газотурбинной установки, связывающая скорость подачи топлива и скорость вращения вала, обучающая выборка нейронной сети должна иметь следующий вид:

$$Z_N = [y(t)y(t-1)...y(t-n_y)u(t-1)...u(t-n_u)]. \quad (1.7)$$

Для достижения необходимой точности используется метод наименьших квадратов. Согласно работе [29] шесть нейронов скрытого слоя и один в выходном слое являются достаточным количеством для входных значений больших и малых амплитуд.

1.4.1.2.3. Нечеткая модель (*Fuzzy logic model*)

Автор [30] предлагает использовать при построении модели не только физические зависимости, но и опыт экспертов. В [30] для построения модели, с учетом опыта экспертов, используется подход предложенный Такаги и Сугено [31]. Как было изложено выше, нечеткая логика позволяет формализовать накопленный опыт для представления в математической форме. Локальное соотношение между входом и выходом нелинейной модели определяется с

помощью набора правил. Правила имеют вид: если..., то..., В общем виде i -е правило выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} &IF z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_g(t) \text{ is } M_{ig}, \\ &THEN \dot{X}(t) = A_i X(t) + B_i U(t) + E_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, r. \end{aligned} \quad (1.8)$$

где M_{ip} – нечеткое множество, $X(t)$ – вектор состояний, $U(t)$ – вектор входов, $z_1(t) \dots z_g(t)$ – переменные предпосылок.

1.4.1.3. Применение моделей, полученных по принципу «белого ящика»

В работе [24] синтез динамической модели двухвальной ГТУ, производился на основании физических формул и с учетом конструкционных данных, которые позволили повысить точность модели. Данная модель пригодна для использования в составе адаптивных схем управления.

В [32] проводилось исследование влияния, введенных в регулятор ограничений, на динамические характеристики ГТУ. Изменения в системе управления ГТЭС позволили ограничить отклонение мощности от заданного значения, благодаря ограничению отклонения скорости для регулятора оборотов, настройке точек установки вырабатываемой и требуемого резерва мощности.

В [33] проведено исследование стабильности энергосистемы с помощью типовых динамических моделей ГТУ. Рассматривались основные контуры управления и варианты их реализации. Основное внимание было уделено контурам ограничения температуры и ускорения. Проверка эффективности вариантов контуров управления проводилась с помощью математического моделирования ГТУ, в широком диапазоне изменения нагрузки.

1.4.1.4. Применение моделей, полученных по принципу «черного ящика»

Исследование [34] рассматривает возможность практического использования ИНС для управления сложными и нелинейными системами. В статье, в качестве объекта управления выступает двухвальный авиационный газотурбинный двигатель. Различные варианты реализации нейросетевых контроллеров использовались для контроля переменных состояния, и системных показателей при работе на предпочтительных и безопасных рабочих режимах. Главной целью исследования является увеличение срока службы двигателя и

минимизация потребления топлива. Одной из целей исследования является улучшение производительности системы управления за счет замены линейных регуляторов на нейросеть. В исследовании использовалась ИНС с одним скрытым слоем. Показатели качества переходных процессов ГТУ не приблизились к показателям качества переходных процессов эталонной модели на ожидаемую величину, но произошло повышение производительности контроллера.

В общем случае, система управления с эталонной моделью (ЭМ) работает следующим образом: уставка поступает на вход эталонной модели; ЭМ переходит в соответствующее уставке желаемое состояние, также это называют опорной траекторией; состояние ЭМ сравнивается с состоянием объекта управления; в результате рассчитывается ошибка управления. На основании ошибки управления контроллер вырабатывает управляющее воздействие.

В [29] коэффициенты ПИД-регулятора корректируются на основании сгенерированной на несколько тактов вперед опорной траектории.

В работе [30] нечеткий регулятор аналогичен (1.8), но выходной сигнал рассчитывается как произведение вектора состояний на матрицу обратной связи соответствующую правилу.

В работах [35,36] с помощью с помощью метода обратного распространения ошибки обучен прямой нейроэмулятор, минимизируется ошибка управления. С целью повышения точности методика обучения допускает возможность вмешательства эксперта в процесс обучения.

В [37] сравниваются результаты использования ПИД-регулятора, нечеткого регулятора и нейро-нечеткого регулятора, в котором нейронная сеть производит подстройку параметров. Поверхность нечетких функций принадлежности нечеткого регулятора представлена на рисунке 1.8. Управляющее воздействие формируется на основании ускорения и скорости вращения турбины.

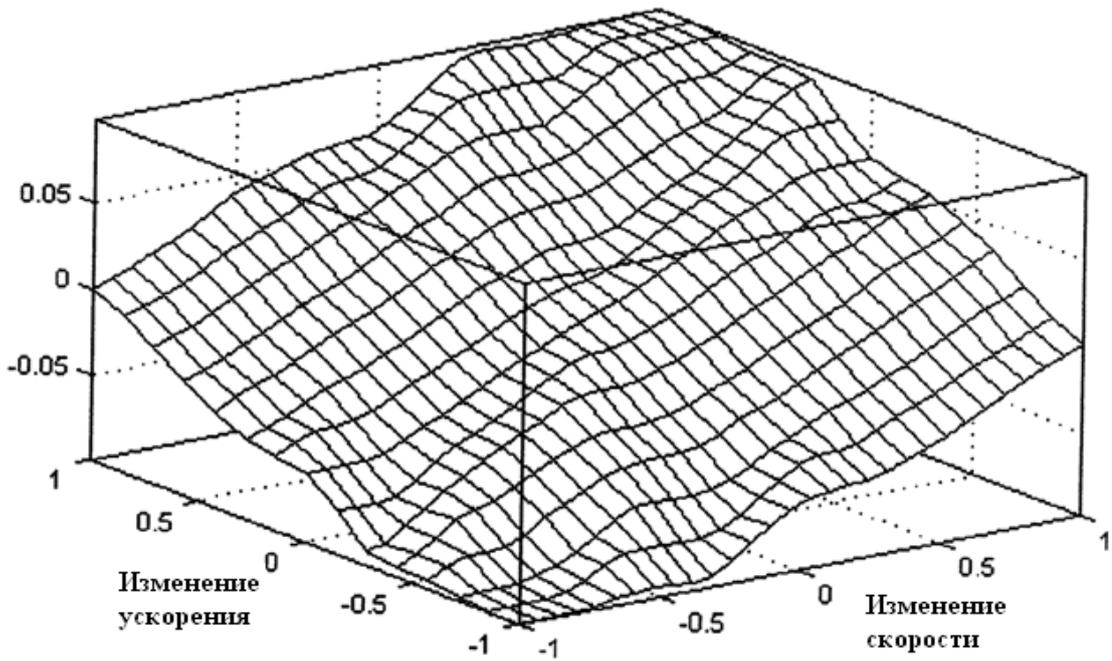


Рисунок 1.8 – Поверхность нечетких функций принадлежности

Сравнение результатов испытаний ПИД-регулятора, нечеткого регулятора и нейро-нечеткого регулятора при изменении нагрузки приведено на рисунках 1.9 и 1.10. Лучшие результаты показал нейро-нечеткий регулятор.

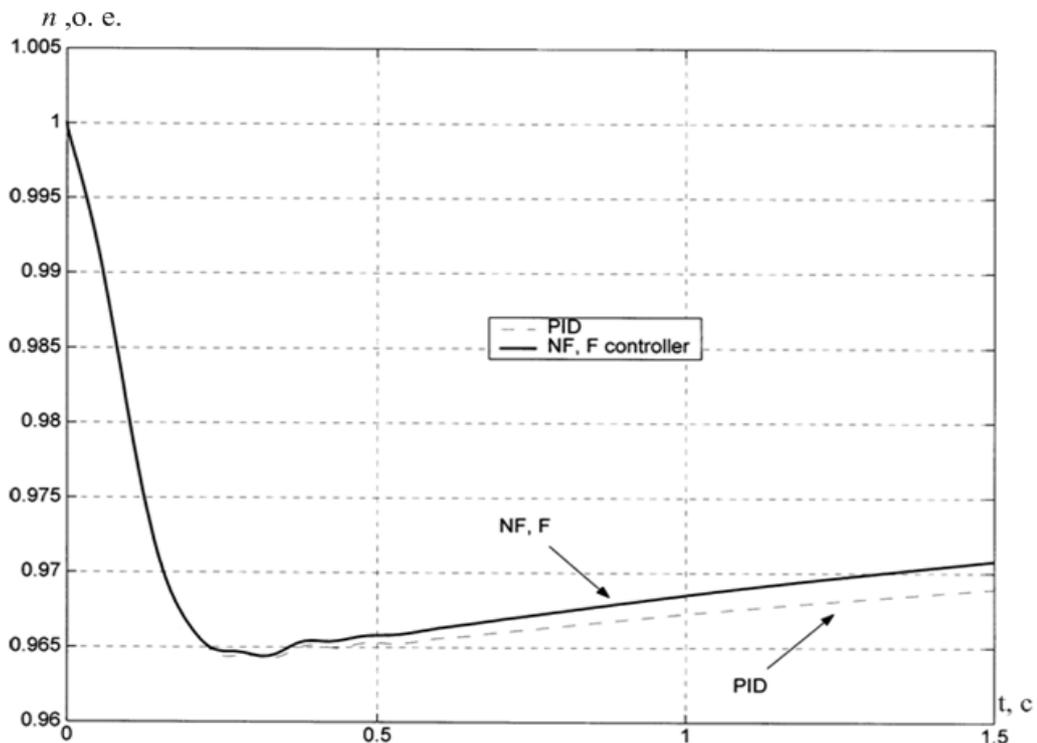


Рисунок 1.9 – Сравнение результатов испытаний ПИД-регулятора, нечеткого регулятора и нейро-нечеткого регулятора

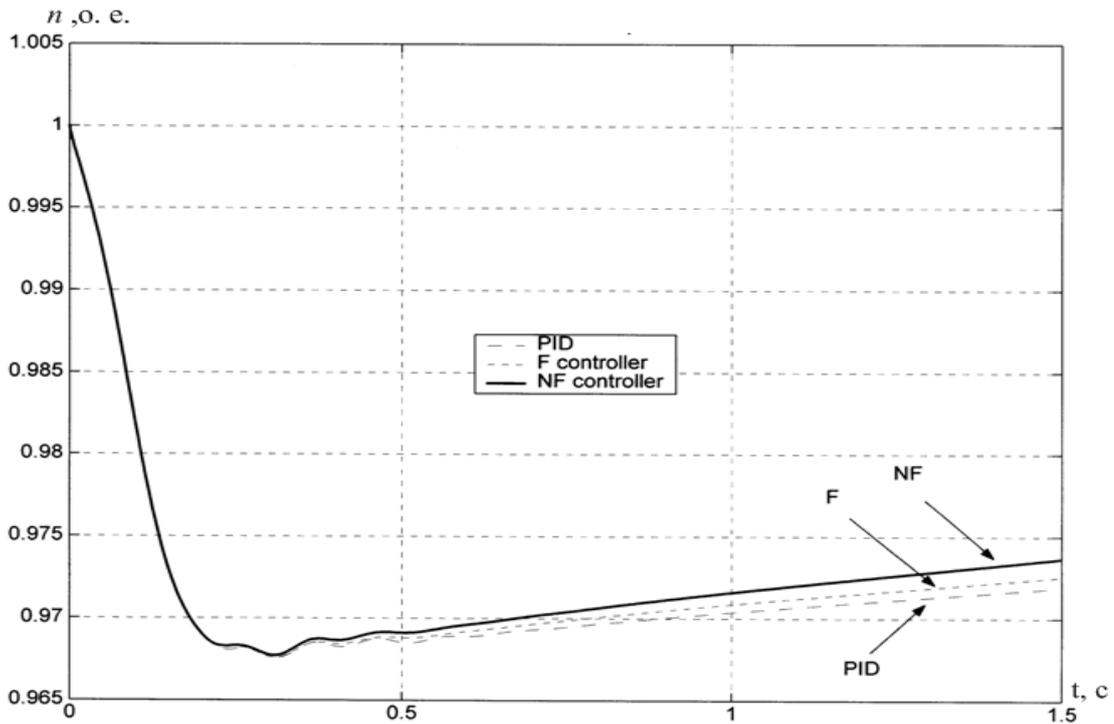


Рисунок 1.10 – Сравнение результатов испытаний ПИД-регулятора, нечеткого регулятора и нейро-нечеткого регулятора

В работе [38] для динамического объекта с запаздыванием по управлению синтезируется система адаптивного управления с неявно заданной ЭМ.

В работе [39] предложен алгоритм адаптации с ЭМ. Алгоритм основан на компенсации суммарного параметрического и координатного возмущения. Основным его отличием от ранее предложенных алгоритмов является отказ от предположения о квазистационарности режима функционирования нестационарного объекта. Это обеспечивает высокую степень точности управления независимо от интенсивности и спектрального состава входных воздействий.

В работе [40] алгоритм адаптации с ЭМ используется для создания адаптивных устройств синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

1.4.2. Поисковое адаптивное управление

В работе [41] предложенный вариант адаптивного регулятора сочетает в себе управление на скользящих режимах, адаптивное управление и нечеткую

логику. Управление на скользящих режимах вместе и управление переключениями гарантирует асимптотическую устойчивость системы благодаря критерию устойчивости Ляпунова. В свою очередь управление с переключениями служит причиной возникновения колебаний в системе. Управление на скользящих режимах дополняется аппаратом нечеткой логики для преодоления этой проблемы. База нечетких правил корректируется в реальном времени для учета нестационарных свойств системы. В процессе настройки регулятора, в нечеткие правила может меняться и предпосылка, и следствие. Таким образом, недостатки методов управления компенсируются за счет особенностей остальных.

В работе [42] рассматривается возможность включения в штатную САУ турбовентиляторного двигателя (ТВД) подсистемы оптимизации расхода топлива для повышения экономичности и экологичности.

В работе [43] предложен способ построения адаптивной системы автоматического регулирования с использованием подстраиваемого псевдолинейного двухканального корректирующего устройства динамических характеристик.

1.5. Выводы по первой главе

В настоящее время проблема обеспечения показателей качества вырабатываемой электроэнергии (прежде всего, по частоте) требует решения ряда задач по совершенствованию существующих систем управления ГТУ, что требует дополнительной проработки, так как при большом количестве контролируемых переменных существует только одна управляющая переменная, закон изменения которой выбирается в реальном времени, исходя из ограничений. Зачастую в современных исследованиях, проводящихся в этом направлении, изучают возможности нечеткого и нейросетевого математического аппарата. При этом в большинстве исследований не учитываются существующие ограничения по изменению переменных состояния, которые учтены в реальных системах управления ГТУ. Также в большинстве работ рассматриваются ГТУ авиационного применения, в то время как задача управления

электроэнергетическими ГТУ имеет серьезные отличия в силу особенностей изменения нагрузки.

В свою очередь, адаптивные методы управления предоставляют возможность учитывать как различные переменные состояния, так и критерии оптимальности[44,45]. Использование математического аппарата нечеткой логики[46,47] и нейронных сетей[48–52] является весьма перспективным, в том числе для построения адаптивных систем[53]. Недостатком нейро-нечетких технологий является требование высокого уровня знаний как объекта, так и математического аппарата. Это серьезно ограничивает возможность широкого внедрения данных подходов.

Таким образом, исходя из выше изложенного, определим цель диссертационной работы: улучшение показателей качества вырабатываемой электроэнергии по частоте на основе алгоритмов адаптивного управления. Сопутствующей целью является сокращение затрат на настройку и испытания САУ ГТУ за счет использования алгоритмов адаптивного управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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.

Глава 2. Разработка системы адаптивного управления

Использование рассмотренных выше алгоритмов адаптации требует внесения изменений в существующие САУ ГТУ. Прежде всего, возможно построить САУ с полностью новой структурой на адаптивной основе. Преимущества этого варианта заключаются в том, что нет ограничений, накладываемых существующими САУ, поскольку здесь разрабатывается заведомо новая структура САУ. Поэтому можно в полной мере использовать все возможности новейших разработок в этой области, например, нейро-нечеткий подход и др. Недостаток – это значительные временные затраты на разработку, тестирование и испытания таких САУ, и связанные с этим риски.

Второй вариант – оставить существующую САУ в ее базовой части без изменений и дополнить существующую структуру специальной подсистемой (модулем), который обеспечит реализацию функций адаптивного управления. Рассмотрим достоинства и недостатки данного варианта. К недостаткам следует отнести серьезные ограничения со стороны существующей функционально-структурной организации САУ. Достоинства такого подхода – это, прежде всего, сокращение сроков создания таких систем, сроков их отладки и испытаний, снижение рисков, так как сигналы от подсистемы адаптации можно на начальных стадиях испытаний вводить постепенно с учетом требований безопасности. По сути, в этом случае подсистема адаптации улучшает характеристики существующих регуляторов САУ, которые в этом случае рассматриваются совместно с объектом управления как внешняя для модуля адаптации система. Поэтому второй вариант создания адаптивной САУ ГТУ имеет значительную практическую направленность, сулит экономический эффект, который будет оправдан при достижении поставленных целей управления.

На этом основании в настоящей диссертации отдается предпочтение второму варианту построения адаптивной САУ.

Среди рассмотренных в главе 1 методов адаптации вначале целесообразно рассмотреть метод адаптивного управления с эталонной моделью (ЭМ). Это обусловлено тем, что:

- желаемая реакция при изменении нагрузки всех переменных состояния задается в явном виде;
- возможна как параметрическая адаптация, так и сигнальная;
- мера влияния алгоритмов адаптации также задается в явном виде и конкретным числом;
- метод реализуется проще по сравнению с методом адаптации с настраиваемой моделью и, как правило, является более быстродействующим.

Для синтеза эталонной модели ГТУ все эксперименты проводились на верифицированной сложной поэлементной модели АО «ОДК-Авиадвигатель», входящей в состав программного моделирующего комплекса «КМЭС» [54]. Комплекс «КМЭС» используется для испытаний и отладки алгоритмов управления ГТУ на АО «ОДК-Авиадвигатель».

Рассмотрим математические основы беспоиcкового адаптивного управления с эталонной моделью. Матрицы и вектора в дальнейшем выделены полужирным шрифтом – \mathbf{x} , \mathbf{A} ; скаляры выделены курсивом – t , n_{CT} .

2.1. Математическое описание метода адаптивного управления с эталонной моделью

Математическое описание метода адаптивного управления с эталонной моделью представлено в большом числе публикаций и исследований [55,56], с методической точки зрения очень подробно адаптивные системы рассматриваются в работах [57, 58, 60–62].

В работе [58] параметры исследуемых электромеханических объектов могут меняться в 5–10 раз. Скорость изменения параметров обусловлена природой возмущающих факторов. Важно, что алгоритмы адаптации, рассмотренные в [58], позволяют проводить подстройку системы управления за короткое время. Напротив, многие известные алгоритмы требуют более-менее длительного промежутка стабильности параметров, кроме того, часто используются дополнительные испытательные сигналы, как, например, в новом алгоритме, описанном в работе [62]. Поэтому в дальнейшем рассмотрении будем опираться

на теоретическую базу работы [58], заменив электромеханический объект управления газотурбинной установкой.

Возможность применения методики [58], разработанной Ю.А. Борцовом, Н.Д. Поляховым, В.В. Путовым для адаптивного управления газотурбинной установкой обуславливается тем, что упрощенная модель ГТУ оказывается подобна модели электропривода, приведенной в [58]. Частота вращения турбокомпрессора является внутренней переменной и изменяется по аperiodическому закону, а частота вращения свободной турбины является внешней переменной и изменяется по интегральному закону [12] (рисунок 1.5). После учета ряда особенностей ГТУ как объекта управления, методика может быть успешно применена для ГТУ.

Система дифференциальных уравнений, с учетом неустойчивости свойств, представляющая движение газотурбинной установки будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, \dots); \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (2.1)$$

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 представлена полная поэлементная модель ГТУ, которая используется при проектировании мощностного ряда ГТУ различного, в том числе наземного применения на АО «ОДК-Авиадвигатель».

Далее представим нестационарную нелинейную модель ГТУ в следующей форме [58]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{f}(t), \quad (2.2)$$

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. Пара (\mathbf{A}, \mathbf{B}) обладает свойством управляемости. Описание границ изменения элементов матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} должно сопровождать запись (2.1). В результате проведенных исследований [12] сложной модели ГТУ (2.1), была разработана нелинейная модель ГТУ (1.1), (1.4), представимая в форме (2.2) и пригодная для исследования алгоритмов управления. Эта модель состоит из

линейной модели ГТУ совмещенной с нелинейными зависимостями, полученными экспериментально, что часто находит применение при создании и использовании моделей авиационных газотурбинных двигателей [59,60].

При работе в режиме стабилизации частоты вращения задействованы регуляторы со следующими передаточными функциями: $W_{CT}(p) = k_{\Pi} \frac{k_i + k_f p}{k_i + p}$,

$W_G(p) = \frac{1 + T_d p}{p} k_d$ это регулятор частоты вращения свободной турбины ГТУ (n_{CT})

и регулятор дозатора газа ГТУ, соответственно. Дополним нелинейную модель (1.1),(1.4) ГТУ регуляторами, приведенными выше. Настройки регуляторов соответствуют режиму работы ГТУ и ее номиналу. В этом последнем регуляторе T_d – постоянная времени регулятора, k_d – коэффициент усиления регулятора дозатора газа. Назначение регулятора частоты вращения свободной турбины представлено в главе 1. Регулятор дозатора газа включается на выходе устройства регулирования (рисунок 1.6), именно он формирует сигнал на подачу топлива G_T . На этот регулятор замыкаются все остальные регуляторы селективной САУ. Поэтому последовательное включение указанных двух регуляторов означает, что в данный момент на дозатор газа замкнут именно контур частоты вращения свободной турбины, и именно он является в данный момент активным.

Вектор управления $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T$ введем в состав расширенного вектора состояния уравнения (2): $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, где: $x_1 = n_{CT}$, $x_2 = n_{TK}$, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа, x_4 – выход интегратора регулятора n_{CT} . Тогда уравнение (2.2) запишется с учетом вида функциональных матриц $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ в следующем виде:

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

где $f_1(t) = k_{CT}(x_1, t)N_G(t)$.

Рассмотрим границы изменения элементов матриц в уравнении (2.2). Эти значения представлены в таблице 2.1 для ГТУ мощностью 6 МВт при изменении нагрузки от холостого хода до номинального значения.

Таблица 2.1 – Границы изменения элементов матриц

Элемент матрицы	Максимальная кратность изменения
a_{12}	20 – 25
a_{22}	1,5 – 3
a_{23}	5 – 7
a_{24}	5 – 7
b_{24}	5 – 7

Темп изменения n_{CT} и n_{TK} обуславливает достаточно быструю скорость изменения представленных в таблице 2.1 параметров. Управление ГТУ дополнительно осложняет тот факт, что при переключении механизации ГТУ изменение параметров происходит скачкообразно.

Выделим линейную стационарную часть в правой части (2.2) так, чтобы описание приняло следующий вид [58]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \mathbf{g} + \boldsymbol{\sigma}_\phi, \quad (2.3)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_\phi = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, t) - \mathbf{A}_0 \mathbf{x} - \mathbf{B}_0 \mathbf{u}$ – 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, соответствующие линейной стационарной части. Их можно рассматривать как приближение, полученное с помощью

усреднения и линеаризации элементов матриц во времени, либо обозначать желаемое поведение объекта. Тогда считаем линейную стационарную часть эталонной моделью: $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_M$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_M$, где \mathbf{A}_M – гурвицева матрица (устойчива). Таким образом, уравнение (2.3) можно записать в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & 0 & 0 & a_{34} \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 0 & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{\phi_1}(x_1, x_2, t) \\ \sigma_{\phi_2}(x_2, x_3, t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Дополним (2.2) уравнением адаптивного регулятора в следующем виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{K}, \mathbf{z}, \mathbf{g}), \quad (2.4)$$

где $\mathbf{g} = \mathbf{g}(t)$ – m -мерный вектор сигналов задания, в случае ГТУ – это сигнал задания частоты вращения свободной турбины $n_{СТЗад}$; $\mathbf{K} = \mathbf{K}(t)$ – матрица настраиваемых параметров, отвечает за параметрическую настройку (ПН); $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ – m -вектор дополнительных (сигнальных) воздействий, отвечает за сигнальную настройку (СН)[58].

Зададим эталонную модель следующим образом

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{g} + \mathbf{f}(t), \quad (2.5)$$

Ее реакция, благодаря оптимальной настройке регуляторов, на возмущающее воздействие $\mathbf{f}(t)$ соответствует ГОСТ. Возмущающее воздействие $\mathbf{f}(t)$ полагаем известным.

Необходимо синтезировать закон управления $\mathbf{u}(t)$. Он должен быть выражен через минимизацию функционала качества на решениях системы (2.3), (2.5). А так же, обеспечивать выполнение следующего неравенства при любых $\xi \in M$, $\mathbf{x}(t_0)$, $\mathbf{x}_M(t_0)$

$$\|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_M(t)\| = \|\mathbf{e}(t)\| \leq \varepsilon_0, \quad (2.6)$$

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = 0. \quad (2.7)$$

Правую часть (2.1) запишем как

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi, t) = (\mathbf{A}_t + \mathbf{a}(\mathbf{x}, \xi))\mathbf{x} + (\mathbf{B}_t + \mathbf{b}(\mathbf{x}, \xi))\mathbf{u}, \quad (2.8)$$

где $\mathbf{a}(\mathbf{x}, \xi)$, $\mathbf{b}(\mathbf{x}, \xi)$ – некоторые нелинейные добавки; $\mathbf{A}_t = \mathbf{A}(\xi)$, $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}(\xi)$. При введении добавок в (2.8) предполагаются дифференцируемость и непрерывность функций $\mathbf{a}(\mathbf{x}, \xi)$, $\mathbf{b}(\mathbf{x}, \xi)$ по своим аргументам.

Примем в (2.3) $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_M$; $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_M$, учитывая (2.8) получим:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \xi, t) - \mathbf{A}_M \mathbf{x} - \mathbf{B}_M \mathbf{u} = (\mathbf{A}_t - \mathbf{A}_M) \mathbf{x} + (\mathbf{B}_t - \mathbf{B}_M) \mathbf{u} + \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{u} = \boldsymbol{\sigma}_\phi, \quad (2.9)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_\phi = \boldsymbol{\sigma} + \phi$, $\boldsymbol{\sigma} = (\mathbf{A}_t - \mathbf{A}_M) \mathbf{x} + (\mathbf{B}_t - \mathbf{B}_M) \mathbf{u}$; $\phi = \mathbf{a}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{u}$.

Адаптивный регулятор (2.4) выполняется в виде

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_a \mathbf{x} + \mathbf{K}_b (\mathbf{g} + \mathbf{z}), \quad (2.10)$$

где \mathbf{K}_a , \mathbf{K}_b – $(m \times n)$, $(m \times m)$ -мерные матрицы настраиваемых коэффициентов. В таком случае (2.3), (2.4) при учете (2.9) и (2.10) может быть записана

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x} + \mathbf{B}_M \mathbf{g} + (\mathbf{A}_t + \mathbf{B}_t \mathbf{K}_a - \mathbf{A}_M) \mathbf{x} + (\mathbf{B}_t \mathbf{K}_b - \mathbf{B}_M) \mathbf{g} + \mathbf{B}_t \mathbf{z} + \phi, \quad (2.11)$$

где $\phi = \mathbf{f} + (\mathbf{a} + \mathbf{b}\mathbf{K}_a) \mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{K}_b \mathbf{g} + \mathbf{b}\mathbf{z}$.

Тогда цель адаптации, то есть справедливость (2.7), достигается выполнением соотношений:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{A} + \mathbf{B}_t \mathbf{K}_a) = \mathbf{A}_M; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{B}_t \mathbf{K}_b = \mathbf{B}_M; \quad \mathbf{B}\mathbf{z} = \phi. \quad (2.12)$$

Полагая, что в результате адаптации $\mathbf{K}_a \rightarrow \mathbf{K}_a^0$, $\mathbf{K}_b \rightarrow \mathbf{K}_b^0$ и $\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_a^0 = \mathbf{A}_M$, $\mathbf{B}\mathbf{K}_b^0 = \mathbf{B}_M$, выражение (2.11) можно переписать в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M \mathbf{x} + \mathbf{B}_M \mathbf{g} + \mathbf{B}\delta_a \mathbf{x} + \mathbf{B}\delta_b \mathbf{g} + \mathbf{B}\mathbf{z} + \phi, \quad (2.13)$$

где $\mathbf{K}_a - \mathbf{K}_a^0 = \delta_a$; $\mathbf{K}_b - \mathbf{K}_b^0 = \delta_b$.

Цель управления (2.12) достигается с помощью следующих уравнений алгоритмов адаптации, представленных в общем виде [58]:

$$\dot{\mathbf{K}} = \mathbf{A}_1(\mathbf{K}, \mathbf{e}, \mathbf{g}); \quad \mathbf{K} = [\mathbf{K}_a; \mathbf{K}_b] \quad (2.14)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_2(\mathbf{e}, \mathbf{g}, \xi, t), \quad (2.15)$$

из них параметрической настройке (ПН) соответствует первое уравнение (2.14), а сигнальной настройке (СН) – второе (2.15). На рисунке 2.1 приведена структура системы.

