

На правах рукописи



Суворов Алексей Александрович

**ВСЕРЕЖИМНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2018

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 оппоненты: **Фишов Александр Георгиевич,**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы»;

Сацук Евгений Иванович,
доктор технических наук, доцент, акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы», начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Защита состоится 11 декабря 2018 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией 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 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «__» октября 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.10



А.В. Прохоров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Надежность и эффективность решения широкого спектра задач проектирования, исследования, эксплуатации, совершенствования, развития электроэнергетических систем (ЭЭС) и, соответственно, их функционирования зависят от полноты и достоверности используемой при этом информации о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Ввиду недопустимости натурных экспериментов в ЭЭС, особенно аварийных, и невозможности, из-за сложности, полноценного физического моделирования ЭЭС основным способом получения этой информации служит преимущественно математическое моделирование, полнота и достоверность которого определяются, прежде всего, адекватностью применяемых математических моделей оборудования и ЭЭС в целом. Однако достаточно адекватная бездекомпозиционная математическая модель любой реальной ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования, всегда содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, аналитически нерешаемую и согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений плохо обусловленную на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования. Обусловленность может быть улучшена лишь за счет снижения жесткости, дифференциального порядка и ограничения интервала решения, реализуемых только путем декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС, упрощения математических моделей оборудования и ЭЭС в целом, ограничения интервала воспроизведения процессов. При этом независимо от указанных упрощений и ограничений, всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение которой в теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений отнесено к категории фундаментальных проблем. Указанные упрощения и ограничения в совокупности с неопределимой методической ошибкой решения порождают неразрешимую в рамках методологически одностороннего сугубо численного подхода проблему полноты и достоверности такого моделирования. Поскольку данную проблематику неизбежно наследуют все реализующие это моделирование многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в ЭЭС, необходимой становится их верификация, осуществление которой в настоящее время возможно в рамках сравнения результатов расчетов с имеющимися натурными данными. Необходимость верификации данных средств моделирования ЭЭС подтверждают также опубликованные результаты такого

рода сравнений, выполненных в последние годы в США, Европе и России, которые демонстрируют значительные несоответствия натурным данным. Вместе с тем очевидно, что независимо от развитости средств измерения и регистрации режимов и процессов в ЭЭС (оперативно-информационных комплексов (ОИК), Supervisory control and data acquisition (SCADA), систем мониторинга переходных режимов (СМПР) и др.), получение необходимых для всережимной верификации натурных данных неосуществимо, ввиду широкого спектра возможных схемно-режимных состояний ЭЭС, а также нормальных, аномальных возмущений и неопределенной вероятности их сочетания и возникновения. Поэтому возможности верификации ПВК, ориентированной на использование натурных данных, являются принципиально и неприемлемо ограниченными. Существование и нерешенность обозначенной проблемы подтверждается также обобщённой статистикой системных аварий в мировой электроэнергетике, согласно которой 50% таких аварий происходит из-за неправильных действий релейной защиты, автоматики и диспетчерского персонала, связанных с использованием неполной и малодостоверной информации, получаемой с помощью различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

В связи с вышеизложенным решение задачи гарантированной всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, которому посвящена данная работа, является весьма актуальным для мировой электроэнергетики.

Степень разработанности темы исследования.

Ввиду актуальности проблемы получения достаточно полной и гарантированно достоверной информации по всему непрерывному спектру значимых нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом, а также оценки этих характеристик, различным аспектам её решения посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: Аюев Б.И., Веников В.А., Герасимов А.С., Гробовой А.А., Гусев А.С., Есипович А.Х., Жуков А.В., Куликов Ю.А., Смирнов А.Н., Строев В.А., Carreras B.A., Ciapessoni E., Kostarov D.N., Mittelstadt W.A., Phadke A., Sattinger W., Taylor C.W. и др. Однако, актуальная в настоящее время задача всережимной верификации современных ПВК расчета режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС в целом по-прежнему остаётся нерешенной.

Цель и задачи работы.

Целью работы является создание средств гарантированной всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

Для достижения данной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ свойств и возможностей современных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС и обоснование необходимости их всережимной верификации, а также причин её неосуществимости в рамках существующего подхода.

2. Разработка концепции и средств гарантированной всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

3. Разработка методики реализации концепции всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

4. Проведение комплекса экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных концепции и средств всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, обеспечивающие успешное решение исследуемой проблемы и достижение цели диссертационной работы.

Идея работы.

Радикальным решением проблемы получения полной и достоверной информации о нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом является создание средств моделирования ЭЭС, обладающих свойствами бездекомпозиционного достаточно достоверного воспроизведения на неограниченном интервале, в том числе в реальном времени, непрерывного значимого спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Эвристически очевидно, что создание такого рода средств возможно только на основе комплексного подхода, представляющего в широком смысле гибридное моделирование, позволяющего для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом. Однако такие средства неизбежно образуют уникальный сложный программно-технический комплекс гибридного типа, промышленное изготовление и широкомасштабное внедрение которого представляет собой весьма дорогостоящий и длительно реализуемый бизнес-проект, осуществление которого в настоящее время может рассматриваться как некоторая возможная перспектива. Вместе с тем созданный экспериментальный образец таких средств может служить модельным эталоном (МЭ) для получения достаточно полной и достоверной информации по всему значимому спектру нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и любой реальной ЭЭС в целом, необходимой для всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС. Данную идею позволяет реализовать экспериментальный образец разработанного в научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета Всережимного моделирующего комплекса

реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), обладающего всеми вышеуказанными свойствами и возможностями, который может успешно использоваться в качестве МЭ.

