

На правах рукописи



КИЛИН Григорий Александрович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность: 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2022

Работа выполнена на кафедре «Электротехника и электромеханика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **КАВАЛЕРОВ Борис Владимирович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **МАКАРЬЯНЦ Георгий Михайлович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», заведующий кафедрой «Эксплуатация авиационной техники» (г. Самара)

АБДУЛНАГИМОВ Ансаф Ирекович
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра «Автоматизированные системы управления», доцент (г. Уфа)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «14» октября 2022 г., в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14 Пермского национального исследовательского политехнического университета по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «8» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.14
доктор технических наук, доцент



В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электроэнергетика играет ключевую роль в промышленности и обеспечении повседневной жизни населения страны. Развитие электроэнергетических систем зарубежных стран и России показывает высокую эффективность применения газотурбинных установок (ГТУ) малой и средней мощности. Значительное число таких ГТУ создается на базе конвертированных авиационных двигателей отечественной разработки. Газотурбинные электростанции (ГТЭС) малой и средней мощности широко используются в качестве постоянных, резервных или аварийных источников тепло- и электроснабжения в городах, в отдаленных и труднодоступных районах. ГТЭС получают все более широкое распространение еще и потому, что обеспечивают минимальный ущерб для окружающей среды: низкий расход масла, возможность работы на отходах производства, низкие выбросы вредных веществ.

Для эксплуатации конвертированных газотурбинных двигателей (ГТД) в составе ГТЭС необходимы системы автоматического управления (САУ) ГТУ, которые должны обеспечивать требуемые показатели качества выработки электроэнергии. Базовая структура таких САУ нередко переносится практически в неизменном виде со своих авиационных прототипов. Как следствие, при разработке и испытаниях подобных САУ ГТУ возможное влияние электроэнергетической системы (ЭЭС) на САУ ГТУ учитывается лишь в незначительной степени. Такая ситуация приводит к снижению эффективности САУ ГТУ и затрудняет ее настройку при подготовке ГТЭС к вводу в эксплуатацию, также может страдать и качество вырабатываемой электроэнергии. Поэтому целесообразно САУ ГТУ рассматривать совместно с ЭЭС.

Однако известно, что в настоящее время испытания систем управления как ГТУ, так и синхронным генератором (СГ) осуществляется в значительной мере независимо друг от друга. Влияние ЭЭС на САУ ГТУ учитывается приближенно. В результате, в ходе эксплуатации ГТЭС снижается качество вырабатываемой электроэнергии, главным образом, по частоте. Увеличиваются общие затраты на испытания и доводку ГТЭС, среди них велики затраты на настройку САУ ГТУ.

Настройка системы управления ГТУ является составной частью испытаний ГТЭС. Особенно затратными по времени являются операции неавтоматизированной ручной настройки САУ при опытно-конструкторских и эксплуатационных испытаниях. Для учета динамики ЭЭС предлагается на основных этапах испытаний САУ ГТУ использовать математическую модель (ММ) ГТЭС, которая представляет из себя объединение моделей ГТУ и ЭЭС. В этом случае вначале производятся испытания и настройка САУ ГТУ на ММ ГТЭС, затем полученные настройки САУ ГТУ проверяются на полунатурном стенде, итоговая проверка принятых решений проходит на натурном стенде для испытаний ГТЭС.

Ввиду обозначенных причин, **актуальной** является автоматизация испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ на основе использования нейросетевых моделей ГТЭС для сокращения времени испытаний и настройки регуляторов САУ ГТУ.

Степень разработанности темы. Концепция модельно-ориентированного подхода и необходимость использования ММ рассматривается у многих авторов: Гольберга Ф.Д., Батенина А.В., Кривошеева И.А., Волкова Д.И., Ахмедзянова Д.А., Годованюка А.Г., Винокура В.М., Кавалерова Б.В., Михайлова А.Е., Кишалова А.Е. и др. Однако большинство существующих ММ не подходят для осуществления автоматизации испытаний САУ ГТУ с учетом влияния ЭЭС, так как предназначены для другой цели, либо обладают низким быстродействием. Кавалеровым Б.В. предложено совместное моделирование ГТУ и ЭЭС при проведении испытаний ГТУ, чтобы учесть все основные режимы работы ГТЭС.

Моделирование с использованием структурно-сложной ММ ЭЭС требует затраты значительных вычислительных ресурсов, что увеличивает время моделирования. Поэтому Кавалеровым Б.В. было предложено на основе исходных структурно-сложных моделей строить упрощенные быстрорешаемые (быстросчетные) модели и по ним проводить испытания и настройку САУ ГТУ. Быстрорешаемые модели ГТЭС должны обладать высокими показателями быстродействия и при этом сохранять необходимую адекватность, чтобы с их использованием успешно испытывать САУ ГТУ и настраивать параметры регуляторов САУ. Дальнейшие исследования, показали, что построение таких быстрорешаемых моделей также встречает значительные трудности. По причине большой размерности и неочевидного выбора структуры систем уравнений, описывающих ГТЭС, время на получение таких моделей существенно возрастает, а их область адекватности не всегда достаточна для проведения испытаний.

Возникает проблемная ситуация. Процедура настройки САУ ГТУ во время испытаний является весьма трудозатратной процедурой и может достигать половины стоимости разработки ГТУ. Традиционные модели ГТЭС плохо подходят для испытаний и настройки САУ ГТУ или требуют больших затрат времени на их получение. Разрешение проблемной ситуации предложено обеспечить за счет применения искусственной нейронной сети для получения быстрорешаемых моделей.

В диссертации предлагается разработать новые нейросетевые модели ГТЭС для систем автоматизации испытаний (САИ) САУ ГТУ. Разрабатываемые модели должны воспроизводить процессы не только в ГТУ, но также в синхронных генераторах и ЭЭС. Таким образом, чтобы преодолеть проблемную ситуацию необходимо предложить новую методику автоматизации испытаний САУ ГТУ в составе которой будут использоваться нейросетевые модели ГТЭС, и для этого разработать новые нейросетевые модели и алгоритмы моделирования, испытаний и настройки.

Объектом исследования является система автоматизации испытаний (САИ) САУ электроэнергетическими ГТУ.

Предмет исследования: модели, методики и алгоритмы системы автоматизации испытаний САУ ГТУ в составе ГТЭС.

Цель работы: повышение эффективности испытаний САУ ГТУ за счет автоматизации испытаний с использованием нейросетевых моделей ГТЭС.

Для достижения заявленной цели необходимо решить следующие **задачи исследований:**

1. Разработать новую методику автоматизации испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевых моделей ГТЭС;
2. Построить нейросетевые модели ГТЭС для основных характерных режимов работы;
3. Создать программно-моделирующий комплекс для построения нейросетевых моделей ГТЭС;
4. Апробировать эффективность предложенной методики автоматизации испытаний и работоспособность нейросетевых моделей ГТЭС в экспериментах по настройке регулятора САУ ГТУ.