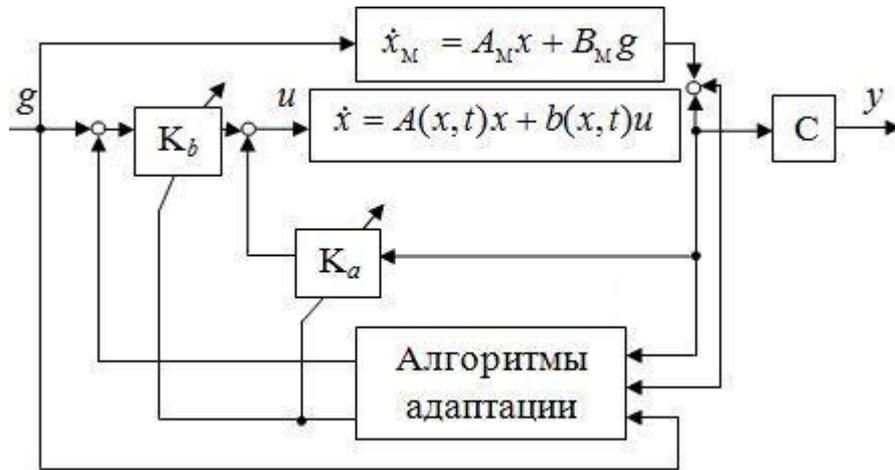


Рисунок 2.1 – Структурная схема системы с параметрической и сигнальной настройками

В работе [58] дается и обосновывается рекомендация при существенном преобладании нестационарных свойств использовать для модели (2.1) параметрическую настройку. В случае преобладания в системе нелинейных свойств использовать для модели (2.1) сигнальную настройку. В случае проявления и нелинейных, и нестационарных свойств модели (2.1) использовать оба типа настройки совместно.

При построении системы методом функций Ляпунова [58,63,65], с эталонной моделью и с комбинированной настройкой (ПН и СН), используя уравнения (2.5), (2.11), уравнение ошибки запишем в виде

$$\dot{e} = A_M e + B_f \delta v(t) + B_f z(t) + \phi. \quad (2.16)$$

Функция Ляпунова выберем в виде [58]:

$$V(e, \delta) = 0,5[e^T P e + \text{Tr}(\delta \Gamma^{-1} \delta^T)]. \quad (2.17)$$

Для нахождения матрицы P необходимо решить матричное уравнение

$$P A^T + A^T P = -Q,$$

где матрица Q выбирается произвольно (>0).

При выполнении условия квазистационарности (ограниченном темпе изменения параметров ГТУ) производная по времени этой функции может быть записана как

$$\dot{V}(e, \delta) = 0,5 e^T [A_M^T P + P A_M] e + e^T P B_f \delta v + e^T P \phi + \text{Tr}(\dot{\delta} \Gamma^{-1} \dot{\delta}^T) + e^T P B_f z. \quad (2.18)$$

При любых $\mathbf{e} \neq 0$, $\delta \neq 0$ производная (2.18) будет отрицательно определенной, если адаптивные алгоритмы будут выбраны в виде:

-параметрическая адаптация

$$\dot{\delta} = -\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{v}^T \mathbf{\Gamma}; \quad \mathbf{\Gamma} = \text{diag}\{\gamma_1, \dots, \gamma_{n+m}\}; \quad \gamma_i > 0; \quad (2.19)$$

-сигнальная адаптация

$$\mathbf{z}(t) = -h \text{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); \quad h > 0, \quad (2.20)$$

где $(\text{sgn } \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i = \text{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i$.

В силу ограничений на темп изменения параметров и ограниченности расширенного вектора состояния $\mathbf{v}(t)$ вектор-функция ϕ также ограничена с некоторой оценкой $\sup_t \|\phi\| = M_\phi$.

Условие отрицательной определенности функции $V(\mathbf{e}, \delta)$ относительно ошибки $e(t)$ выполняется [58], если значение h выбрать как

$$h \geq M_\phi \|\mathbf{B}_t^+\|, \quad (2.21)$$

чем гарантируется $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ и $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{\delta}(t) = 0$.

Простота и быстроедействие данного способа адаптивного управления уравновешиваются серьезным недостатком. Высокочастотные колебания, вызванные скользящим режимом, являются недопустимыми при применении сигнального метода адаптации для управления ГТУ [58].

Способ устранения колебаний сигнальной ветви подробно рассмотрен в работе [64].

В статьях [65,66] среди прочего приводится сравнение сигмоидальной (sigma) и релейной (sign) функциями. Замена релейной функции (sign) на гладкую функцию с насыщением позволит решить проблему возникновения высокочастотных колебаний в системе. Сигма-функция является нелинейной, гладкой, не имеет особых точек, и ее нелинейность обеспечивает качество оценки сигналов.

С этой целью внесем изменения в уравнение (2.20):

$$\mathbf{z}(t) = -h \text{sigma}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); \quad h > 0, \quad (2.22)$$

где $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x/k}} - 0,5 = 0,5 \frac{1-e^{-x/k}}{1+e^{-x/k}}$ – это сигмоидальная функция,

коэффициент $k=\text{const}>0$ определяет угол наклона касательной к сигмоидальной функции в нуле, иначе, при $k \rightarrow +0$ стремится к функции знака

$\lim_{k \rightarrow +0} \sigma(x) = \text{sgn}(x)$. Точки $x \approx \pm 1,3k$ служат естественными границами, которые

отделяют промежутки области определения, где сигма-функция близка или к постоянной, или к линейной функции[64]. Производную сигма-функции можно представить в виде:

$$\sigma'(x/k) = \frac{1 - \sigma^2(x/k)}{2k} \quad (2.23)$$

Благодаря простому выражению производной сигма-функции ее удобно использовать в различных системах.

На рисунке 2.2 представлен график сигма-функции(2.23) при $k=1$.

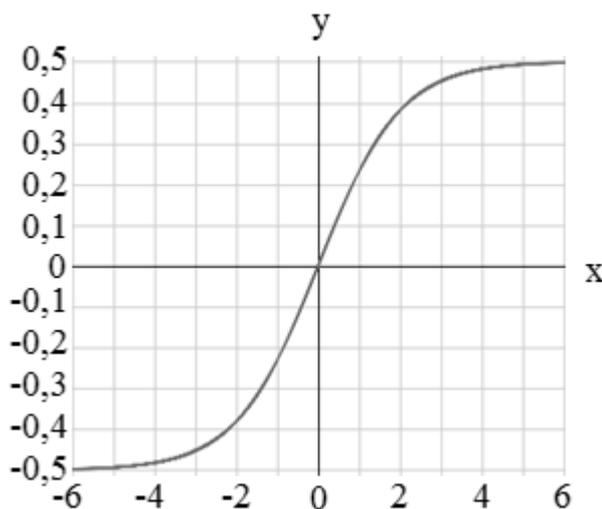


Рисунок 2.2 – График сигма-функции

Сигма-функция позволяет установить соответствие между множествами значений ошибок параметров и значений сигнальной ветви. Это позволяет перейти к обычному управлению, сохранив все достоинства скользящего режима[64,67,68].

В результате использования рассмотренных методов [55,58,60,61,69–71] и предложенных нами решений разработан алгоритм адаптивного управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для автоматизации ГТЭС.

Альтернативным подходом для адаптивных методов с ЭМ является использование настраиваемой модели (НМ). Учитывая существенно нелинейный характер математического описания САУ ГТУ, целесообразно рассмотреть и этот алгоритм. В связи с тем, что контур адаптации должен быть быстродействующим, предпочтение для идентификации в реальном времени следует отдать беспойсковым методам. Рассмотрим метод беспойсковой идентификации.

2.2. Математическое описание беспойскового метода идентификации в реальном времени

Приведенный здесь беспойсковый алгоритм идентификации с адаптивной моделью (БАИАМ) был разработан С.Д. Земляковым и В.Ю. Рутковским. Его область применения это линейные непрерывные объекты с описанием в пространстве состояний. Данный метод, как и ранее рассмотренные, основывается на методе функций Ляпунова. Как известно нахождение функций Ляпунова для такого класса систем не имеет общих формальных методов [60,61,63], поэтому процедура остается эвристической.

Наиболее простым является случай линейных объекта и модели. Однако в фундаментальном издании [63] метод используется исключительно для получения линейной модели линейного объекта. Поэтому модифицируем этот метод[72,73]. Рассмотрим возможность получения линейной модели нелинейного объекта в реальном времени с использованием математического аппарата из [59]. Для этого будем считать, что в каждый момент времени настраиваемая модель является линейной моделью соответствующей текущему состоянию нелинейной объекта, для этого в начальный момент времени параметры линейной модели должны соответствовать нелинейному объекту[67,72,73].

Описание линейного объекта и линейной модели в пространствах состояний имеет следующий вид[63]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bg}, \quad (2.24)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M \mathbf{g}. \quad (2.25)$$

где: \mathbf{x} – вектор переменных состояния объекта, \mathbf{x}_M – вектор переменных состояния модели, \mathbf{g} – вектор сигналов задания, $\dot{\mathbf{x}}$ – вектор производных переменных состояния объекта, $\dot{\mathbf{x}}_M$ – вектор производных переменных состояния модели.

Соответствующие векторы и матрицы объекта и модели имеют одинаковые размерности, а их отклонения имеют вид:

$$\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_M, \quad \Delta\mathbf{A} = \mathbf{A} - \mathbf{A}_M, \quad \Delta\mathbf{B} = \mathbf{B} - \mathbf{B}_M. \quad (2.26)$$

Считается, что векторы \mathbf{x} , \mathbf{x}_M , \mathbf{g} , $\dot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{x}}_M$ являются непосредственно наблюдаемыми (измеряемыми).

Вычтя (2.25) из (2.24), найдем:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \Delta\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{A}_M\Delta\mathbf{x} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{g}. \quad (2.27)$$

\mathbf{A}_M – матрица соответствующая текущей настройке модели, полагаем ее известной. $\Delta\mathbf{x}$ и $\Delta\dot{\mathbf{x}}$ определяем по измеряемым величинам. В таком случае, наблюдаемый сигнал невязки примем равным:

$$\Delta\mathbf{z} = \Delta\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{A}_M\Delta\mathbf{x} = \Delta\mathbf{A}\mathbf{x} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{g}. \quad (2.28)$$

Элементы матриц \mathbf{A} , \mathbf{A}_M , \mathbf{B} , \mathbf{B}_M являются независимыми друг от друга. Таким образом, процесс идентификации может быть осуществлен параллельно по строкам этих матриц. В силу этого, запишем:

$$\Delta\mathbf{z}_i = \Delta\mathbf{A}_{|i|}\mathbf{x} + \Delta\mathbf{B}_{|i|}\mathbf{g}, i = \overline{1, n}, \quad (2.29)$$

где $\Delta\mathbf{A}_{|i|}$, $\Delta\mathbf{B}_{|i|}$ – являются i -ми строками матриц $\Delta\mathbf{A}$, $\Delta\mathbf{B}$.

Функцию Ляпунова для i -го канала БАИАМ будем искать в виде положительно-определенной квадратичной формы:

$$\mathbf{V}_i = 0.5(\Delta\mathbf{A}_{|i|}\mathbf{K}^{(i)}\Delta\mathbf{A}_{|i|}^T + \Delta\mathbf{B}_{|i|}\mathbf{D}^{(i)}\Delta\mathbf{B}_{|i|}^T), \quad (2.30)$$

где $\mathbf{K}^{(i)}$, $\mathbf{D}^{(i)}$ – положительно-определенные диагональные матрицы заданных постоянных коэффициентов. Для функции \mathbf{V}_i производную по времени запишем в следующем виде

$$\dot{\mathbf{V}}_i = \Delta\mathbf{A}_{|i|}\mathbf{K}^{(i)}\Delta\dot{\mathbf{A}}_{|i|}^T + \Delta\mathbf{B}_{|i|}\mathbf{D}^{(i)}\Delta\dot{\mathbf{B}}_{|i|}^T. \quad (2.31)$$

Пусть

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{A}}_{|i}^T &= -(\mathbf{K}^{(i)})^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{x} = -(\mathbf{K}^{(i)})^{-1} (\Delta \mathbf{A}_{|i} \mathbf{x} + \Delta \mathbf{B}_{|i} \mathbf{g}) \mathbf{x}, \\ \Delta \dot{\mathbf{B}}_{|i}^T &= -(\mathbf{D}^{(i)})^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{g} = -(\mathbf{D}^{(i)})^{-1} (\Delta \mathbf{A}_{|i} \mathbf{x} + \Delta \mathbf{B}_{|i} \mathbf{g}) \mathbf{g}.\end{aligned}\quad (2.32)$$

Подставим (2.9) в (2.8), найдем:

$$\dot{\mathbf{V}}_i = -(\Delta \mathbf{A}_{|i} \mathbf{x} + \Delta \mathbf{B}_{|i} \mathbf{g})^2. \quad (2.33)$$

Асимптотическая сходимость процесса настройки модели подтверждается выражениями (2.30), (2.32), в том случае, если соотношения (2.32) выполняются, а величина невязки (2.29) обращается тождественно в нуль на реализациях $x(t) \in X, u(t) \in U$ только при $\Delta \mathbf{A}_{|i} = 0, \Delta \mathbf{B}_{|i} = 0$. Преобразуем выражения (2.32) к следующему виду:

$$\dot{\mathbf{A}}_{M|i}^T = (\mathbf{K}^{(i)})^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{x} + \dot{\mathbf{A}}_{|i}^T, \dot{\mathbf{B}}_{M|i}^T = (\mathbf{D}^{(i)})^{-1} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{g} + \dot{\mathbf{B}}_{|i}^T. \quad (2.34)$$

Данный алгоритм для настройки модели невозможно реализовать точно, потому что $\dot{\mathbf{A}}$ и $\dot{\mathbf{B}}$ являются неизвестными. В случаях, когда коэффициенты усиления, образующие диагональные матрицы, $\mathbf{K}^{*(i)} = (\mathbf{K}^{(i)})^{-1}, \mathbf{D}^{*(i)} = (\mathbf{D}^{(i)})^{-1}$, достаточно велики или при темп изменения \mathbf{A} достаточно медленный, членами $\dot{\mathbf{A}}_{|i}^T, \dot{\mathbf{B}}_{|i}^T$ можно пренебречь. В таком случае, вместо (2.34) можно использовать алгоритм

$$\dot{\mathbf{A}}_{M|i}^T = \mathbf{K}^{*(i)} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{x}, \dot{\mathbf{B}}_{M|i}^T = \mathbf{D}^{*(i)} \Delta \mathbf{z}_i \mathbf{g}. \quad (2.35)$$

Этот алгоритм настройки модели является реализуемым. Полагая $\mathbf{K}^{*(i)}, \mathbf{D}^{*(i)}$, не зависящими от i , перепишем (2.35):

$$\dot{\mathbf{A}}_M = \Delta \mathbf{z} (\mathbf{K} * \mathbf{x})^T, \dot{\mathbf{B}}_M = \Delta \mathbf{z} (\mathbf{D} * \mathbf{g})^T. \quad (2.36)$$

Программная реализация приведенного выше БАИАМ требует разработки разностной схемы численного интегрирования для (2.25) и (2.36). Это сопряжено с определенными трудностями, так как вектор состояния \mathbf{x} должен быть доступен для измерения, а вектор производных $\dot{\mathbf{x}}$ должен быть доступен для измерения или вычисления, то есть объект должен обладать высокой степенью непосредственной наблюдаемости. По оценкам [63] программная реализация данного метода идентификации должна требовать вычислительную производительность в

полтора – два раза больше, чем производительность необходимая для процесса моделирования в реальном времени объекта идентификации.

В соответствии с уравнениями(2.24), (2.25), (2.36) и соотношением $\Delta z = \Delta \dot{x} - A_M \Delta x$, получена структурная схема БАИАМ, приведенная на рисунке 2.3.

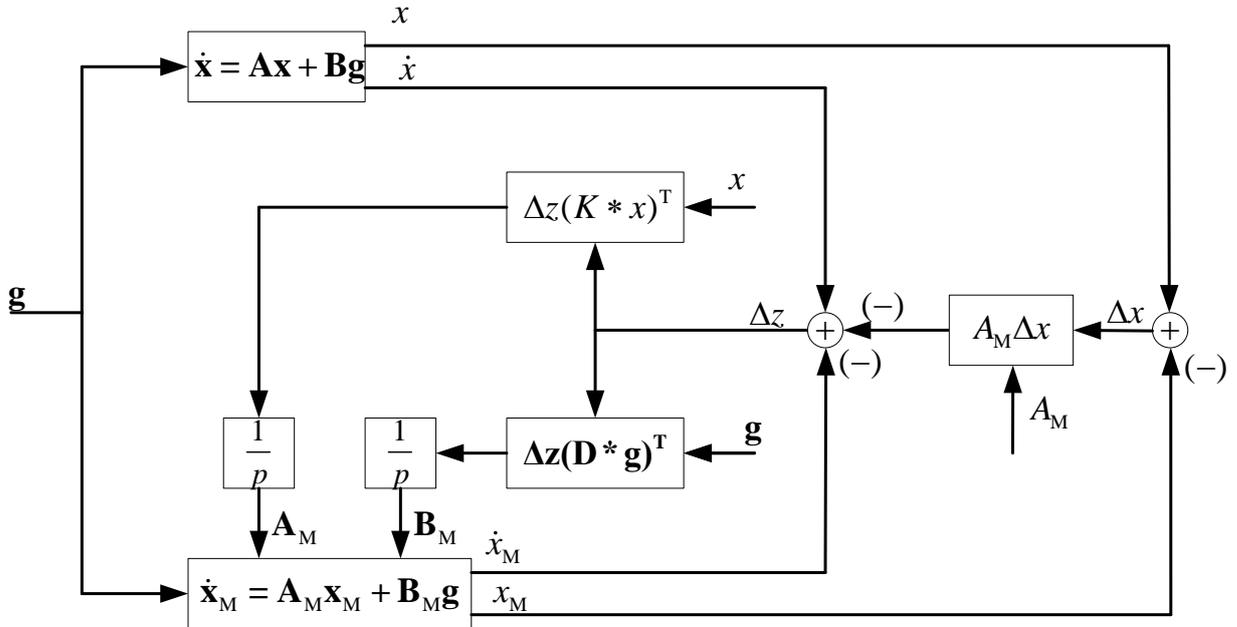


Рисунок 2.3 – Структурная схема идентификации в реальном времени

Поскольку ГТУ является существенно нелинейным объектом, упростим задачу идентификации в реальном времени с помощью знаний о режимах работы ГТУ. Добавим к линейной идентифицируемой модели (2.25) нелинейную часть, включающую в себя упрощенные статические характеристики. Упрощенные статические характеристики получаются путем аппроксимации статических характеристик объекта на основании двух точек, соответствующих номинальному режиму и холостому ходу ГТУ. Таким образом, в процессе идентификации появится дополнительная оценка \dot{A} и \dot{B} , что позволяет приблизить процесс идентификации к уравнению (2.34). Уравнение НМ примет вид:

$$\dot{x}_M = (A_M(x) + A_M(\Delta z))x + (B_M(x) + B_M(\Delta z))g + f(t) \quad (2.37)$$

где $\mathbf{A}_M(\mathbf{x}), \mathbf{B}_M(\mathbf{x})$ – матрицы, представляющие оценку нелинейной части модели на основании физических характеристик объекта; $\mathbf{A}_M(\Delta z), \mathbf{B}_M(\Delta z)$ – матрицы, линейной идентифицируемой модели, меняющиеся в соответствии с (2.36).

Данный метод обеспечивает высокую точность идентификации в реальном времени. Желаемые показатели качества переходных процессов обеспечиваются с помощью метода динамической компенсации. Динамическая компенсация рассмотрена в соответствующем пункте алгоритма построения подсистемы адаптации.

Разработанный модифицированный метод беспойсковой идентификации позволяет на его основе построить алгоритм для системы адаптивного управления с настраиваемой моделью [67, 72-74].

2.3. Структура адаптивной САУ ГТУ

Рассмотрим штатную САУ ГТУ, дополненную приведенными выше методами адаптивного управления. Процессы адаптации и идентификации ГТУ в реальном времени протекают только в том случае, когда задействован контур стабилизации частоты вращения свободной турбины. Поскольку прочие контуры управления и ограничения не затронуты процессом адаптации, а схема селектирования каналов управления не претерпела никаких изменений, можно утверждать, что новая САУ ГТУ, представленная на рисунке 2.4, полностью соответствует штатной САУ ГТУ, за исключением контура стабилизации частоты вращения свободной турбины.

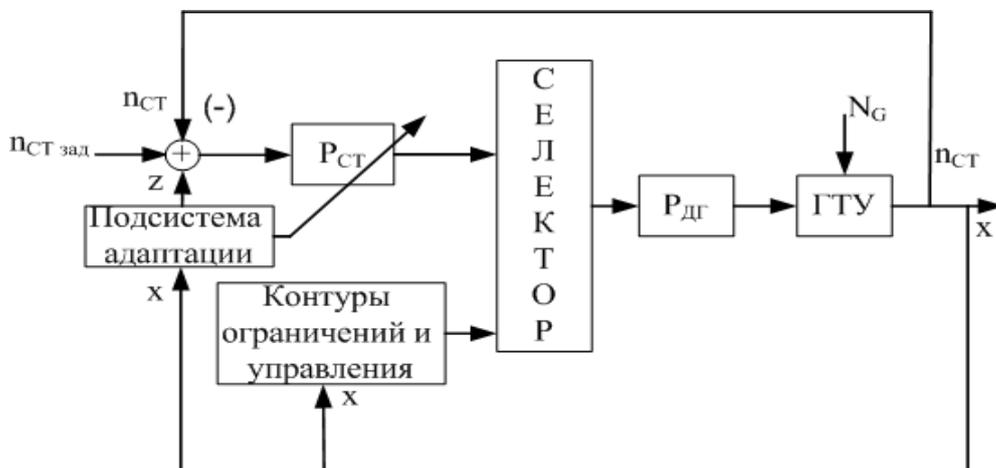


Рисунок 2.4 – Обобщенная адаптивной САУ ГТУ

В связи с выше изложенным, модернизация и испытания новой адаптивной САУ ГТУ не потребует значительных затрат.

Принцип функционирования схемы, приведенной на рисунке 2.4, может быть сформулирован следующим образом. В зависимости от состояния системы и выбранной схемы селектирования каналов управления контуры ограничения и управления подключаются через селектор к регулятору дозатора топливного газа. Как правило, контур получает приоритет при достижении ограничения соответствующей технологической координаты или изменении режима работы. На схеме контуры ограничения и управления вынесены отдельно, поскольку соответствуют штатной структуре. В свою очередь, контур стабилизации частоты вращения свободной турбины, дополненный подсистемой адаптации, вынесен отдельно. Остановимся на его работе более подробно. На основании вектора состояния x , подсистема адаптации вырабатывает воздействия соответствующие сигнальной и параметрической настройкам. Параметрическая адаптация изменяет коэффициенты регулятора частоты вращения свободной турбины. Сигнальное воздействие z прибавляется к уставке на входе регулятора. Сигнальная и параметрическая адаптация могут использоваться как совместно, так и по отдельности.

Новая структура САУ ГТУ является результатом совмещения традиционной методической базы проектирования и методов адаптивного управления. Сохранение структуры и параметров штатной САУ ГТУ позволяет сократить сроки настройки и испытаний. Использование методов адаптивного управления позволяет: улучшить динамические характеристики по частоте вращения свободной турбины, а, следовательно, и частоту в электрической системе, парировать разнообразные внутренние и внешние возмущения [75].

2.4. Выводы по второй главе

В главе рассмотрены модифицированные методы сигнального и параметрического адаптивного управления, и модификация метода идентификации в реальном времени. В совокупности предложенные методы

позволяют использовать различные варианты адаптивного управления для создания адаптивных САУ. Сравнение вариантов адаптивного управления, для определения лучшего для повышения качества электроэнергии по частоте, будет проводиться с помощью математического моделирования. Обоснован способ включения адаптивных алгоритмов управления в структуру САУ ГТУ.

Глава 3. Программная реализация адаптивного управления

Для разработки, моделирования и испытания систем адаптивного управления был использован программный моделирующий комплекс «КМЭС»[54,76–81]. В ПМК «КМЭС» используются сложные поэлементные модели наземных ГТУ и соответствующие им модели СГ мощностью от 2,5МВт до 16 МВт, а штатные системы управления. ПМК «КМЭС» внедрен на ОАО «ОДК-Авиадвигатель» и доказал свою точность и эффективность при решении задач разработки, настройки и поддержки процесса эксплуатации САУ ГТУ. Подсистема адаптации, которая была разработана в процессе работы над диссертацией, была встроена в штатную САУ ГТУ.

Подсистема адаптации разрабатывается в виде программного модуля, который включен в состав штатной САУ ГТУ. Поэтому в главе сначала разрабатывается алгоритм построения подсистемы адаптивного управления. Затем в соответствии с этим алгоритмом выполняется программная реализация подсистемы адаптивного управления, которая встраивается в состав штатной селективной САУ ГТУ, структура которой рассматривалась в главе 1.

3.1. Алгоритм построения подсистемы адаптации

Для реализации приведенных ранее методов адаптивного управления в виде подсистемы для САУ ГТУ требуется рассчитать параметры адаптивных алгоритмов. Исходя из предложенной ранее структуры адаптивной САУ ГТУ, подсистема адаптации будет связана только с контуром стабилизации частоты вращения.

Подробное применение алгоритма построения подсистемы адаптации будет рассмотрено в целях улучшения качества электроэнергии по частоте, поскольку это является целью диссертационной работы. Перечень этапов построения подсистемы адаптации будет иметь следующий вид:

1. Выбор показателей качества переходных процессов, нуждающихся в улучшении и связанных с ними переменных состояния;

2. Определение контуров управления, непосредственно влияющих на выбранные переменные;
 3. Синтез математической модели объекта управления;
 4. Синтез замкнутых контуров, по результатам пунктов 2 и 3;
 5. Подбор параметров для алгоритма беспойсковой идентификации;
 6. Определение объекта динамической компенсации и расчет соответствующих параметров;
 7. Настройка регуляторов в замкнутом контуре ЭМ или НМ во всем рабочем диапазоне для достижения желаемого поведения системы;
 8. Определение параметров алгоритмов параметрической (2.19) и сигнальной(2.22) адаптации;
 9. Реализация полученных результатов в виде программы для ЭВМ.
- В приложении к цели диссертации алгоритм будет иметь вид (рисунок 3.1).

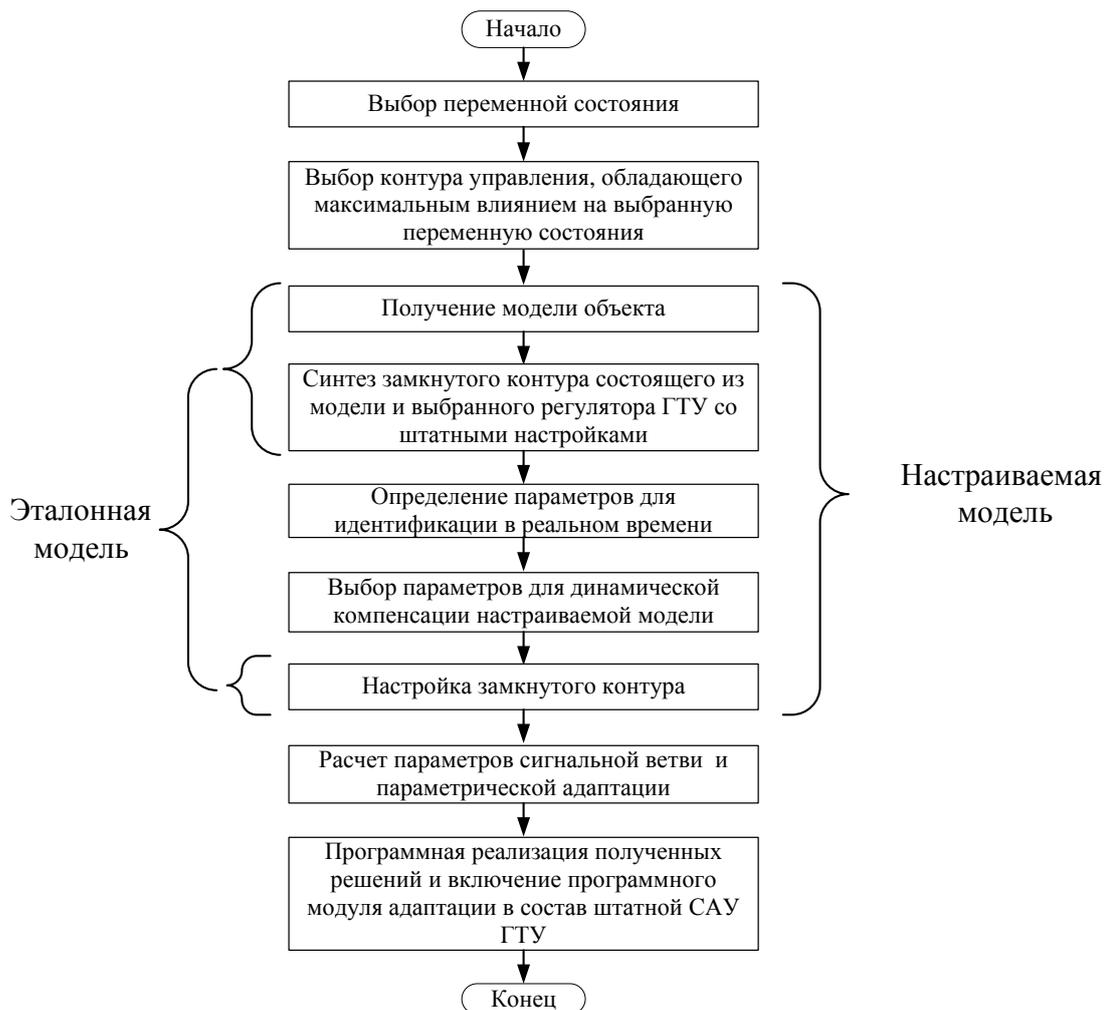


Рисунок 3.1 – Алгоритм построения подсистемы адаптации

Для получения подсистемы адаптивного управления с ЭМ необходимо выполнить этапы 1 – 4 и 7 – 9. Для получения подсистемы адаптивного управления с НМ необходимо выполнить этапы с первого по девятый.