Научная новизна работы:

1) выявлены и обоснованы необходимость всережимной верификации существующих ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также причины её нереализуемости в рамках существующего подхода, ориентированного на использование натурных данных;

2) предложено альтернативное существующему направление решения проблемы всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, основанное на использовании в качестве источника необходимой для всережимной верификации информации о нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессах в оборудовании и ЭЭС в целом модельного эталона - экспериментального образца ВМК РВ ЭЭС (МЭ - ВМК РВ ЭЭС), созданного на основе комплексного подхода, представляющего в широком смысле гибридное моделирование;

3) обоснована и сформулирована концепция всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также методика её осуществления;

4) выполнен комплекс экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных средств, позволяющие осуществлять гарантированную всережимную верификацию различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, обосновано определять уровень полноты и достоверности результатов таких расчетов и оценивать влияние применяемых упрощений, ограничений и методической ошибки решения.

Теоретическую значимость работы определяют:

1) результаты выявления и обоснования необходимости всережимной верификации существующих ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также причин её нереализуемости в рамках используемого подхода, ориентированного на использование натурных данных, и направления решения данной проблемы, основанного на использовании в качестве источника достаточно достоверной всережимной информации МЭ - ВМК РВ ЭЭС;

2) обоснованная концепция всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС;

3) сформулированная в соответствии с предложенной концепцией методика её реализации.

Практическая значимость работы.

Разработанные средства всережимной верификации позволяют гарантированно оценивать полноту и достоверность получаемой с помощью различных ПВК информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС в

целом, а также влияние на эти характеристики применяемых в данных средствах декомпозиций режимов и процессов, упрощений математических моделей, ограничений интервала воспроизведения и методической ошибки решения. Результаты такой верификации обеспечивают возможность обоснованной оценки надежности и эффективности решений различных задач проектирования, исследования, эксплуатации, совершенствования и развития ЭЭС, осуществляемых с использованием информации, получаемой с помощью многочисленных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

Методы исследования: теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений и определяемые ею ограничительные условия применимости методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, метод непрерывного неявного методически точного параллельного интегрирования дифференциальных уравнений, методы математического и физического моделирования, методы объектно-ориентированного программирования для формирования сценариев верификации, методы экспериментальных исследований, в том числе с использованием ПВК АРМ СРЗА, ПВК Eurostag, Real Time Digital Simulator (RTDS) и прошедшего всесторонние лабораторные испытания и опытную эксплуатацию экспериментального образца многопроцессорного программно-технического комплекса гибридного типа - ВМК РВ ЭЭС.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) выявление и обоснование причин существования проблемы всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также её неразрешимости в рамках существующего подхода, ориентированного на использование натурных данных;
- 2) направление решения проблемы всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, заключающееся в использовании адекватной натурным данным информации, получаемой с помощью МЭ, созданного на основе комплексного подхода, представляющего собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющего для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение обозначенной проблемы в целом;
- 3) обоснованные и сформулированные концепция всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС и методика её реализации;
- 4) результаты комплекса экспериментальных исследований, подтверждающие свойства и возможности разработанных средств, позволяющие обосновано определять полноту и достоверность расчетов режимов и процессов в

ЭЭС с помощью различных ПВК, а также влияние на них применяемых упрощений, ограничений и методической ошибкой решения.

Достоверность результатов исследования базируется на определяемых теорией методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования, определяемых официальными документами характеристиках современных ПВК, классических положениях и законах теоретической электротехники и математики, использовании метода непрерывного неявного методически точного параллельного интегрирования дифференциальных уравнений, а также теоретически обоснованных и всесторонне апробированных, в том числе независимыми исследованиями, математических моделей, и соответствиях имеющимся натурным данным.

Апробация результатов исследований.

Основные положения и результаты 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.); Общероссийский конкурс молодежных проектов в области энергетики «Энергия молодости» (диплом победителя, г. Москва, 2016 г.) и др.

Публикации.

Все основные положения и результаты диссертационной работы отражены 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 в двух патентах на изобретения.

Личный вклад автора.

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. Личный вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве, является преобладающим.

Реализация результатов работы.

Актуальность результатов диссертационной работы для более надежного анализа нормальных, аварийных и послеаварийных режимов и процессов в магистральных сетях Томской ЭЭС, а также условий работы противоаварийной автоматики, в частности автоматики ликвидации асинхронного режима, в сложных переходных режимах, который осуществляется в настоящее время с помощью различных ПВК, подтверждена соответствующими актами их использования ОАО «Томские магистральные сети», АО «Институт автоматизации энергетических систем».

