

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского политехнического

университета,

физико-математических наук,

 Швейкин Алексей Игоревич

июня 2022 г.

ИИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей» выполнена на кафедре «Электротехника и электромеханика».

В период подготовки диссертации соискатель КИЛИН Григорий Александрович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» на кафедре электротехники и электромеханики в должностях ассистента, старшего преподавателя.

В 2013 году окончил Пермский национальный исследовательский политехнический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств».

С 01.07.2013г. по 30.06.2017г. обучался в аспирантуре очной формы обучения Пермского национального исследовательского политехнического университета по направлению 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Кавалеров Борис Владимирович, работает заведующим кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем

- соискатель выполнил теоретическое исследование поставленных в диссертации задач и провел численные эксперименты;
- предложил и обосновал архитектуру искусственной нейронной сети;

- разработал методику построения искусственной нейронной сети для достижения цели исследований;
- разработал нейросетевые математические модели газотурбинных электростанций для различных режимов и схем функционирования;
- выполнил программную реализацию разработанных методов, моделей и алгоритмов.

2. Научная новизна диссертационного исследования Килина Григория Александровича заключается в следующем:

- предложена новая методика автоматизации испытаний систем автоматического управления (САУ) электроэнергетическими газотурбинными установками (ГТУ), отличающаяся применением нейросетевых моделей газотурбинных электростанций (ГТЭС) для моделирования характерных динамических процессов электрической системы и включением в состав системы автоматизации испытаний (САИ) подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС;
- разработана и обоснована архитектура искусственной нейронной сети (ИНС), ориентированная на построение моделей для различных режимов работы ГТЭС, для этого получена новая методика создания такой ИНС;
- получены новые нейросетевые модели для отдельных режимов работы ГТЭС, отличающиеся учетом взаимовлияния ГТУ и электроэнергетической системы в динамике
- разработана подсистема подготовки нейросетевых математических моделей ГТЭС для системы автоматизации испытаний САУ ГТУ, реализованная в виде оригинального программно-моделирующего комплекса.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждена корректным теоретическим обоснованием приведенных утверждений и выводов. Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе Килина Григория Александровича логичны, последовательны и обоснованы. Выполненные исследования основываются на анализе трудов отечественных и зарубежных авторов в рассматриваемой области. Выполнение требований достоверности и обоснованности обеспечивается корректным применением методов теории автоматического управления, методов математического моделирования, методов теории искусственных нейронных сетей, корректным проведением экспериментов по моделированию электроэнергетических систем, сравнением с результатами, полученными другими авторами.

4. Практическая значимость исследования состоит в том, что разработаны новые алгоритмы и программы для ЭВМ, использованные при создании человеко-машинной подсистемы подготовки нейросетевых математических моделей (НСММ) газотурбинных электростанций для системы автоматизации испытаний САУ газотурбинной установки. Новая подсистема САИ позволяет в значительной мере упростить и сократить время испытаний и настройки регуляторов САУ электроэнергетическими ГТУ, а также в перспективе повысить надежность и эффективность ЭЭС с ГТЭС за счет улучшения

показателей качества выработки электроэнергии. В первую очередь это достигается использованием быстродействующих нейросетевых математических моделей для испытаний и настройки САУ ГТУ. Использование новой методики автоматизации испытаний САУ ГТУ позволяет получить существенную экономическую выгоду, которая достигается за счет уменьшения времени испытаний и экономии топлива по сравнению с традиционными подходами. Внедрение результатов диссертационной работы Килина Григория Александровича (ПК «НейроДин») на ООО «НТЦ Турбопневматик» в технологический процесс разработки энергоустановок и компрессорных агрегатов на основе замкнутых газотурбинных двигателей (ЗГТД) позволяет успешно решать следующие задачи:

- разрабатывать и идентифицировать поэлементные математические модели ЗГТД и их узлов, обеспечив значительное сокращение сроков и трудоёмкости разработки;
- создавать 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;
- уменьшить время разработки алгоритмов управления и диагностики;
- значительно повысить эффективность обработки результатов испытаний энергоустановки и её узлов;
- повысить эффективность процесса верификации математических моделей установок и их узлов;
- создать эффективные технологии эксплуатации установок и их узлов с использованием технологий искусственного интеллекта.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 26 работах, из них 17 работ из перечня ВАК, 9 рецензированы SCOPUS (общий объем публикаций составляет 8,4375 п.л., авторских – 5,46 п.л.):

из перечня ВАК

- 1) Кавалеров Б. В., Килин Г. А., Один К. А. Всережимная быстро решаемая модель газотурбинной газоперекачивающей установки //Юго-Западного государственного университета Серия ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ. – 2013. – С. 42;
- 2) Кавалеров Б. В., Килин Г. А., Один К. А., Бахирев И.В., Поварницын А.Ю. Алгоритм построения быстро решаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным //Вестник ИжГТУ им. МТ Калашникова. – 2013. – №. 3. – С. 116-118.
- 3) 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;

4) Килин Г. А., Один К. А., Кавалеров Б. В. Структурно-параметрическая идентификация модели газотурбинной установки на основе генетического алгоритма //Фундаментальные исследования. – 2014. – №. 11-7;

5) 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;

6) 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;

7) 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;

8) 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;

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) 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.

11) 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;

12) 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;

13) 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.

14) 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.

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

16) 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.

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

из базы цитирования Scopus

1) 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;

2) 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;

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

4) 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.

5) KavaleroV B., Kilin G., Zhdanovskiy E. 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) 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.

7) 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.

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

9) 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.

разработанные программные продукты

1. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2014660371 «Генетический идентификатор газотурбинных установок» («Генетический идентификатор ГТУ»)/ Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, К.А. Один /Дата приоритета 13.08.2014. Дата регистрации 07.10.2014.

2. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2015616156 «Идентификация газотурбинных установок и электроэнергетической системы» («Идентификация ГТУ-ЭЭС»)/ Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, К.А. Один /Дата приоритета 16.04.2015. Дата регистрации 02.06.2015;

3. 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;

4. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2017614742 «Нейродин»./ Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров /Дата приоритета 09.12.2016. Дата регистрации 26.04.2017.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Килиным Григорием Александровичем диссертационная работа является научно-квалификационной работой в области автоматизации технологических процессов и производств в промышленности, теории автоматического управления, математического моделирования, оптимизации и идентификации.

Указанная область исследования соответствует формуле специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: пункту 2 – «Автоматизация контроля и испытаний», пункту 4 – «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами», пункту 8 – «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников» и пункту 16 – «Средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ».

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, установленным п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней»

Диссертация Килина Г.А. представляет собой оригинальное исследование, в котором отсутствуют материалы без ссылки на автора или источник заимствования. Автор работы корректно ссылается на результаты научных работ, выполненных им лично и в соавторстве.

Диссертация «Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей» Килина Григория Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по

специальности 2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Заключение принято на заседании кафедры «Электротехники и электромеханики».

Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0, протокол № 26 от «25» мая 2022г.

Заключение подготовил канд. техн. наук (05.13.06), доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Бахирев Иван Владимирович.

Заместитель заведующего кафедрой

«Электротехника и электромеханика»

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,

канд. техн. наук, доцент

(614990, г. Пермь, Комсомольский проспект 29

Ученый секретарь кафедры «Электротехника и электромеханика»)

Чабанов Евгений Александрович