Рассмотрим этапы алгоритма более подробно, в свете задачи улучшения качества, производимой ГТЭС электроэнергии, по частоте.

3.1.1. Выбор показателей качества и переменных состояния

Важными показателями качества электроэнергии по частоте являются время восстановления и максимальное отклонение частоты. В случае переходных процессов – это время переходного процесса и максимальное отклонение. Основываясь на физике происходящих процессов, искомая переменная состояния ГТУ – это частота вращения свободной турбины, так как вал генератора соединен через редуктор со свободной турбиной ГТУ.

3.1.2. Определение контуров управления

Исходя из анализа структуры САУ ГТУ и проведенных исследований [57,64], сделан вывод, что регулятор частоты вращения свободной турбины отвечает за выбранные показатели качества.

3.1.3. Получение модели объекта

Учитывая основные физические законы преобразования энергии, процесс синтеза математической модели ГТУ может быть следующим [12,18].

Максимальное использование априорных сведений о физических процессах, происходящих в ГТУ, позволяет заранее выбрать структуру модели и идентифицировать незначительное число параметров. Таким образом, возможно отказаться от формальных методов определения параметров уравнений регрессии. Неизвестные параметры определяются по экспериментальным данным (установившиеся значения переменных и кривые переходных процессов).

Для модели объекта была выбрана структура (1.1,1.2). Подобная структура была получена в процессе идентификации с помощью метода наименьших квадратов [82], так же подобные модели часто применяются при разработке САУ ГТУ проектными организациями авиадвигателестроительной отрасли [12,18,19,59].

Параметрическая идентификация модели ГТУ проводилась с помощью данных полученных с помощью верифицированной поэлементной модели ГТУ, так как без устройства управления ГТУ не работоспособна [83]. Используемая поэлементная модель обладает высокой точностью. Структура модели является закрытой, потому что это собственность промышленного предприятия (АО «ОДК-Авиадвигатель»)

Динамические характеристики снимались с помощью двух серий опытов. В этих опытах происходило ступенчатое изменение нагрузки и расхода топлива, от холостого хода до номинального режима в первой серии опытов и с номинального режима до холостого хода во второй серии опытов. В (1.1) турбокомпрессор представлен аperiodическим звеном, его эквивалентная постоянная времени рассчитывалась следующим образом[84]:

$$T_{TK} = T_{0,63} \quad (3.1)$$

где $T_{0,63}$ – промежуток времени достижения n_{TK} значения, равного $0,63n_{TKуст}$.

Для расчета постоянной времени свободной турбины использовалась формула:

$$T_{ST} = \frac{\Delta t}{n_{ST1} - n_{ST0}} (N_E - N_G) \quad (3.2)$$

где обозначено: T_{ST} – постоянная времени свободной турбины, n_{ST0} – начальное значение скорости вращения свободной турбины, n_{ST1} – конечное значение скорости вращения свободной турбины, Δt – приращение времени, N_E – располагаемая мощность свободной турбины, N_G – потребляемая мощность нагрузки. В приложении А представлены результаты расчета.

Статические характеристики представляют собой функциональные зависимости между входными и выходными величинами в установившемся режиме. Статические характеристики ГТУ были получены в замкнутой системе (приложение Б). Они были получены с помощью поэлементной модели ГТУ, но могут быть получены и на основании экспериментов на реальной ГТУ.

Настраиваемая модель (2.37) представляет собой линеаризованную модель аналогичную по структуре (1.1,1.2) с упрощенными статическими характеристиками, построенными по значениям холостого хода и номинального режима.

3.1.4. Синтез замкнутого контура

Дополним, ранее рассмотренные модели, регулятором частоты вращения свободной турбины – $W_{CT}(p) = k_{\Pi} \frac{k_i + k_f p}{k_i + p}$ и регулятором дозатора газа – $W_G(p) = \frac{1 + T_D p}{p} k_D$. После этого, введём отрицательную обратную связь по частоте вращения (рисунок 3.2).

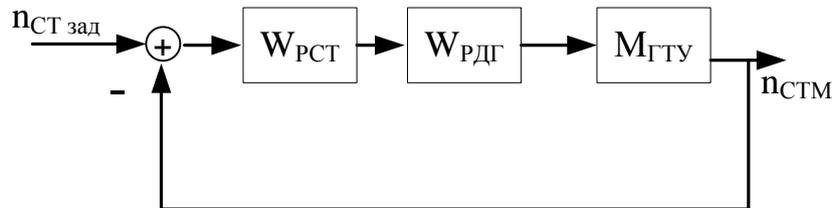


Рисунок 3.2 – Структурная схема замкнутого контура

Для структуры, показанной на рисунке 3.2, регулятор частоты вращения свободной турбины выполняет роль фильтра, включенного перед регулятором дозатора газа.

3.1.5. Подбор параметров для алгоритма беспойсковой идентификации

В зависимости от типа ГТУ положительные диагональные матрицы **D** и **K** будут отличаться [61,73,74]. Это обусловлено тем, что устойчивость процесса беспойсковой идентификации основывается на функции Ляпунова.

Основываясь на опыте подбора матриц для ГТУ различной мощности, были сформированы следующие рекомендации.

Элементы диагональных матриц **D** и **K**, соответствующие переменной состояния, нужно увеличивать, если продолжительность переходного процесса

переменной НМ больше, чем продолжительность переходного процесса соответствующей переменной объекта.

Элементы диагональных матриц **D** и **K**, соответствующие переменной состояния, нужно уменьшать, если в переходном процессе переменной НМ появляются колебания, которых нет в переходном процессе соответствующей переменной объекта.

В качестве начального значения элементы диагональных матриц **D** и **K**, удобно использовать число 10^{-8} .

3.1.6. Определение объекта динамической компенсации и расчет соответствующих параметров

В процессе идентификации в реальном времени меняются параметры всех элементов замкнутого контура. Для обеспечения желаемого поведения необходимо провести динамическую компенсацию регулятора частоты вращения свободной турбины и заменить его регулятором аналогичной структуры настроенный желаемым образом (рисунок 3.3).

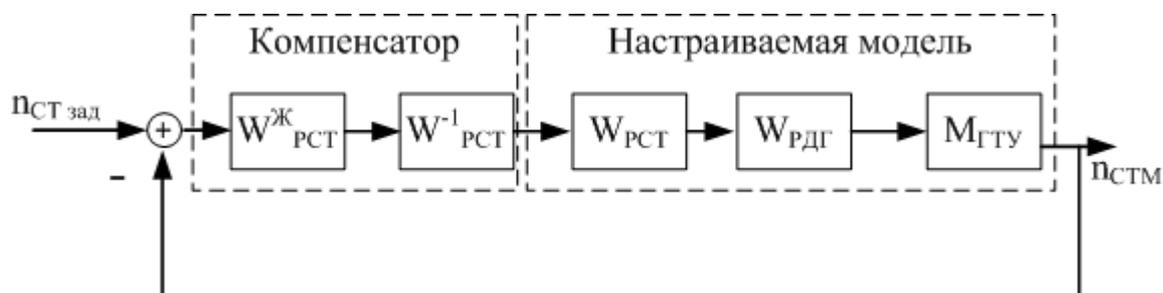


Рисунок 3.3 – Схема динамической компенсации

На рисунке 3.3 компенсатор состоит из передаточной функция регулятора частоты вращения свободной турбины, с желаемыми настройками – $W^{\text{ж}}_{\text{рст}}$ и передаточной функции, компенсирующей регулятор частоты вращения свободной турбины – $W^{-1}_{\text{рст}}$; настраиваемая модель состоит из передаточных функций регулятора частоты свободной турбины – $W_{\text{рст}}$, регулятора дозатора газа – $W_{\text{рдг}}$, модели ГТУ – $M_{\text{гту}}$. $W^{-1}_{\text{рст}}$ имеет вид:

$$W^{-1}_{\text{рст}}(p) = \frac{1}{k_{\text{п}}} \frac{k_i + p}{k_i + k_f p}, \quad (3.3)$$

Коэффициенты k_i , k_f и k_{Π} рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} k_f &= 1/(1 + \mathbf{A}_{3,4} / \mathbf{B}_{3,4}); \\ k_{\Pi} &= \mathbf{B}_{2,4} / (\mathbf{A}_{2,3} * k_f); \\ k_i &= \mathbf{B}_{4,4}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Настройка регулятора рассмотрена в следующем разделе.

3.1.7. Настройка регуляторов в замкнутом контуре ЭМ или НМ во всем рабочем диапазоне для достижения желаемого поведения системы

Желаемое поведение системы во всем рабочем диапазоне обеспечивается за счет настройки регуляторов. В качестве желаемых показателей качества переходных процессов НМ и ЭМ можно использовать требования ГОСТ. Для настройки могут использоваться методы оптимизации, методы подбора и другие способы. Структура ЭМ и НМ позволяет настроить их на симметричный оптимум (СО) [58]. В таком случае [84], будет обеспечена нулевая статическая ошибка. Для разомкнутой системы, настроенной на СО, передаточная функция имеет следующий вид

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{4T_{\mu}p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu}p + 1)}, \quad (3.5)$$

где T_{μ} – это малая некомпенсированная постоянная времени.

3.1.8. Определение параметров алгоритмов адаптации

Для нахождения параметров уравнений параметрической (2.19) и сигнальной (2.22) необходимо найти матрицу \mathbf{P} из уравнения:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = \mathbf{Q}. \quad (3.6)$$

Для решения уравнения необходимо выбрать матрицу \mathbf{Q} . Она должна быть отрицательно-определенной. Согласно рекомендациям, приведенным в работе [58], матрица \mathbf{Q} должна быть диагональной. Качество сигнальной и параметрической адаптации сильно зависят [58,64,67,84] от матрицы \mathbf{P} и, следовательно, от выбранной матрицы \mathbf{Q} . В результате исследований, лучшие

результаты были получены при соотношении величин полученных коэффициентов не более чем 4.

Поскольку, матрица Q выбирается произвольно, необходимо проводить сравнения различных вариантов реализации параметрической и сигнальной адаптации. Проверка проводится с помощью математического моделирования, после программной реализации.

3.1.9. Реализация полученных результатов в виде программы для ЭВМ

Программные пакеты *Matlab/Simulink* и их бесплатный аналог *Scilab/Xocs* позволяют быстро реализовать модели объекта и алгоритмы управления. На основании экспериментов, в случае необходимости, в расчетные данные могут быть внесены изменения. После получения удовлетворительного результата, следует перейти к экспериментам со сложными поэлементными моделями, учитывая динамику электрической системы, совместно со штатными регуляторами ГТУ и СГ. Программная реализация разработанных алгоритмов [86,87,88] для такой проверки подробно рассмотрена далее.

3.2. Программный моделирующий комплекс «КМЭС»

Программный моделирующий комплекс «КМЭС» обладает определенными ограничениями, связанными со структурой сети и типами потребителей. Структура сети является жестко заданной и не позволяет произвольно комбинировать доступные элементы.

Функциональные возможности «КМЭС»:

- структура энергосистемы жесткая, формируется посредством ключей;
- моделирование установившихся и переходных режимов;
- написание собственных алгоритмов управления для ГТУ и СГ;
- написание собственных моделей элементов электросистемы;
- написание собственных моделей ГТУ;
- просмотр текущих переменных элемента, трендов и результатов моделирования;

- сохранение результатов моделирования в формате *xls*;

Интерфейс ПМК «КМЭС» представлен на рисунке 3.4.

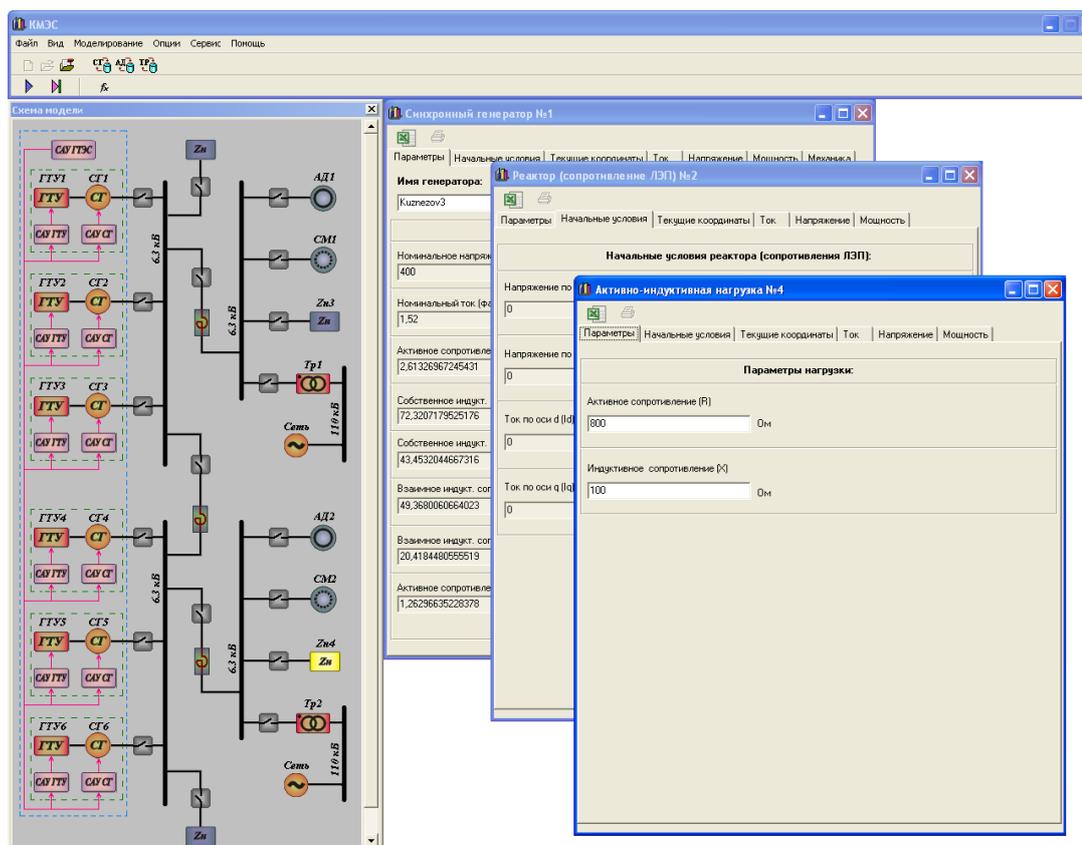


Рисунок 3.4 – Интерфейс ПМК «КМЭС»

Возможности ПМК «КМЭС» по исследованию динамики электросистем позволили провести испытания разработанных алгоритмов адаптивного управления при различных режимах поведения электрической нагрузки [89,90].

3.2.1. Модели ГТУ

Программный моделирующий комплекс «КМЭС» включает себя модели ГТУ, разработанные на АО «ОДК-Авиадвигатель». Эти модели являются поэлементными, точно описывают физические процессы, протекающие в ГТУ, и демонстрируют высокую степень соответствия экспериментальным данным. Они прошли верификацию и используются длительное время.

Блок-схема внешних сигналов модели ГТУ представлена на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Блок-схема внешних сигналов модели ГТУ

Как показано на рисунке 3.5, на вход модели ГТУ подаются: расход топлива – управляющее воздействие и мощность нагрузки генератора – возмущающее воздействие. Управление механизацией турбокомпрессора, отвечающей за количество подаваемого воздуха, для наземных версий ГТУ является программным, для обеспечения желаемой статической характеристики, выражающей соотношение между расходом топлива и вырабатываемой мощностью в установившемся режиме.

3.2.2. Система управления ГТУ

Блок-схема внешних сигналов САУ ГТУ представлена на рисунке 3.6.

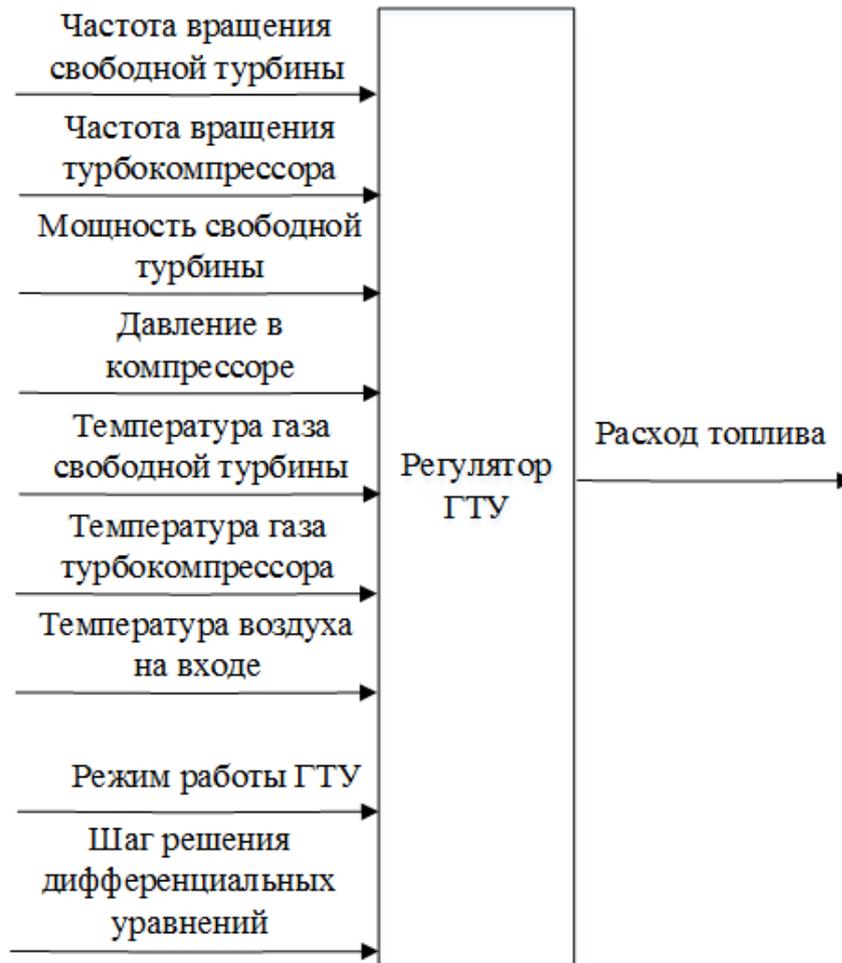


Рисунок 3.6 – Блок-схема внешних сигналов регулятора ГТУ

Как показано на рисунке 3.6, штатная система управления ГТУ включает в себя различные контуры ограничений и управления, подключенных к селекторам. В ПМК «КМЭС» регуляторы ГТУ представляют собой *dll*. На вход САУ поступают переменные с модели, а также идентификатор режима работы и значение шага расчета для решения дифференциальных уравнений. Расход топлива – выходная переменная САУ.

В случае включения в состав САУ ГТУ контура адаптации необходимо добавить еще один внешний сигнал – мощность нагрузки генератора.

3.2.3. Изменение в программном моделирующем комплексе «КМЭС»

Как следует из описания САУ ГТУ, программный моделирующий комплекс «КМЭС» требует незначительной доработки – вывода данных о мощности

нагрузки генератора в САУ ГТУ. После внесения необходимых изменений в программный код комплекс «КМЭС» пригоден для испытания разработанных алгоритмов адаптации в составе штатного регулятора.

3.3. Модули адаптивного управления

Штатная САУ ГТУ была дополнена разработанными программными модулями, реализующими методы адаптивного управления.

3.3.1. Модуль сигнальной адаптации

Принцип работы модуля сигнальной адаптации можно описать следующим образом. На вход модуля поступают : x_M – вектор состояния ЭМ или НМ и x – сокращенный вектор состояния объекта управления. На основании полученных данных происходит расчет вектора рассогласования. После чего рассчитывается взвешенная сумма вектора рассогласования. Затем происходит расчет сигнального воздействия z .

Величина сигнального воздействия z является выходной переменной.

На рисунке 3.7 показана блок-схема входных и выходных сигналов модуля сигнальной адаптации.

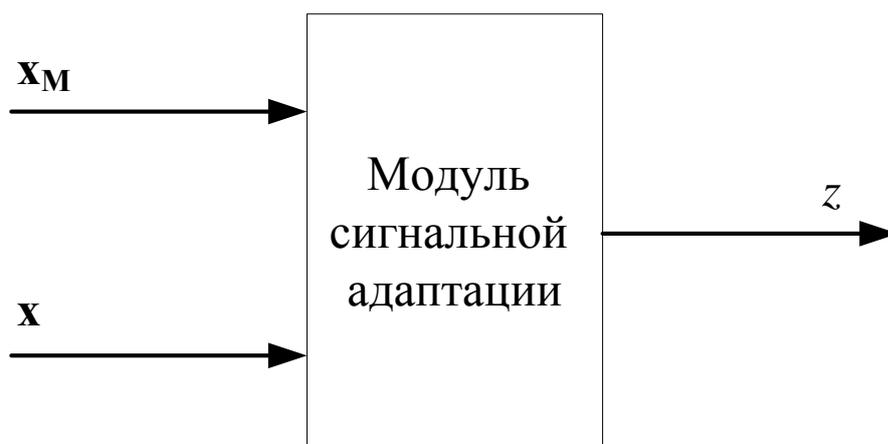


Рисунок 3.7 – Блок-схема входных и выходных сигналов модуля

3.3.2. Модуль параметрической адаптации

Принцип работы модуля параметрической адаптации можно описать следующим образом. На вход модуля поступают: шаг решения дифференциальных уравнений, \mathbf{x}_M – вектор состояния ЭМ или НМ и \mathbf{x} – сокращенный вектор состояния объекта управления. На основании полученных данных происходит расчет вектора рассогласования. После чего рассчитывается взвешенная сумма вектора рассогласования. Затем происходит расчет приращений коэффициентов регулятора $\Delta k_i, \Delta k_f, \Delta k_p$.

Приращения коэффициентов регулятора $\Delta k_i, \Delta k_f, \Delta k_p$ являются выходными переменными модуля.

Блок-схема входных и выходных сигналов модуля параметрической адаптации показана на рисунке 3.8.

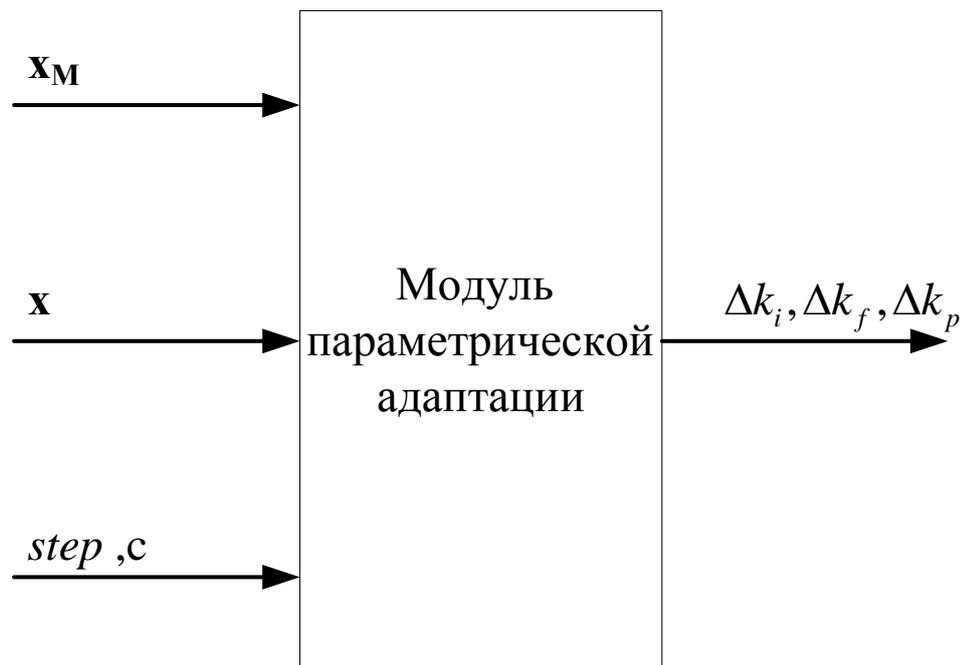


Рисунок 3.8 – Блок-схема входных и выходных сигналов модуля

3.3.3. Модуль эталонной модели

Принцип работы модуля эталонной модели можно описать следующим образом. На вход модуля поступают: мощность нагрузки генератора (N_G кВт) и

шаг решения дифференциальных уравнений. На основании полученных данных происходит последовательный расчет переменных состояния модели. Для решения дифференциальных уравнений используется метод первого порядка.

$x_{ЭМ}$ – вектор состояния эталонной модели является выходной переменной модуля.

На рисунке 3.9 приведена блок-схема входных и выходных сигналов модуля эталонной модели.

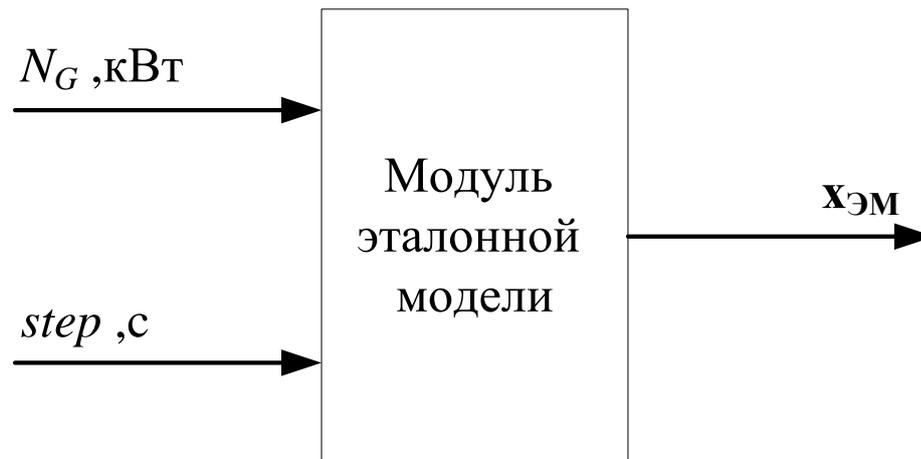


Рисунок 3.9 – Блок-схема внешних сигналов модуля эталонной модели

3.3.4. Модуль настраиваемой линейной модели

Принцип работы модуля настраиваемой линейной модели можно описать следующим образом. На вход модуля поступают: сокращенный вектор состояния сложной поэлементной модели (x), мощность нагрузки генератора (N_G кВт) и шаг решения дифференциальных уравнений. На основании полученных данных происходит расчет вектора производных переменных состояния объекта. Затем рассчитывается вектора состояния модели. После этого, происходит вычисление разности между векторами состояния и производными переменных состояния объекта и модели. На основании рассчитанных разностей определяется сигнал невязки. Сигнал невязки позволяет определить приращений матриц A_M и B_M . Следующим шагом, при необходимости, выполняется динамическая компенсация. После этого, формируется итоговый вектор состояния настраиваемой модели – $x_{НМ}$.

x_{HM} является выходной переменной модуля.

На рисунке 3.10 приведена блок-схема входных и выходных сигналов модуля НМ.

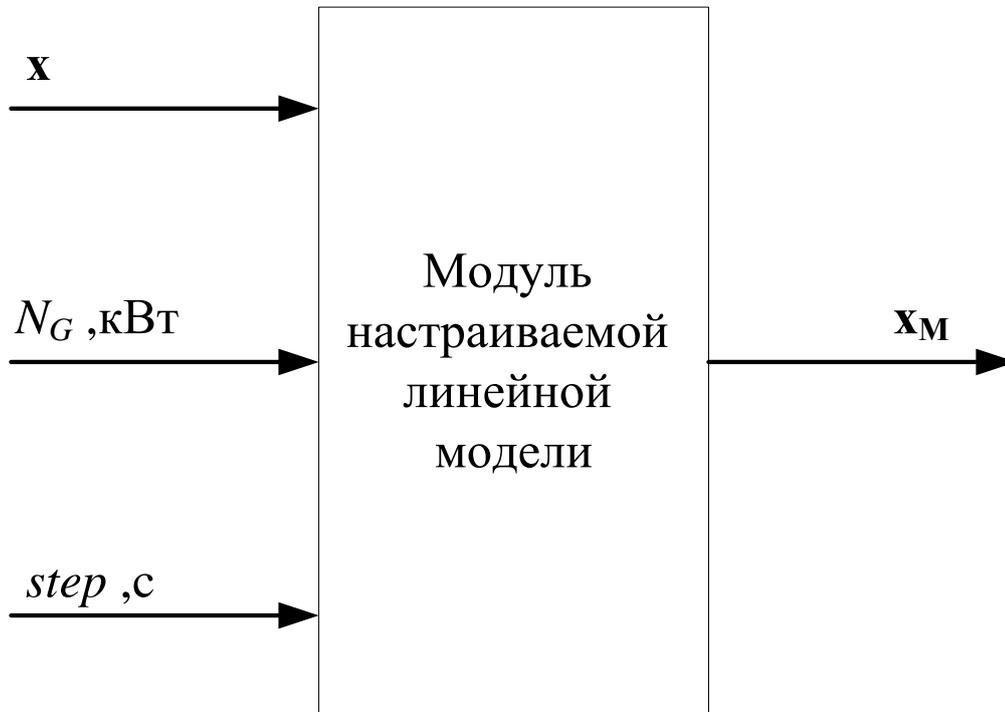


Рисунок 3.10 – Блок-схема внешних сигналов модуля настраиваемой линейной модели

3.4. Программный комплекс предварительной настройки модулей

Для создания сигнальной адаптивной САУ ГТУ в штатный регулятор дополнительно включаются модули ЭМ или НМ и модуль сигнальной адаптации [86,87]. Подсистема адаптации будет работать в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.11.

Для создания адаптивной САУ ГТУ с параметрической адаптацией в штатный регулятор дополнительно включаются модули НМ и модуль параметрической адаптации. Подсистема адаптации будет работать в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.12.