Кроме этого, результаты диссертационной работы используются в рамках Гранта Российского научного фонда №18-79-10006 от 02.08.2018 г. «Исследование проблемы достоверности расчетов режимов и процессов в электроэнергетических системах с активно-адаптивными сетями и распределенной генерацией и разработка методики их всережимной верификации» и государственного контракта: Гос. задание «Наука» №13.5852.2017/БЧ от 01.02.2017 г. «Разработка концепции всережимной верификации расчётов режимов и процессов в электроэнергетических системах и средств её реализации».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 131 наименования, содержащих 134 страницы, 12 таблиц, 63 рисунка, а также трех приложений на 12 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена проблема и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследования, достоверности результатов, апробации, публикации и реализации результатов, структуре и объеме диссертации.

В первой главе выявлены и обоснованы отмеченные в разделе «Актуальность темы исследования» причины существования проблемы полноты и достоверности расчетов режимов и процессов в ЭЭС, выполняемых в настоящее время с помощью многочисленных ПВК, а также её неразрешимости в рамках реализуемого ими методологически одностороннего сугубо численного подхода. Данный теоретически обоснованный и подтвержденный свойствами и возможностями существующих ПВК расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС вывод соответствует проведенным в США, Европе и России специально подготовленным верификациям, выполненным с использованием современных ПВК и имеющейся натурной информации. В частности, опубликованные

результаты выполненного с помощью ПВК ETMSP анализа системной аварии в Западной энергосистеме США полностью подтверждают обозначенную проблему и необходимость верификации выполняемых с помощью ПВК расчетов (рисунок 1).

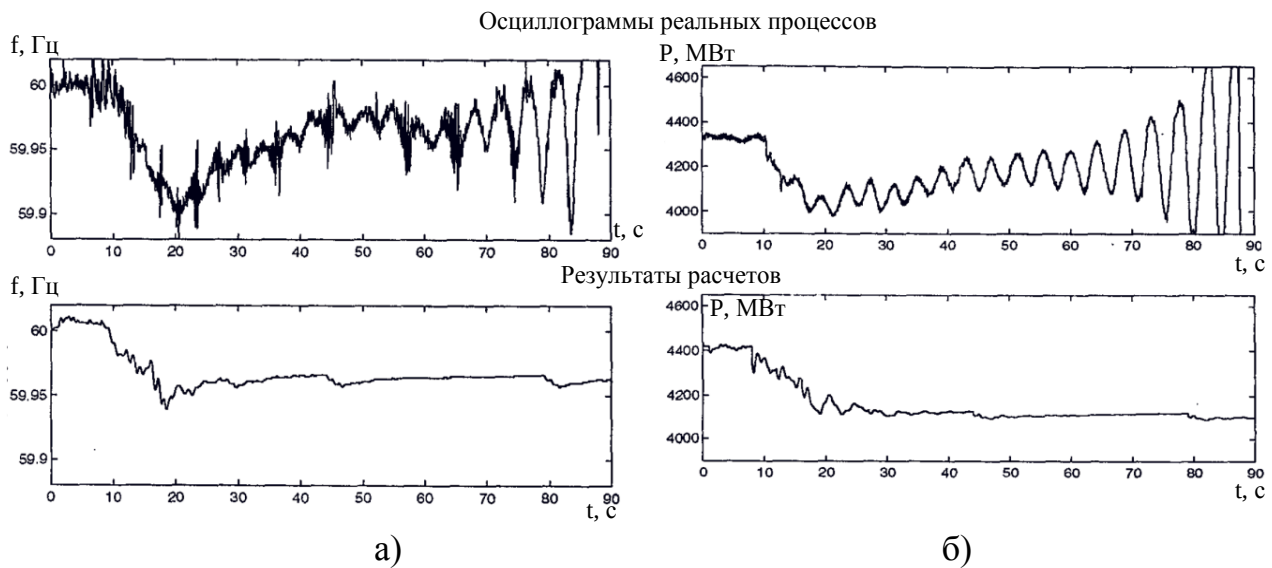


Рисунок 1 – Осциллограммы аварийных процессов изменения частоты на шинах электростанции (а) и перетока мощности в линии электропередачи постоянного тока (б)

Однако, ввиду отсутствия в настоящее время и обозримой перспективе необходимых для всережимной верификации натурных данных о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом в связи с отмеченным в разделе «Актуальность темы исследования» широким спектром возможных схемно-режимных состояний, нормальных и аномальных возмущений, а также неопределенной вероятности их сочетания и возникновения, единственным направлением решения данной проблемы может быть только альтернативное существующему, основанное на использовании всережимной информации, получаемой указанным в разделе «Идея работы» путем с помощью созданного на основе комплексного подхода МЭ - ВМК РВ ЭЭС.

Во второй главе обоснованы свойства и возможности МЭ - ВМК РВ ЭЭС, обеспечивающие возможность получения полной и достоверной информации по всему значимому спектру квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и любой реальной ЭЭС в целом, необходимой для всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, и позволяющие для её осуществления разработать соответствующую концепцию:

1. Для осуществления гарантированной всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС в качестве источника достаточно полной и достоверной информации используется МЭ - ВМК РВ ЭЭС, обладающий всеми необходимыми свойствами и возможностями.

2. В верифицируемом ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, в рамках его возможностей, и МЭ - ВМК РВ ЭЭС формируется идентичная по топологии, составу и параметрам оборудования моделируемая ЭЭС.