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

Разработка программно-моделирующего комплекса проводилась с использованием языка программирования *Java*, среды разработки *NetBeans*.

Теоретической и методологической основой исследований являются работы В.Я.Ротача, И.А.Кривошеева, А.Г.Годованюка, В.А.Григорьева, Ф.Д.Гольдберга, А.В.Батенина, *H.Asgari*, *X.Q.Chen*, *R.Sainudiin*, О.С.Гуревича, С.Хайкина, К.Роберта, Н.Г.Егупова, Д.И.Батищева, В.В.Борисова, А.Г.Сухарева, А.В.Тимохова, А.В.Еремеева, В.М.Винокура, Ю.Н.Хижнякова, Б.В.Кавалерова.

Научная новизна

1. Предложена новая методика автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, отличающаяся применением нейросетевых моделей ГТЭС для моделирования характерных динамических процессов электрической системы и включением в состав САИ подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС, что позволяет существенно сократить процедуру настройки САУ ГТУ.

2. Предложена искусственная нейронная сеть (ИНС), полученная на основе разработанной методики выбора и обоснования ее архитектуры и гиперпараметров, отличающаяся возможностью создания нейросетевых математических моделей, которые позволяют моделировать различные режимы работы ГТЭС и схемы электроснабжения.

3. Получены новые нейросетевые модели для характерных режимов работы ГТЭС, отличающиеся учетом взаимовлияния ГТУ и электроэнергетической системы, обладающие высоким быстродействием при использовании в САИ.

4. Разработана подсистема подготовки нейросетевых моделей ГТЭС для системы автоматизации испытаний САУ ГТУ, отличающаяся возможностью дополнительной автоматизации испытаний САУ ГТУ, которая позволяет сократить сроки получения математических моделей ГТЭС.

Теоретическая значимость (ценность) исследования заключается в предложенном способе применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения моделей ГТЭС, предназначенных для автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, что позволяет упростит процедуру проведения испытаний. Также созданы новые динамические нейросетевые модели для характерных режимов функционирования ГТЭС, благодаря быстродействию

которых возможно проводить большое количество исследований и испытаний САУ ГТУ. Для построения ИНС разработана новая методика выбора и обоснования архитектуры и гиперпараметров ИНС, которые позволяют упростить и ускорить процедуру получения искомым НСМ ГТЭС.

Практическая ценность работы заключается в том, что созданы новые алгоритмы и программы для ЭВМ, использованные при создании человеко-машинной подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС для САИ САУ ГТУ. Новая подсистема САИ позволяет в значительной мере автоматизировать, упростить и повысить быстродействие испытаний и настройки регуляторов САУ электроэнергетическими ГТУ, а также повысить надежность и устойчивость ЭЭС и улучшить показатели качества вырабатываемой электроэнергии. В первую очередь это достигается использованием быстродействующих нейросетевых моделей. Применение разработанной методики автоматизации испытаний САУ ГТУ приводит к уменьшению времени испытаний и экономии топлива по сравнению с традиционными подходами. Внедрение разработанной подсистемы в технологический процесс на ООО «НТЦ «Турбопневматик» позволило: создать высокопроизводительные динамические модели установок и их узлов для использования в составе цифровых двойников, обеспечивающих уменьшение времени счёта модели более чем в 10 раз; сократить время, необходимое на разработку программ управления и диагностики; значительно повысить эффективность обработки результатов испытаний энергоустановки и ее узлов.

Результаты диссертационной работы внедрены на ООО «НТЦ «Турбопневматик» (г. Пермь) и в учебном процессе Пермского национального исследовательского политехнического университета.

На защиту выносятся:

1. методика автоматизации испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевых моделей ГТЭС, воспроизводящих характерные динамические процессы электрической системы, в результате достигается упрощение процедур испытаний и автоматизируются их этапы;
2. архитектура и гиперпараметры ИНС для упрощения процедуры получения нейросетевых моделей характерных режимов работы ГТЭС;
3. нейросетевые модели ГТЭС, которые строятся на базе предложенной архитектуры ИНС и учитывают взаимовлияние ГТУ и системы электроснабжения в динамике при испытаниях и настройке САУ ГТУ;
4. подсистема построения нейросетевых моделей ГТЭС для САИ САУ ГТУ, реализованная на основе оригинального программно-моделирующего комплекса;
5. результаты апробации предложенной методики автоматизации испытаний и нейросетевых моделей ГТЭС в компьютерных экспериментах по настройке параметров регулятора САУ ГТУ.

Область исследования соответствует пп. 2, 4, 8 и 16 паспорта научной специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на IX, X, XI, XII Международной Интернет-конференции

«Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (Пермь, 2017-2020), на Международной конференции «Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий» (Екатеринбург, 2017), на Всероссийской научно-технической конференции «АСУИТ» (Пермь, 2018, 2021), на VIII, XI Всероссийской научно-технической конференции "Инновационная энергетика" (Пермь, 2014,2020), на I, II Международных научно-технических конференциях «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике» (Пермь, 2015,2016), на IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП – 2016» (Пермь), на Международной научно-практической конференции «Наука сегодня: задачи и пути их решения» (Вологда, 2016), на научно-технической конференции «Климовские чтения – 2016. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2016) на 3-й Международной научно-практической конференции «Новая индустриализация и цифровизация: мировое, национальное, региональное измерение» (Екатеринбург, 2020), на XI Международной конференции «Инновационная энергетика» (Пермь, 2020), 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Магнитогорск, 2021), IV Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы топливно-энергетического комплекса: добыча, производство, передача, переработка и охрана окружающей среды» (Москва, 2021).

Исследования выполнялись в соответствии с госзаданием Минобрнауки РФ № 13.832.2014/К, договором 13.G25.31.0009 между ОАО «Протон-ПМ» и Минобрнауки РФ от 07.09.2010 в рамках постановления №218 Правительства РФ, исследование поддержано РФФИ и Пермским краем в рамках научного проекта № 19-48-590012.

Личный вклад. Автором диссертации разработаны новые методики и алгоритмы, проведены численные эксперименты, предложена и обоснована архитектура ИНС, разработаны нейросетевые модели. Разработанные методы, модели и алгоритмы реализованы в виде программного кода.

Публикации. Результаты диссертационной работы представлены в 26 публикациях (из них 17 индексируемых ВАК и 9 индексируемых в базе *Scopus*), получено 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований и 10 приложений. Работа содержит 177 страниц, 113 рисунков и 21 таблицы. Приложения содержат результаты компьютерных и натуральных экспериментов, документы о внедрении результатов работы

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности проводимых в рамках данной диссертационной работы исследований, формулируется цель и задачи, рассматривается научная новизна и практическая значимость.

