

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль 13.06.01 Электро- и теплотехника 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Школа Инженерная школа энергетики

Отделение Отделение электроэнергетики и электротехники

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада

**Всерезимная верификация средств моделирования  
электроэнергетических систем**

УДК 621.311.004.13-047.43:519.86

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A4-42	Суворов Алексей Александрович		

Руководитель профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующая отделом аспирантуры и докторантуры	Барская Анна Валерьевна	К.т.н., доцент		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭЭ ИШЭ	Дементьев Юрий Николаевич	К.т.н., доцент		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭЭ ИШЭ	Гусев Александр Сергеевич	Д.т.н., профессор		

Томск – 2018 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Гусев Александр Сергеевич**

**Официальные рецензенты:** **Хрущев Юрий Васильевич,**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
Отделения электроэнергетики и электротехники  
Инженерной школы энергетики «Национального  
исследовательского Томского политехнического  
университета».

**Копьев Владимир Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
Северского технологического института - филиала  
федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ».

Защита состоится 01 июня 2018 года в 10:00 на заседании Государственной экзаменационной комиссии по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника, профиль 05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 323.

С научным докладом можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53а

Секретарь ГЭК

А.Ю. Юшков

**Аннотация научного доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы.**

Надежность и эффективность функционирования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) непосредственно зависят от решения широко спектра задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС, уровень и качество которого определяется полнотой и достоверностью используемой при этом информации о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных и аномальных режимах их работы.

Известная специфика и сложность современных ЭЭС исключают возможность получения всей необходимой информации для решения указанных задач натурным путем и посредством физического моделирования. Поэтому основным способом ее получения служит математическое моделирование, полнота, достоверность и оперативность которого определяются двумя факторами:

- адекватностью применяемых математических моделей всего значимого оборудования и ЭЭС в целом;
- способностью средств решения осуществлять реализацию образуемой совокупной математической модели ЭЭС с гарантированной приемлемой точностью и оперативностью, в том числе в реальном времени, на интервале протекания квазиустановившихся и переходных процессов, в общем случае неограниченном.

Достигнутый уровень физико-математического представления и описания процессов в элементах и оборудовании в целом, позволяет синтезировать высокоадекватные математические модели, которые бездекомпозиционно описывают весь непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и соответственно в ЭЭС в целом. Однако получаемая при этом совокупная математическая модель любой реальной ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, плохо обусловленную на условиях применимости методов численного интегрирования дифференциальных уравнений, которые неминуемо применяются в доминирующих в настоящее время многочисленных сугубо цифровых средствах расчета режимов и процессов в ЭЭС, что приводит к

необходимости использования в этих средствах существенных упрощений и ограничений:

- декомпозиции объективно единого и непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов ЭЭС, в соответствии с которой условно выделяются и отдельно рассчитываются с помощью различных математических моделей и методов решения установившиеся и различные стадии переходных процессов;
- применения вместо трехфазных однолинейных расчетных схем замещения и упрощений математических моделей элементов, особенно электросетевых в виде статических моделей и соответствующих алгебраических уравнений;
- ограничивается интервал воспроизведения процессов.

Кроме этого, независимо от указанных упрощений и ограничений всегда неизвестной остаётся действительная ошибка численного решения, что в совокупности с отмеченными упрощениями и ограничениями порождает проблему полноты и достоверности информации, получаемой с помощью используемых средств расчета режимов и процессов в ЭЭС. При этом недостижимым является также реальный масштаб времени воспроизведения процессов при моделировании ЭЭС реальной размерности. В связи с вышеизложенным, актуальной и обязательной является верификация данных средств.

Существующий подход к верификации заключается в сравнении результатов моделирования с натурными данными процесса, полученными от оперативно-информационных комплексов (ОИК), SCADA-систем, аварийных регистраторов, системы векторных измерений. Однако обозначенная проблематика сугубо численного моделирования ЭЭС определяет необходимость верификации результатов каждого решения, а ввиду необозримого разнообразия схемно-режимных состояний, возмущений ЭЭС и др., и соответственно процессов, требуемая для сравнения приемлемо ограниченная база натурных данных нереализуема в обозримой перспективе,

поэтому используемый в настоящее время подход к верификации средств моделирования ЭЭС оказывается принципиально ограниченным, не гарантирующим использование проверяемых средств для ситуаций отличных от верифицируемой, тем более даже при наличии необходимых натуральных данных требуется адаптация результатов расчета к натурным данным, которая осуществляется путем произвольного варьирования параметров математических моделей элементов. Данные выводы подтверждаются опубликованными результатами выполненной в последние годы такой верификации, в частности в США, в Европе и в российских ЭЭС. Кроме этого, подтверждением использования недостаточно полной и достоверной необходимой информации является обобщённая статистика системных аварий в мировой электроэнергетике, согласно которой 50% таких аварий происходит из-за неправильных действий релейной защиты, автоматики и ошибочных или запоздалых действий диспетчерского персонала. При этом по мере развития и усложнения ЭЭС увеличивается вероятность тяжелых системных аварий.

Согласно вышеизложенному, единственным способом решения проблемы всережимной верификации средств моделирования ЭЭС является использование для этих целей высокоадекватных средств моделирования ЭЭС, обладающих свойствами бездекомпозиционного непрерывного воспроизведения единого спектра квазиустановившихся и переходных процессов в реальном времени на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой точностью. Перечень требуемых свойств и возможностей реализуем только с помощью комплексного подхода, подразумевающего для каждого значимого аспекта данной проблемы разработку и применение наиболее эффективных методов, способов и средств, агрегированное применение которых обеспечит радикальное решение проблемы в целом:

- использование высокоадекватных математических моделей для каждого вида основного и вспомогательного оборудования полно и достоверно

описывающих единый непрерывный спектр значимых квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом;

- применение методически точного метода (аналоговое моделирование) непрерывного неявного интегрирования на неограниченном интервале указанных математических моделей.

В связи с тем, что в используемых средствах для всего единого непрерывного спектра процессов используются одна и та же высокоадекватная математическая модель и методически точный метод её решения, их верификация возможна только по данным любого квазиустановившегося режима реальной ЭЭС, получаемого с помощью ОИК, SCADA-систем и т.п., а полученные результаты верификации, в связи с указанными свойствами применяемых средств, можно распространять на весь значимый спектр режимов и процессов, включая коммутационные перенапряжения. Таким образом, информацию, получаемую с помощью обозначенных средств, можно использовать в качестве эталонных данных для сравнения с результатами цифрового моделирования, что позволит определить точность воспроизведения требуемых процессов и диапазон применимости верифицируемого средства моделирования ЭЭС. Однако, создаваемое средство, эвристически очевидно, будет представлять весьма сложную и дорогостоящую программно-техническую систему, промышленное изготовление и внедрение которой является перспективной задачей, но разработанный в ТПУ экспериментальный образец Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем может успешно решить задачу всережимной верификации средств моделирования ЭЭС.

### **Структура и объем научно-квалификационной работы.**

Научно-квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 131 наименования, содержащих 138 страниц, 12 таблиц, 63 рисунка, а также трех приложений на 12 страницах.