3. Разрабатываются сценарии воспроизведения необходимых для верификации ПВК нормальных и аномальных режимов и процессов, в общем случае охватывающие весь значимый спектр квазиустановившихся и переходных процессов, включая коммутационные перенапряжения, требуемых для оценки условий и обеспечения надежности и эффективности функционирования силового оборудования, средств релейной защиты (РЗ), технологической и противоаварийной автоматики (ТиПА), ЭЭС в целом на этапах их проектирования, исследования, эксплуатации, развития и совершенствования.

4. Реализуются в верифицируемом ПВК и МЭ - ВМК РВ ЭЭС указанные в пункте 3 сценарии, результаты воспроизведения которых используются для оценки полноты и достоверности выполняемых с помощью ПВК расчетов режимов и процессов в ЭЭС.

В третьей главе представлена методика реализации концепции всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, определяющая последовательность и содержание действий по всережимной верификации ПВК, которые применительно к конкретной реальной ЭЭС конкретизируются лишь формированием в МЭ - ВМК РВ ЭЭС и верифицируемом ПВК, в рамках его возможностей, исходного схемно-режимного состояния этой ЭЭС:

1. На основе нормальной электрической схемы конкретной ЭЭС, её базы данных параметров оборудования, настроек технологической автоматики в МЭ - ВМК РВ ЭЭС и верифицируемом ПВК, в рамках его возможностей, воспроизводится исходное схемно-режимное состояние моделируемой ЭЭС. При наличии данных телесигналов (ТС) и телеизмерений (ТИ) ОИК моделируемой ЭЭС воспроизведение выполняется с использованием этой информации. Причем в среде МЭ - ВМК РВ ЭЭС разработаны соответствующие программные процедуры для импорта базы данных ОИК моделируемой ЭЭС в базу данных Сервера МЭ - ВМК РВ ЭЭС, дорасчета и достоверизации данных ОИК, а также сравнения результатов воспроизведения и их всестороннего отображения в виде таблиц, графиков и осциллограмм посредством специализированных динамических панелей наблюдения и управления (ДПНУ).

2. Теоретически обоснованные и практически подтвержденные свойства и возможности МЭ - ВМК РВ ЭЭС исключают необходимость собственно его всережимной верификации, поскольку воспроизведение какого-либо квазиустановившегося процесса, в частности, в соответствии с п.1, при $f \approx 50$ Гц, является текущим результатом достаточно достоверного моделирования

непрерывного значимого спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом и результаты его верификации распространяемы на весь значимый спектр квазиустановившихся и переходных процессов, включая коммутационные перенапряжения. Тем не менее, для текущего подтверждения вышеизложенного выполняются сравнение и визуализация воспроизведения исходного схемно-режимного состояния моделируемой ЭЭС с данными ОИК, результаты которых гарантировано всережимно верифицируют МЭ - ВМК РВ ЭЭС.

3. Формируется требуемый для верификации обоснованный спектр квазиустановившихся и переходных процессов, основой для которого являются режимы и процессы, информация о которых необходима для надежного и эффективного решения важных для исследования, проектирования и эксплуатации задач: определение термической и электродинамической стойкости оборудования; оценка условий работы изоляции по напряжению; определение качества электроэнергии; оценка статической и динамической устойчивости ЭЭС; настройка средств РЗ, ТиПА.

4. Разрабатываются сценарии воспроизведения верификационного спектра, ориентированные на свойства и возможности верифицируемых ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, в которых, согласно применяемой декомпозиции, условно выделяются и отдельно рассчитываются с помощью различных моделей и методов установившиеся режимы и различные стадии переходных процессов, а также на процессы, которые, согласно этим упрощениям, рассчитываются с наименьшей достоверностью.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, выполненных согласно разработанной концепции всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС и методике её реализации применительно к распространенным, особенно в России, ПВК Eurostag расчета режимов и процессов в ЭЭС и ПВК АРМ СРЗА расчета установившихся аварийных режимов в ЭЭС на примере Томской ЭЭС (ТЭЭС), фрагмент ДПНУ МЭ - ВМК РВ ЭЭС в однолинейном изображении схемы моделирования которой, сформированной на основе её нормальной электрической схемы, приведен на рисунке 2.

Соответствие воспроизведения с помощью МЭ - ВМК РВ ЭЭС, согласно п.2 методики, квазиустановившегося режима ТЭЭС данным контрольно-диспетчерских замеров, сформированных на основе ТС и ТИ ОИК ТЭЭС, в пределах погрешности ОИК $\leq 5\%$. На этом же уровне соответствия расчеты данного установившегося режима по напряжениям и перетокам активной мощности с помощью ПВК Eurostag. Вместе с тем, несоответствия токов, реактивной мощности (РМ) и взаимных углов синхронных машин (СМ) более

Рисунок 2 – Фрагменты ДПНУ ТЭЭС с объектами экспериментов

значительны. Данное обстоятельство связано с использованием PU-модели СМ, исключающей регулирование РМ. Результаты верификации расчетов с помощью ПВК Eurostag установившихся послеаварийных схемно-режимных состояний ТЭЭС аналогичные.