В первой главе описана текущая проблемная ситуация в области автоматизации испытаний САУ ГТУ, входящих в состав ГТЭС. Система управления ГТЭС является сложной и многосвязной, поэтому изменения переменных, происходящие в одной части системы (рисунок 1), автоматически

приводит к изменениям переменных в других частях системы.

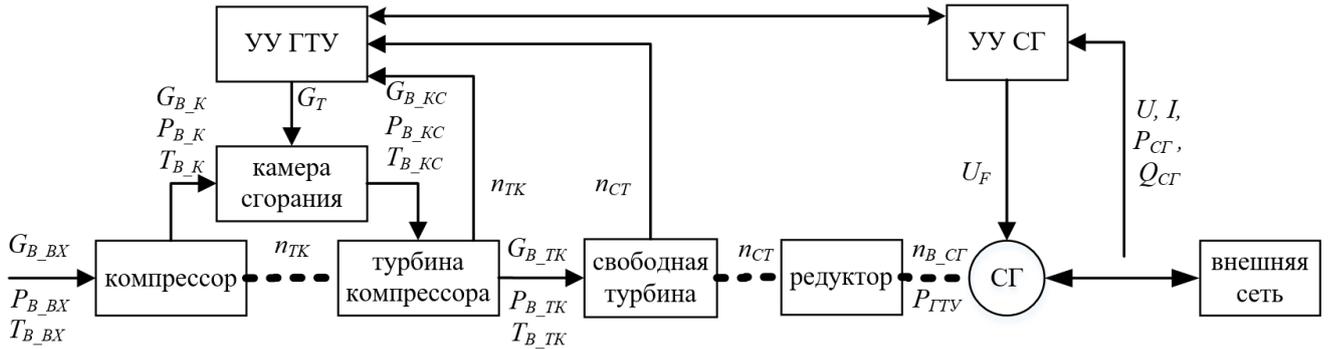


Рисунок 1 – Система управления ГТЭС

На рисунке 1 обозначены: G_T – расход топлива; n_{TK} – частота вращения турбокомпрессора; n_{CT} – частота вращения свободной турбины; $P_{ГТУ}$ – вырабатываемая мощность ГТУ; n_{B_CG} – частота вращения вала СГ; U – действующее напряжение СГ; U_F – напряжение обмотки возбуждения; I – действующий ток СГ; P_{CG} – вырабатываемая активная мощность СГ; Q – вырабатываемая реактивная мощность СГ; G_{B_BX} – расход воздуха, поступающий в ГТУ из внешней среды; P_{B_BX} – давление воздуха, поступающий в ГТУ из внешней среды; T_{B_BX} – температура воздуха, поступающего в ГТУ из внешней среды; G_{B_K} – расход воздуха через компрессор; P_{B_K} – давление воздуха через компрессор; T_{B_K} – температура воздуха через компрессор; G_{B_KC} – расход газа после камеры сгорания; P_{B_KC} – давление газа после камеры сгорания; T_{B_KC} – температура газа после камеры сгорания; G_{B_TK} – расход газа через турбину компрессора; P_{B_TK} – давление газа через турбину компрессора; T_{B_TK} – температура газа через турбину компрессора.

Испытания САУ ГТУ (рисунок 2) включают в себя многочисленные циклические процедуры настройки САУ и проверки результатов этой настройки.

Анализ проблемной ситуации подтвердил целесообразность переноса процедур настройки параметров САУ на полунатурные и компьютерные испытания.

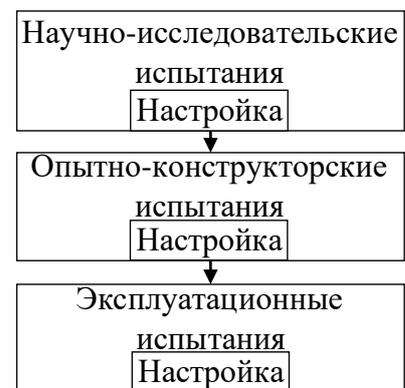


Рисунок 2 – Этапы испытаний САУ

Рассмотрены преимущества модельно-ориентированного подхода (МОП) для настройки САУ ГТУ в ходе испытаний (рисунок 3).

Проведен анализ существующих способов получения ММ ГТЭС для САИ САУ ГТУ. Рассматриваются особенности получения упрощенных (быстрорешаемых) ММ, преимущество которых заключается в их высокой

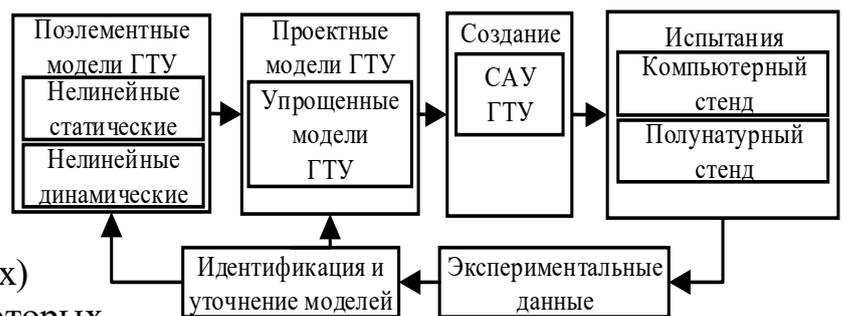


Рисунок 3 – Испытания САУ на

скорости работы. Быстродействие таких моделей позволяет использовать их для многократных циклических испытаний САУ, в том числе, на полунатурных стендах в реальном времени.

Обсуждаются возможности и особенности использования ИНС для реализации предлагаемого способа построения упрощенных быстро решаемых ММ на их основе.

Сформулированы требования и ограничения, предъявляемые к испытаниям САУ ГТУ, к системе управления ГТЭС (рисунок 1) и к разрабатываемым ММ для САИ. Показано преимущество автономной настройки контуров регулирования САУ ГТУ при применяемой селективной системе управления, которое заключается в значительном упрощении процедуры настройки регуляторов. Сформулирована цель диссертации, поставлены задачи, решение которых необходимо для достижения заявленной цели.

Во второй главе представлена разработанная методика испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевых моделей ГТЭС.

Ввиду трудоемкости и затратности испытаний на реальном объекте целесообразно испытывать САУ ГТУ на модели реального объекта, то есть на модели ГТЭС. Показана необходимость разработки новой методики для испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевых моделей. Формулируются требования к испытаниям САУ, а также рассматривается разработанная методика испытаний САУ ГТУ, включающая: 1) получение экспериментальных данных с реального объекта управления (или первичной сложной динамической модели); 2) построение нейросетевой модели на основе экспериментальных данных; 3) оценку мер адекватности полученных моделей; 4) использование НСМ для испытаний САУ

ГТУ; 5) испытание полученных настроек регуляторов САУ ГТУ на полунатурном стенде или реальном объекте.