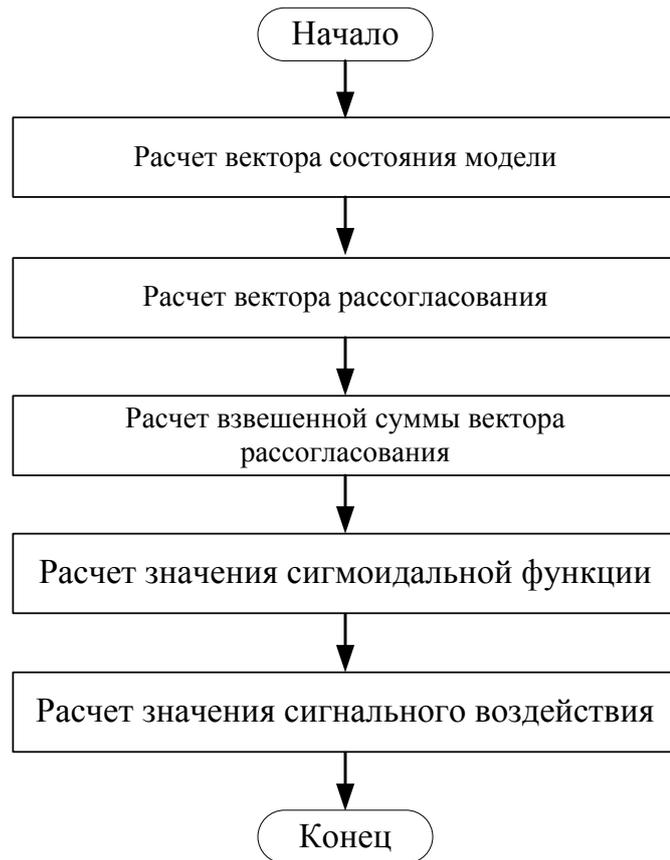


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритма работы модуля адаптации с СН

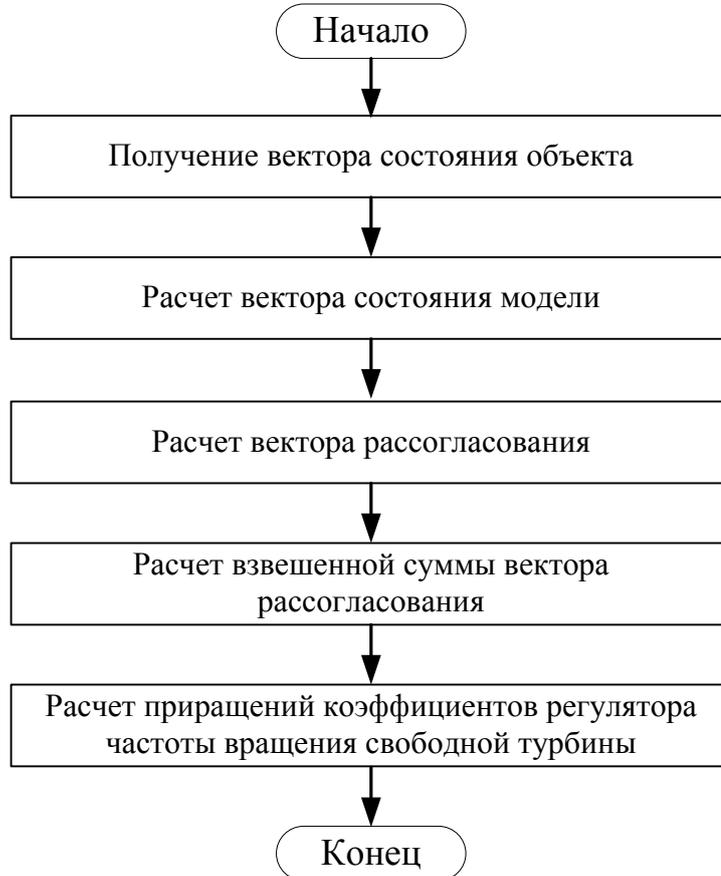


Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритма работы модуля адаптации с ПН

Для проверки рассчитанных параметров и соответствия кода математическим выражениям разработанные модули были дополнены модулем моделей и регуляторов ГТУ(3.1–3.2, 3.5–3.8) и модулем управления. Модуль управления позволяет задавать: время моделирования, шаг моделирования, начальное значение нагрузки, время изменения нагрузки, новое значение нагрузки. В итоге был получен программный комплекс предварительной настройки адаптивного модуля (рисунок 3.13).

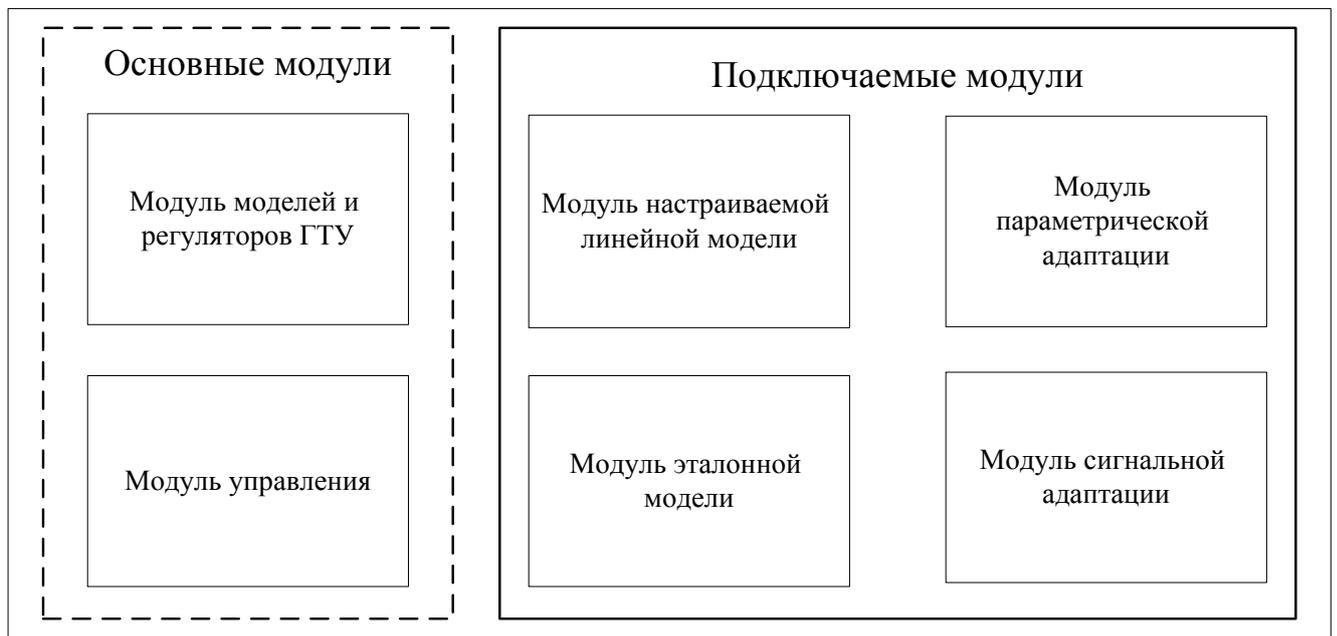


Рисунок 3.13 – Программный комплекс предварительной настройки адаптивного модуля

Программный комплекс предварительной настройки модулей позволяет проводить проверку модулей как по отдельности, так и совместно. Главной задачей данного программного комплекса является проверка программной реализации алгоритмов адаптивного управления. В ПМК «КМЭС» система управления ГТУ представляет собой *dll*, поэтому возможность отследить процесс изменения переменных сильно ограничена.

Интерфейс и программные модули программного обеспечения программного моделирующего комплекса «КМЭС» разработаны в среде *Borland Delphi* на языке программирования *ObjectPascal* (объектный Паскаль). Поэтому

программный комплекс предварительной настройки модулей был реализован так же на языке программирования *ObjectPascal*.

Результаты проведенных экспериментов сохраняются в формате *txt* (в текстовом файле).

3.5. Выводы по третьей главе

Подсистема адаптивного управления разрабатывается в виде программного модуля в соответствии с предложенным алгоритмом, затем полученный программный модуль непосредственно встраивается в состав штатной селективной САУ ГТУ для ГТЭС. Тем самым реализуется адаптивная САУ на базе разработанных в настоящей диссертации методов и алгоритмов.

Выполнена программная реализация алгоритмов адаптивного управления в виде отдельных программных модулей. Такой подход позволяет получить различные варианты модуля адаптивного управления для САУ ГТУ.

Создан программный комплекс для проверки и отладки различных вариантов модуля адаптивного управления САУ ГТУ.

Алгоритмы адаптивного управления газотурбинными установками на основе эталонной модели и на основе настраиваемой модели реализованы в виде модуля адаптивного управления и используются в составе ПМК «КМЭС», что позволяет проводить компьютерные испытания САУ ГТУ многоагрегатных газотурбинных электростанций в составе электроэнергетических систем различного вида.

Получены свидетельства на регистрацию соответствующих программ для ЭВМ.

Глава 4. Сравнительный анализ методов адаптивного управления

В третьей главе получена программная реализация подсистемы адаптивного управления, реализующая разработанные в диссертации методы и алгоритмы. Для определения их эффективности были проведены испытания на моделях различной сложности. Преимущества предложенного в предыдущей главе алгоритма построения подсистемы адаптивного управления заключаются еще и в том, что, с одной стороны, в результате формируется законченный программный модуль для встраивания в штатную САУ ГТУ для ГТЭС. С другой стороны, полученный программный модуль может быть встроен в различные компьютерные и полунатурные испытательные комплексы для их всесторонней проверки, тестирования и испытания.

Первичная проверка проводилась на нелинейной модели соответствующей уравнениям (1.1,1.4) и дополненным уравнениями регуляторов (3.7,3.8). Далее проверка проводилась на сложных поэлементных моделях, обладающей высокой точностью, на разнообразных испытательных ресурсах АО «ОДК-Авиадвигатель».

4.1. Первичная проверка

Первичная проверка проводится на нелинейных моделях ГТУ 2,5 и 6 МВт четвертого порядка. Вектор x представлен в следующем виде: $x_1 = n_{СТ}$ —частота вращения свободной турбины, $x_2 = n_{ТК}$ —частота вращения турбокомпрессора, x_3 —интегратор регулятора дозатора газа, x_4 —интегратор регулятора $n_{СТ}$.

В данных испытаниях электрическая часть системы представлена одним блоком, задающим мощность нагрузки для модели ГТУ. При переключении нагрузка изменяется мгновенно.

4.1.1. Первичная проверка сигнальной настройки с эталонной моделью

В случае использования сигнальной ветви с функцией знака sign (2.20) возникают высокочастотные колебания, обусловленные скользящим режимом [58]. В виду конструкции дозатора газа эти колебания недопустимы. Для устранения этого недостатка сигнальной адаптации уравнение сигнальной ветви было преобразовано в (2.22). Здесь функция знака sign была заменена на гладкую

сигма-функцию. В результате высокочастотные колебания были устранены[64]. Таким образом, отличительной особенностью полученного метода адаптивного управления[64] является дополнительное сигнальное воздействие, которое в каждый момент времени соответствует взвешенной сумме сигналов рассогласования. Высокочастотные колебания, возникающие в случае использования сигнальной ветви с функцией sign , приведены на рисунке 4.1. Пример отсутствия высокочастотных колебаний приведен на рисунке 4.2.

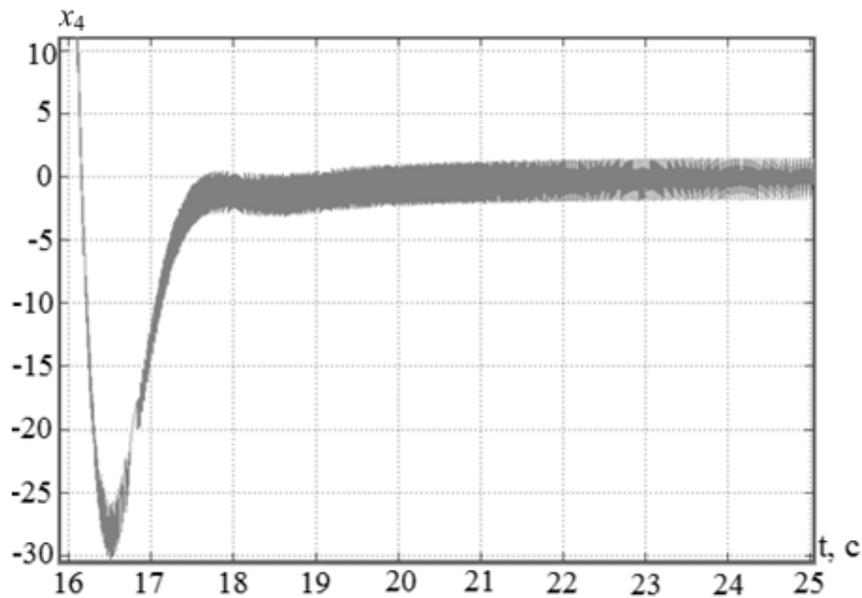


Рисунок 4.1 – Высокочастотные колебания x_3 при сигнальной настройке с функцией sign

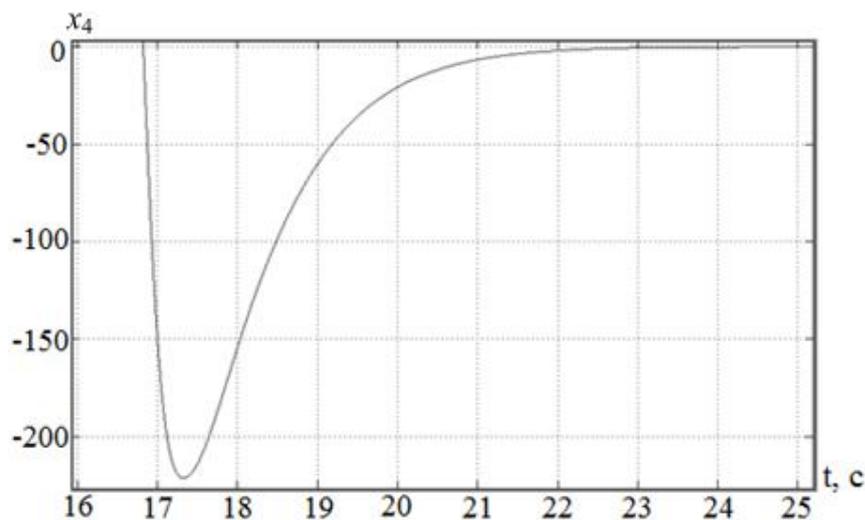


Рисунок 4.2 – Отсутствие высокочастотных колебаний x_3 при сигнальной настройке функцией sigma

В случае использования линейной эталонной модели с сигнальной настройкой (2.22) возникает статическая ошибка. Это связано с тем, что расход топлива и частота вращения турбокомпрессора изменяются нелинейно, что приводит к ненулевому значению сигнальной ветви в статическом режиме. Таким образом, эталонная модель должна быть дополнена статическими характеристиками.

Рассмотрим работу адаптивного регулятора с сигнальной ветвью (2.22) и эталонной моделью (3.1,3.2) с моделью ГТУ мощностью 2500кВт. В момент времени t равный 0с нагрузка изменяется со 140кВт (холостой ход) до 2000кВт, в момент времени t равный 10с нагрузка уменьшается с 2000 до 500кВт.

Результаты моделирования системы с сигнальной настройкой и ЭМ приведены на рисунках 4.3 – 4.6, черным цветом обозначена ЭМ, темно-серым цветом обозначена система с сигнальной настройкой, светло-серым цветом обозначена система со штатным регулятором.

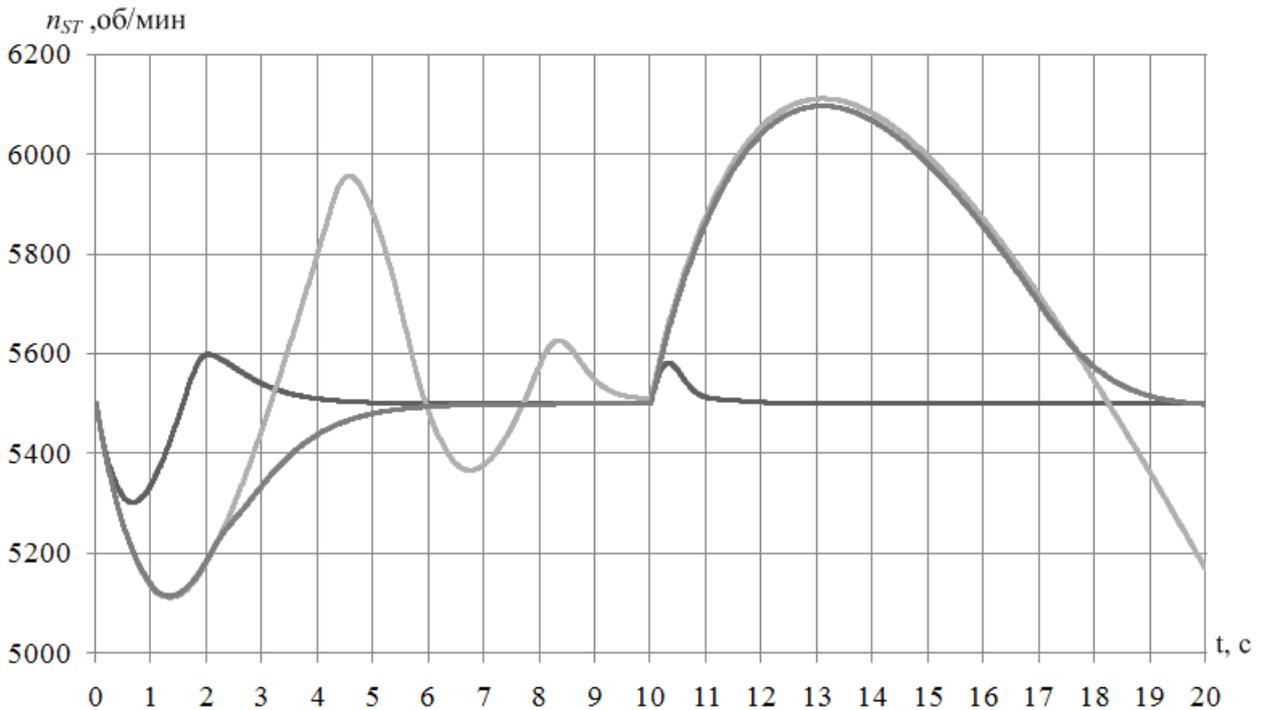


Рисунок 4.3 – График изменения частоты вращения свободной турбины

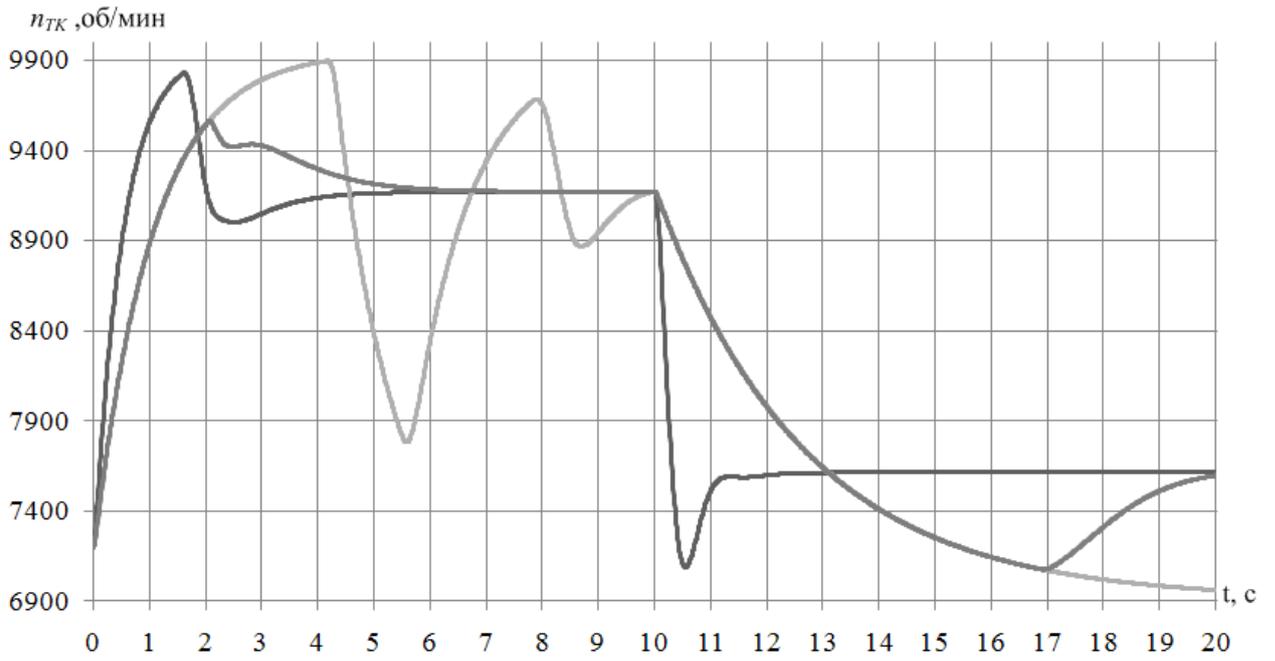


Рисунок 4.4 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

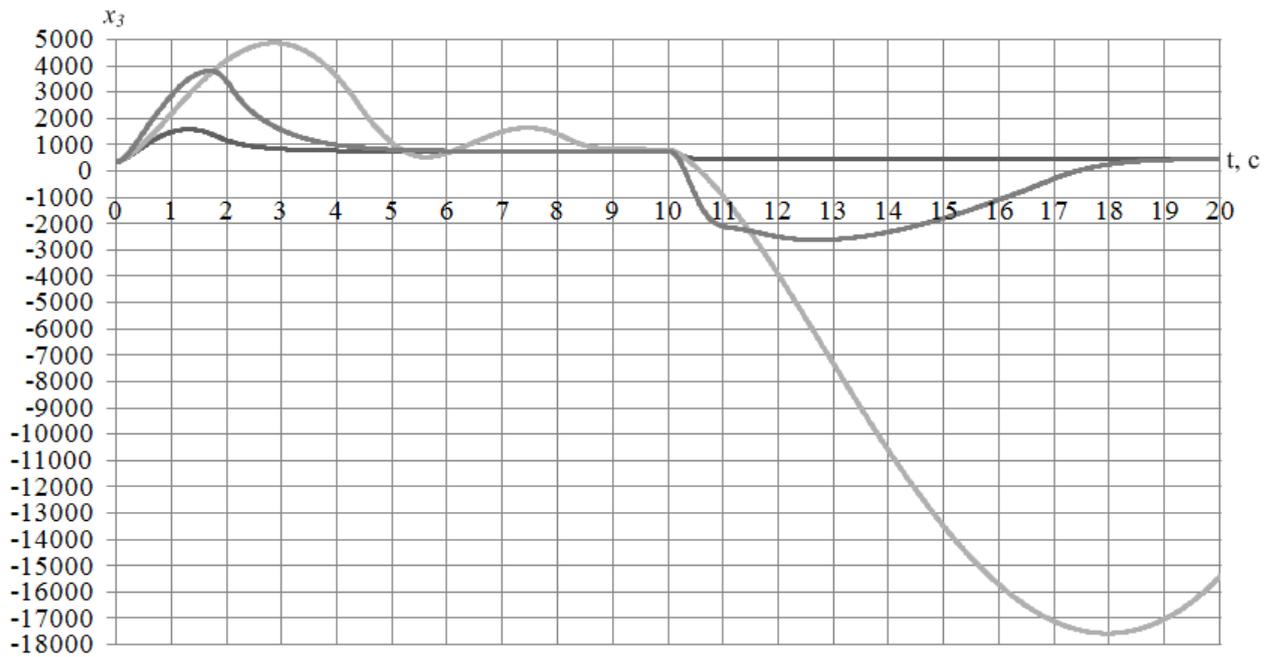


Рисунок 4.5 – График изменения интегратора регулятора дозатора

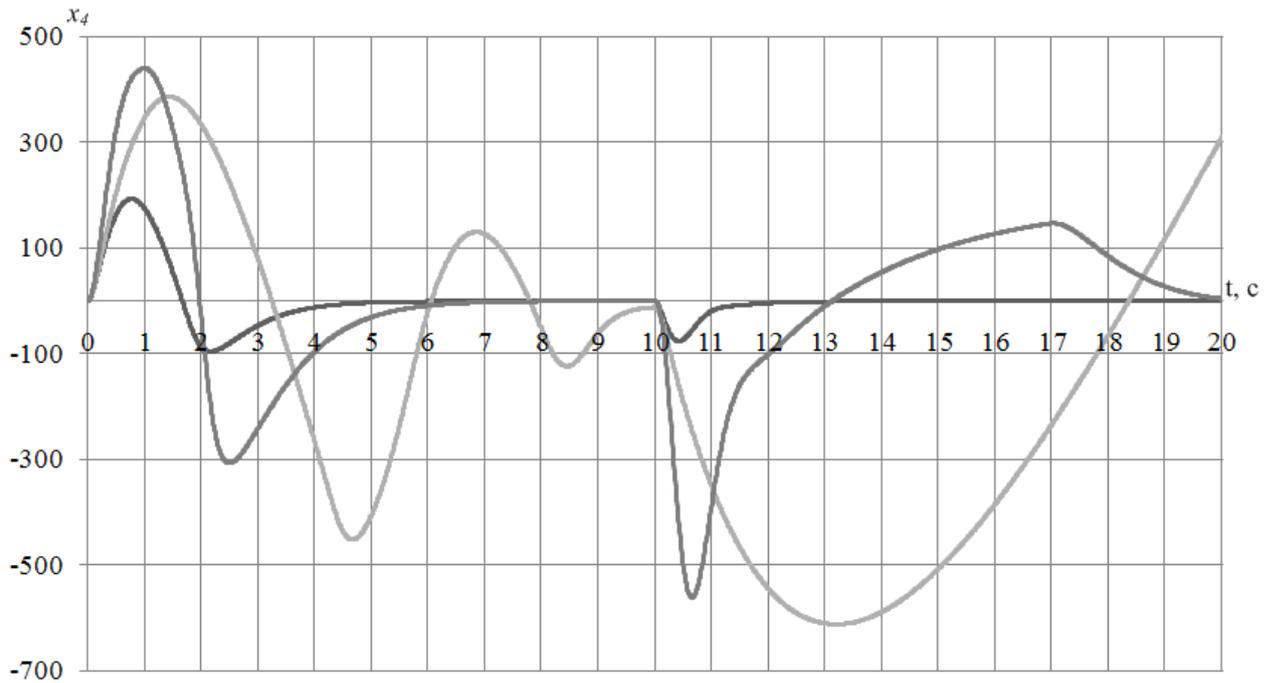


Рисунок 4.6 – График изменения интегратора регулятора свободной турбины

Благодаря использованию сигнальной настройки время переходного процесса существенно сократилось и повысилась устойчивость системы. Покажем улучшение показателей качества в течение переходных процессов (таблицы 4.1, 4.2).

Таблица 4.1– Показатели качества по $n_{СТ}$ ЭМ СН

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	480	9	2
Адаптивный регулятор	340	4,1	0

Таблица 4.2 – Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ ЭМ СН

Улучшение, %	29,17	54,4	100
Участок переходного процесса, с	0–10	0–10	0–10

4.1.2. Первичная проверка сигнальной настройки с настраиваемой моделью

Рассмотрим процесс сигнальной адаптации с настраиваемой моделью (2.37) без динамической компенсации [67] для нелинейной модели ГТУ 6МВт (1.1,1.4). Изменение нагрузки происходит в соответствии со следующими значениями: 6000 – 3000 – 1000 – 5500 – 500кВт. В начальный момент времени векторы состояния линейной настраиваемой модели и нелинейной модели ГТУ равны. Переходный процесс в начальный момент времени обусловлен рассогласованием начальных условий совместно изменением мощности нагрузки, что является сложным режимом работы и подобен изменению нагрузки во время переходного процесса. На рисунках 4.7 – 4.10 представлены переходные процессы, черным цветом обозначена НМ, темно-серым цветом обозначена система с сигнальной настройкой, светло-серым цветом обозначена система со штатным регулятором.