Натурным подтверждением распространности вышеуказанных результатов верификации собственно МЭ - ВМК РВ ЭЭС на весь значимый спектр квазиустановившихся и переходных процессов является выполненное сопоставление результатов моделирования с помощью МЭ - ВМК РВ ЭЭС однофазных коротких замыканий (КЗ) на линиях электропередачи (ЛЭП) ВЧ-232 подстанции (ПС) Володино и ЛЭП ПВ-224_1 ПС Каргасок в воспроизводимом по данным ТС и ТИ ОИК схемно-режимном состоянии ТЭЭС с имеющимися записями этих процессов регистраторами аварийных событий (РАС) (рисунок 3).

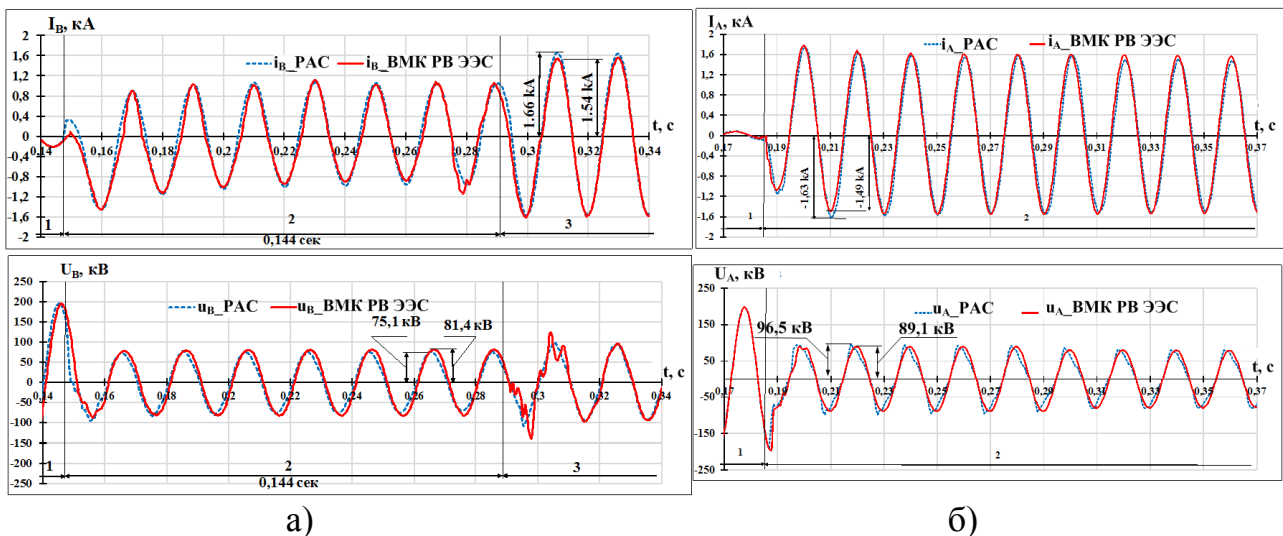


Рисунок 3 – Осциллограммы токов и напряжений поврежденных фаз ЛЭП 220 кВ при однофазных КЗ ВЧ-232 ПС Володино (а) и ПВ-224_1 ПС Каргасок (б)

Поскольку в многопроцессорном ПВК реального времени RTDS, как и в МЭ - ВМК РВ ЭЭС, используются аналогичные всережимные математические модели оборудования, а при расчете процессов в двухмашинной схеме ЭЭС отмеченная ранее проблематика численного интегрирования сложных схем ЭЭС практически не проявляется, то сопоставление осциллограмм процессов, в частности при различных КЗ, также может служить дополнительной верификацией МЭ - ВМК РВ ЭЭС (рисунок 4).

Выявленные в результате верификации расчетов токов коротких замыканий (ТКЗ) с помощью ПВК Eurostag зависящие от места и вида КЗ погрешности, особенно максимальных значений, составляют, как правило, $\geq 20\%$ из-за упрощений математической модели электрических машин (ЭМ), главным образом уравнений статора, в которых исключены трансформаторные ЭДС и учитываются при этом ЭДС скольжения и активное сопротивление статора, а также

статического моделирования электрической сети, исключая влияние аperiodических составляющих (рисунки 5 и 6).

