УТВЕРЖДАЮ:
И. о. проректора по научной работе и инновациям федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
_____ Оствальд Р.В.
«26» 04 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация **Суворова Алексея Александровича «Всережимная верификация средств моделирования электроэнергетических систем», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы»,** выполнена в Отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Суворов Алексей Александрович обучался в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по специальности 05.14.02 - Электрические станции и электроэнергетические системы и работал ассистентом в Отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Срок окончания аспирантуры – 2018 год.

Суворова А.А. в 2014 г. окончил с отличием специалитет федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский

политехнический университет» по специальности «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

Справка об обучении в аспирантуре и сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2018 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель – Гусев Александр Сергеевич, доктор технических наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы», профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

По итогам рассмотрения и обсуждения диссертационной работы на заседании научного семинара Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» принято следующее **заключение:**

Диссертационная работа Суворова Алексея Александровича «Всережимная верификация средств моделирования электроэнергетических систем» посвящена решению актуальной для современной электроэнергетики проблемы всережимной верификации программно-вычислительных комплексов (ПВК) расчета режимов и процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС). Ввиду неизбежно применяемых в данных средствах существенных упрощений и ограничений, обусловленных ограничительными условиями применимости методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, являющихся вычислительным ядром всех современных ПВК, которые в совокупности с принципиально присущей данным методам методической ошибкой численного решения порождают проблему полноты и достоверности информации о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения сложных и важных задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС. В связи с этим актуальной и обязательной становится верификация данных ПВК, которая в рамках существующего подхода ориентирована на использования натурных данных, необходимая приемлемо ограниченная совокупность которых нереализуема в связи с

очевидной спецификой ЭЭС. Поэтому из-за невозможности приемлемо достоверных численных расчетов нормальных и анормальных режимов и процессов в ЭЭС и отсутствия в настоящее время и обозримой перспективе необходимых для всережимной верификации натурных данных, автором предложено иное направление решения данной проблемы, заключающееся в использовании альтернативной натурным данным информации, получаемой от модельного эталона, созданного в рамках комплексного подхода, основанного на свойствах и возможностях гибридного моделирования ЭЭС, позволяющего для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом. В соответствии с обозначенным подходом разработана концепция всережимной верификации ПВК расчёта режимов и процессов в ЭЭС и средства её осуществления. Результаты экспериментальных исследований подтверждают свойства и возможности созданных средств, позволяющих обосновано определить конкретные области применения используемых ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС; уровень полноты и достоверности получаемых результатов и оказываемое на них влияние применяемыми декомпозициями режимов и процессов, упрощениями математических моделей, ограничениями интервала решения и методической ошибкой решения, и соответственно адекватность принимаемых с помощью таких расчетов решений важных и сложных практических задач.

Личное участие соискателя в получении результатов.

Представленные в диссертационной работе результаты анализа, выявления и обоснования проблемы всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также разработка концепции решения данной проблемы, средств её реализации и их экспериментальные исследования, подтверждающие определяемые концепцией свойства и возможности, получены лично автором.

Степень достоверности проведенных исследований.

Достоверность результатов исследования базируется на использовании классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теоретически обоснованных и всесторонне апробированных независимыми исследованиями математических моделей, а также соответствием имеющимся натурным данным.

Научная новизна результатов проведённых исследований:

1) выявлены, теоретически и экспериментально обоснованы причины существования проблемы всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС и её неразрешимость в рамках существующего подхода, ориентированного на использования натурных данных, необходимая приемлемо ограниченная совокупность которых нереализуема в обозримой перспективе, а также направление её решения;

2) предложено использование для всережимной верификации ПВК в качестве источника полной и достоверной информации о квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом модельного эталона, созданного в рамках комплексного подхода и осуществляющего бездекомпозиционное методически точное воспроизведение единого непрерывного спектра квазиустановившихся и переходных процессов в реальном времени на неограниченном интервале с гарантированной приемлемой инструментальной точностью в оборудовании и ЭЭС в целом;

3) обоснована и сформулирована концепция решения проблемы всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, основанная на использовании модельного эталона, и методика её осуществления;

4) созданы экспериментальные средства осуществления концепции всережимной верификации ПВК и методики её реализации на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС, позволяющие оценить полноту и достоверность расчетов режимов и процессов в ЭЭС реальной размерности с помощью доминирующих в настоящее время ПВК с полноценным учетом взаимовлияния непрерывного спектра процессов в оборудовании и ЭЭС в целом.

Практическая значимость результатов проведённых исследований.

