

В диссертационный совет Д ПНИПУ.05.14  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»

Председателю диссертационного совета,  
д-р техн. наук, проф. А.А. Южакову

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

кандидата технических наук, доцента кафедры «Автоматизированные системы управления» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» Абдулнагимова Ансафа Ирековича на диссертационную работу Килина Григория Александровича на тему «Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»

### **1. Актуальность темы**

Развитие электроэнергетики играет ключевую роль в развитии экономики, промышленности и жизнеобеспечения страны. Развитие электроэнергетических систем Российской Федерации и зарубежных государств сегодня осуществляется за счет применения газотурбинных электростанций (ГТЭС) малой и средней мощности. ГТЭС малой и средней мощности широко используются в качестве постоянных, резервных или аварийных источников тепло- и электроснабжения. Основу ГТЭС составляют один или несколько газотурбинных двигателей (ГТД), которые представляют собой конвертированные авиационные двигатели с системами автоматического управления (САУ). В основном структура и алгоритмы таких САУ переносятся в неизменном виде со своих авиационных прототипов, что влияет на обеспечение требуемых показателей качества выработки электроэнергии.

В настоящее время испытания САУ газотурбинных установок (ГТУ) и синхронного генератора (СГ) осуществляется в большинстве случаев независимо друг от друга. В итоге в ходе работы ГТЭС снижается ее производительность – располагаемая мощность генераторов, сопровождаемая дефицитом активной мощности и снижением частоты.

Для учета динамики электроэнергетической системы (ЭЭС) предлагается на основных этапах испытаний системы автоматического управления (САУ) ГТУ использовать математическую модель (ММ) ГТЭС, которая представляет собой объединение моделей ГТУ и ЭЭС. В этом случае сначала 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.

## **2. Новизна исследований и полученных результатов**

Новизна диссертационной работы заключается в разработке методики автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, отличающейся применением нейросетевых моделей ГТЭС для моделирования характерных динамических процессов электрической системы и включением в состав систем автоматизации испытаний (САИ) подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС, что позволяет существенно сократить процедуру настройки САУ ГТУ.

Дополнительно в диссертационной работе получены следующие результаты, представляющие научную значимость:

– Предложена искусственная нейронная сеть (ИНС), которая получена на основе разработанной методики выбора и обоснования ее архитектуры и гиперпараметров, и отличается возможностью создания нейросетевых математических моделей, позволяющих моделировать различные режимы работы ГТЭС и схемы электроснабжения.

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

– Разработана подсистема подготовки нейросетевых моделей ГТЭС для системы автоматизации испытаний САУ ГТУ, которая отличается возможностью дополнительной автоматизации испытаний САУ ГТУ, позволяющей сократить сроки получения математических моделей ГТЭС.

## **3. Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов**

Теоретическая значимость 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. Предложена методика выбора и обоснования архитектуры и гиперпараметров ИНС, которая позволяет моделировать различные режимы работы ГТЭС и схем электроснабжения для повышения их эффективности функционирования. Полученные нейросетевые модели для основных характерных режимов работы ГТЭС учитывают взаимовлияние ГТУ и системы электроснабжения в динамике, быстрдействие которых более чем в 10 раз превосходит классические аналоги.

Практическая значимость предложенной методики автоматизации испытаний подтверждается достижением сокращения времени испытаний САУ ГТУ не менее чем в 2,4 раза. Практическая значимость нейросетевых моделей ГТЭС в экспериментах по настройке параметров регулятора САУ ГТУ заключается в том, что время восстановления частоты электрогенератора ГТЭС сократилось не менее чем на 88,9%.

Результаты диссертационной работы внедрены в технологический процесс на ООО «НТЦ «Турбопневматик», что позволило создать высокопроизводительные динамические модели установок и их узлов для использования в составе цифровых двойников, с увеличением скорости расчета более чем в 10 раз, а также сократить время на разработку программ управления и диагностики, повысить эффективность обработки результатов испытаний энергоустановки и ее узлов.

#### **4. Обоснованность и достоверность полученных выводов**

Выполнение требований достоверности и обоснованности полученных результатов подтверждается корректным применением системного и статистического анализа, теории оптимизации и автоматического управления, теории испытаний и контроля технических систем. Корректность создания нейросетевых моделей ГТЭС подтверждается использованием теории рекуррентных нейронных сетей и математического моделирования технических систем. Робастность (адекватность) полученных моделей проводится на основе критерия Тейла. Отличие модельных и экспериментальных данных, полученных в ходе исследования, приемлемо для решения поставленной в диссертационной работе задачи – проведения предварительной настройки регуляторов ГТУ за указанное время.