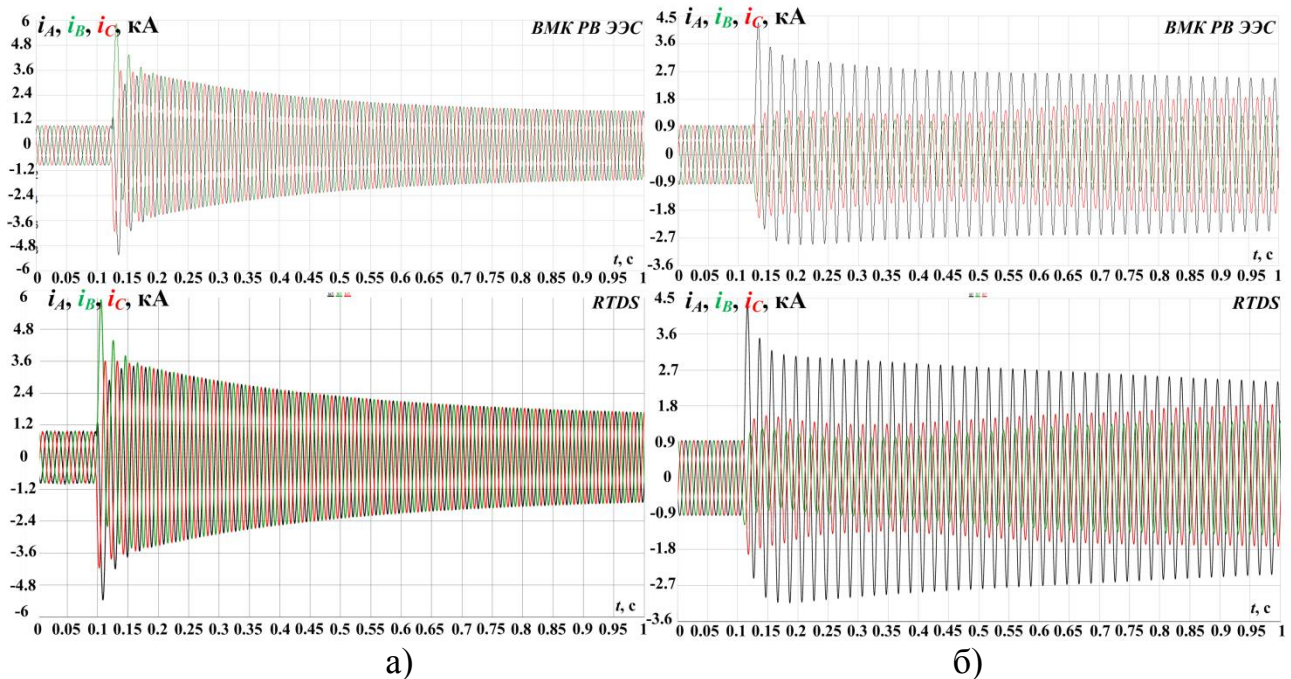


Рисунок 4 – Осциллограммы фазных токов генератора при трехфазном (а) и однофазном (б) КЗ

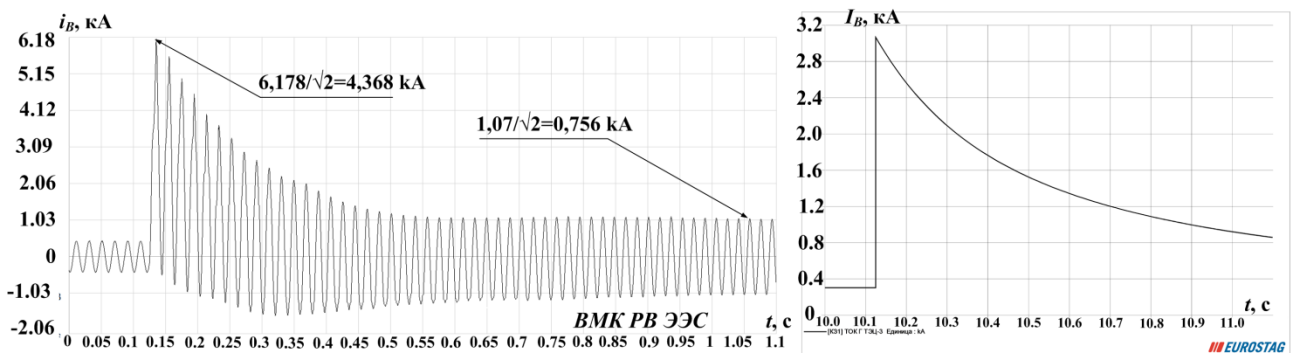


Рисунок 5 – Осциллограммы тока генератора ТЭЦ-3 при трехфазном КЗ

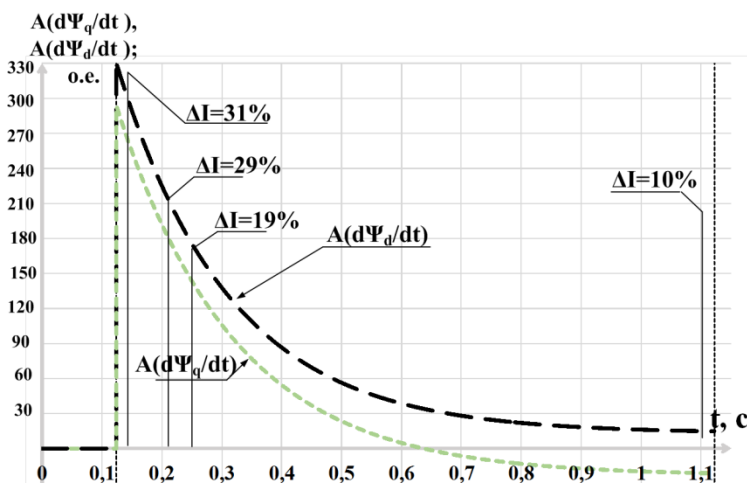


Рисунок 6 – График изменения амплитуды трансформаторных ЭДС по осям d и q при трехфазном КЗ на выводах генератора ТЭЦ-3 и связанная с их исключением погрешность расчета ТКЗ

Расчеты ТКЗ с помощью ПВК АРМ СРЗА также осуществляются с погрешностью, зависящей от места, вида КЗ и достоверности значения обобщенного ударного коэффициента, которая особенно проявляется при расчете ТКЗ СМ из-за неучета апериодической составляющей в ЭДС СМ.

