



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44  
E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)  
ОГРН 1027739051779  
ИНН 7701002520 КПП 770101001

16.09.2022 № 01.03-10/56

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по науке  
и стратегическим коммуникациям МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

д-р. экон. наук, проф.

« 16 » сентября



## ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

на диссертацию Килина Григория Александровича

на тему: Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей

по специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

на соискание ученой степени кандидата технических наук.

### **Актуальность темы выполненного исследования.**

В диссертационной работе Килина Г.А. рассматривается автоматизация испытаний газотурбинных электростанций (ГТЭС) малой и средней мощности,

которые создаются на основе конвертированных газотурбинных авиационных двигателей (ГТД).

Для эксплуатации конвертированных авиационных газотурбинных установок (ГТУ) необходима система автоматического управления (САУ) ГТУ, обеспечивающая требуемые показатели качества выработки электроэнергии ГТЭС. Эти показатели в значительной мере определяются характером переходных процессов ГТУ, для улучшения которых требуется дальнейшее совершенствование систем и алгоритмов управления САУ ГТУ. При этом ГТУ должна рассматриваться во взаимодействии с электроэнергетической системой (ЭЭС), поскольку из ЭЭС в ГТУ поступают возмущающие воздействия.

Автор справедливо указывает на то, что процесс настройки САУ ГТУ является составной частью испытаний САУ ГТУ для ГТЭС. Особенно затратными по времени являются операции неавтоматизированной ручной настройки САУ при опытно-конструкторских и эксплуатационных испытаниях ГТЭС. Для учета динамики ЭЭС в диссертации рассматривается использование объединенной математической модели (ММ) ГТУ и ЭЭС на основных этапах испытаний ГТЭС.

Однако моделирование с использованием структурно-сложной ММ ЭЭС, содержащей большое количество дифференциальных уравнений, требует затраты значительных вычислительных ресурсов, что существенно увеличивает время моделирования. Поэтому одновременно было предложено на основе структурно-сложных моделей строить упрощенные быстрорешаемые модели и по ним проводить настройку САУ ГТУ во время испытаний. Быстрорешаемые модели ГТЭС должны обладать высокими показателями быстродействия и при этом сохранять необходимую адекватность, чтобы с их использованием успешно настраивать параметры регуляторов САУ ГТУ. Предпринятые исследования, показали, что построение таких быстрорешаемых моделей также встречает свои трудности. По причине большой размерности и неочевидного выбора структуры уравнений время на получение моделей существенно возрастает, а их область адекватности не всегда достаточна для проведения испытаний.



Следует согласиться с выявленной автором проблемной ситуацией, которая состоит в том, что процесс испытания и настройки САУ ГТУ является весьма затратной процедурой (вплоть до 50% стоимости ГТУ), а существующие модели ГТЭС слабо приспособлены для автоматизации настройки параметров регуляторов САУ ГТУ.

Для преодоления выявленной проблемной ситуации в диссертационной работе Килина Г.А. предложено разработать новую нейросетевую модель (НСМ) ГТЭС специально для систем автоматизации испытаний (САИ) САУ ГТУ. Необходимо предложить новую методику автоматизации испытаний САУ ГТУ на основе использования нейросетевой модели ГТЭС, разработать подсистему подготовки нейросетевых моделей для САИ.

Таким образом, тему диссертационного исследования Килина Г.А., посвященного автоматизации испытаний САУ ГТУ с использованием нейросетевой модели ГТЭС для настройки регуляторов САУ ГТУ, следует признать актуальной.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе Килина Григория Александровича логичны, последовательны и вполне 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.

## **Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научная новизна диссертационной работы Килина Григория Александровича заключается в следующем.

Предложена новая методика автоматизации испытаний САУ ГТУ для ГТЭС, в этой новой методике используется искусственная нейронная сеть для моделирования ГТЭС с целью воспроизведения характерных динамических процессов электрической системы. Также в рамках этой методики предусмотрено включение в состав САИ новой подсистемы – подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС, что позволяет существенно сократить время испытаний САУ ГТУ.

Для построения нейросетевых моделей автором предложена и обоснована искусственная нейронная сеть (ИНС). ИНС построена с использованием оригинальной методики выбора и обоснования архитектуры и гиперпараметров ИНС для создания нейросетевых математических моделей основных режимов работы ГТЭС и схем электроснабжения.

С использованием ИНС получены нейросетевые модели для характерных режимов работы ГТЭС, отличающиеся учетом взаимовлияния ГТУ и электроэнергетической системы и обладающие высоким быстродействием, что важно при использовании в САИ.

Разработана подсистема САИ для подготовки нейросетевых моделей ГТЭС, использование которой позволяет сократить сроки получения математических моделей ГТЭС, также эта подсистема отличается возможностью дополнительной автоматизации испытаний САУ ГТУ.

### **Значимость результатов для науки.**

Значимость исследований, проведенных Килиным Г.А., заключается в предложенном способе применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для построения эквивалентной модели ГТЭС. Такая модель ГТЭС предназначена для автоматизации испытаний САУ электроэнергетическими ГТУ, что позволяет



упростит процедуру проведения испытаний. Автором разработаны новые динамические нейросетевые модели для характерных режимов функционирования ГТЭС, благодаря быстрдействию которых возможно проводить исследования по настройке параметров регулятора САУ ГТУ и таким образом достигать дополнительного улучшения показателей качества САУ ГТУ при выработке электроэнергии. Обоснована архитектура и гиперпараметры ИНС для создания нейросетевых моделей ГТЭС, которая позволяет упростить и ускорить процедуру получения таких моделей.

