



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО «МЭИ»

Н.Д. Роголев

«23» сентября 2020 г.

№ 50/08 ОТ 09.01.2020 ГОДА

ПО ДОВЕРЕННОСТИ  
ПОМОЩНИК ПРОРЕКТОРА ПО НАУЧНОЙ РАБОТЕ

ВОЛКОВ А.В.

## ОТЗЫВ

Ведущей организации – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» о диссертационной работе Зеленина Александра Сергеевича на тему «Цифровые средства реального времени для испытаний устройств автоматики энергосистем на цифро-аналого-физическом комплексе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

### 1. Актуальность темы диссертации

Представленная диссертационная работа Зеленина А.С. посвящена вопросу создания и воспроизведения математических моделей устройств противоаварийного управления на цифро-аналого-физическом комплексе с целью повышения качества моделирования переходных процессов, получаемых на физических моделях энергосистемы.

Физическое моделирование на сегодняшний день широко применяется при исследованиях устройств автоматического управления и регулирования, в том числе: автоматических регуляторов возбуждения, микропроцессорных устройств автоматики (быстродействующий автоматический ввод резерва – БАВР, автоматика ограничения повышения частоты – АОСЧ; автоматика ограничения снижения частоты – АОСЧ), систем группового регулирования активной и/или реактивной мощности (ГРАМ, ГРНРМ, ГРАРМ) и др.

При испытаниях создаются физические модели энергосистемы, а испытываемое оборудование (промышленные и/или специализированные испытательные образцы устройств) стыкуется с соответствующими элементами моделируемой сети.

При этом, как отмечается в диссертационной работе и ряде публикаций, нередко встает задача воспроизведения работы сложных систем управления, регулирования или автоматики, установленных в моделируемой области, отсутствие учета которых может существенно влиять на результаты испытаний. Описание работы таких устройств обычно передается в виде алгоритмов функционирования, которые могут быть сведены к математическим моделям устройств.

Поэтому целью диссертационной работы Зеленина Александра Сергеевича стала разработка методов и способов реализации математических моделей устройств автоматики энергосистем, функционирующих в режиме реального времени, для использования в составе физических моделей энергосистем при исследованиях. Таким образом, тема и задачи диссертационной работы актуальны и имеют практическое значение.

## **2. Содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений, списка литературы из 60 источников, списка условных обозначений. Общий объем – 174 страницы, включая 70 рисунков и 11 таблиц.

**Во введении** обоснован выбор темы, приведена цель и задачи диссертационной работы и их актуальности, указана научная новизна и практическая ценность результатов выполненных научных исследований.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена решению задачи учета динамических свойств измерительного тракта устройств автоматики энергосистем. Созданные аналитические выражения позволяют учитывать свойства измерительного тракта устройств автоматики энергосистемы, в частности, устройств автоматического регулирования, для которых количественное совпадение частотных характеристик важно с точки зрения выбора/оптимизации параметров настройки. Разработанное математическое описание способов учета измерительных органов используется впоследствии при разработке средств моделирования для цифро-аналого-физического комплекса. Приведено описание разработанного метода измерения амплитуды, фазы и частоты напряжения прямой последовательности.

**Вторая глава** посвящена разработке методики получения экспериментальных частотных характеристик (ЭЧХ) автоматических регуляторов возбуждения (АРВ). На основе теоретических положений создан испытательный стенд, функционирующий в режиме реального времени и позволяющий получать ЭЧХ промышленных образцов АРВ в замкнутом контуре регулирования. Предложенный подход позволил получать ЭЧХ без модификации программной части АРВ, что потребовалось бы для ряда моделей регуляторов при получении ЭЧХ в разомкнутом контуре. Разработанная методика была апробирована, результаты, полученные экспериментально, сравнивались с аналитически полученными для заданной математической модели. Приведено описание аналогичных экспериментов для промышленных устройств АРВ синхронных генераторов и выполнено сравнение ЭЧХ с частотными характеристиками математических моделей, декларируемых их производителями. Подтверждена необходимость корректного учета измерительного тракта устройств АРВ, основные положения и аналитические выражения для которого сформулированы в первой главе. Важным аналитическим результатом, полученным в

главе, является возможность вычисления по экспериментальным данным характеристик для одновременно работающих каналов путем решения систем уравнений.