Уровень погрешности расчетов ТКЗ с помощью ПВК Eurostag и ПВК АРМ СРЗА, определяемый вышеобозначенными упрощениями, иллюстрируют результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Действующие значения ударных токов трехфазных КЗ

Места КЗ, различно удаленные от источников	Действующее значение ударного тока КЗ, А			$\Delta I_{уд}, \%$ Eurostag	$\Delta I_{уд}, \%$ АРМ СРЗА
	ВМК РВ ЭЭС	Eurostag	АРМ СРЗА		
КЗ на шинах 110 кВ ТЭЦ-3	6872,37	4734	6449,13	31,12	6,16
КЗ на шинах 110 кВ СХК	7714,53	5415	6386,25	29,81	17,22
КЗ на ЛЭП 220 кВ АТ-215 ПС Ново-Анжерская	3144,50	2044	3259,18	35,00	-3,65
КЗ на ЛЭП 220 кВ Т-211 ПС ГПП-220	3005,91	2144	3186,20	28,67	-6,00
КЗ на ЛЭП 220 кВ Т-214 ПС СХК	4770,14	3676	4289,80	22,94	10,07
КЗ на ЛЭП 220 кВ ЧП-223 ПС ПарABELь	1306,03	859	1440,02	34,23	-10,26
КЗ на ЛЭП 220 кВ ТВ-221 2 ПС Володино	2583,06	1889	2896,06	26,87	-12,12
КЗ на ЛЭП 220 кВ Т-218 ПС Асино	4398,20	3199	5218,96	27,27	-18,66
КЗ на ЛЭП 110 кВ С-40 ПС Колпашево	2069,70	1464	2458,74	29,27	-18,80
КЗ на ЛЭП 110 кВ С-7Б ПС Итатка	3137,43	2336	2223,52	25,54	29,13
КЗ на ЛЭП 110 кВ С-7А ПС Асино	3409,67	2623	4711,45	23,07	-38,18

Фрагменты результатов верификации воспроизведения процессов, используемых для оценки статической апериодической и колебательной устойчивости, а также динамической устойчивости, в том числе при однофазном автоматическом повторном включении (ОАПВ), представлены на рисунках 7-10.

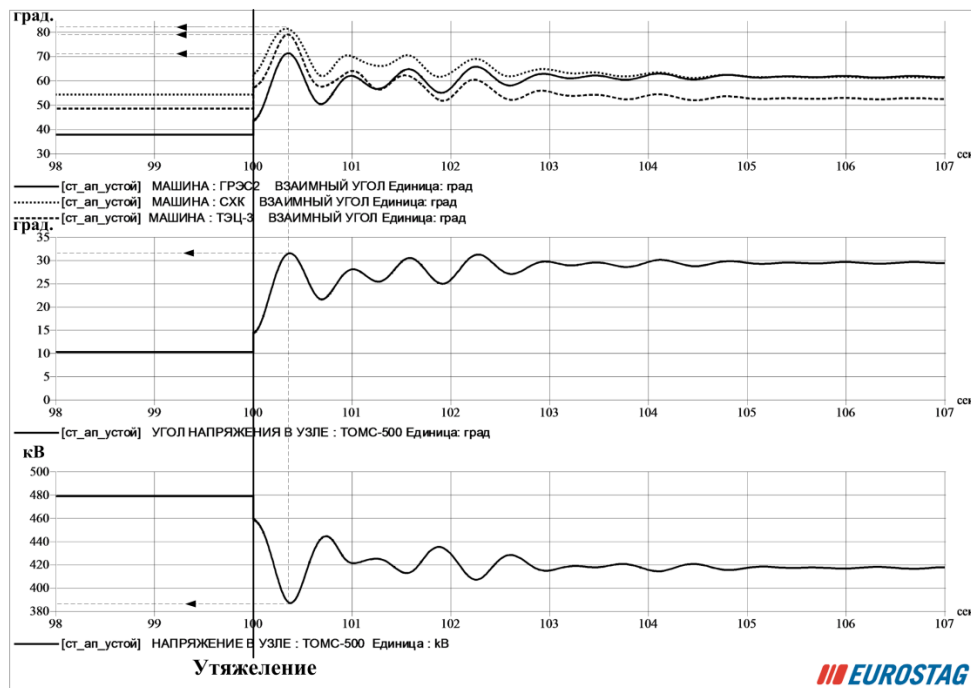


Рисунок 7 – Осциллограммы взаимных углов генераторов и напряжения на ПС Томская-500, иллюстрирующие оценку статической апериодической устойчивости