### **Практическая значимость полученных автором диссертации результатов.**

Килиным Г.А. разработаны новые алгоритмы и программы для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), которые были использованы при создании человеко-машинной подсистемы подготовки нейросетевых моделей ГТЭС для САИ САУ ГТУ. Благодаря разработанной подсистеме САИ можно в значительной мере упростить и сократить время испытаний и настройки регуляторов САУ электроэнергетическими ГТУ. Также такая подсистема позволяет дополнительно повысить надежность и устойчивость ЭЭС за счет улучшения показателей качества выработки электроэнергии. В первую очередь это достигается использованием синтезированных Килиным Г.А. быстрдействующих нейросетевых 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. Разработанные Килиным Г.А. программные продукты защищены четырьмя свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Разработанная методика автоматизации испытаний САУ ГТУ для ГТЭС с использованием нейросетевых моделей и предложенная новая подсистема САИ для подготовки нейросетевых моделей могут быть использованы для

автоматизации испытаний САУ ГТУ для наземных электростанций на предприятиях авиационного двигателестроения и на предприятиях, разрабатывающих новые перспективных наземные газотурбинные установки и системы управления ими. Разработанный программный комплекс «НейроДин» для получения и использования нейросетевых моделей ГТЭС может быть рекомендован для внедрения в научно-исследовательских центрах, опытно-конструкторских предприятиях, на испытательных станциях, в образовательном процессе высших учебных заведений при обучении магистрантов и аспирантов, а также при проведении научных исследований силами студентов и преподавателей.

#### **Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.**

Представленная Килиным Г.А. диссертационная работа по своему содержанию соответствует п. 2 «Автоматизация контроля и испытаний», п.4 «Теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами», п.8 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников», п.16 «Средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ» паспорта научной специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами. Соответствие содержания диссертационной работы специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, по которой она представляется к защите, также подтверждается апробацией работы, ее научной новизной и практической полезностью.



## **Оценка содержания диссертации и автореферата.**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований и 10 приложений. Основная часть диссертационной работы содержит 177 страницы, 21 таблицу и 113 рисунков. Приложения содержат примеры расчетов характеристик, результаты компьютерных и натуральных экспериментов, документы о внедрении результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. По результатам исследований опубликовано 26 научных работ (из них 17 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК и 9 индексируемых в базе *Scopus*).

В целом диссертация является законченным научным исследованием, обладающим актуальностью, научной новизной и практическим потенциалом использования. Текст диссертации написан в большей своей части грамотно, с соблюдением правил оформления основной части и приложений, таблиц и рисунков. К тексту диссертации приложены акты внедрения ее результатов. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения.

Вместе с тем к диссертации Килина Г.А. имеются следующие **замечания**.

1. Недостаточно подробно рассмотрены метод обучения нейронной сети и последовательность, на которой проводилось обучение.
2. Не показано, насколько настройка нейронной сети на одних этапах исследования применима на других этапах и для других экземпляров ГТУ.
3. Непонятно, зачем в п. 5.5 вначале проверяется работоспособность предложенных решений на пропорционально-интегральном регуляторе, а потом в п.5.6 та же проверка сделана для штатного регулятора с форсировкой? В чем смысл такой последовательности?

4. В п.3.8 показано получение трех нейросетевых моделей для трех разных конфигураций электросистемы и потом еще одной модели для двух конфигураций, но нет сравнительного анализа полученных моделей, а в таблицах приведены лишь значения мер адекватности без комментариев.

5. В диссертации иногда вместо правильного и общепринятого термина «частота вращения свободной турбины» используется термин «скорость вращения свободной турбины», например, на стр. 152.

6. Графики переходных процессов в ряде случаев представлены в неудачном масштабе, где происходящие изменения переменных занимают весьма незначительную часть представленного графика (например, рисунки 3.58, 3.59, 3.61, 3.64).

Сделанные замечания не отражаются в целом на положительной оценке работы, на ее научной и прикладной значимости.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.**

Диссертационное исследование Килина Григория Александровича на тему «Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей», представленное на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Диссертационная работа является законченной научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение научной задачи автоматизации испытаний САУ ГТЭС с использованием нейросетевых моделей.

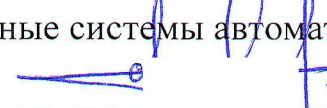
Автореферат в полном объеме раскрывает содержание диссертационной работы. Основные положения диссертационного исследования отражены в публикациях автора, в том числе в ведущих журналах, рекомендуемых ВАК РФ и изданиях, индексируемых базой *Scopus*.




Диссертация Килина Григория Александровича «Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием нейросетевых моделей» удовлетворяет критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней, указанным в части 2-й 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».

Настоящий отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры Компьютерные системы автоматизации производства МГТУ им. Н.Э. Баумана протокол № 1 от 30 августа 2022 г.

Отзыв составлен кандидатом технических наук,  
доцентом кафедры Компьютерные системы автоматизации производства МГТУ им. Н.Э. Баумана Овсянниковым Михаилом Владимировичем

Заведующий кафедрой Компьютерные системы автоматизации производства  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  С.С. Гаврюшин

Доцент кафедры Компьютерные системы ае  
Н.Э. Баумана  М.В. Овсянников

*Подпись заведующего кафедрой Компьютерные системы автоматизации  
производства МГТУ им. Н.Э. Баумана заверяю.*