**Третья глава** посвящена разработке *программного* средства для моделирования устройств автоматики энергосистем при испытаниях, проводимых на физических моделях. Разработанные и описанные в первой главе способы измерений параметров электроэнергетического режима были реализованы в виде программных алгоритмов цифровой обработки сигналов средства моделирования, что позволило сформировать измерительные органы для моделей устройств автоматики энергосистем. Программное обеспечение позволяет формировать алгоритмические схемы функционирования устройств без перепрограммирования, что делает разработанное программное средство универсальным и простым в использовании. Для подтверждения качества моделирования и сформированных в первой и второй главах положений выполнена апробация работы программного средства посредством анализа частотных характеристик каналов регулирования моделируемого с помощью разработанного программного средства АРВ.

**Четвертая глава** посвящена вопросу создания микропроцессорного (МП) средства моделирования устройств автоматики энергосистем. Производятся аналогичные оценки точности моделирования, алгоритмы цифровой обработки сигналов реализуются с использованием МП устройства. Применение МП средств моделирования позволяет более детально воспроизводить работу тех или иных моделей в виду большего значения частоты дискретизации работы (по сравнению с программным средством). Реализация измерительных алгоритмов цифровой обработки сигналов в виде алгоритмических схем позволяет при наличии необходимости выполнять их модификацию для повышения степени соответствия работы реализуемой модели натурным устройствам.

**Заключение** содержит обобщенные результаты выполненного исследования. Приведены выводы о необходимости использования методики получения ЭЧХ для проверки математических моделей автоматических регуляторов возбуждения. Даны рекомендации по использованию программного и микропроцессорного средства моделирования устройств автоматики энергосистем при испытаниях, проводимых на физических моделях.

### **3. Научная новизна**

1. Разработан способ получения экспериментальных частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения, учитывающий одновременную работу нескольких каналов регулирования и их измерительных трактов.
2. Разработан метод, позволяющий создавать в виде алгоритмических схем и реализовывать в режиме реального времени модели устройств автоматики энергосистем программными и микропроцессорными средствами моделирования.

#### **4. Практическая значимость работы**

Практическая значимость работы Зеленина А.С. определяется тем, что разработанный стенд получения экспериментальных частотных характеристик автоматических регуляторов возбуждения сильного действия синхронных генераторов используется в подготовке нормативной документации (описания моделей) к сертификации отечественных и зарубежных АРВ. Экспериментальные частотные характеристики используются при верификации математических моделей АРВ на соответствие критериям, изложенным в СТО 59012820.29.160.20.001-2012 АО «СО ЕЭС» «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильного действия синхронных генераторов». Как отмечается автором диссертационной работы, большинство моделей АРВ, предоставляемых из производителями, содержат существенные упрощения, которые могут, в том числе, приводить к неверному выбору настроек АРВ на цифровых моделях энергосистем (отмечено в одной из публикаций автора).

Созданные цифровые средства моделирования устройств автоматики энергосистем, функционирующие в режиме реального времени, используются при создании физических моделей энергосистем в АО «НТЦ ЕЭС».

#### **5. Достоверность результатов исследования**

Достоверность полученных в работе Зелениным А.С. обеспечена совпадением результатов, полученных аналитически (на основе теории автоматического управления и сформированных положений), и результатов, полученных экспериментально. Разработанные методики и средства моделирования внедрены и используются в научно-практической деятельности АО «НТЦ ЕЭС», а корректность их реализации описана в диссертационной работе.