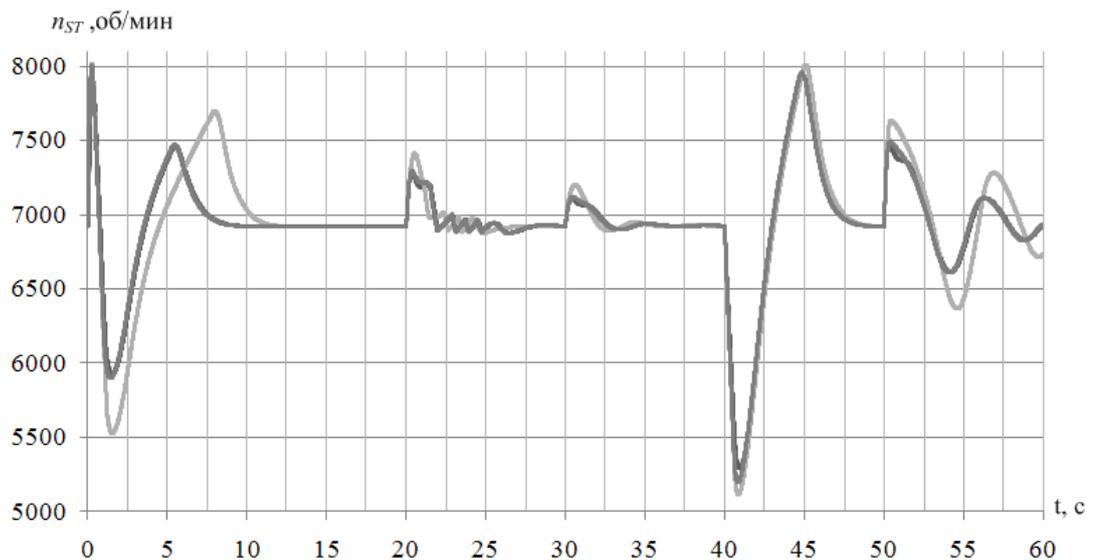


Рисунок 4.7 – График изменения частоты вращения свободной турбины

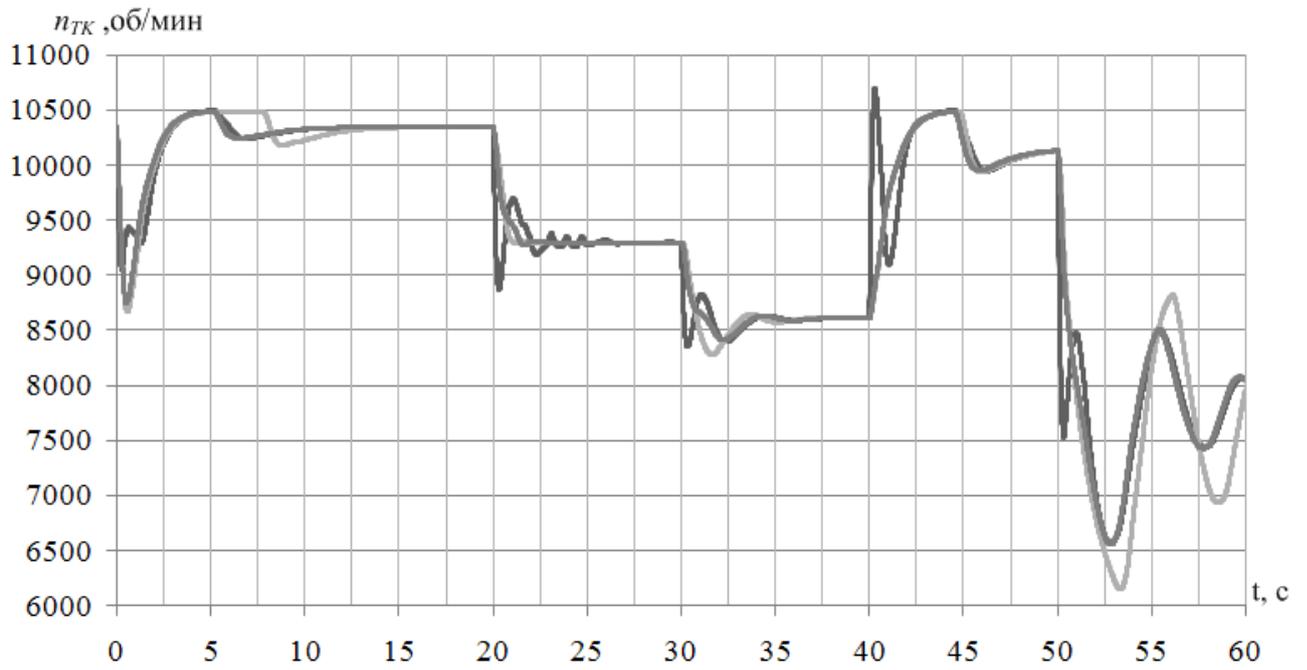


Рисунок 4.8 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

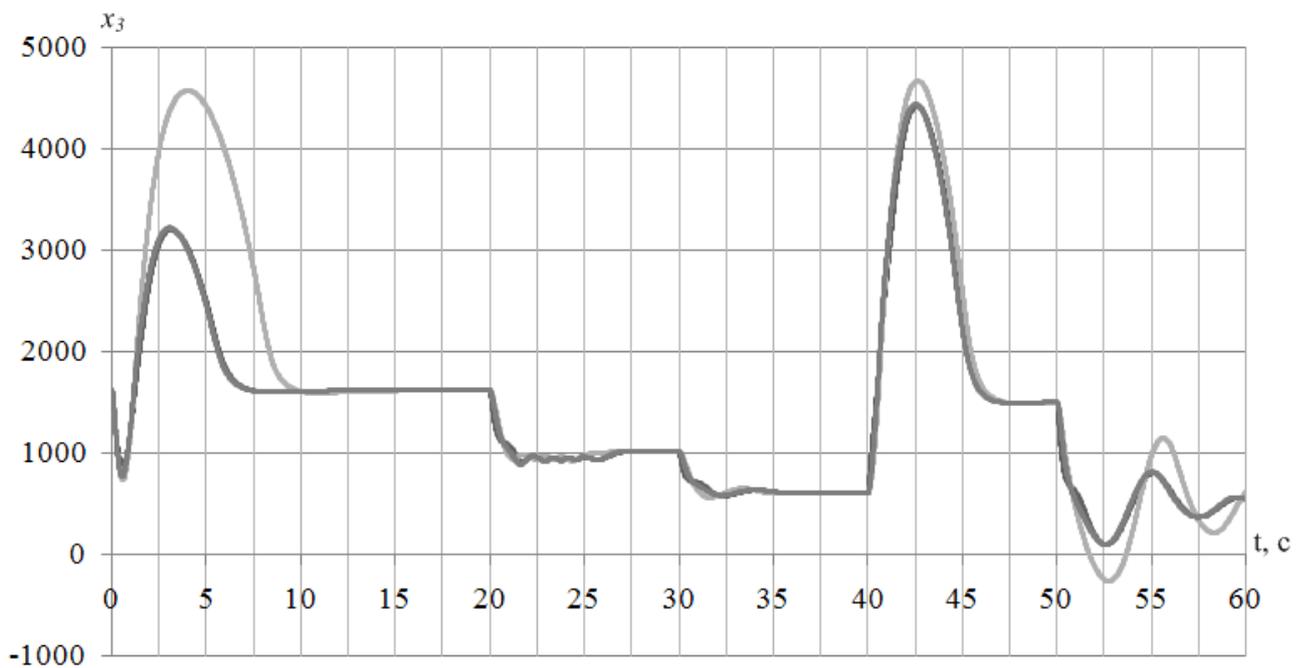


Рисунок 4.9 – График изменения интегратора регулятора дозатора

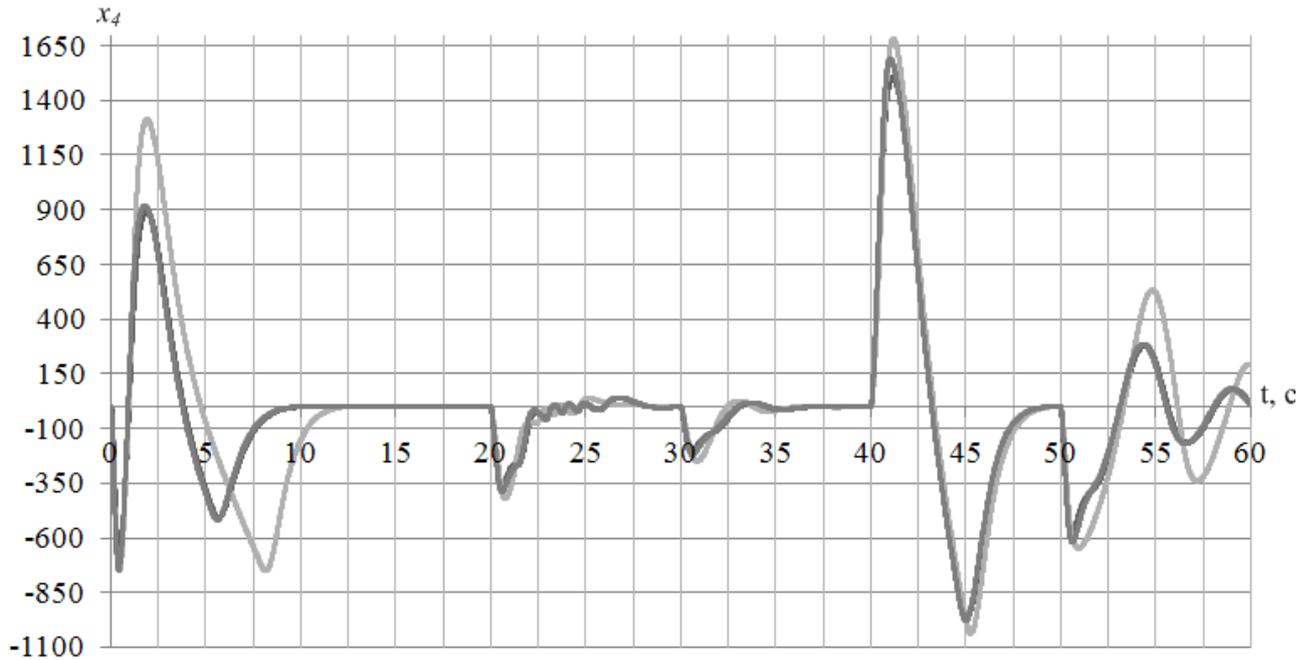


Рисунок 4.10 – График изменения интегратора регулятора свободной турбины

Как следует из графиков приведенных выше, в случае сигнального управления с ЭМ, улучшение показателей качества переходных процессов более значительны. Это связано с тем, что динамическая компенсация не применялась в силу того, что порядок моделей совпадает и НМ демонстрирует показатели качества лучше, чем объект, несмотря на изменение параметров в течение переходного процесса. Рассмотрим максимальное улучшение показателей качества в течение переходных процессов (таблицы 4.3,4.4).

Таблица 4.3 –Показатели качества по $n_{СТ}$ НМ СН

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	1405	10,2	1
Адаптивный регулятор	1050	7,6	1

Таблица 4.4 – Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ НМ СН

Улучшение, %	25,27	25,49	0
Участок переходного процесса, с	0–20	0–20	0–20

4.1.3. Первичная проверка параметрической настройки с настраиваемой моделью

Рассмотрим процесс параметрической адаптации с настраиваемой моделью [86] для нелинейной модели ГТУ 6МВт (2.37,1.1,1.4). Изменение нагрузки происходит в соответствии со следующими значениями: 6000 – 3000 – 1000 – 5500 – 500кВт. На рисунках 4.11 – 4.14 представлены результаты моделирования, черным цветом обозначена НМ, темно-серым цветом обозначена система с ПН, светло-серым цветом обозначена система со штатным регулятором.

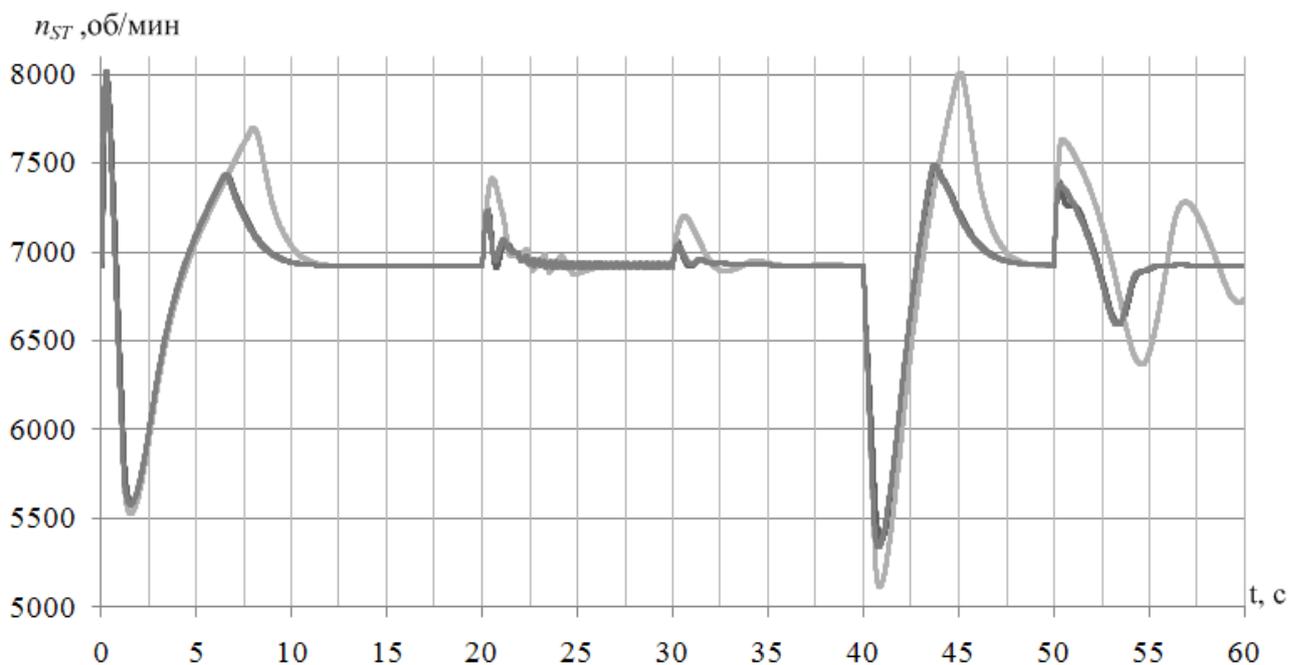


Рисунок 4.11 – График изменения частоты вращения свободной турбины

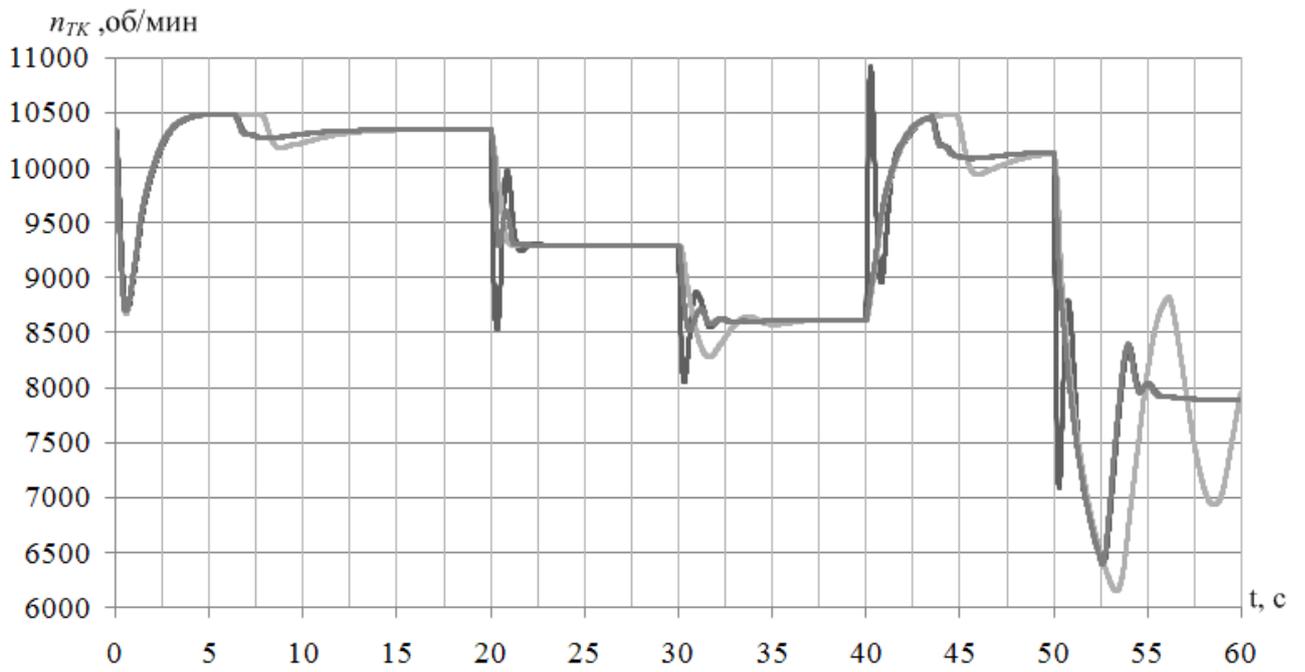


Рисунок 4.12 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

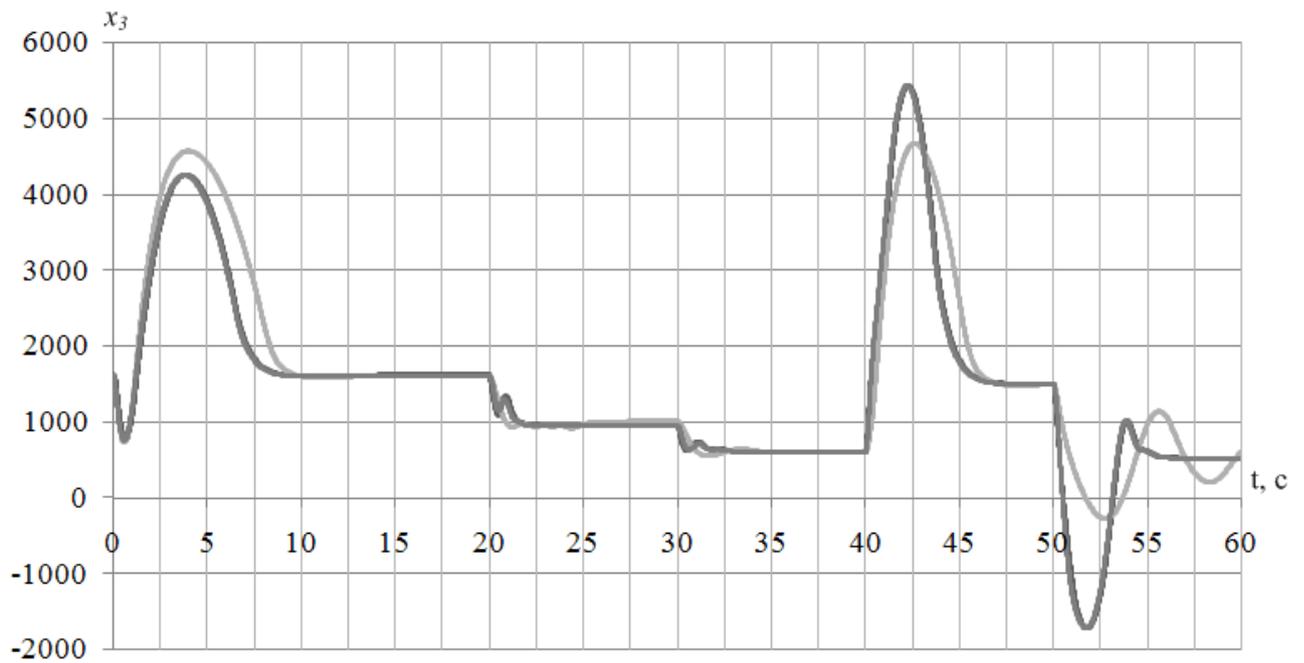


Рисунок 4.13 – График изменения интегратора регулятора дозатора

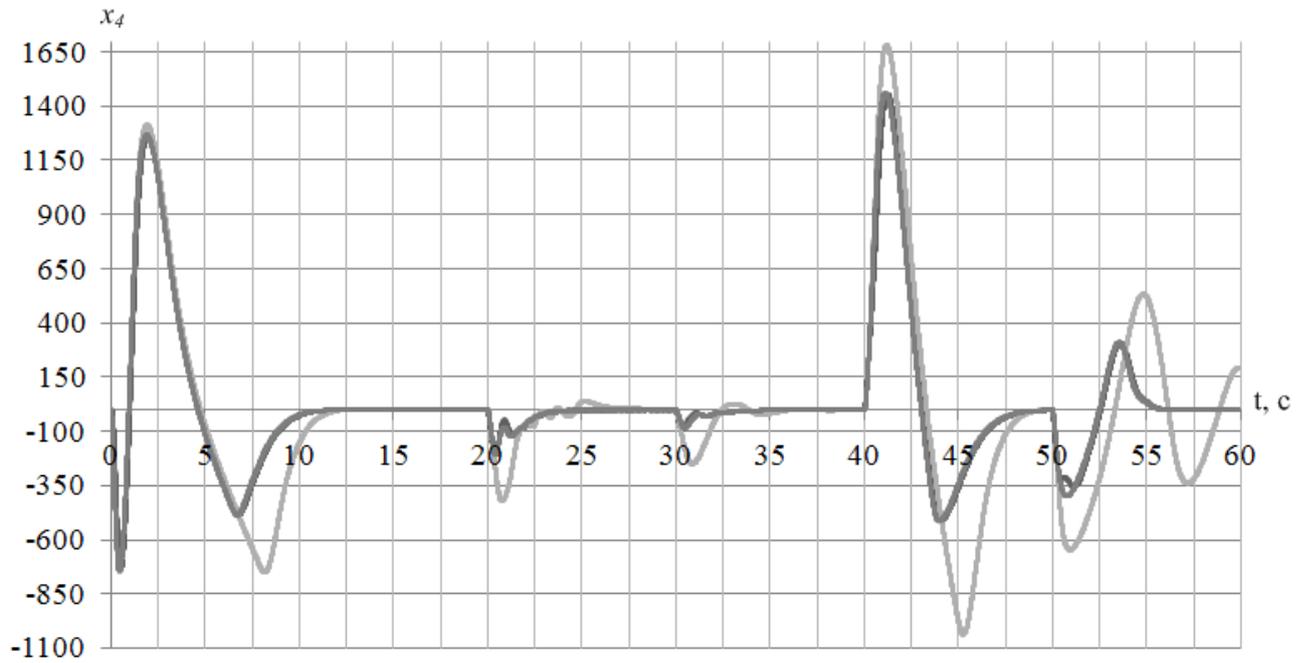


Рисунок 4.14 – График изменения интегратора регулятора свободной турбины

На рисунках 4.15 – 4.17 приведено изменение значений коэффициентов регулятора частоты свободной турбины.

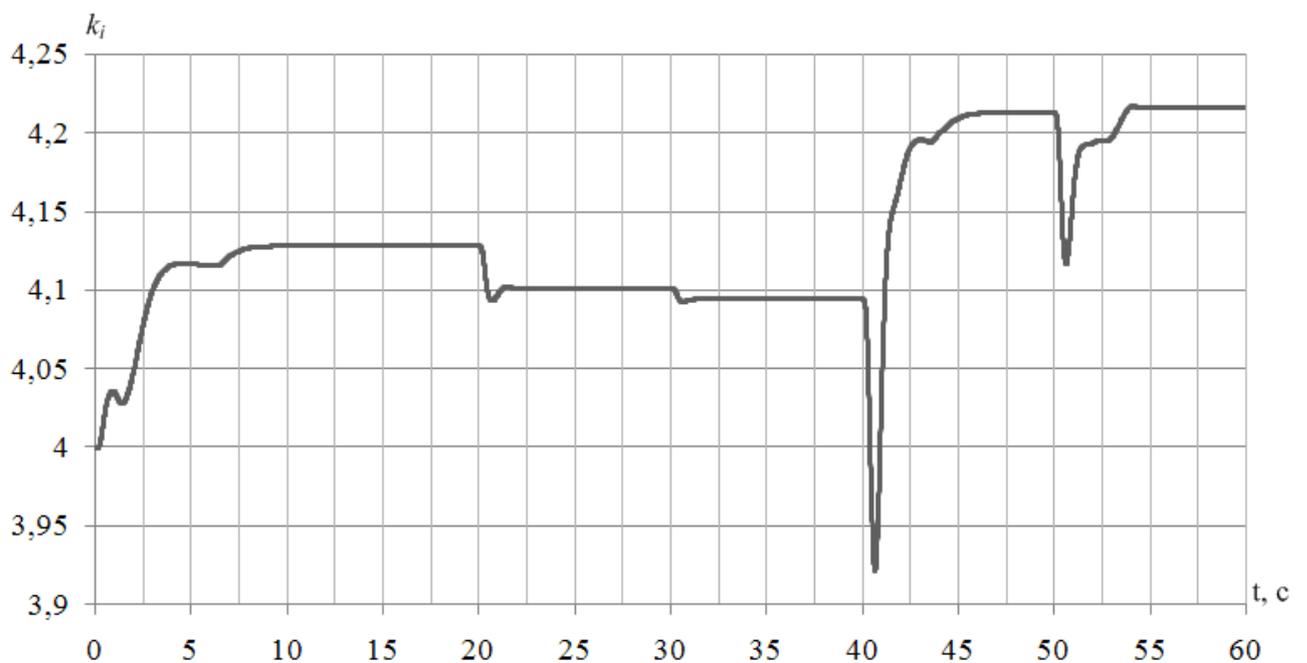


Рисунок 4.15 – График изменения интегрального коэффициента

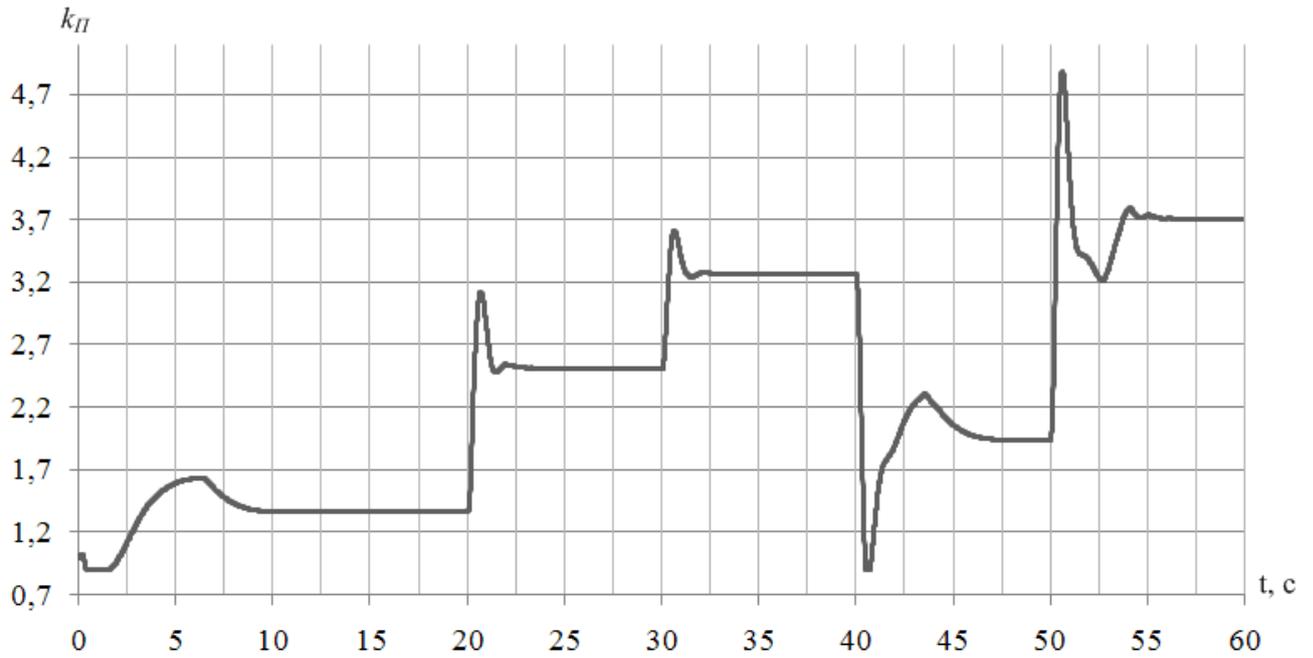


Рисунок 4.16 – График изменения пропорционального коэффициента

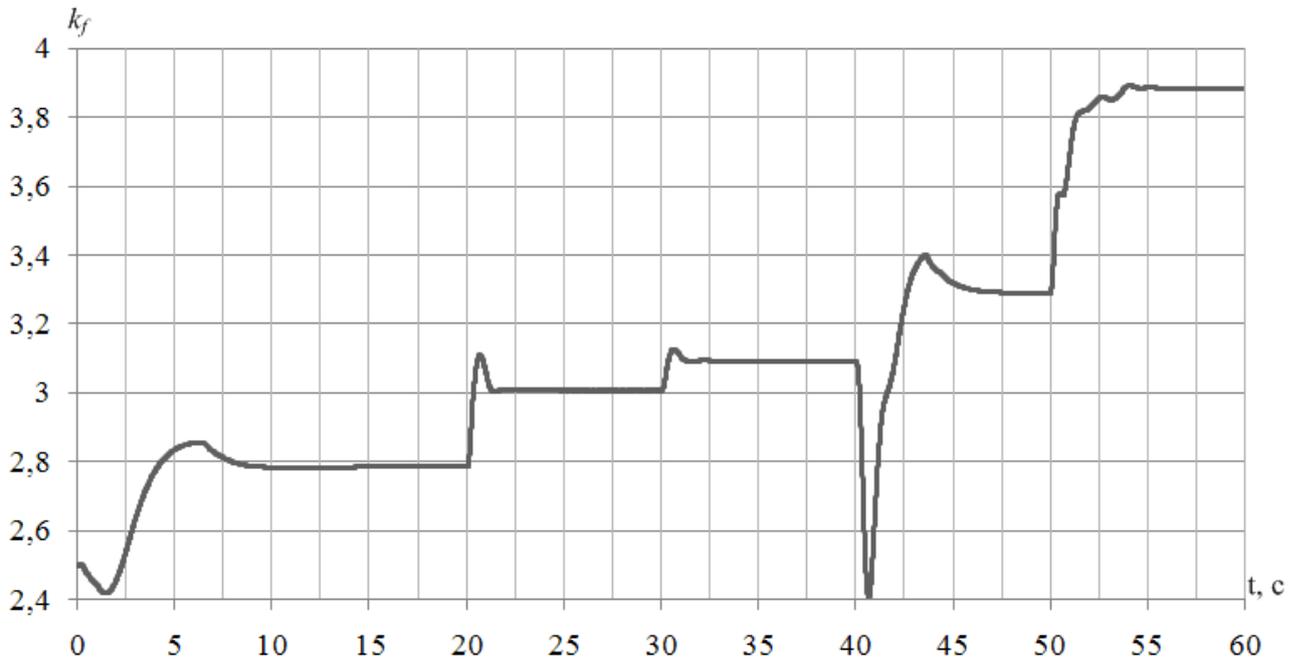


Рисунок 4.17 – График изменения форсирующего коэффициента

Благодаря параметрической настройке достигается улучшение таких показателей качества, как максимальное отклонение. Рассмотрим максимальное улучшение показателей качества в течение переходных процессов (таблицы 4.5,4.6).