Разработанные средства всережимной верификации позволяют обосновано оценивать полноту и достоверность получаемой с помощью ПВК информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС в целом и влияние на эти характеристики применяемых в настоящее время декомпозиций режимов и процессов, упрощений математических моделей, ограничений интервала решения, а также методической ошибки решения. Кроме того, полученные результаты позволяют определить конкретные области применения используемых средств расчета режимов и процессов в ЭЭС и адекватность принимаемых с помощью них решений: оценка статической и динамической устойчивости, действительных условий работы силового оборудования ЭЭС, адекватной настройки средств релейной защиты,

технологической и противоаварийной автоматики, действительных условий работы силового оборудования ЭЭС, качества электроэнергии и др.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 13 международных и всероссийских научно-технических конференциях и конкурсах: IEEE Power & Energy Society International Conference on Innovative Smart Grid Technologies, Europe (Италия, г. Турин, 2017 г.); XI International Forum on Strategic Technology (г. Новосибирск: НГТУ, 2016 г.); 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 (г. Челябинск: ЮУрГУ, 2017 г.); VII Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Казань: КГЭУ, 2016 г); VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск: НГТУ, 2015 г.) и др.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах.

Все основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 34 работах, в том числе в 9 статьях в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ, в 16 работах в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, а также получено два патента на изобретения.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Андреев М.В., Ставицкий С.А. Проблема достоверности расчетов токов коротких замыканий в электроэнергетических системах и средства их всережимной верификации // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. - №2. С. 13-25.

2. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В. Проблема верификации средств моделирования электроэнергетических систем и концепция ее решения // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2017 - №.1. - С. 11-23.

3. **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Гусев А.С., Васильев А.С., Сулайманов А.О. Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства её решения (часть 1) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. – № 5. С 32–46.

4. **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Рубан Н.Ю. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. –

2017. № 5 (752). С. 18– 27.

5. **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Рубан Н.Ю. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 94–104.

6. **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Рубан Н.Ю., Сулайманов А.О. Исследование влияния управляемых шунтирующих реакторов на режимы работы системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. Т. 327. № 7. С. 46–57.

7. **Суворов А.А.**, Аскаров А.Б., Рубан Н.Ю., Андреев М.В., Уфа Р.А. Анализ возможности применения всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем в качестве программно-аппаратного комплекса настройки и сертификации автоматических регуляторов возбуждения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. No 9. С. 114–124.

8. **Суворов А.А.**, Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Исследование измерительной части цифровых устройств релейной защиты // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2017. №5. С. 92-98.

9. **Суворов А.А.**, Андреев М.В., Рубан Н.Ю. Математическое моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора в среде Matlab Simulink // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2018 - Т. 22 - №. 1 (132). - С. 134-150.

Статьи в издании, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science

1. **Suvorov A.**, Andreev M., Ruban N., Ufa R. Methodology for validation of electric power system simulation tools // Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2017 IEEE PES: proceedings, Torino, Italy, 26-29 Sept., 2017. - New York: IEEE, 2017 - p. 1-6.

2. **Suvorov A.A.**, Ufa R.A., Borovikov Y.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Vasilev A.S., Andreev M.V., Ruban N.Y. A hybrid simulation model for VSC HVDC // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. – Vol. 7(5). – pp. 2242–2249.

3. **Suvorov A.**, Andreev M., Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Ufa R., Beměš J., Králík T. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission & Distribution, Volume 12, Issue 1, 02 January 2018, p. 133 – 141.

4. **Suvorov A.**, Borovikov Y., Gusev A., Sulaymanov A., Andreev M., Ruban N., Ufa R. Increase in simulation accuracy of self-starting motors used for relay protection and automatic equipment // Electrical Engineering. 2017. Vol. 99(3), pp. 959-968.

5. **Suvorov A.,** Andreev M. Validation of short-circuit current

calculations in electric power system // MATEC Web of Conferences. – 2017 - Vol. 141, Article number 01043. - p. 1-5.

6. **Suvorov A.A.**, Gusev A.S., Sulaymanov A.O. Development Concept of Guaranteed Verification Electric Power System Simulation Tools and Its Realization // MATEC Web of Conferences . - 2015 - Vol. 37, Article number 01023. - p. 1-4.

7. **Suvorov A.A.**, Gusev A.S., Sulaymanov A.O. Measure of reliability tools for simulating electric power systems and alternative approach of their verification // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM): proceedings, Chelyabinsk, May 19-20, 2016. - New York: IEEE, 2016 - p. 1-4.

8. **Suvorov A.A.**, Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Sulaymanov A.O., Ufa R.A. Impact of measuring part elements of transformer differential protection on input signal processing // Problemele energeticii regionale, Volume 2, 2017, pp. 1-12.

9. **Suvorov A.A.**, Gusev A.S., Sulaymanov A.O. Using Controlled Shunt Reactors for Voltage Stabilization on the Example of Real Electric Power System // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2015 - Vol. 93 - №. 1, Article number 012016. - p. 1-6.