#### **6. Общая характеристика работы и ее научных положений**

Анализ диссертационной работы Зеленина А.С. показал, что тема диссертации соответствует пунктам паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

п.6. – «разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;

п. 9 – «разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;

п. 13 – «разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Автореферат достаточно полно отражает выполненные в диссертации исследования и полученные результаты. Положения, выносимые на защиту, подробно раскрыты в диссертационной работе, предложенные решения аргументированы.

## **7. Соответствие диссертации критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней**

Диссертация Зеленина Александра Сергеевича «Цифровые средства реального времени для испытаний устройств автоматики энергосистем на цифро-аналого-физическом комплексе», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертационным работам, а именно:

п. 9. диссертация является законченной научно-квалифицированной работой. В работе приведено решение научно-практической задачи, направленной на развитие физического моделирования энергосистем и развития электроэнергетической отрасли знаний.

По п. 10. Диссертация написана автором самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, обладает внутренним единством.

В приложении к диссертации приведены акты внедрения научных результатов диссертации, описано применение разработанных средств моделирования на физических моделях энергосистемы.

По п.п. 11-13. По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, включая 4 в научных рецензируемых изданиях (Научно-технические ведомости СПбГПУ, Электрические станции, Известия НТЦ ЕЭС), входящих в список рекомендуемых ВАК РФ.

По п. 14. В диссертации сделаны необходимые ссылки на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов.

## **8. Замечания и вопросы**

- 8.1. Необходимо сопоставить результаты оценивания параметров частотных характеристик используемым методом с результатами, получаемыми известными методами, например спектральным методом.
- 8.2. Каким образом обеспечивает идентичность физических моделей СГ (малые машины) и реальных генераторов (существенно более мощных)? Пример: параметры СГ в сертификационных схемах. (Стр. 18.).
- 8.3. На стр. 57 насколько справедлива фраза «Были предложены методы измерения частоты напряжения по переходам через «0» фазных напряжений, измерение частоты по коэффициентам Фурье для одной фазы, измерение частоты по коэффициентам Фурье для трех фаз»? Эти методы известны давно. Насколько эти методы чувствительны к различным шумам, которые всегда присутствуют во входных сигналах? Особенно «измерение частоты напряжения по переходам через «0» фазных напряжений».

## 9. Заключение по работе

Приведенные замечания не снижают положительной оценки представленной диссертации (диссертационной работы), посвященной решению актуальной научной и практической задачи адаптивного управления возбуждением синхронных генераторов.

Оценивая диссертационную работу Зеленина А.С. в целом можно заключить, что по своему объему, структуре и направленности диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на достаточно высоком уровне и содержащее новые научные и практические результаты. Основные этапы работы, выводы и результаты представлены в автореферате. Автореферат соответствует основному содержанию работы.

Диссертационная работа Зеленина Александра Сергеевича «Цифровые средства реального времени для испытаний устройств автоматики энергосистем на цифро-аналого-физическом комплексе» соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. пост. Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней»), в том числе требованиям пунктов 9-14, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук., а её автор, Зеленин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Отзыв на диссертационную работу был подготовлен на кафедре Электроэнергетические системы ФГБОУ ВО «МЭИ».

Отзыв на диссертационную работу Зеленина Александра Сергеевича обсужден и одобрен на заседании кафедры Электроэнергетические системы ФГБОУ ВО «МЭИ», протокол №03 от 23 сентября 2020 г.