Таблица 4.5–Показатели качества по $n_{СТ}$ НМ ПН

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	2090	10,2	2
Адаптивный регулятор	1575	4,6	1

Таблица 4.6–Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ НМ ПН

Улучшение, %	24,64	58,82	50
Участок переходного процесса, с	40–50	50–60	50–60

4.2 Вторичная проверка

Следующей ступенью является исследование адаптивных регуляторов на сложных поэлементных моделях ГТУ номиналом 6 и 12 МВт. В данных испытаниях электрическая часть системы задает мощность нагрузки для модели ГТУ. Реализовать такую проверку возможно на ПМК «КМЭС», куда уже встроены поэлементная модель ГТУ и штатная САУ ГТУ и на полунатурных испытательных стендах АО «ОДК-Авиадвигатель».

4.2.1. Вторичная проверка сигнальной настройки с эталонной моделью

Рассмотрим работу адаптивного регулятора с сигнальной ветвью (2.22) и эталонной моделью [64] (3.1,3.2). Проверка проводится в полном штатном регуляторе ГТУ, включающем в себя различные контуры ограничения и управления. Контур стабилизации частоты вращения свободной турбины является адаптивным [67].

График изменения нагрузки в процессе проведения эксперимента представлен на рисунке 4.18. На первом этапе нагрузка задавалась мгновенным изменением активной мощности СГ, дальнейшие проверки производились для разнообразных режимных ситуаций из перечня, представленного в главе 1, которые воспроизводятся ПМК «КМЭС». Подобные же переходные процессы могут быть реализованы на полунатурных стендах.

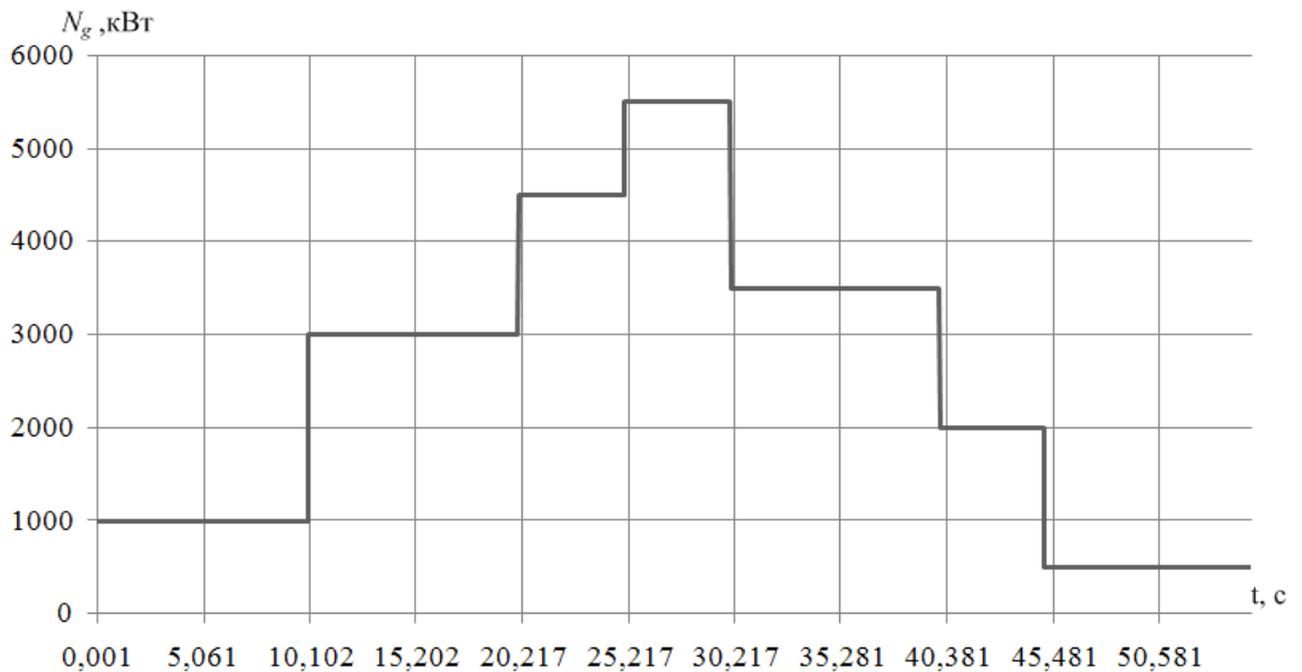


Рисунок 4.18– График изменения нагрузки кВт

Сравнение штатного регулятора и штатного регулятора с сигнальной настройкой приведено на рисунках 4.19 – 4.21, черным цветом обозначен штатный регулятор с сигнальной настройкой, светло-серым цветом обозначен штатный регулятор.

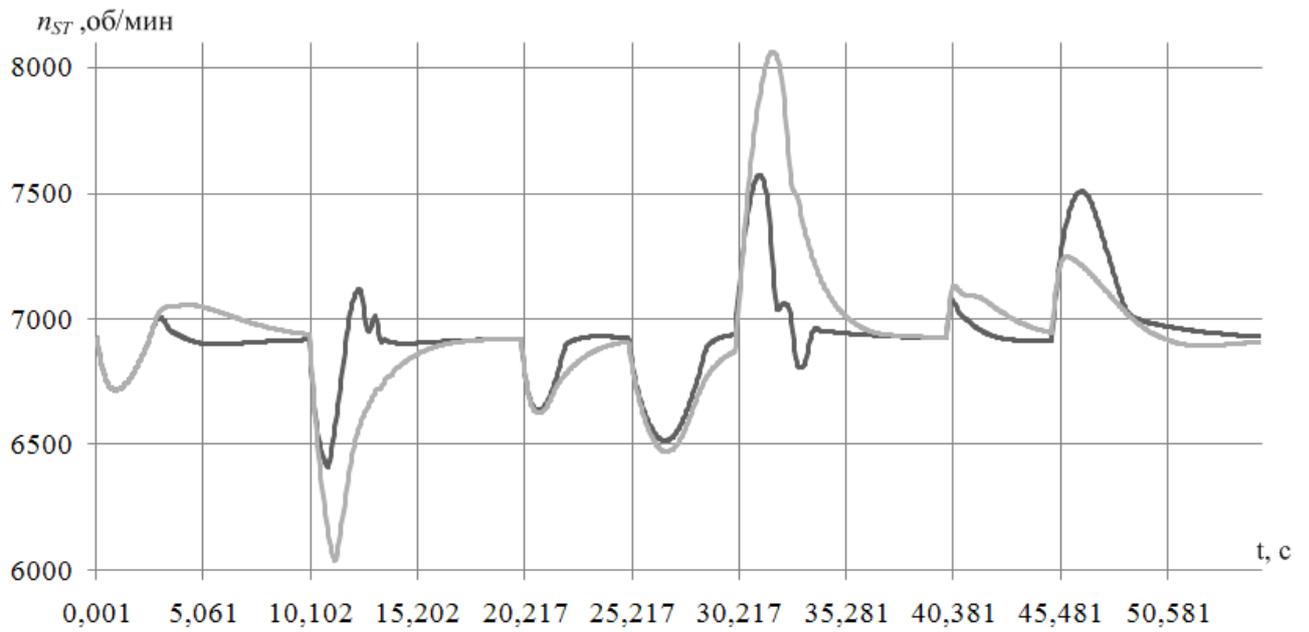


Рисунок 4.19 – График изменения частоты вращения свободной турбины

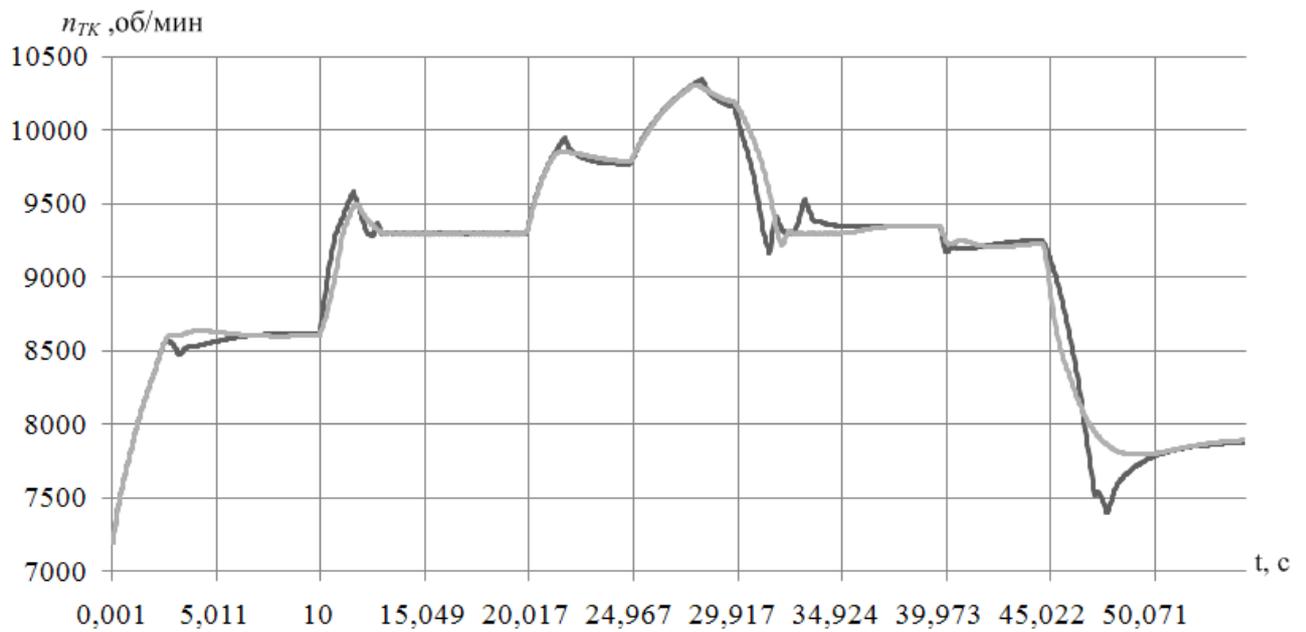


Рисунок 4.20 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

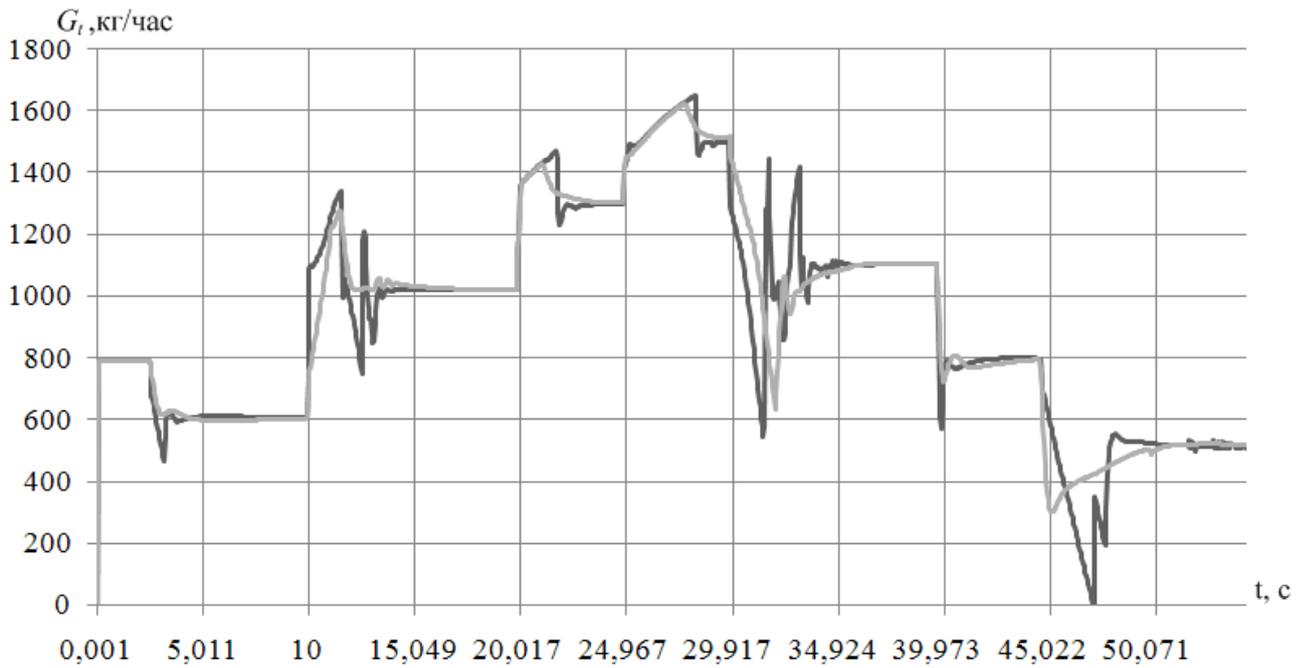


Рисунок 4.21 – График изменения расхода топлива

Из выше приведенных рисунков следует, что режим работы ГТУ и величина изменения нагрузки влияют на улучшение показателей качества переходных процессов частоты вращения свободной турбины, что связано с настройкой ЭМ. С 45-й секунды реакция ЭМ намеренно идеализирована, в следствие чего рассогласование параметров с поэлементной моделью ГТУ становится слишком большим. В результате расход топлива формируемый адаптивным контуром становится недопустимым поэтому, приоритет управления переходит к другому контуру управления. Из этого следует, что адаптивная САУ не несет опасности, благодаря схеме селектирования. В таблицах 4.7,4.8 приведено улучшение показателей качества.

Таблица 4.7 – Показатели качества по $n_{СТ}$ ЭМ СН, полный регулятор

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	1115	5	0
Адаптивный регулятор	630	3,6	1

Таблица 4.8– Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ ЭМ СН, полный регулятор

Улучшение, %	43,5	28	-
Участок переходного процесса, с	30–40	30–40	10–20

4.2.2. Вторичная проверка сигнальной настройки с настраиваемой моделью

Рассмотрим процесс сигнальной адаптации с настраиваемой моделью [64] (2.37) для поэлементной динамической модели ГТУ 12МВт. Изменение нагрузки происходит в соответствии со следующими значениями: 12000 – 10000 – 7000 – 12000кВт. В начальный момент времени НМ соответствует номинальному режиму работы (12МВт), так как поэлементная модель существенно сложнее НМ, в процессе идентификации возникают большие параметрические возмущения, поэтому применяется динамическая компенсация НМ. На рисунках 4.22–4.25 представлены переходные процессы: черным цветом обозначена система со штатным регулятором, светло-серым цветом обозначена система с сигнальной настройкой.

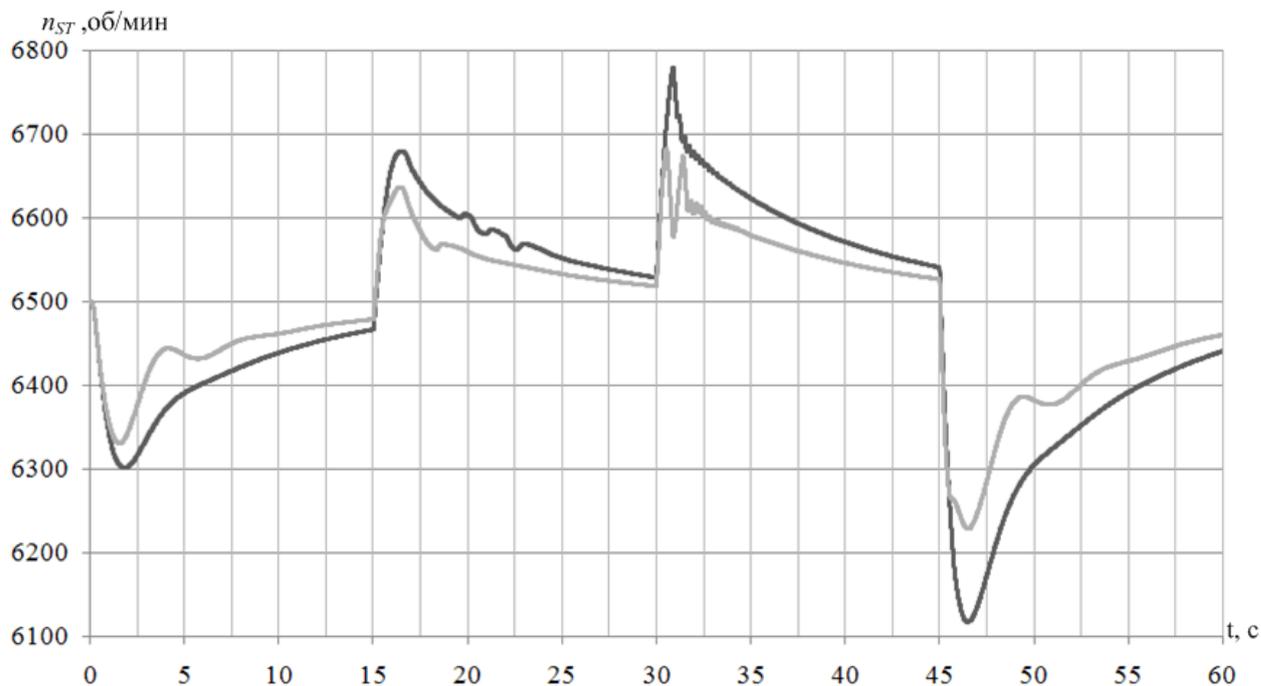


Рисунок 4.22 – График изменения частоты вращения свободной турбины

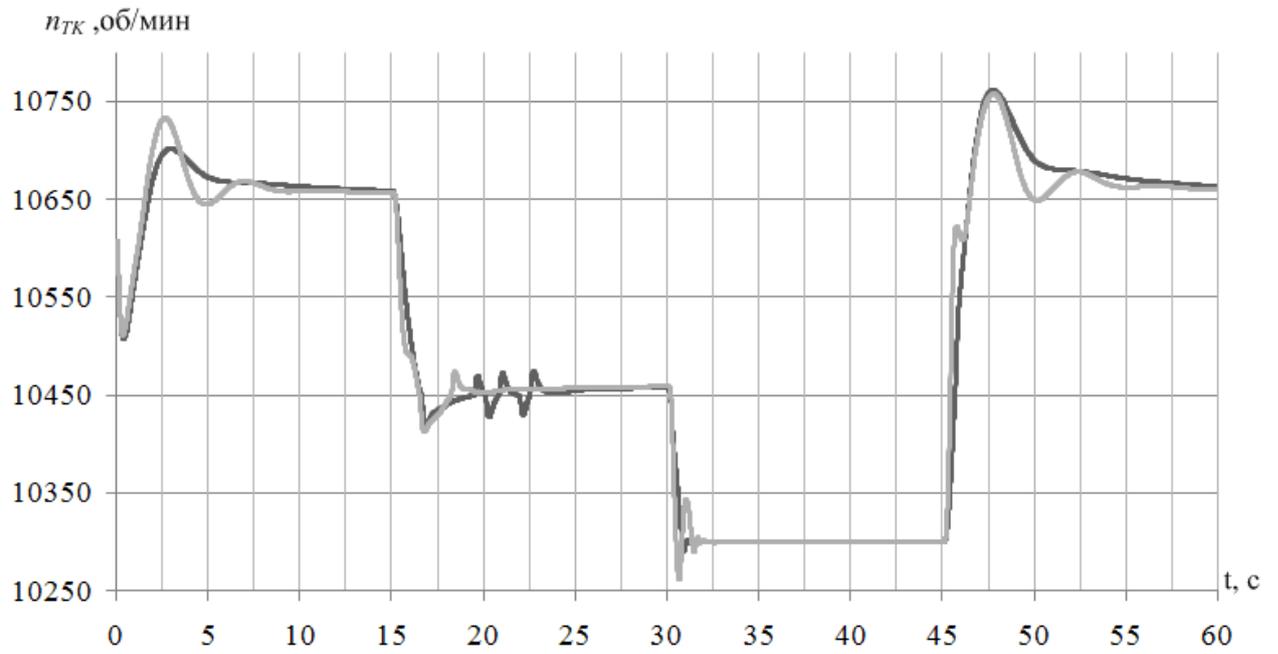


Рисунок 4.23 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

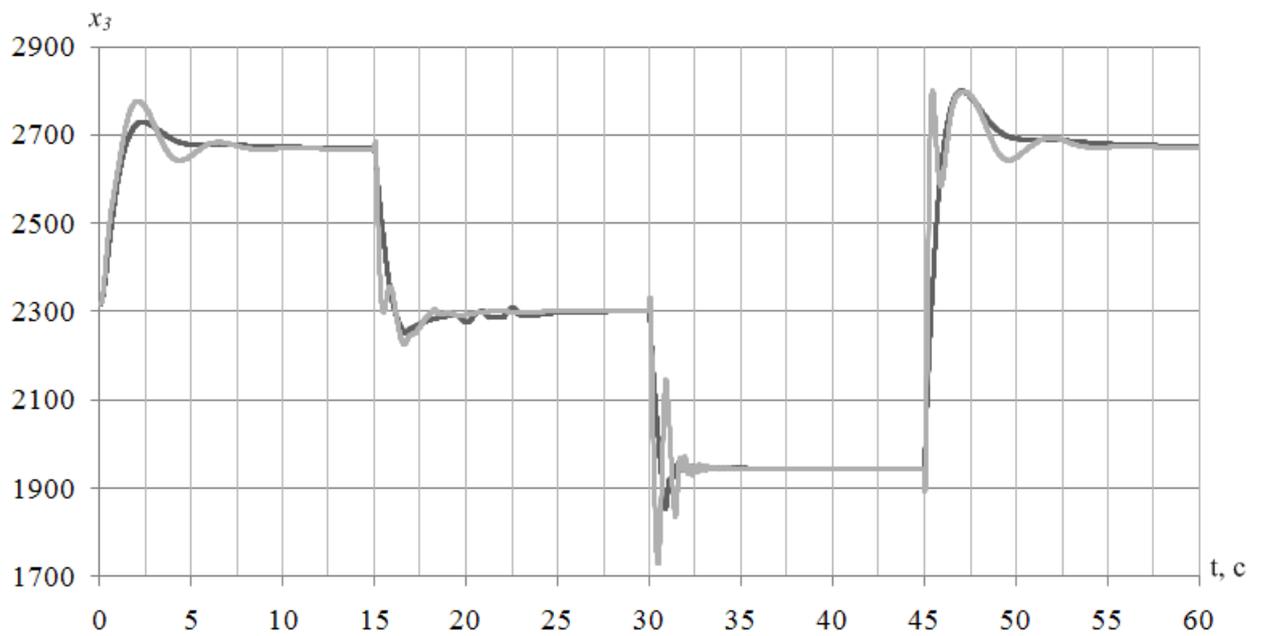


Рисунок 4.24 – График изменения интегратора регулятора дозатора

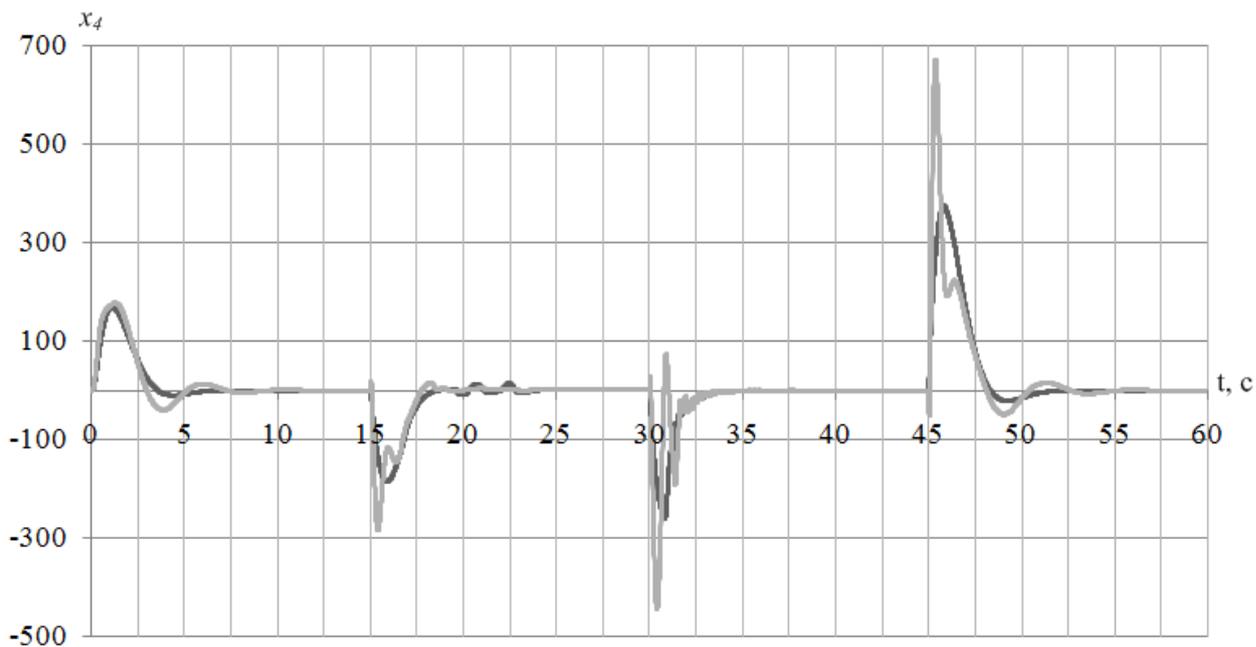


Рисунок 4.25 – График изменения интегратора регулятора свободной турбины

Рассмотрим максимальное улучшение показателей качества в течение переходных процессов (таблицы 4.9,4.10).

Таблица 4.9– Показатели качества по $n_{СТ}$ НМ СН поэлементная модель

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	380	11,5	0
Адаптивный регулятор	270	7,4	1

Таблица 4.10 – Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ НМ СН поэлементная модель

Улучшение, %	28,95	35,65	-
Участок переходного процесса, с	30–45	30–45	10–20

4.2.3. Вторичная проверка параметрической настройки с настраиваемой моделью

Рассмотрим процесс сигнальной адаптации с настраиваемой моделью[67] (2.36,2.37) для нелинейной модели ГТУ 12МВт.

На первом этапе проводится сравнение НМ[73,91] и поэлементной модели. Настройка коэффициентов регулятора поэлементной модели не производится. Изменение нагрузки происходит в соответствии со следующими значениями: 12000 – 10000 – 7000 – 12000кВт. Рассогласование начальных условий вызывает переходный процесс до 15-й секунды. На рисунках 4.26 – 4.29 представлены результаты эксперимента, черным цветом обозначена поэлементная модель, светло-серым цветом обозначена НМ.