Новизна данной методики заключается в использовании нейросетевых моделей для моделирования ГТЭС, поэтому при испытаниях и настройке САУ

ГТУ учитывается влияние энергосистемы (рисунок 4, где: 1 – управляющее устройство; 2, 7 – электрические линии связи; 3 – функциональный модуль обработки входных сигналов; 4 – функциональный модуль математической модели объекта управления; 5 – функциональный модуль обработки выходных сигналов; 6 – имитатор объекта). Рассмотрены этапы реализации разработанной методики. Показаны ее отличительные особенности и основные преимущества: 1) объединение структурной и параметрической идентификации; 2) возможность дообучения нейросетевых моделей ГТЭС в случае получения нового набора экспериментальных данных или изменения параметров объекта управления, а не строить модель заново.

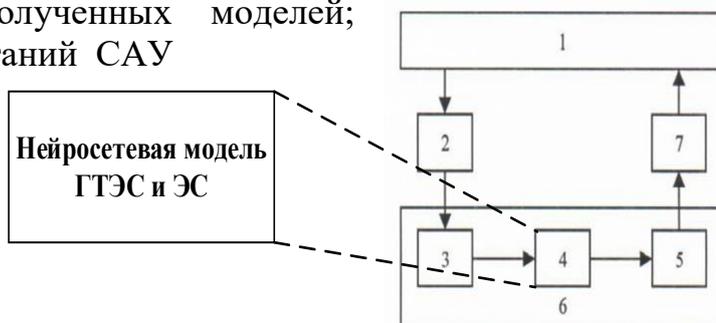


Рисунок 4 – Стенд для испытаний ГТУ в составе ГТЭС

Для практической реализации разработанной методики предложена человеко-машинная подсистема САИ для подготовки нейросетевых моделей (НСМ) для испытательного стенда (рисунок 4), которая дополняет и расширяет возможности стандартной структуры САИ. Именно в составе этой подсистемы должны быть программно реализованы разработанные методы, алгоритмы и модели, а сама эта подсистема представляет собой методическую основу использованием НСМ для решения задачи автоматизации испытаний.

Новизна методики заключается в использовании НСМ для совместного моделирования ГТУ и ЭЭС. Благодаря разработанной методике испытаний САУ ГТУ открываются возможности решить проблемные аспекты, поднятые в первой главе диссертации. А именно, появляется возможность настраивать САУ ГТУ за приемлемое время с учетом требований показателей качества электроэнергии в ЭЭС, учитывать все ее основные особенности, такие как режим функционирования или выбранная схема включения ГТЭС. Предложенная человеко-машинная подсистема подготовки НСМ позволяет в значительной мере автоматизировать процедуру получения таких моделей, так как в ходе процесса обучения НСМ автоматически осуществляется как структурная, так и параметрическая идентификация.

Как результат, в значительной мере сокращаются затраты времени на настройку САУ ГТУ в составе ГТЭС в ходе модельных испытаний, а также сокращается стоимость испытаний.

В третьей главе рассмотрены основные способы получения ММ, описывающих ГТУ и ЭЭС, рассматриваются возможности их использования для настройки параметров регуляторов САУ электроэнергетическими ГТУ, как одного из этапов испытаний САУ.

Рассмотрены сложные поэлементные модели ГТУ, модели электрических машин и других элементов ЭЭС в классических осях Парка-Горева, а также способы их объединения для совместного моделирования. Показаны недостатки указанных моделей и сделан вывод о необходимости разработки упрощенных быстродействующих моделей ГТЭС, поскольку даже упрощенная модель одиночного СГ в осях Парка-Горева обычно описывается системой из восьми дифференциальных уравнений (все обозначения переменных – общепринятые в теории электрических машин):

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -\Psi_q \omega - \frac{d\Psi_d}{dt} - I_d r; \\ U_q = -\Psi_d \omega - \frac{d\Psi_q}{dt} - I_q r; \\ U_f = \frac{d\Psi_f}{dt} - I_f r_f; \\ 0 = \frac{d\Psi_D}{dt} - I_D r_D; \\ 0 = \frac{d\Psi_Q}{dt} - I_Q r_Q; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_M} (M_T - M); \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega; \\ d\delta/dt = \omega - \omega_0; \end{array} \right. \quad (1)$$

В свою очередь, всережимная динамическая модель (ВДМ) ГТУ строится на основе уравнений компрессора низкого и высокого давления, турбины высокого давления, свободной турбины, камеры сгорания и т.д. Уравнения элементов ВДМ ГТУ на входе в двигатель:

$$T_{\text{H}}^{\text{MCA}} = T_{\text{H}}(H),$$

$$P_{\text{H}}^{\text{MCA}} = P_{\text{H}}(H),$$

где $T_{\text{H}}^{\text{MCA}}$, $P_{\text{H}}^{\text{MCA}}$ – температура и давление воздуха окружающей среды при нормальных условиях; T_{H} , P_{H} – температура и давление воздуха окружающей среды. Статические давления и температуры, соответствующие стандартным атмосферным условиям:

$$T_{\text{H}} = T_{\text{H}}^{\text{MCA}} + \Delta T_{\text{H}},$$

$$K_{\text{ВХ}} = K(T_{\text{H}}),$$

$$T_{\text{H}}^* = T_{\text{H}} [1 + (K_{\text{ВХ}} - 1) \cdot M^2/2],$$

$$P_{\text{H}}^* = P_{\text{H}} [1 + (K_{\text{ВХ}} - 1) \cdot M^2/2]^{K_{\text{ВХ}}/(K_{\text{ВХ}} - 1)},$$

$$T_{\text{ВХ}}^* = T_{\text{H}}^*,$$

$$P_{\text{ВХ}}^* = \sigma_{\text{ВХ}}(M) P_{\text{H}}^*,$$

где M – число Маха; T_{H}^* , P_{H}^* – температура и давление заторможенного потока воздуха окружающей среды; $T_{\text{ВХ}}^*$, $P_{\text{ВХ}}^*$ – температура и давление заторможенного потока воздуха на входе ГТУ; $\sigma_{\text{ВХ}}(M)$ – коэффициент потери давления воздуха на входе в ГТУ.

Во всех этих элементах ГТУ учитываются переходные процессы по разным координатам в многочисленных сечениях.

Показаны недостатки традиционных регрессионных моделей ГТУ и СГ при построении быстрорешаемой модели ГТЭС. Поэтому был предложен альтернативный способ построения ММ ГТЭС на основе ИНС. Для решение данной задачи в первую очередь необходимо было разработать методику поиска приемлемой архитектуры и гиперпараметров ИНС.

Согласно разработанной методике, вначале необходимо определиться с типом архитектуры ИНС. Затем определить параметры структуры ИНС, а затем определяются гиперпараметры ИНС: а) алгоритм обучения, б) глубина обратных связей, в) алгоритм инициализации весов ИНС, г) шаг обучения, д) функция активации.