Заместитель заведующего кафедрой Электроэнергетические системы  
ФГБОУ ВО «МЭИ»

к.т.н., доцент



Насыров Ринат Ришатович

тел. +7 (926) 284-42-18, эл. почта: [nasyrovrr@mpei.ru](mailto:nasyrovrr@mpei.ru)

Доцент кафедры Электроэнергетические системы  
ФГБОУ ВО «МЭИ»

к.т.н., доцент



Кузнецов Олег Николаевич

тел. +7 (916) 573-43-75, эл. почта: [kuznetsovon@mpei.ru](mailto:kuznetsovon@mpei.ru)

Доцент кафедры Электроэнергетические системы  
ФГБОУ ВО «МЭИ»

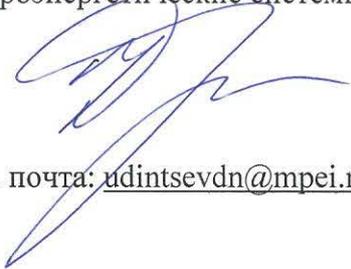
к.т.н., доцент



Шульженко Сергей Витальевич

тел. +7 (903) 682-51-80, эл. почта: [shulzhenkosv@mpei.ru](mailto:shulzhenkosv@mpei.ru)

Профессор кафедры Электроэнергетические системы  
энергосистем  
ФГБОУ ВО «МЭИ»  
д.т.н., профессор



Удинцев Дмитрий Николаевич

тел. +7 (926) 245-48-53, эл. почта: [udintsevdn@mpei.ru](mailto:udintsevdn@mpei.ru)

Доцент кафедры Релейная защита и автоматизация  
энергосистем  
ФГБОУ ВО «МЭИ»  
к.т.н., доцент



Климова Татьяна Георгиевна

тел. +7 (916) 178-72-56, эл. почта: [klimovatg@mpei.ru](mailto:klimovatg@mpei.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»»  
(ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»)  
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14  
Телефон: +7 495 362-70-01 (Ректор),  
+7 495 362-75-60 (справочная)  
Адрес электронной почты: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru)  
Сайт: <https://mpei.ru>

**СВЕДЕНИЯ**  
**о ведущей организации**

<p>Полное наименование организации, сокращенное наименование организации</p>	<p>Место нахождения (страна, город)</p>	<p>Почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон (при наличии); адрес электронной почты (при наличии), адрес официального сайта в сети «Интернет» (при наличии)</p>
<p>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)</p>	<p>Российская федерация, г. Москва</p>	<p>111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14 Тел.: +7 (495) 362-75-60; Факс: +7 (495) 362-89-38 E-mail: universe@mpei.ac.ru http:// mpei.ru/</p>
<p>Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций):</p>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Арцишевский Я. Л., Климова Т. Г., Серов Д. М. Выбор схемно-режимных ситуаций для проверки функционирования автоматического регулятора возбуждения // Электричество, 2016, № 5, с. 4-7.</li> <li>2. А.Г.Долгополов. Способы управления и алгоритмы работы ДГР на основе УШРТ // Энергетик № 5, 2013 г.</li> <li>3. J.L. Artsyshevsky, T.G. Klimova, B.K. Maximov, O.O. Nikolaeva, Techniques of control, analysis and visualization of automatic exciter controller functioning in synchronous machine // Electric Power Systems Research, 2017, №144. PP. 175–184</li> <li>4. Дьяков А.Ф., Климова Т.Г., Максимов Б.К. Методики анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения СГ и примеры их использования в режиме реального времени // Электрические станции №6, 2015. С. 39-45.</li> <li>5. Я.Л. Арцишевский, А.В. Жуков, Е.И. Сацук, А.И. Расщепляев Использование программно-аппаратного комплекса RTDS для анализа функционирования автоматических регуляторов возбуждения. Влияние структуры и параметров АРВ на колебательные свойства АСР // Энергетик № 6, 2014 г.</li> <li>6. А.И. Расщепляев, Климова Т.Г., Арцишевский Я.Л., Жуков А.В., Сацук Е.И., Анализ влияния параметров настройки АРВ СГ на уровень демпфирования низкочастотные колебания в ЭЭС // Сборник докладов Международной конференции и выставки «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017». 25-28 апреля 2017, Санкт-Петербург.</li> </ol>		

Сведения заверяю:

Врио проректора по научной работе

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



\_\_\_\_\_ (подпись)

\_\_\_\_\_ / А.В. Волков /