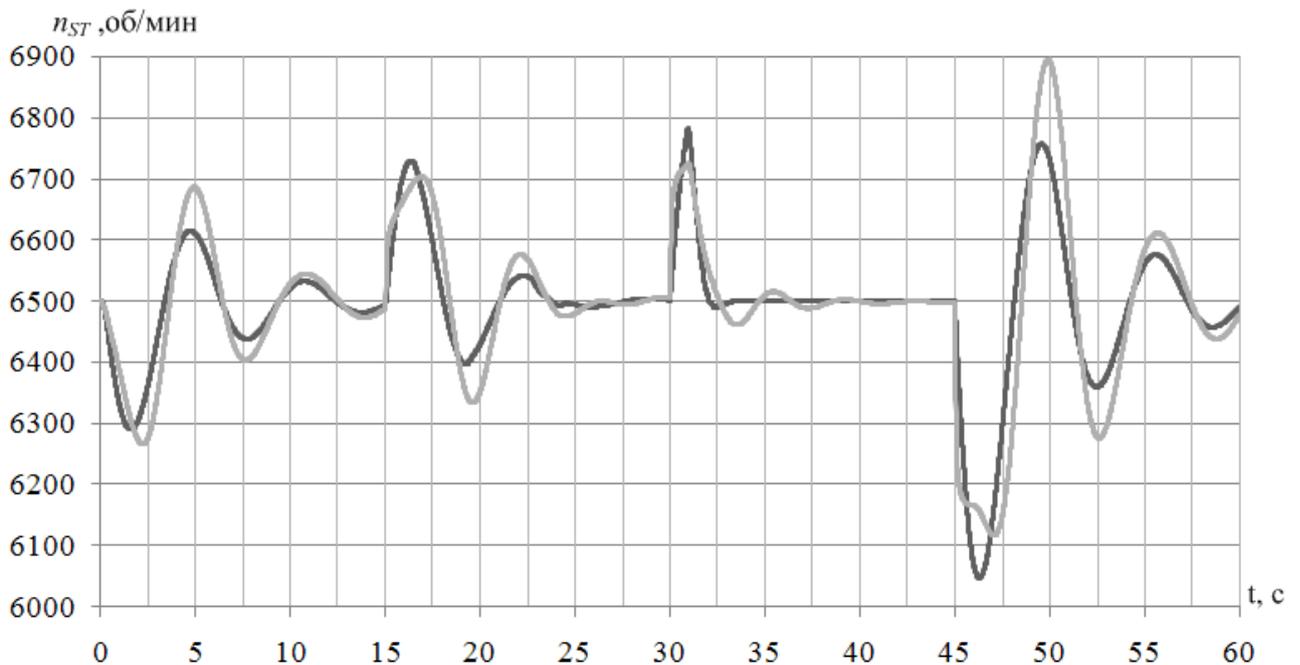


Рисунок 4.26 – График изменения частоты вращения свободной турбины

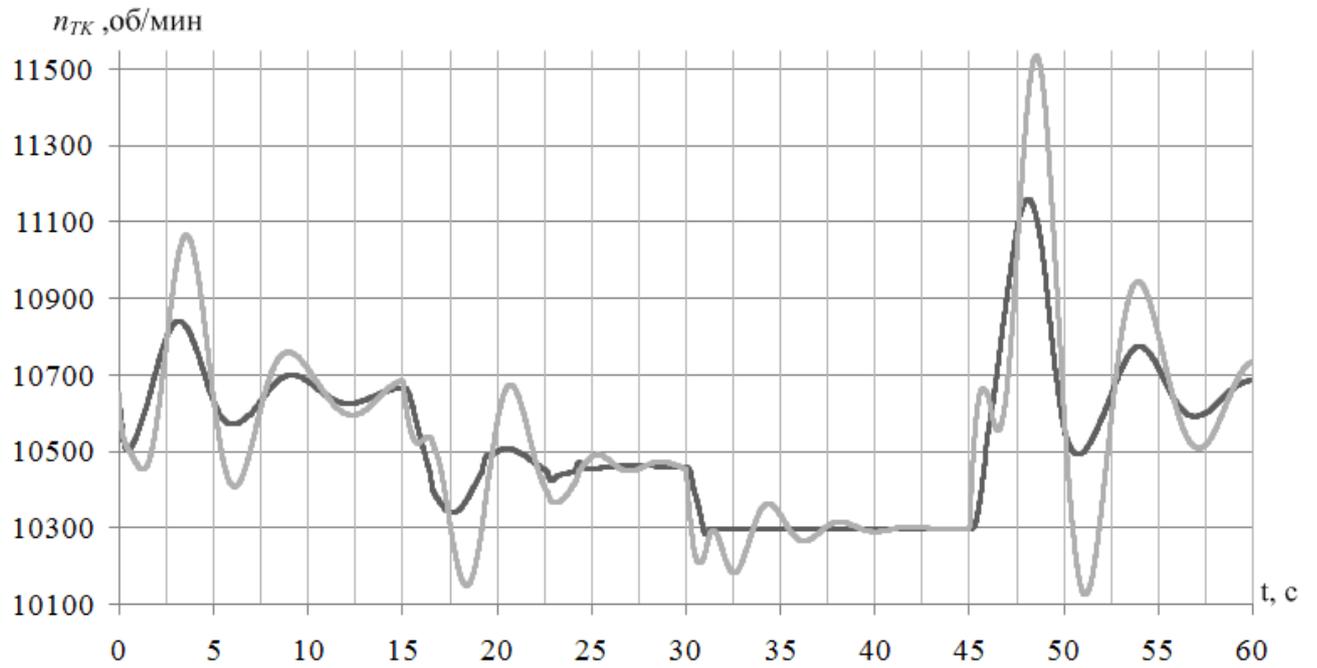


Рисунок 4.27 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

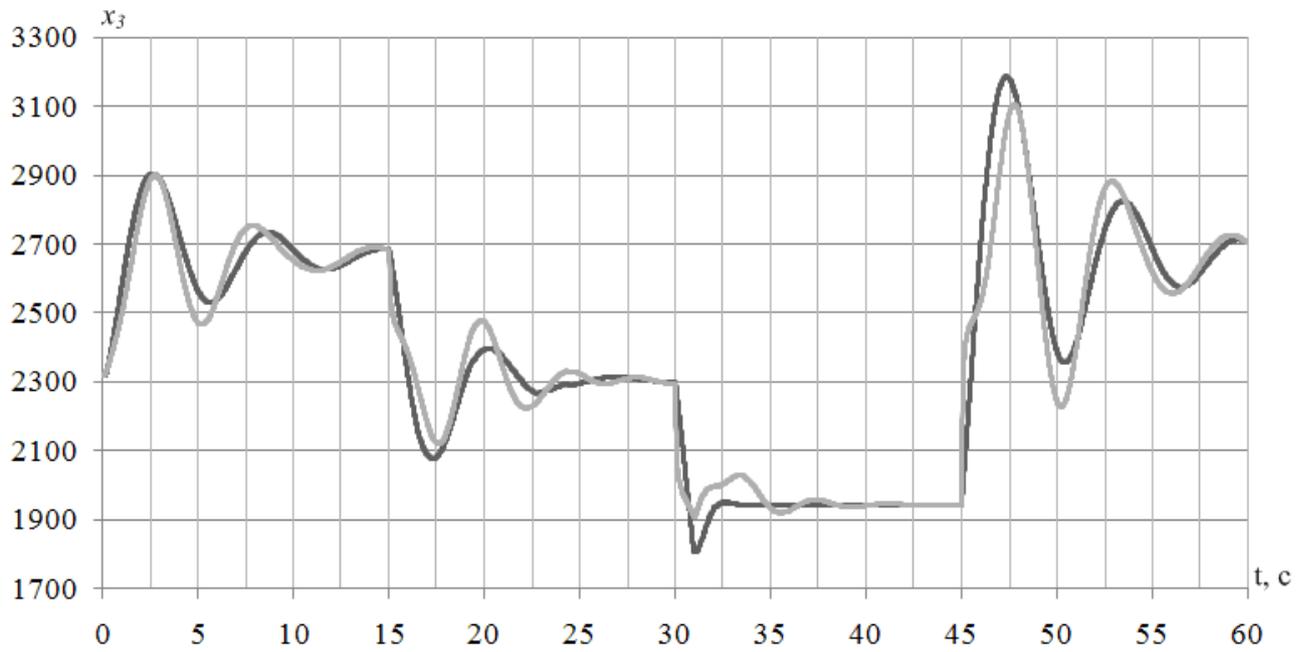


Рисунок 4.28 – График изменения интегратора регулятора дозатора

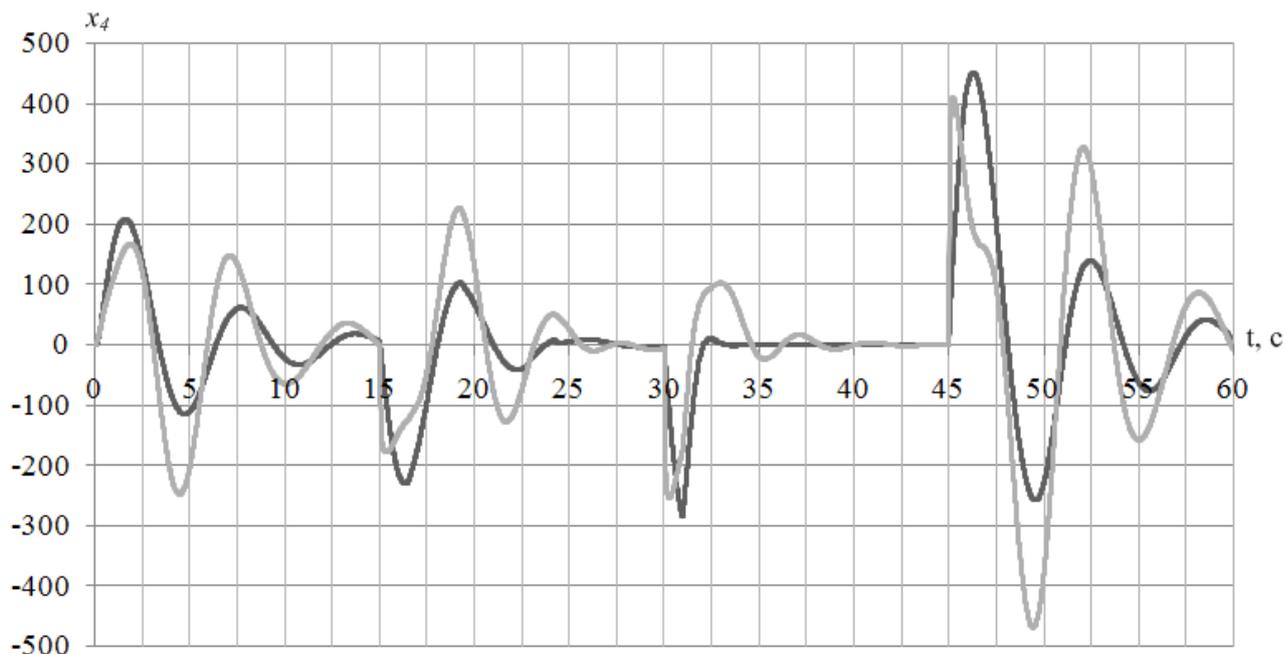


Рисунок 4.29 – График изменения интегратора регулятора свободной турбины

Поэлементная модель ГТУ значительно сложнее, чем предыдущий объект идентификации, поэтому точность при идентификации НМ хуже, чем в ранее приведенных случаях. Так же, это может быть связано с тем, что вычисленное значение момента инерции свободной турбины и эквивалентная постоянная времени турбокомпрессора линеаризованной модели были получены на недостаточном количестве экспериментов, и, в силу этого, недостаточно точны.

На втором этапе проводится настройка коэффициентов регулятора по текущей НМ[91,92]. Изменение коэффициентов будем производить также, как и в подразделе 4.1.3. Нагрузка изменяется аналогично первому этапу: 12000 – 10000 – 7000 – 12000кВт. На рисунках 4.30 – 4.33 приведены графики переходных процессов, черным цветом обозначена поэлементная модель, светло-серым цветом обозначена НМ; на рисунках 4.34 – 4.36 приведены графики изменения коэффициентов.

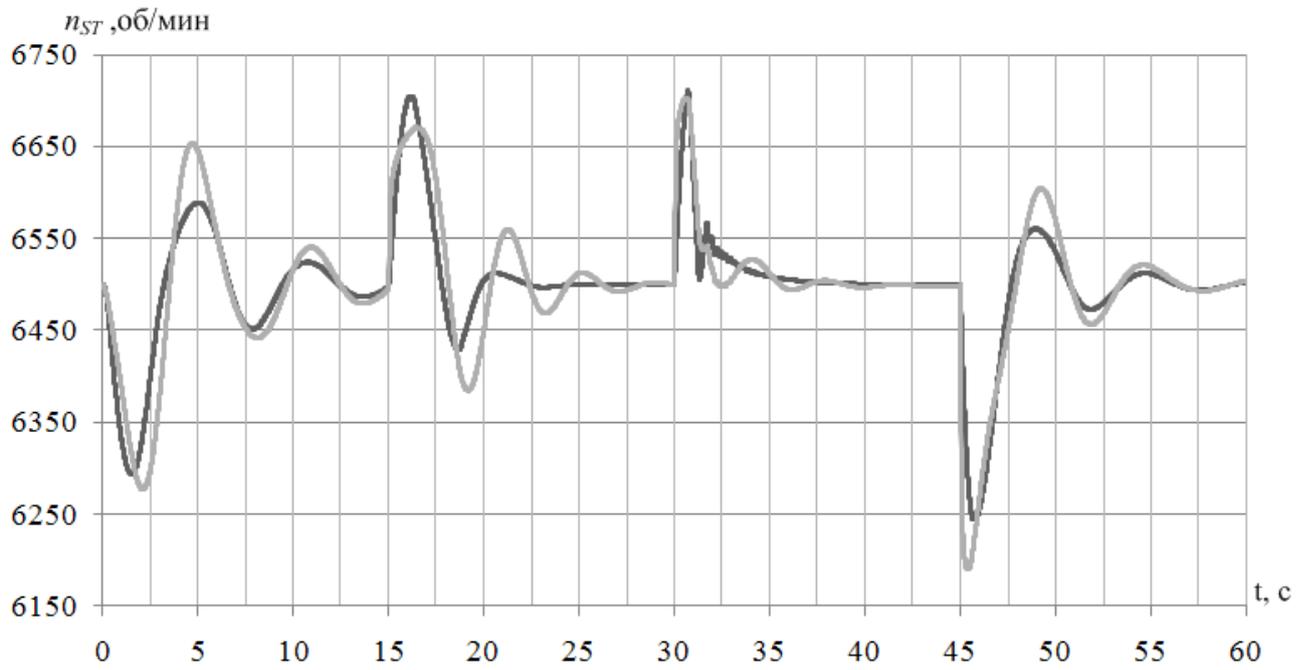


Рисунок 4.30 – График изменения частоты вращения свободной турбины

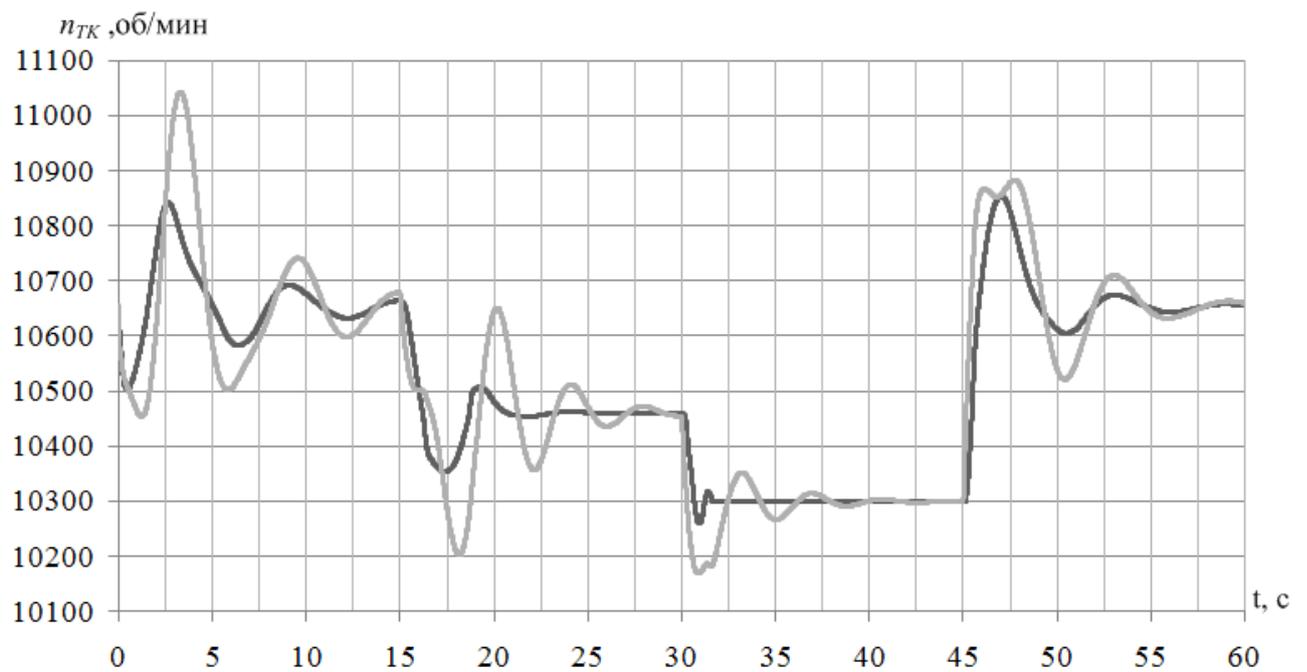


Рисунок 4.31 – График изменения частоты вращения турбокомпрессора

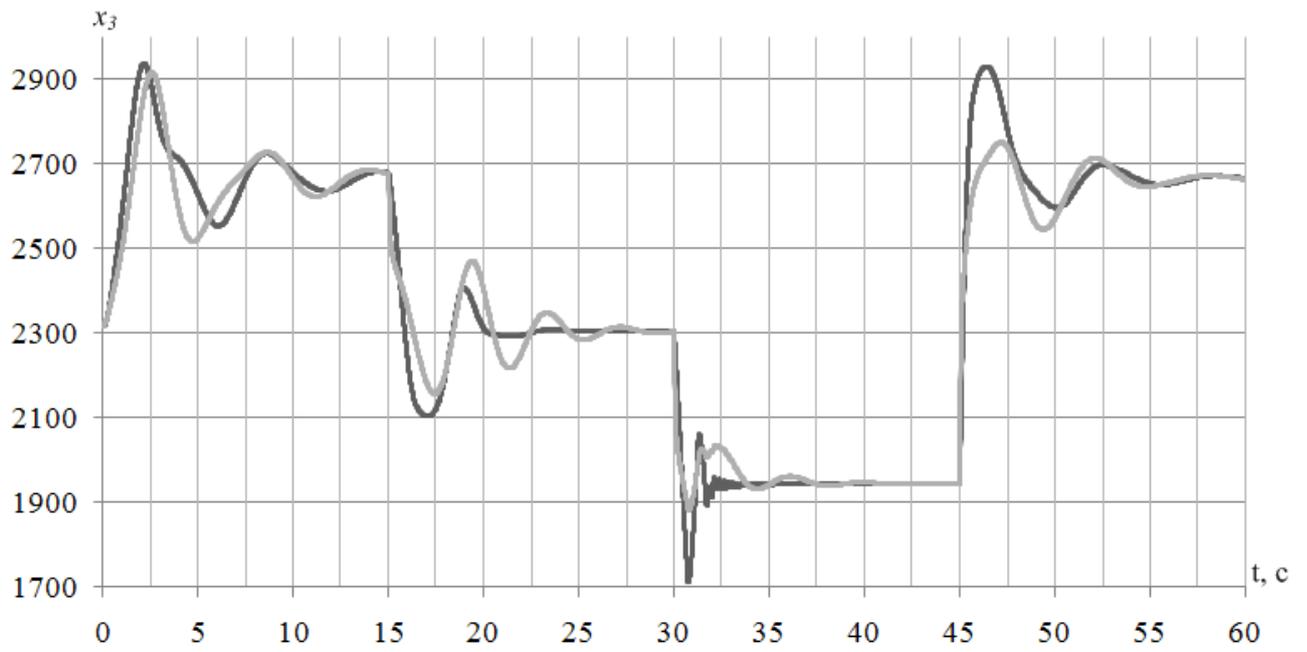


Рисунок 4.32 – График изменения интегратора регулятора дозатора

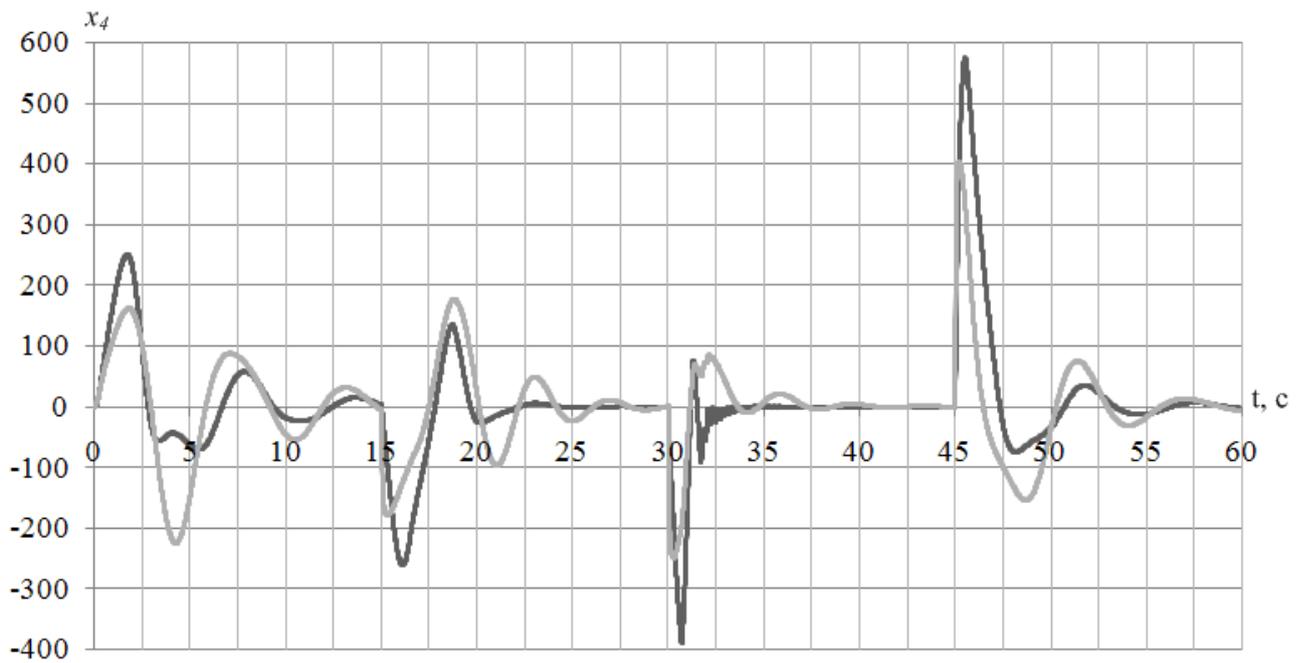


Рисунок 4.33– График изменения интегратора регулятора свободной турбины



Рисунок 4.34 – График изменения интегрального коэффициента регулятора свободной турбины

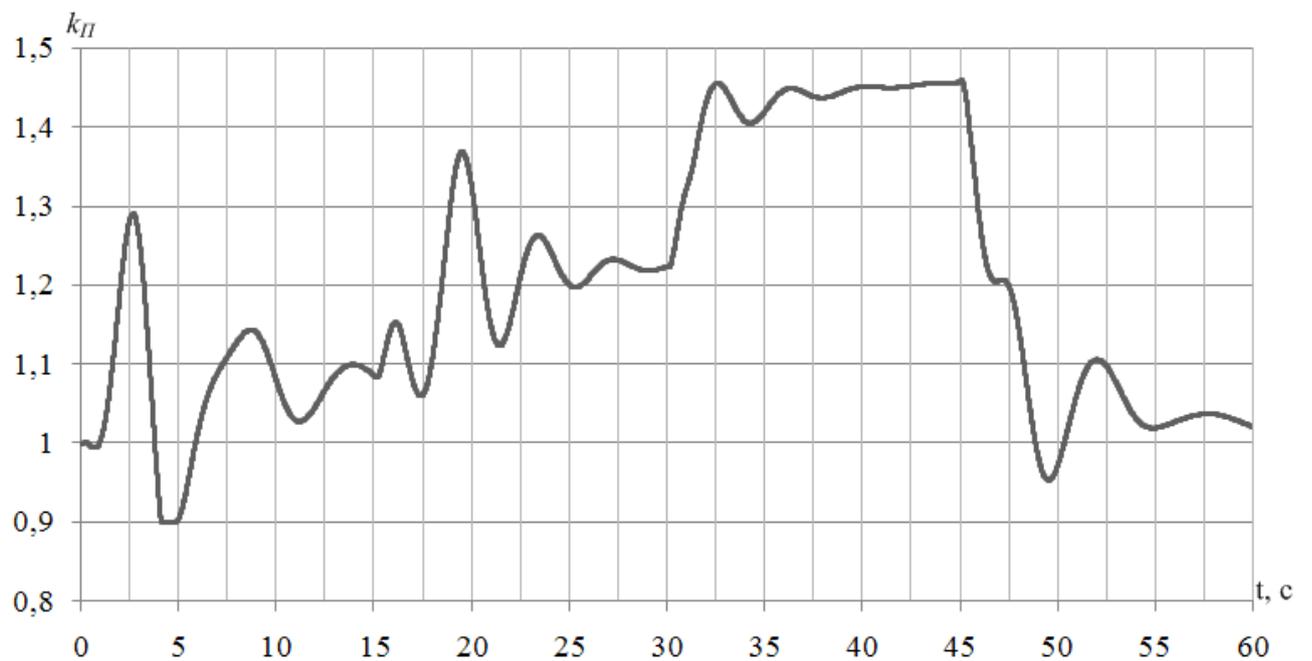


Рисунок 4.35 – График изменения пропорционального коэффициента регулятора свободной турбины

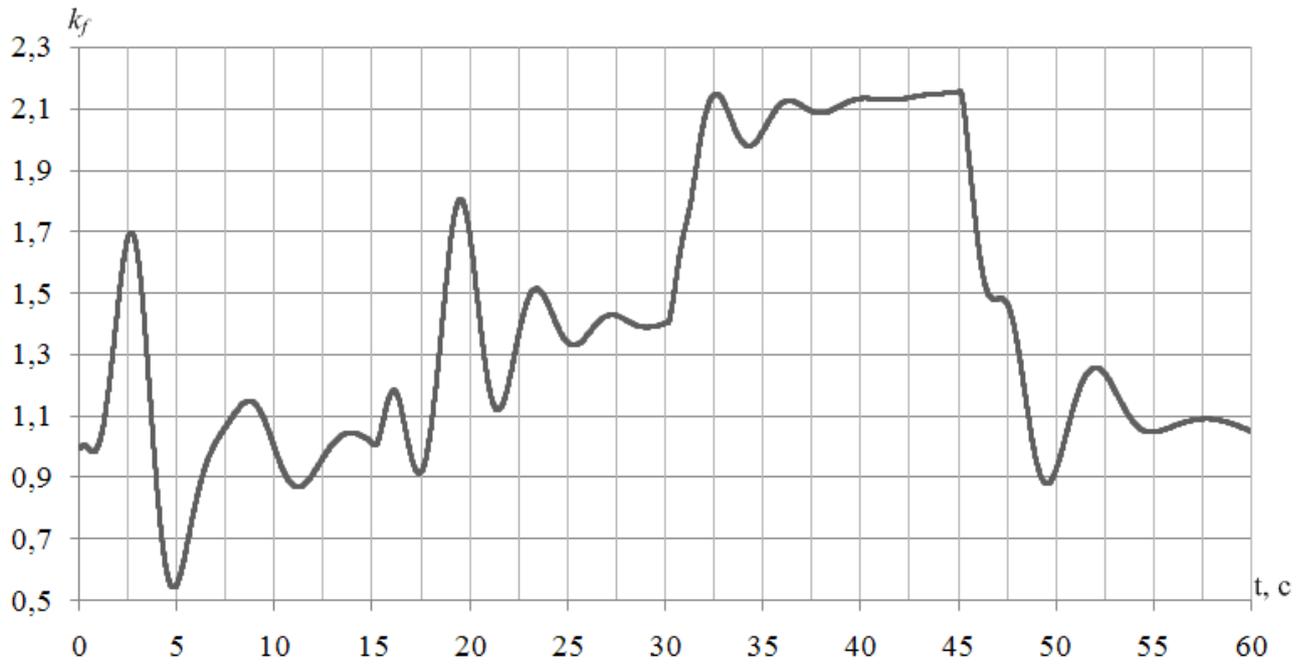


Рисунок 4.36 – График изменения форсирующего коэффициента регулятора свободной турбины

Улучшение показателей качества переходных процессов происходит несмотря на то, что соответствие НМ и объекта не так высоко, как в предыдущих случаях. Рассмотрим максимальное улучшение показателей качества в течение переходных процессов (таблицы 4.11,4.12).

Таблица 4.11– Показатели качества по $n_{СТ}$ НМ ПН поэлементная модель

Тип регулятора	Максимальное отклонение, об/мин	Время переходного процесса, с	Число колебаний
Штатный регулятор	450	12	2
Адаптивный регулятор	252	4,5	2

Таблица 4.12– Улучшение показателей качества по $n_{СТ}$ НМ ПН поэлементная модель

Улучшение, %	44	62,5	0
Участок переходного процесса, с	45–60	45–60	45–60

Рассмотрим сравнение сигнальной адаптации в полном штатном регуляторе ГТУ на модели ГТУ-6П(Д30ЭУ-6) с моделью синхронного генератора ГТГ-6, изменение потребляемой активной мощности 1000 – 4000– 1000 кВт при $\cos\varphi=0,9$, характер нагрузки активно-индуктивный (рисунки 4.37 – 4.39).