Предложим следующую математическую формулировку задачи построения ИНС. Пусть имеется множество возможных типов архитектур ИНС:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, \quad (2)$$

Введено множество настраиваемых параметров (параметров структуры и гиперпараметров) ИНС:

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}, \quad (3)$$

Для каждого из m настраиваемых параметров ИНС из множества R существует множество вариантов выбора настройки этого параметра:

$$I_m = \{i_1, i_2, \dots, i_s\}, \quad (4)$$

Введено множество показателей качества ИНС:

$$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}, \quad (5)$$

Введено множество ограничений на настраиваемые параметры ИНС:

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_l\}, \quad (6)$$

Также необходимо ввести множество экспериментов:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_p\}, \quad (7)$$

На первом этапе для фиксированного типа архитектуры ИНС из множества A производится для каждого из настраиваемых параметров ИНС (множество R) проверка всех вариантов настройки из множеств I_m на соответствие множеству G на множестве U . При этом для каждого опыта записываются значения показателей качества из множества Q .

В случае удовлетворения множеству G вариант настраиваемых параметров вместе с соответствующим ему показателями качества из множества Q рассматривается как возможный, в противном случае данный гиперпараметр отвергается.

Затем может быть сформулирована задача выбора наилучшей ИНС. Из совокупности найденных вариантов ИНС выбирается оптимальный набор настраиваемых параметров ИНС, который можно представить в виде вектора \mathbf{R} , соответствующего экстремальному значению некоторой целевой функции:

$$F(\mathbf{R}, Q, G, U) \rightarrow \text{extr}, \quad \mathbf{R} \in R \quad (8)$$

для данного типа архитектуры ИНС и всех ограничений.

Мощность множеств (2–7) может быть различна и зависит от полноты постановки задачи выбора наилучших значений параметров ИНС:

$$r_1, I_1, G_1, Q_1 \xrightarrow{Y_1} r_2, I_2, G_2, Q_2 \xrightarrow{Y_2} \dots \xrightarrow{Y_{k-1}} r_k, I_k, G_k, Q_k \xrightarrow{Y_k} \dots \xrightarrow{Y_{n-1}} r_n, I_n, G_n, Q_n, \quad (9)$$

где G_i, Q_i – соответственно множество ограничений и множество показателей качества на i -м шаге.

На каждом шаге лицо принимающее решение (ЛПР) осуществляет выбор граничных условий из G_i , показателей качества из Q_i и выполняет оптимизацию. При этом в процессе, заданном соотношением (9), происходит накопление информации в процессе обучения ЛПР и его приспособление к решаемой задаче.

В общем случае после получения конкретной архитектуры ИНС возможно повторить весь или частично процесс (9) с учетом полученной в ходе этого процесса информации Y с целью дальнейшего улучшения характеристик ИНС или проверки возможности такого улучшения.

Поскольку рассмотренная задача является многокритериальной и с большим многомерным пространством поиска разработана методика (рисунок 5) получения не оптимальной, а допустимой ИНС путем декомпозиции исходной задачи на ряд последовательных подзадач с

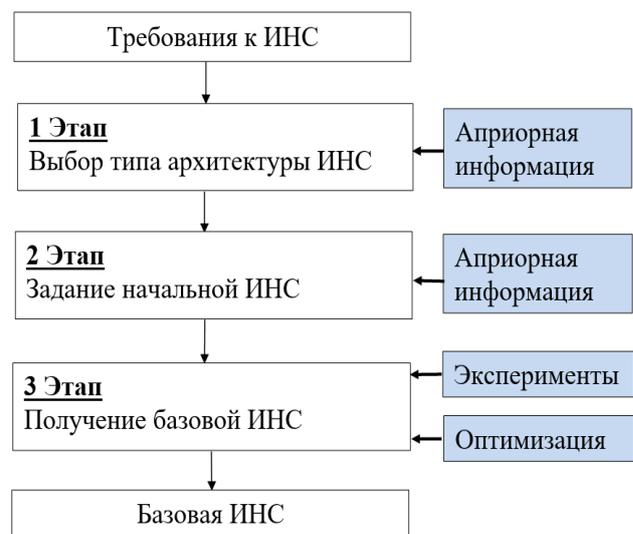


Рисунок 5 – Методика получения архитектуры и гиперпараметров

ограниченными пространствами поиска. В этом случае отдельные подзадачи решаются как задачи оптимизации по одному или двум критериям. В результате реализации этой методки в диссертации получена следующая ИНС.

На первом этапе выбрана рекуррентная ИНС, так как она позволяет хорошо учесть динамику за счет наличия обратных связей.

На следующем этапе с использованием априорной информации задана некоторая начальная архитектура рекуррентной ИНС. При этом использовались существующие рекомендации и имеющийся опыт построения ИНС.

На третьем этапе решен ряд оптимизационных задач с привлечением экспериментальных данных. Рекомендована следующая последовательность настройки параметров ИНС:

$$r_3 \rightarrow r_2 \rightarrow r_9 \rightarrow r_5 \rightarrow r_7$$

Такая последовательность поиска определена исходя из значимости этих параметров на итоговые показатели качества ИНС для ЛПР. Для каждого этапа предложен свой критерий поиска, например, для определения количества скрытых слоев ИНС (r_3) предложен следующий критерий:

$$J_3 = k_\sigma J_\sigma + k_t J_t \rightarrow \min_{I_3}, \quad (10)$$

$$J_\sigma = \frac{\sum_{i=1}^M e_i}{M}, \quad (11)$$

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - d_i)^2}{N}}, \quad (12)$$

$$J_t = \sum_{i=0}^N \Delta t, \quad (13)$$

где J_σ – среднее арифметическое среднеквадратичных ошибок экспериментам с разным значением исследуемого параметра структуры или гиперпараметра; M – число экспериментов по обучению ИНС с одинаковым значением гиперпараметра; e – среднеквадратичная ошибка по всем экспериментальным данным; N – объем выборки данных, y_i – текущее выходное значение; d_i – желаемое выходное значение; $k_\sigma = 1/e_{\max}$ – нормализующий коэффициент для среднеквадратичной ошибки; e_{\max} – максимальное значение усредненной среднеквадратичной ошибки из экспериментов с разным количеством скрытых слоев; J_t – время обучения; Δt – время, затраченное на одну итерацию обучения; $k_t = 1/t_{\max}$ – нормализующий коэффициент для времени обучения; t_{\max} – максимальное значение времени обучения из экспериментов с разным количеством скрытых слоев. В результате по критерию (10) получено два скрытых слоя для ИНС.

Вторая поисковая задача решается для определения количества нейронов в выходном слое – r_2 :

$$\begin{cases} J_2 = e \rightarrow \min_{I_2} \\ e \leq e_{\max} \end{cases}, \quad (14)$$

где $e = K_T = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - d_i)^2 / (\sum_{i=1}^N y_i^2 + \sum_{i=1}^N d_i^2)}$ – мера адекватности модели по критерию Тейла, $e_{\max} = 0.1$.

Здесь необходимо также принимать во внимание дополнительную информацию, которую оценивает ЛПР. В итоге обосновано использование 5 нейронов ($I_3 = 5$).