10. **Suvorov A.A.**, Andreev M.V., Sulaymanov A.O. Decision Support System for Dispatching Personnel Of Intelligent Electric Power Systems // MATEC Web of Conferences . - 2015 - Vol. 37, Article number 01001. - p. 1-4.

11. **Suvorov A.A.**, Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Suslova O.V. Approach to Creating an Information-Control System of Hybrid Power System Simulator // MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 91, Article number 01052. - p. 1-4.

12. **Suvorov A.A.**, Sulaymanova V.A., Borovikov Y.S., Andreev M.V. Software and Hardware Complex for Setting of Automatic Excitation Regulators of Turbogenerators // MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 91, Article number 01051. - p. 1-4.

13. **Suvorov A.A.**, Andreev M.V., Sulaymanov A.O. Universal Mathematical Model of Three-phase Electrical Transmission Lines // Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016, pp.172-176.

14. **Suvorov A.A.,** Ufa R.A., Vasiliev A.S., Gusev A.S., Development of hybrid model of STATCOM // Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016, pp.113-117.

15. **Suvorov A.A.**, Ufa R.A., Vasiljev A.S. Development of hybrid model of B2B HVDC // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017: proceedings, Chelyabinsk, May 16-19, 2017. - New York: IEEE, 2017 - p. 1-5.

16. **Suvorov A.A.**, Andreev M.V., Khlebov A.V. Mathematical simulation of analog-to-digital converter // MATEC Web of Conferences. – 2017 - Vol. 141, Article number 01040. - p. 1-4.

Публикации в других периодических изданиях:

1. **Suvorov A.A.**, Gusev A.S., Sulaymanov A.O. Problem of Reliability,

Verification of Electrical Power Systems Simulation and Ways of Solving it, Applied Mechanics and Materials, Vol. 792 (2015), pp. 261 - 266.

2. Суворов А.А., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В. Исследование и решение проблемы надежности и достоверности средств моделирования электроэнергетических систем // Оперативное управление в электроэнергетике. - 2017. - № 3. - с. 26-31.

Патенты РФ на изобретение:

1. Патент РФ №2638632, 14.12.2017. Комплекс поддержки принятия решений диспетчерским персоналом электроэнергетических систем // **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Сулайманова В.А.

2. Патент РФ №2606308, 10.01.2017. Бюл. № 1 Устройство для моделирования вставки постоянного тока в энергетических системах // **Суворов А.А.**, Уфа Р.А., Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Сулайманова В.А.

Материалы международных и всероссийских конференций:

1. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О. Верификация расчетов тока короткого замыкания в электроэнергетических системах // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 2-6 Октября 2017. - Саратов: СГТУ, 2017 - Т. 2 - С. 223-226.

2. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Сулайманов А.О. Методика гарантированной верификации расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах // Интеллектуальные энергосистемы: материалы IV Международного молодёжного форума. В 3т., Томск, 10-14 Октября 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 367-370.

3. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Сулайманов А.О. Исследование и решение проблемы надежности и достоверности средств моделирования электроэнергетических систем // Труды VII международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», 19 – 23 сентября 2016, Казань. – В 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. - с.182 – 185.

4. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Сулайманов А.О. Концепция всережимной верификации средств моделирования электроэнергетических систем // Труды VI международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т. Т. 1. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2015. - с.217 – 220.

5. **Суворов А.А.**, Гусев А.С., Сулайманов А.О. Проблема достоверности средств моделирования электроэнергетических систем и пути их верификации //Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых "Электротехника. Электротехнология. Энергетика" в 3 ч., Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015, 3-ая часть, с. 167-171.

Диссертация «Всережимная верификация средств моделирования электроэнергетических систем» является законченной научно-

квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. При выполнении диссертационной работы Суворов А.А. проявил себя сформировавшимся высококвалифицированным научно-педагогическим сотрудником, способным ставить и решать сложные и актуальные задачи в области электроэнергетики.

Диссертация Суворова А.А. «Всережимная верификация средств моделирования электроэнергетических систем» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы».

Заключение принято на заседании научного семинара Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 24 чел., из них докторов наук по специальности 05.14.02 - 4 чел.

Результаты голосования: «за» - 24 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Протокол № 3 от «26» апреля 2018 г.

Председатель научного семинара
профессор Отделения электроэнергетики и
электротехники
Инженерной школы энергетики
Национального исследовательского Томского
политехнического университета
д.т.н., профессор — Б.В. Лукутин

Секретарь научного семинара
профессор Отделения электроэнергетики и
электротехники
Инженерной школы энергетики
Национального исследовательского Томского
политехнического университета
д.т.н., с.н.с. — А.А. Сивков