#### **5. Заключение о соответствии диссертационной работ установленным критериям**

Диссертационная работа Килина Г. А. в полном объеме отвечает

критериям диссертации на соискание ученых степеней, указанным в части 2 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, **соответствует** требованиям п.13 и п.14 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ и ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации». В диссертации соблюдены следующие принципы соответствия:

5.1 Цель работы — повышение эффективности испытаний САУ ГТУ за счет автоматизации испытаний с использованием нейросетевых моделей ГТЭС — *можно полагать реализованной в рамках представленной диссертационной работы;*

5.2 Автореферат диссертации Килина Г. А. в полной мере соответствует *диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: цели, задачам исследования, основным положениям, определению актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и др.;

5.3 *Основные выводы и результаты* диссертационной работы *соответствуют поставленным задачам* исследования и сформулированы автором структурно, логично, содержательно;

5.4 Научные публикации Килина Г. А., изданные в период с 2017 по 2022 годы, *соответствуют диссертационной работе* и с достаточной полнотой отражают её суть, основные результаты и выводы;

5.5 *Тема и содержание* диссертации Килина Г.А. *соответствуют паспорту* специальности 2.3.3 — «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (далее курсивом по паспорту специальности):

– **по направлению исследования**, связанному с автоматизацией испытаний и получением существенных научно-технических результатов в области «...методологии исследования и проектирования, формализованного описания и алгоритмизации, оптимизации и имитационного моделирования функционирования систем, внедрения, сопровождения и эксплуатации человекомашинных систем...» в соответствии с формулой специальности;

– **по областям исследования** в соответствии с пунктами паспорта специальности:

2 «Автоматизация контроля и испытаний»;

4 «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами»;

8 «Научные основы, модели и методы идентификации

производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников»;

16 «Средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ».

– по объектам исследования – системе автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ в части «...математического, информационного, алгоритмического и машинного обеспечения создания автоматизированных технологических процессов и производств и систем управления ими...».

## **6. Анализ содержания диссертации**

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований и 10 приложений. Работа содержит 177 страниц, 113 рисунков и 21 таблицу.

**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. Показано, что в настоящее время САУ ГТУ синтезируются без должного учета влияния энергосистемы, поэтому для учета динамики ЭЭС предлагается использовать объединенную математическую модель ГТУ и ЭЭС на основных этапах испытаний ГТЭС.

**Вторая глава** представлена методика испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевых моделей ГТЭС. Сформулированы требования к испытаниям САУ ГТУ.

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

**В четвертой главе** описывается разработанный программный моделирующий комплекс «Нейродин», представляющий основу подсистемы САИ для получения НСМ. Предложена функциональная структура программного комплекса.

**В пятой главе** исследуется эффективность применения полученных НСМ при настройке параметров САУ ГТУ для ГТЭС в ходе испытаний. Обсуждается критерий качества автоматической настройки регуляторов САУ

ГТУ для НСМ ГТЭС и обосновывается выбор квадратичного интегрального критерия качества переходных процессов при учете ограничений.

Содержание автореферата соответствует основным выводам работы.

## **7. Вопросы и замечания по содержанию диссертации**

7.1. В работе предложена методика создания упрощенных (быстросчётных) математических моделей ГТЭС на основе нейронных сетей. При этом показатель быстродействия модели ставится в приоритет точности и адекватности модели. Автором не определены, какая производительность (операций в секунду) и какая точность требуются в моделях ГТЭС. Например, сегодня точность создания математических моделей авиационных ГТД регламентирована и не должна превышать 5%. В диссертационной работе оценка адекватности нейросетевых моделей проводится только по критерию Тейла и демонстрируется на обучающей выборке. На практике адекватность модели оценивается на другой тестовой выборке, ранее не подававшейся на нейронную сеть, с анализом ее отклонений. На рисунках, например, 3.29 – 3.32 видны отклонения экспериментальных и модельных данных, превышающие максимальную ошибку аппроксимации более чем в 10%. Допустимость таких отклонений вызывает вопросы.

7.2. Для увеличения ускорения обучения автор проводил инициализацию весовых коэффициентов нейронной сети с помощью генетического алгоритма и определенной архитектуры автокодировщика. Данная процедура необходима, но больше влияет на повышение точности модели, чем на увеличение скорости обучения. Сегодня существует множество параллельных алгоритмов (готовых библиотек) для ускорения вычислений как на физических, так и на графических процессорах, которые решают проблемы ускорения вычислений.

7.3. В работе исследован только один тип рекуррентных нейронных сетей – обычных полносвязных с обратной связью, которые сталкиваются с проблемой переполнения памяти. Современные рекуррентные нейронные сети типа Long short-term memory, Gated Recurrent Units, Seq-2-seq лишены этой проблемы и могут послужить хорошей альтернативой для решения данной задачи.

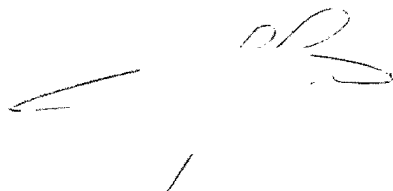
7.4. Для проведения испытаний САУ ГТУ на нейросетевых моделях ГТЭС необходимо отладить их работу в реальном масштабе времени, например, под разную частоту приема и обработки данных. Данный вопрос в диссертации не рассматривался.

## 8. Общее заключение

На основании анализа представленных материалов и указанных замечаний считаю, что диссертационная работа Килина Григория Александровича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью отвечает требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным «Положение о присуждении ученых степеней» № 842 от 24.09.2013. Автор Килин Григорий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

### Официальный оппонент

Доцент кафедры «Автоматизированные системы управления», Уфимского государственного авиационного технического университета, кандидат технических наук (специальность – 05.13.01)



Абдулнагимов Ансаф Ирекович  
19. 09. 2022 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», 450008, Российская Федерация, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, корпус 6, ком. 322, тел. + 7 (987) 254-38-29 , e-mail: [abdunagimov.ai@ugatu.su](mailto:abdunagimov.ai@ugatu.su)