Подобным же образом решаются последовательно остальные поисковые задачи с привлечением опыта ЛПР.

В результате на основе разработанной методики (рисунок 5) получена обоснованная архитектура базовой ИНС (рисунок 6): 1) 4 нейрона в входном слое; 2) 5 нейронов в выходном слое; 3) 2 скрытых слоя; 4) 34 нейрона в каждом скрытом слое; 5) 0.1 шаг обучения;

б) сигмоидальная функция активации нейрона; 7) случайная

инициализация весов в диапазоне от 0 до 1 и делятся на n , где n – количество входных сигналов нейрона; 8) алгоритм обратного распространения ошибки; 9) глубина обратных связей равна шести.

На рисунке 6 обозначено: w^{abc} – веса ИНС (a – индекс таблицы весов ИНС, b – индекс нейрона в предыдущем слое, c – индекс нейрона в следующем слое), z^{-i} – оператор задержки (i – число шагов задержки).

В итоге, при наличии нескольких слоев, выходное значение нейронной сети вычисляется следующим образом:

$$Y = \varphi\left(\sum_k w_{0k} \varphi\left(\sum_j w_{kj} \varphi\left(\dots\left(\sum_i w_{ij} x_i\right)\right)\right)\right), \quad (15)$$

где: w – вес связи; x – числовое значение сигнала связи; $\varphi(\dots)$ – функция активации нейрона.

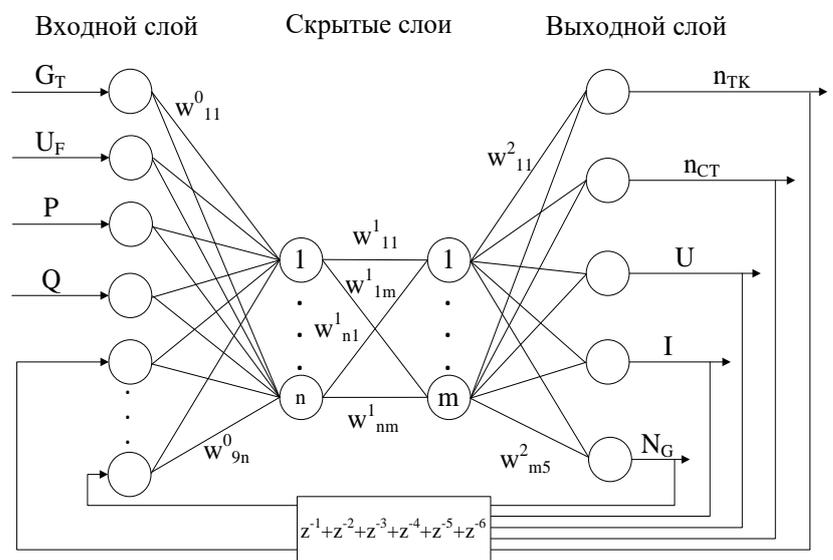


Рисунок 6 – Базовая ИНС

С помощью синтезированной ИНС (рисунок 6) разработаны новые нейросетевые модели ГТЭС для испытаний САУ ГТУ, в том числе: ГТЭС, работающая на выделенную нагрузку; ГТЭС, работающая на выделенную нагрузку параллельно сети бесконечной мощности; две ГТЭС параллельно работающие на выделенную нагрузку.

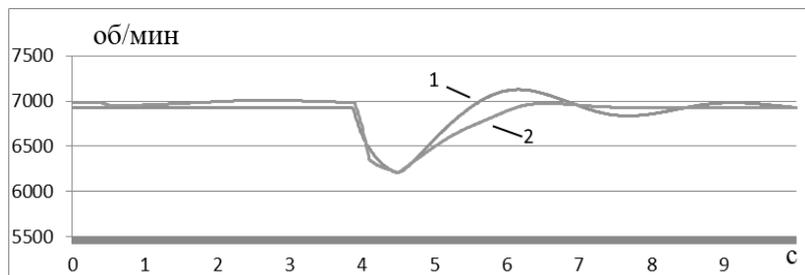


Рисунок 7 – Переходный процесс $n_{ст}$ (1 – модельная, 2 – экспериментальная)

На рисунке 7 ($n_{ст}$) показано изменение частоты вращения свободной турбины для НСМ ГТЭС 6 МВт, работающей на выделенную нагрузку в режиме скачкообразного увеличения мощности нагрузки с 1 МВт до 6 МВт. Эта модель прошла проверку адекватности в замкнутом контуре с работающим регулятором ГТУ. Новизна результатов заключается в создании оригинальных НСМ ГТЭС, в которых учитывается работа различных режимов ГТЭС совместно с ЭЭС. Рассмотрены возможности получения как многорежимной, так и многосхемной НСМ ГТЭС.

В четвертой главе диссертации описывается разработанный программный моделирующий комплекс (ПК) «НейроДин», который является ядром новой подсистемы САИ для получения НСМ. Рассматривается функциональная структура ПК. «НейроДин» позволяет на основе экспериментальных данных получать НСМ для сложных нелинейных конфигураций ЭЭС с ГТЭС, и состоит из модулей, показанных на рисунке 8.

Подсистема САИ, реализованная на базе ПМК «НейроДин», предназначена для автоматизации испытаний САУ ГТЭС, позволяет автоматизировать получение нейросетевых моделей ГТЭС, что положительно сказывается на времени выполнения задачи, экономии человеческих и материальных ресурсов. Не менее важным преимуществом является возможность получения таких НСМ ГТЭС, которые учитывают поведение ГТУ совместно с ЭЭС разной конфигурации.

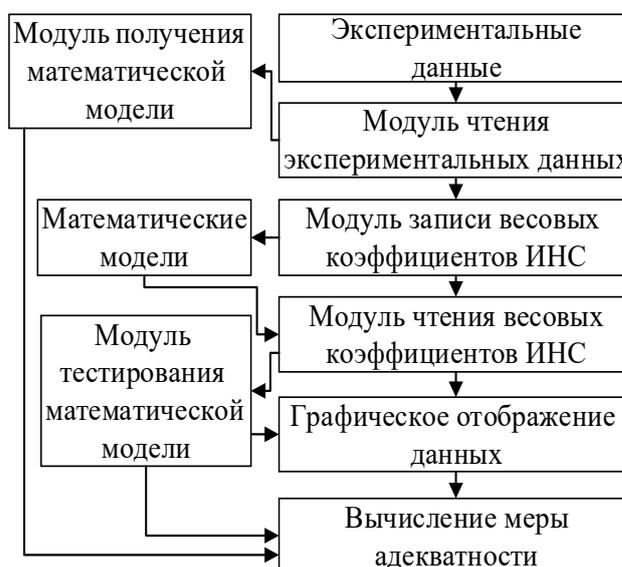


Рисунок 8 – Функциональная схема ПМК для САИ

В пятой главе исследуется эффективность применения полученных НСМ при настройке параметров САУ ГТУ для ГТЭС в ходе испытаний.