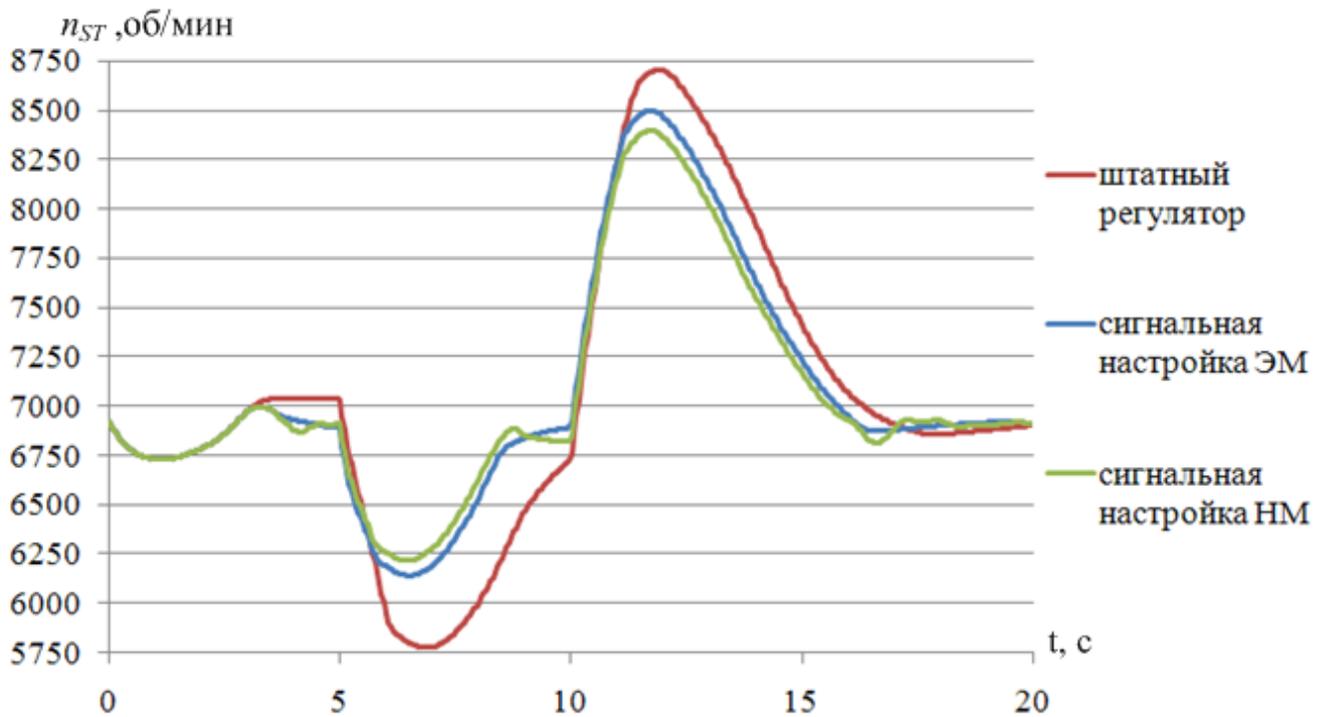


Рисунок 4.37 – Частота вращения свободной турбины

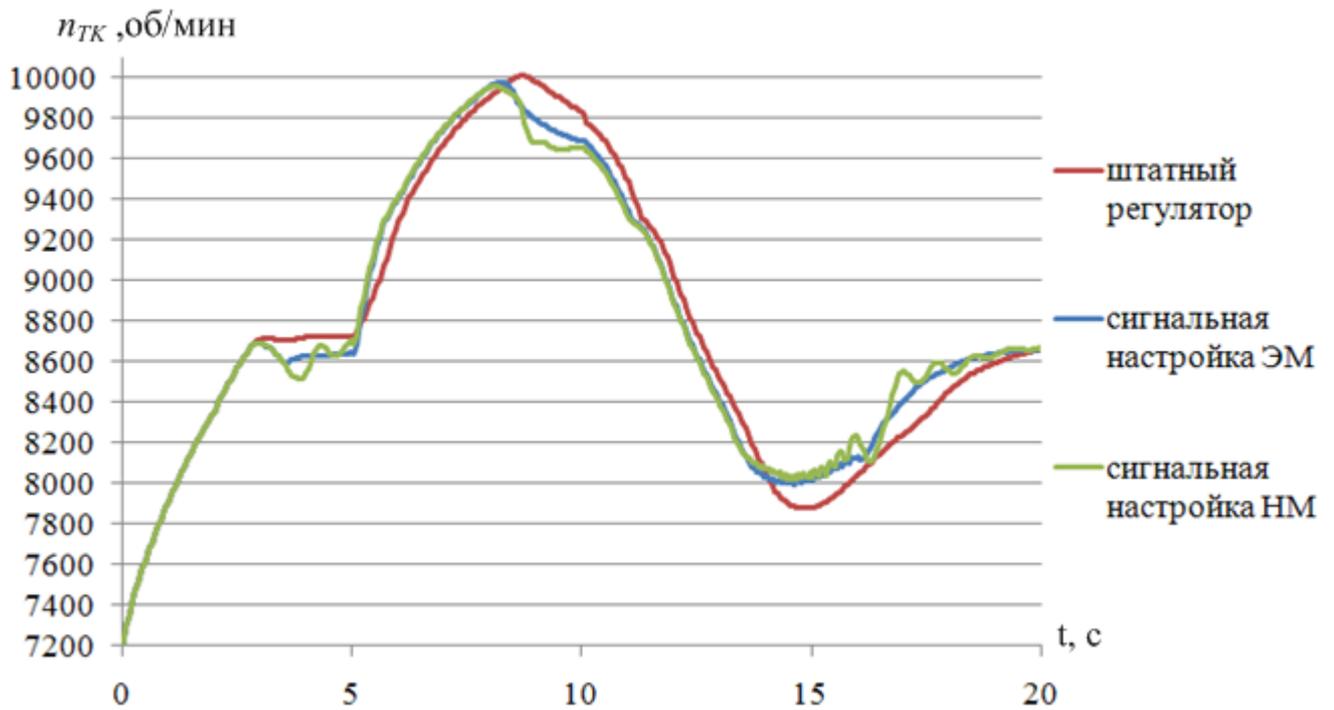


Рисунок 4.38 – Частота вращения турбокомпрессора

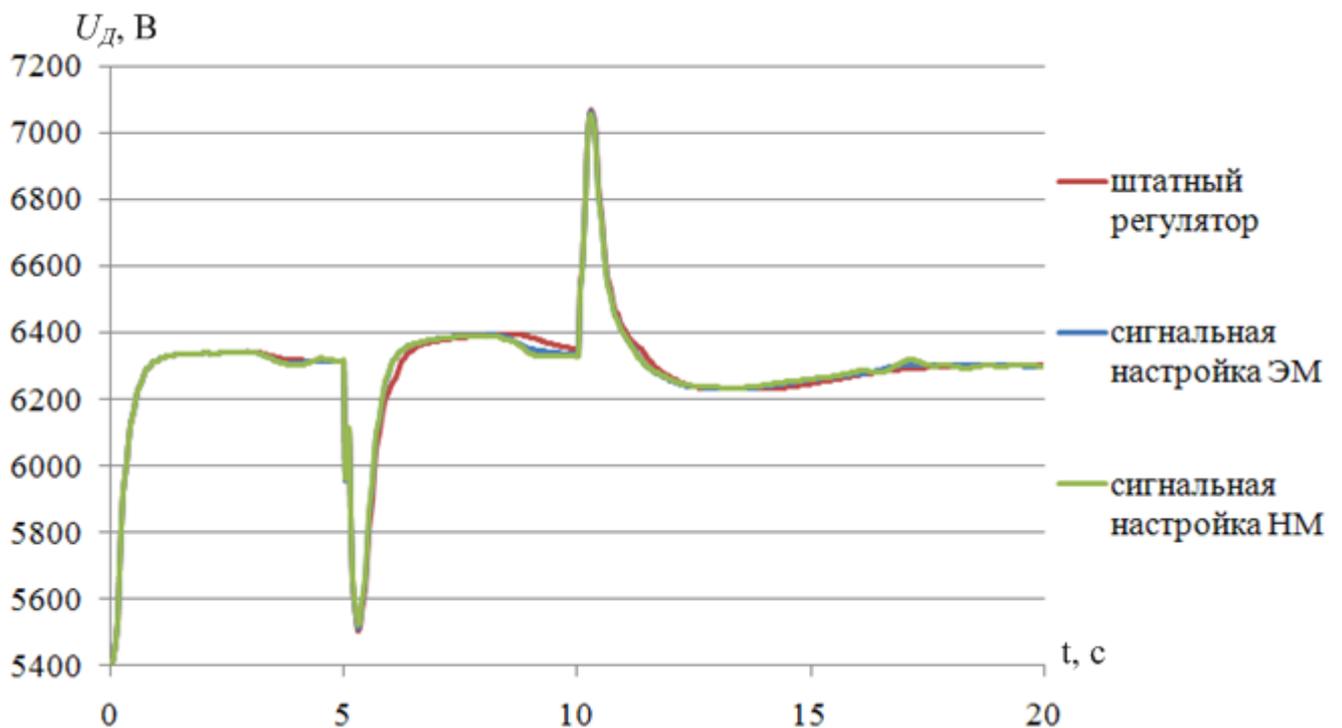


Рисунок 4.39 – Действующее напряжение генератора линейное

В результате получено улучшение максимального отклонения ЭМ – 34%, НМ – 41% при набросе нагрузки, ЭМ – 11,5%, НМ – 12,3% при сбросе нагрузки от максимального отклонения без адаптации.

Результаты ряда экспериментов при различных типовых возмущениях внешней электросистемы приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнение методов адаптивного управления

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

4.3. Выводы по четвертой главе

В процессе экспериментов было установлено, что параметрическая адаптация эффективно работает преимущественно только совместно с настраиваемой моделью, при использовании ПН с ЭМ было получено незначительное улучшение показателей качества переходных процессов. В целом ПН регулятора частоты вращения свободной турбины, несмотря на некоторые улучшения показателей качества, нецелесообразна, поскольку коэффициенты регулятора разумно выбирать, исходя из принципа компенсации переменных параметров свободной турбины ГТУ. В силу того, что процесс идентификации в реальном времени связан с непрерывными параметрическими возмущениями, задача получения коэффициентов регулятора для компенсации параметров ГТУ является сложной и неоднозначной. Также, адаптивным является только один контур, а значит, процесс адаптации останавливается при передаче приоритета управления другому контуру. Это означает, что после возврата приоритета управления параметры регулятора могут значительно отличаться от оптимальных.

Поэтому использование табличной настройки для регулятора свободной турбины может быть более эффективным, чем рассматриваемый вариант параметрической адаптации.

В свою очередь, сигнальная настройка показала свою эффективность при использовании как ЭМ, так и НМ. При появлении возмущающего воздействия СН существенно влияет на работу регулятора в тот же момент времени.

Улучшение показателей качества переходных процессов зависит не только от способа управления, но и от начального состояния ГТУ и характера изменения нагрузки. По этой причине оценка улучшения производится в среднем по множеству проведенных экспериментов. В результате достигнуто улучшение показателей качества вырабатываемой электроэнергии по частоте на 5% по максимальному отклонению и на 20% по длительности переходного процесса, сократилось в 2 раза и более время настройки регуляторов при испытаниях САУ ГТУ, что подтверждает акт внедрения результатов диссертационной работы в производственной деятельности АО «ОДК-Авиадвигатель» (приложение В).

Подводя итог, следует признать использование СН целесообразным при построении подсистемы адаптации для контура стабилизации частоты вращения свободной турбины. Выбор между ЭМ и НМ следует производить, исходя из анализа конкретной ситуации: какова производительность используемого регулятора, как часто производится остановка агрегата, как сильно меняются параметры ГТУ в течение эксплуатации и прочих факторов.

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

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.

В результате получено улучшение показателей качества регулирования по каналу частоты вращения свободной турбины ГТУ в среднем на 3% по максимальному отклонению и на 20% по длительности переходного процесса при одновременном сохранении показателей качества по напряжению электрогенератора в сравнении со штатной САУ ГТУ, сокращены затраты времени (в 2 раза и более) на настройку регуляторов САУ ГТУ за счет использования модуля адаптивного управления, подключаемого параллельно регуляторам штатной САУ ГТУ.

Следует отметить, что разработанный алгоритм построения модуля адаптации может быть использован для улучшения показателей качества по другим переменным состояниям ГТУ.

Результаты работы внедрены в производственной деятельности АО «ОДК-Авиадвигатель» (приложение В). Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета, (приложение Г).

Список использованной литературы

1. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учеб. для электроэнергет. спец. вузов.// В. А. Веников – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985 – 536 с.
2. Овчаренко, Н.И. Автоматика энергосистем./ Н.И. Овчаренко – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
3. ГОСТ Р 50783-95. Электроагрегаты и передвижные электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические требования. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 25 с.
4. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– М. : Изд-во стандартов, 2014. – 15 с.
5. ГОСТ Р 53178-2008 Установки электрогенераторные с бензиновыми, дизельными и газовыми двигателями внутреннего сгорания. Методы испытаний.– М. : Изд-во стандартов, 2009. – 26 с.
6. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр./ В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, М.Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 299с.
7. Кавалеров, Б. В. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем / Б. В. Кавалеров, А. Б. Петроченков // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2010. – № 6. – С. 19-23.
8. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А. И. Полулях, И. Г. Лисовин, Б. В. Кавалеров, А. А. Шигапов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011.– Т. 7, № 11-1. – С. 129-132.
9. Кавалеров, Б. В. // Мини-электростанции на базе конвертированных авиационных двигателей: проблемы управления и испытания САУ ГТУ/Б. В. Кавалеров// Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2011. –Т. 8, № 3. –С. 42-49.

10. Кавалеров, Б.В., Басаргин, Ш.Д. Унифицированные показатели качества переходных процессов для автоматизированных испытаний газотурбинных электростанций// *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №12-3. – С. 457-462.
11. Гриценко, Е. А., Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения./ Гриценко, Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В. – Самара : СНЦ РАН, 2004.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Бахирев, И.В. Построение модели газотурбинной установки для адаптивного управления/ И.В. Бахирев // *Вестник ИжГТУ им. МТ Калашникова*. – 2015. – №. 3. – С. 104-107.
17. Кириллов, И.И. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин и газотурбинных установок./ И.И. Кириллов Л.: Машиностроение, 1988. – 447 с.

18. Гуревич, О.С. Управление авиационными газотурбинными двигателями: учеб. пособие./О.С. Гуревич – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 100 с.
19. Adachi S. Fuel control method for gas turbine : пат. 4517797 США. – 1985.
20. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях/ А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов//Автоматизация в промышленности. – 2011, №6, с.14-17.
21. Тюкин, И. Ю., Адаптация в нелинейных динамических системах,/ И.Ю. Тюкин , В.А. Терехов // (Серия: Синергетика: от прошлого к будущему), СПб: ЛКИ, 2008. – 384 с.
22. Jelali, M., Hydraulic servo-systems: modelling, identification and control. / M. Jelali, A. Kroll //– Springer Science & Business Media. –2012.
23. Rowen, W. I. ‘Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines’, Journal of Engineering for Power– Transactions of the ASME, – 1983. –Vol. 105, No. 4.P.865-869.
24. Ricketts, B. E. ‘Modeling of a gas turbine: A precursor to adaptive control’, IEE Colloquium on Adaptive Controllers in Practice '97: Digest – 1997 – No: 176.
25. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений./Л.А Заде. М.: Мир, 1976.
26. Chiras, N. Global nonlinear modelling of gas turbine dynamics using NARMAX structures/ N. Chiras, C. Evans, D. Rees //ASME Journal of Engineering and Power.–№124 (4) –2002–P. 817-826.
27. Billings, S.A. Identification of MIMO nonlinear systems using a forward-regression orthogonal estimator/ S.A. Billings, S. Chen, M.J. Korenberg //International Journal of Control,– 1989 – 49 (6) –P. 2157-2189.
28. Cybenko, G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function/ G. Cybenko // Mathematics of Control, Signals and System.–1989 –№2 (4), P. 303-314.

29. Mu, Junxia Advanced controller design for aircraft gas turbine engines/ Junxia Mu, David Rees, G.P. Liu //Control Engineering Practice– 2005 – Vol. 13, Iss. 8– P. 1001–1015.
30. Chen, Cheng-Wu Neural network-based fuzzy logic parallel distributed compensation controller for structural system / Cheng-Wu Chen // Journal of Vibration and Control – 2013 –Vol. 19, Iss. 11– P. 1709-1727.
31. Takagi, T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control./ Takagi T., Sugeno M. //IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 15 – 1985. –P. 116–132.
32. Agüero, J. L. ‘Gas turbine control modifications for: Availability and limitation of spinning reserve and limitation of non-desired unloading’/ J. L. Agüero, M.C. Beroqui , H. Di Pasquo, //Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, and Central Térmica Tucumán, Pluspetrol Energy SA, Argentina.– 2002.
33. Centeno, P. ‘Review of gas turbine models for power system stability studies’/ P. Centeno , I. Egido , C. Domingo, F. Fernandez , L. Rouco , M. Gonzalez //, Universidad Pontificia Comillas and Endesa Generación– 2002 –Madrid, Spain.
34. Nabney, I. T.,Cressy, D. C. ‘Neural network control of a gas turbine’/ I. T. Nabney , D. C. Cressy// Neural computing & applications– 1996–Vol. 4, No. 4, P.198-208.
35. Topalov, A. V. Online learning in adaptive neurocontrol schemes with a sliding mode algorithm/ A. V. Topalov , O. Kaynak //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 2001. – Iss. 31. – №. 3. – P. 445-450.
36. Чернодуб, А.Н. Обучение нейроэмуляторов с использованием псевдорегуляризации для метода нейроуправления с эталонной моделью/ А.Н. Чернодуб // Искусственный Интеллект. – 2012. – №. 4. – С. 602–614.
37. Jurado,F. Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant/ F. Jurado, M. Ortega, A. Cano, J. Carpio //Electric Power Systems Research 60 –2002– P.123–135.
38. Чепак, Л. В. Моделирование адаптивно-робастной системы для скалярного объекта с запаздыванием по управлению /Л.В. Чепак, А.В. Мезенцева

//Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 1. – №. 2.

39. Земляков, С. Д. Алгоритм функционирования адаптивной системы с эталонной моделью, гарантирующий заданную динамическую точность управления нестационарным динамическим объектом в условиях неопределенности/ С.Д. Земляков, В.Ю. Рутковский //Автоматика и телемеханика. – 2009. – №. 10. – С. 35-44.

40. Хрущев, Ю.В. Алгоритмы эталонных моделей для построения устройств адаптивной синхронизации генераторов и частей электроэнергетических систем/ Хрущев Ю. В., Беляев Н. А. //Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 4.

41. Piltan, F. et al. On line Tuning Premise and Consequence FIS: Design Fuzzy Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller Based on Lyapunov Theory/ F. Piltan, N. Sulaiman, A. Gavahian, S. Roosta, S. Soltani //International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Т. 2. – №. 5. – С. 381-400.

42. Гусев, Ю.М. Система автоматического управления ТВВД с оптимизацией удельного расхода топлива/ Ю.М. Гусев, О.Е. Данилин, Б.И. Бадамшин //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15. – №. 5 (45).

43. Скороспешкин, В.Н. Адаптивная система автоматического регулирования/ В.Н. Скороспешкин//Интернет-журнал Науковедение. – 2014. – №. 2 (21).

44. 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., 130 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.

45. 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.

46. 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.

47. 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

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. Бахирев, И.В. Получение нелинейной модели ГТУ на основе нейронной сети/ И.В. Бахирев, Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров // «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике»: материалы I Международной научно-технической конференции, – Пермь 2015, с. 72– 78.

53. Хижняков, Ю.Н. Современные проблемы теории управления: учеб. пособие./Ю.Н. Хижняков. –Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014.–160 с.

54. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов, К.А. Один, А.И. Полулях, А.С. Ситников, И.Г. Лисовин, Е.Н. Ширинкина «КМЭС» /Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. / Дата регистрации 28.02.2011.

55. Landau, I. D. A survey of model reference adaptive techniques–theory and applications/I. D. Landau // Automatica. – 1974. – Т. 10. – №. 4. – С. 353-379.

56. Lindorff, D. P. Survey of adaptive control using Liapunov design†/ D. P. Lindorff, R. L. Carroll //International Journal of Control. – 1973. – Т. 18. – №. 5. – С. 897-914.

57. 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–2015– №2(60) – С. 71-76.

58. Борцов, Ю.А. Электромеханические системы с адаптивным и модельным управлением./ Ю.А. Борцов, Н.Д. Поляхов, В.В. Путов–Л. Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 216 с.

59. Гольберг, Ф.Д. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления/ Ф. Д. Гольберг, А. В. Батенин //М.: МАИ, 1999.–82 с. – 1999.

60. Фомин, В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами/ В. Н. Фомин, А. Л. Фрадков, В. А. Якубович. М.: «Наука» – 1981.
61. Пупков, К.А. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления./ К.А. Пупков, Н.Д. Егунов М., МГТУ им. Баумана –2001–744 с.
62. Александров, А.Г. Частотное адаптивное управление по заданной точности/ А.Г. Александров, Д.В. Шатов //Проблемы управления. – 2015. – №5. – С.7–13.
63. Красовский, А.А. Справочник по теории автоматического управления./ А. А. Красовский – изд. Наука – 1987. – 711с.
64. Бахирев, И.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигмоидальной функцией/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // Системы управления и информационные технологии –2015–№3.1(61) – С. 118-123
65. Бабин, В.А. Допредельные реализации разрывных корректирующих воздействий наблюдателя, функционирующего в скользящем режиме/ В. А. Бабин, В. В. Дик, С.А. Краснова //XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ–2014. М.: ИПУ РАН. – 2014. – С. 16–19.
66. Краснова, С. А. Каскадный синтез наблюдателя состояния с нелинейными корректирующими воздействиями/ С. А. Краснова, Н. С. Мысик //Автоматика и телемеханика. – 2014. – №. 2. – С. 106-128.
67. Бахирев, И. В. Управление электроэнергетической газотурбинной установкой с сигнальной настройкой и настраиваемой моделью/ И.В. Бахирев //Наука сегодня: задачи и пути их решения: материалы Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: задачи и пути их решения» (Россия, Вологда, 25 мая 2016 г.). – 2016. – С. 13-16.
68. И. В. Бахирев, Б. В. Кавалеров Об адаптивном управлении газотурбинной электростанцией с эталонной моделью/И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике»: материалы I Международной научно-технической конференции, – Пермь 2015, С. 31-37.

69. Поляхов, Н.Д. Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма адаптации [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан//Журнал «Электричество», 2014, №12– С.47-52.

70. Поляхов, Н.Д. Управление техническими объектами на основе безынерционной параметрической адаптации / Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Сер. Автоматизация и управление, СПб. 2014. – Вып.7. – С.52– 55.

71. Поляхов, Н.Д. Улучшение переходных характеристик синхронного генератора на основе адаптивного управления / Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан // «Актуальные научные вопросы и современные технологии»: материалы междунар. науч.-практ. конф., 28 июня 2013 г., г. Тамбов: ТРОО,– 2013. Ч.3.– С.134-138.

72. 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. науч.-техн. конф. СПб.:–2016. – С. 223 – 229.

73. Бахирев, И.В. Идентификация в темпе переходного процесса при управлении электроэнергетической газотурбинной установкой/ И.В. Бахирев, Б.В. Кавалеров // Системы управления и информационные технологии–2016–№2(64) – С. 73– 77.

74. Кавалеров, Б.В. Исследование адаптивного управления частотой вращения электроэнергетических газотурбинных установок/Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, Г.А. Килин //Электротехника. – 2016. – №11. – С.21–27.

75. Кавалеров, Б.В. Адаптивное управление частотой вращения газотурбинной установки с настраиваемой моделью/Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, Г.А. Килин //Электротехника. – 2017. – №11. – С.43–46.

76. Программа «КМЭС». Руководство оператора./ Перм. гос. техн. ун-т – Пермь, 2009. – 28 с.

77. Программа «КМЭС». Руководство программиста./ Перм. гос. техн. ун-т – Пермь, 2009. – 65 с.
78. Винокур, В.М. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций/ В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, Петроченков А.Б. // Электричество. – 2007. – № 3. – С. 2–7.
79. Создание программного комплекса для моделирования и оптимизации мини-энергосистем на базе автономных электростанций/ Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б., Ромодин А.В. //Научные разработки и изобретения Пермского государственного технического университета. Реферативный сборник ПГТУ. – Пермь, 2003. – С. 201–202.
80. Винокур, В.М. Принципы построения программного комплекса для расчета динамических режимов работы автономной электростанции/ В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.И. Полулях// Annual Proceedings of Technical University in Varna, 2004. – С. 333–337.
81. Программный моделирующий комплекс для испытания и настройки САУ ГТУ наземных электростанций/ Кавалеров Б.В., Полулях А.И., Шигапов А.А., Лисовин И.Г. // Вестник Мос. авиац. ин-та. –2010. – Т. 17, №5. – С. 200–211.
82. 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.
83. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок./ Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. и др. – М.: Машиностроение, 2008. – 190 с.
84. Лукас, В.А. Теория автоматического управления./ В.А. Лукас М.: Недра, 1990. – 416 с.
85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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.

89. 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.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

Приложение А

Результаты расчетов постоянных времени турбокомпрессора и свободной турбины

Таблица А.1 – Зависимость T_{TK} от n_{TK}

n_{TK}	7200	8028,78	9092,92	9300,07	9634,33	10051,99	10491,18
T_{TK}	1,6903	2,0973	1,5787	0,2860	0,8113	0,8147	1,193

Таблица А. 2 – Зависимость T_{ST} от n_{ST}

n_{ST}	T_{ST}
2981,44210241	0,70075188116723
3530,4376622	0,832988189580379
4001,86334176	0,947946715970259
4528,31082984	1,07331420486023
5005,16926171	1,18687232619625
5483,81552894	1,30130232107921
6002,52992286	1,4258349322222
6519,98313691	1,54881260372163
6901,07796505	1,63977261967644
6934,7259086	1,64781270248303
7001,55572705	1,663798802971
7485,23542317	1,77945168004879
8001,841109	1,90287520845093
8491,98009854	2,01996753032362
8987,87190849	2,1382863142866
9490,03584479	2,25804551815058
9998,76445651	2,37927743744819

Приложение Б

Статические характеристики газотурбинной установки

Таблица Б.1 – Статические характеристики газотурбинной установки

Ne	Gt	Ntk
40	296	6765
140,00	373,00	7200,00
250,00	428,26	7439,54
500,00	515,65	7896,28
750,00	553,51	8253,68
1000,00	605,35	8612,90
1250,00	652,38	8788,33
1500,00	693,92	8945,40
1750,00	741,70	9096,88
2000,00	796,62	9251,30
2250,00	850,79	9299,95
2500,00	906,63	9299,97
2750,00	961,83	9300,00
2999,00	1019,62	9300,01
3250,00	1063,78	9300,05
3500,00	1102,68	9354,47
3750,00	1151,65	9456,23
4000,00	1201,77	9562,16
4250,00	1251,57	9668,51
4500,00	1301,20	9772,53
4750,00	1351,76	9868,51
5000,00	1401,96	9964,91
5250,00	1453,92	10057,21
5500,00	1506,70	10147,81
5750,00	1558,58	10236,62
6000,00	1616,22	10348,50
6250,00	1673,63	10446,49

Приложение В

Акт внедрения результатов кандидатской(диссертационной) работы Бахирева Ивана Владимировича (АО «ОДК-Авиадвигатель»)

УТВЕРЖДАЮ

1-й зам. генерального директора -
генерального конструктора
АО «Авиадвигатель»
(Н.Л. Кокшаров)

2016г.

АКТ

внедрения (использования) результатов кандидатской диссертационной работы Бахирева Ивана Владимировича

Мы, нижеподписавшиеся члены комиссии в составе:

1. нач. отделения КО-210 АО «Авиадвигатель», к.т.н. И.Г. Лисовин (председатель);
2. нач. отдела КО-2105 О.Р. Акмалов;
3. зам. нач. отдела КО-2105, к.т.н. А.И. Полулях;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Бахирева Ивана Владимировича внедрены (использованы) в производственной деятельности АО «Авиадвигатель» в следующем виде.

1. Алгоритмы адаптивного управления газотурбинными установками (ГТУ) на основе эталонной модели и на основе настраиваемой модели реализованы в виде модуля адаптивного управления и используются в составе программно-моделирующий комплекс (ПМК) «КМЭС» для проведения компьютерных испытаний систем автоматического управления (САУ) ГТУ многоагрегатных газотурбинных электростанций (ГТЭС) на основе компьютерного моделирования электроэнергетической системы (ЭЭС).
2. Рекомендации по проведению испытаний адаптивных САУ ГТУ на стендах АО «Авиадвигатель».

Заключение.

Внедрение результатов диссертационной работы Бахирева Ивана Владимировича позволило:

1. достичь улучшения показателей качества регулирования по каналу частоты вращения свободной турбины ГТУ в среднем на 5 % по максимальному отклонению и в среднем на 20% по длительности переходного процесса по сравнению со штатной САУ ГТУ при одновременном сохранении показателей качества по напряжению электрогенератора;
2. сократить затраты времени (в 2 раза и более) на настройку регуляторов САУ ГТУ за счет использования модуля адаптивного управления, подключаемого к регуляторам штатной САУ ГТУ.

Результаты диссертационной работы Бахирева Ивана Владимировича в перспективе позволяют обеспечить дальнейшее улучшение показателей качества

вырабатываемой электроэнергии и сокращение затрат на настройку и испытания регуляторов за счет использования принципа адаптивного управления в САУ ГТУ на этапах разработки, проектирования, модернизации и эксплуатации ГТЭС.

Председатель комиссии _____ (И.Г. Лисовин)

Члены комиссии: _____ (О.Р. Акмалов)

_____ (А.И. Полулях)

“ 11 ” 11 2016г.

Приложение Г

Акт внедрения результатов кандидатской(диссертационной) работы

Бахирева Ивана Владимировича в учебный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе ПНИПУ

/ Лобов Н.В. /

«10» 09 2018 г.

внедрения в учебный процесс кафедры «*Электротехника и электромеханика*» ПНИПУ результатов диссертации *Бахирева Ивана Владимировича* на тему «Адаптивное управление газотурбинными установками при производстве электроэнергии с учетом возмущений в электрической системе»

Комиссия в составе:

Председатель: Кавалеров Б.В. – д.т.н., доц., зав. кафедрой «Электротехника и электромеханика»
 Члены комиссии: Шулаков Н.В. – д.т.н., проф., научный руководитель кафедры «Электротехника и электромеханика»
 Любимов Э.В. – к.т.н., проф., проф. кафедры «Электротехника и электромеханика»

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования Бахирева Ивана Владимировича внедрены в учебный процесс кафедры «Электротехника и электромеханика» ПНИПУ в рамках цикла практических занятий: дисциплины «Адаптивные алгоритмы в управлении», которая относится к дисциплинам по выбору вариативной части по обучению аспирантов направления 27.06.01 Управление в технических системах, направленность (профиль) программы аспирантуры «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами», научная специальность «05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)»; дисциплины «Математическое моделирование систем управления», которая относится к дисциплинам по выбору вариативной части по обучению магистрантов направления 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, направленность (профиль) программы магистратуры «Электромеханика».

Результаты диссертационной работы были использованы в разработанных и внедренных в учебный процесс практических работах исследовательского типа:

1. «Разработка и анализ адаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью, параметрической и сигнальной настройкой». В работе формируются знания и владения методами разработки и исследования адаптивных систем управления с эталонными моделями с использованием оригинальных программных средств, а также программного средства Matlab. В практической работе использованы следующие результаты диссертационной работы: оригинальные эталонные модели; оригинальная структура системы управления, оригинальные алгоритмы.
2. «Разработка и анализ адаптивной системы автоматического управления с настраиваемой моделью, параметрической и сигнальной настройкой». В работе формируются знания и владения методами разработки и исследования адаптивных систем управления с настраиваемыми моделями с использованием оригинальных программных средств, а также программного средства Matlab. В практической работе использованы следующие результаты диссертационной работы: оригинальные эталонные модели; оригинальная структура системы управления, оригинальные алгоритмы.

Эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в повышении уровня знаний, умений и владений обучаемых по программам: программы магистратуры «Электромеханика», программы аспирантуры «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Председатель:

д.т.н., доц., зав. кафедрой ЭТиЭМ

Члены комиссии:

д.т.н., проф., проф. кафедры ЭТиЭМ

к.т.н., проф., проф. кафедры ЭТиЭМ

Кавалеров Б.В. /
 Шулаков Н.В. /
 Любимов Э.В. /