Обсуждаются критерий качества автоматической настройки регуляторов САУ ГТУ для НСМ ГТЭС и обосновывается выбор квадратичного интегрального критерия качества переходных процессов при учете ограничений.

Рассматривается испытаний САУ ГТУ на НСМ ГТЭС для настройки регулятора (рисунок 9), который функционирует в составе селективной САУ ГТУ. Именно данный регулятор отвечает за частоту переменного тока при автономной работе ГТЭС.

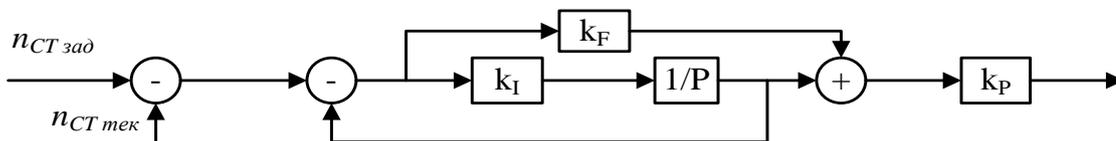


Рисунок 9 – Регулятор n_{CT} ГТУ ($n_{CT зад}$ – заданная частота вращения свободной турбины, $n_{CT тек}$ – текущая частота вращения свободной турбины, k_P – пропорциональный коэффициент усиления, k_I – интегральный коэффициент усиления, k_F – коэффициент форсировки)

Показана настройка регулятора на НСМ и последующий перенос этих настроек на первичную структурно-сложную модель с низким быстродействием (ПК «КМЭС», АО «ОДК-Авиадвигатель»). Первоначально САУ при работе совместно с ПК «КМЭС»

давала неудовлетворительные показатели качества (рисунок 10) по времени переходного процесса (время переходного процесса 18 секунд). После настройки регулятора САУ ГТУ на быстросчетной НСМ и последующего переноса настроек на ПК «КМЭС»

получено существенное уменьшение времени переходного процесса (критерием времени переходного процесса принят вход в 0,8% зону от величины установившегося значения) n_{CT} (рисунок 11), что соответствует требуемым показателям качества электроэнергии (время

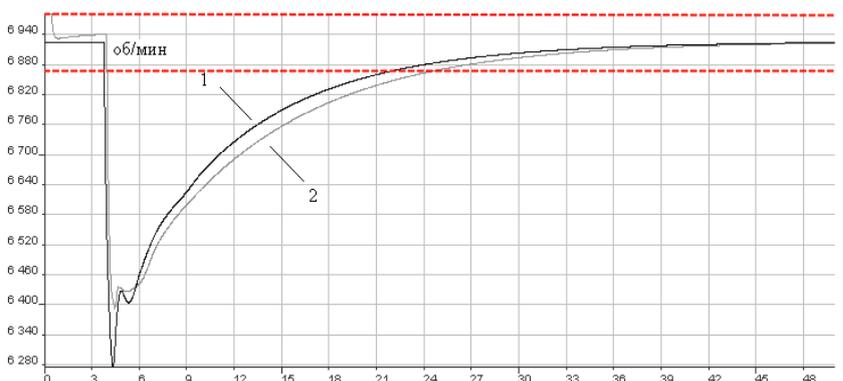


Рисунок 10 – Переходный процесс n_{CT} (1 – экспериментальная, 2 – модельная)

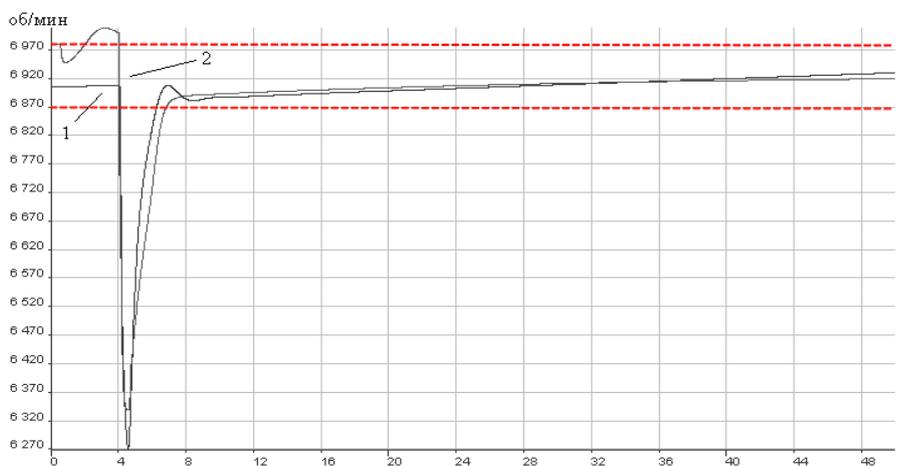


Рисунок 11 – Переходный процесс n_{CT} (1 – экспериментальная, 2 – модельная)

переходного процесса 2 секунды).

В рамках селективной САУ ГТУ регулятор n_{CT} работает с другими контурами регулирования и ограничений, которые могут перехватывать управление на основании логики селектирования. Преимущество селективной САУ – возможность автономной настройки контуров регулирования. Поэтому итоговая проверка может быть проведена на полной САУ ГТУ.

Получено выражение, которое позволяет оценить целесообразности использования НСМ ГТЭС:

$$\sum_{j=0}^m t_{j_iter} \geq \frac{\sum_{i=0}^n t_{i_exp} + t_{model}}{s - 1}, \quad (16)$$

где t_{i_exp} – время, затрачиваемое на получение одного эксперимента на первичной сложной модели, например, в ПМК «КМЭС»; n – количество экспериментов; t_{model} – время получения НСМ; t_{j_iter} – время, затрачиваемое на одну итерацию настройки; m – количество итераций настройки; s – переменная, показывающая во сколько раз НСМ быстрее первичной модели.

В результате оценочное сокращение времени настройки составляет не менее чем в 2,4 раза, а время восстановления частоты электрогенератора ГТЭС сократилось не менее чем на 88,9% (не менее чем на 16 секунд)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана новая методика автоматизации испытаний САУ ГТУ с использованием НСМ ГТЭС, позволяющая сократить время настройки САУ ГТУ при проведении испытаний и автоматизировать этапы испытаний;

2. С использованием оригинальной методики выбора и обоснования архитектуры и гиперпараметров ИНС получена базовая ИНС, которая позволяет упростить процедуру создания НСМ ГТЭС различных режимов работы и схем электроснабжения;

3. Построены новые нейросетевые модели для основных характерных режимов работы ГТЭС, учитывающие взаимовлияние ГТУ и системы электроснабжения в динамике, быстродействие которые более чем в 10 раз превосходит классические аналоги, что позволяет существенно сократить время настройки регуляторов САУ ГТУ при проведении испытаний;

4. Создан оригинальный программно-моделирующий комплекс для построения подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС для системы автоматизации испытаний САУ ГТУ.

5. Исследована эффективность предложенной методики автоматизации испытаний и нейросетевых моделей ГТЭС в экспериментах по настройке параметров регулятора САУ ГТУ, достигнуто сокращение времени испытаний не менее чем в 2,4 раза, а время восстановления частоты электрогенератора ГТЭС сократилось не менее чем на 88,9%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень Scopus:

1) **Kilin G. A.** et al. Modeling gas turbine electro power station typical operating modes using pre-trained artificial neural network //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 990. – №. 1. – С. 012028.

2) KavaleroV B.V., **Kilin G.A.**, Suslov A.I. Neural network architecture choice for modelling various configurations power system //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1886. – №. 1. – С. 012007.

3) **Kilin G. A.** et al. Stand for automation of control systems tests for electric power gas turbine installations using neural network models //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Т. 2402. – №. 1. – С. 030023.

4) **Kilin G. A.**, KavaleroV B. V., Suslov A. I. Set of Neural Network Models for Intelligent Control of Low-and Medium-Capacity Gas-Turbine Power Plants //Russian Electrical Engineering. – 2020. – Т. 91. – №. 11. – С. 659-664.

5) KavaleroV B.V., **Kilin G.A.**, Zhdanovskiy E.O. Software-modeling complex for automation tests of low and medium power turbo electric tests //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 140. – С. 05012.

6) KavaleroV B. V., Bakhirev I. V., **Kilin G. A.** Using Neural Networks in Controlling Low-and Medium-Capacity Gas-Turbine Plants //Russian Electrical Engineering. – 2019. – Т. 90. – №. 11. – С. 737-740.

7) KavaleroV B. V., Bakhirev I. V., **Kilin G. A.**, Chabanov E.A., Zhdanovskiy E.O. A Software System for Configuring the Parameters of a Power Plant Regulator// Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89. – № 11. – С. 675-678;

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

9) KavaleroV B. V., Bakhirev I. V., **Kilin G. A.** An investigation of adaptive control of the rotation speed of gas turbine power plants //Russian Electrical Engineering. – 2016. – Т. 87. – №. 11. – С. 607-611;

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК:

1) **Килин Г. А.**, Суслов А. И., Кавалеров Б. В., Грибков И. Н., Плешивых А. С. Перспективы нейросетевого моделирования для полунатурных испытаний систем автоматического управления сложными техническими объектами двигателестроения //Автоматизация в промышленности. – 2021. – №. 6. – С. 13-16;

2) **Килин Г. А.**, Кавалеров Б. В., Суслов А. И. Комплекс нейросетевых моделей для интеллектуализированного управления газотурбинными установками электростанций малой и средней мощности //Электротехника. – 2020. – №. 11. – С. 12-17;

3) Опарин Д. А., Бахирев И.В., Кавалеров Б.В., **Килин Г.А.** О процедуре идентификации математической модели воздушного потока //Современные наукоемкие технологии. – 2020. – №. 3. – С. 70-75;

- 4) Заборовцев Е. А., Колпакова М. А., **Килин Г. А.** Нейросетевая математическая модель газотурбинной электростанции с учетом различных режимов ее эксплуатации //Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – №. 34. – С. 217-233;
- 5) Кавалеров Б. В., Бахирев И. В., **Килин Г. А.** Применение нейронных сетей в задачах управления газотурбинными электростанциями малой и средней мощности //Электротехника. – 2019. – №. 11. – С. 38-41;
- 6) **Килин Г. А.**, Кавалеров Б.В., Шулаков Н.В., Ждановский Е.О. Тонкая настройка нейронной сети в задачах получения математической модели газотурбинной электростанции //Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №. 7. – С. 41-44;
- 7) **Килин Г.А.**, Кавалеров Б.В. Нейросетевая математическая модель для автоматизации испытаний системы автоматического управления газотурбинных электростанций малой и средней мощности // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 2 – С. 78-82;
- 8) **Килин Г.А.**, Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Ждановский Е.О., Опарин Д.А. Программный комплекс для реализации обучения с подкреплением// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 27. – С. 195-209;
- 9) **Килин Г.А.**, Кавалеров Б.В. Автоматизация настройки систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками на основе нейросетевых моделей // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018 . – Т. 16 . – № 9. – С. 30-35;
- 10) Ждановский Е. О., Кавалеров Б. В., **Килин Г. А.** Разработка нейросетевой модели газотурбинной электростанции для настройки регуляторов газотурбинной установки //Фундаментальные исследования. – 2017. – Т. 3. – №. 12;
- 11) **Килин Г. А.**, Зиятдинов И. Р., Кавалеров Б. В. Использование нейросетевой модели для настройки автоматических регуляторов газотурбинной электростанции.// Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – С. 66 – 69;
- 12) **Килин Г. А.** Получение нелинейной математической модели системы «газотурбинная установка - синхронный генератор» с помощью идентификации //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова. – 2015. – №. 2. – С. 87-91;
- 13) Кавалеров Б. В., **Килин Г. А.**, Бахирев И. В. Алгоритм поиска нелинейной модели ГТУ для привода ГПА //Вестник ИжГТУ имени МТ Калашникова. – 2014. – №. 2. – С. 133-136;
- 14) **Килин Г. А.**, Один К. А., Кавалеров Б. В. Структурно-параметрическая идентификация модели газотурбинной установки на основе генетического алгоритма //Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 11-7;
- 15) **Килин Г.А.**, Кавалеров Б.В., Бахирев И.В., Поварницын А.Ю. Идентификация газоперекачивающего агрегата для модельного испытания и настройки системы управления//Вестник Воронежского государственного

университета, Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – №1. – С.65–71;

16) Кавалеров Б. В., **Килин Г.А.**, Бахирев И.В., Один К.А., Поварницын А.Ю. Алгоритм построения быстрорешаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным //Вестник ИжГТУ им. МТ Калашникова. – 2013. – №. 3. – С. 116-118;

17) Кавалеров Б. В., **Килин Г. А.**, Один К. А. Всережимная быстрорешаемая модель газотурбинной газоперекачивающей установки //Юго-Западного государственного университета Серия ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ. – 2013. – С. 42;

Патенты и свидетельства:

1. Свидетельство о государственной регистрации 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;

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616156 «Идентификация газотурбинных установок и электроэнергетической системы» («Идентификация ГТУ-ЭЭС»)/ Кавалеров Б.В., К.А., Один Г.А. **Килин Г.А.** Дата регистрации 02.06.2015;

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660371 «Генетический идентификатор газотурбинных установок» («Генетический идентификатор ГТУ»)/ Кавалеров Б.В., Один К.А., **Килин Г.А.** Дата регистрации 07.10.2014;

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614742 «НейроДин»/ **Килин Г.А.**, Кавалеров Б.В. Дата приор. 09.12.2016. Дата регистрации 26.04.2017.