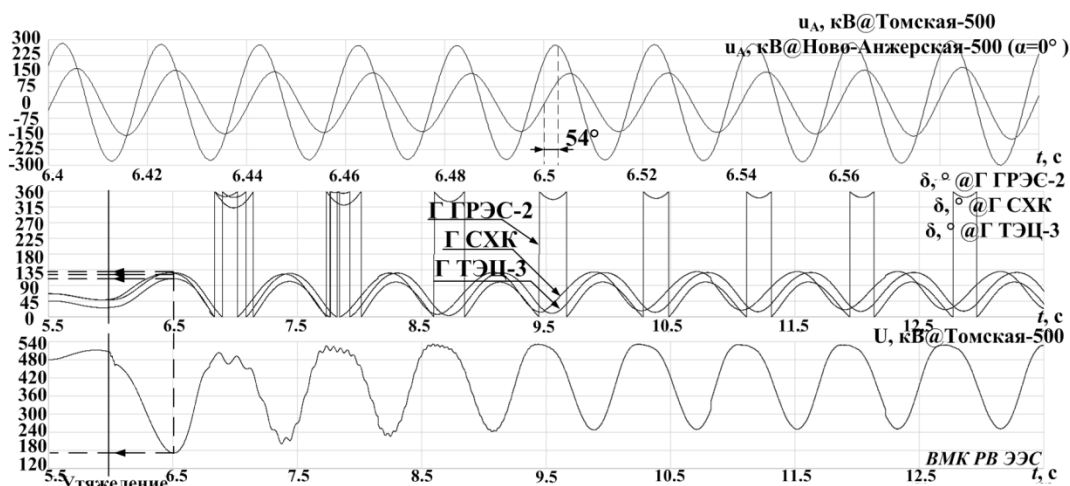


Рисунок 7 – Продолжение

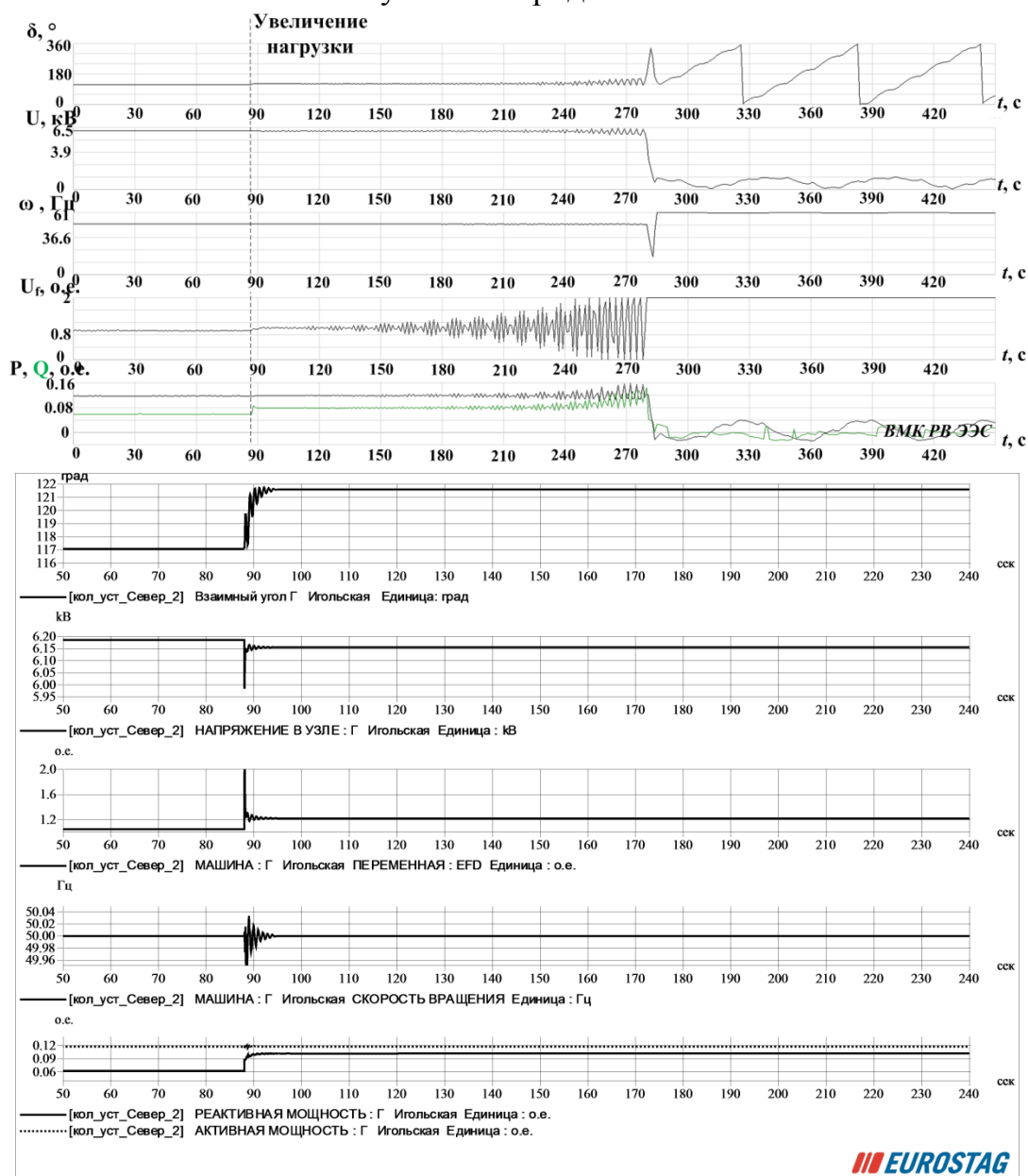


Рисунок 8 – Осциллограммы процессов режимных переменных генератора Игольская, иллюстрирующие оценку статической колебательной устойчивости

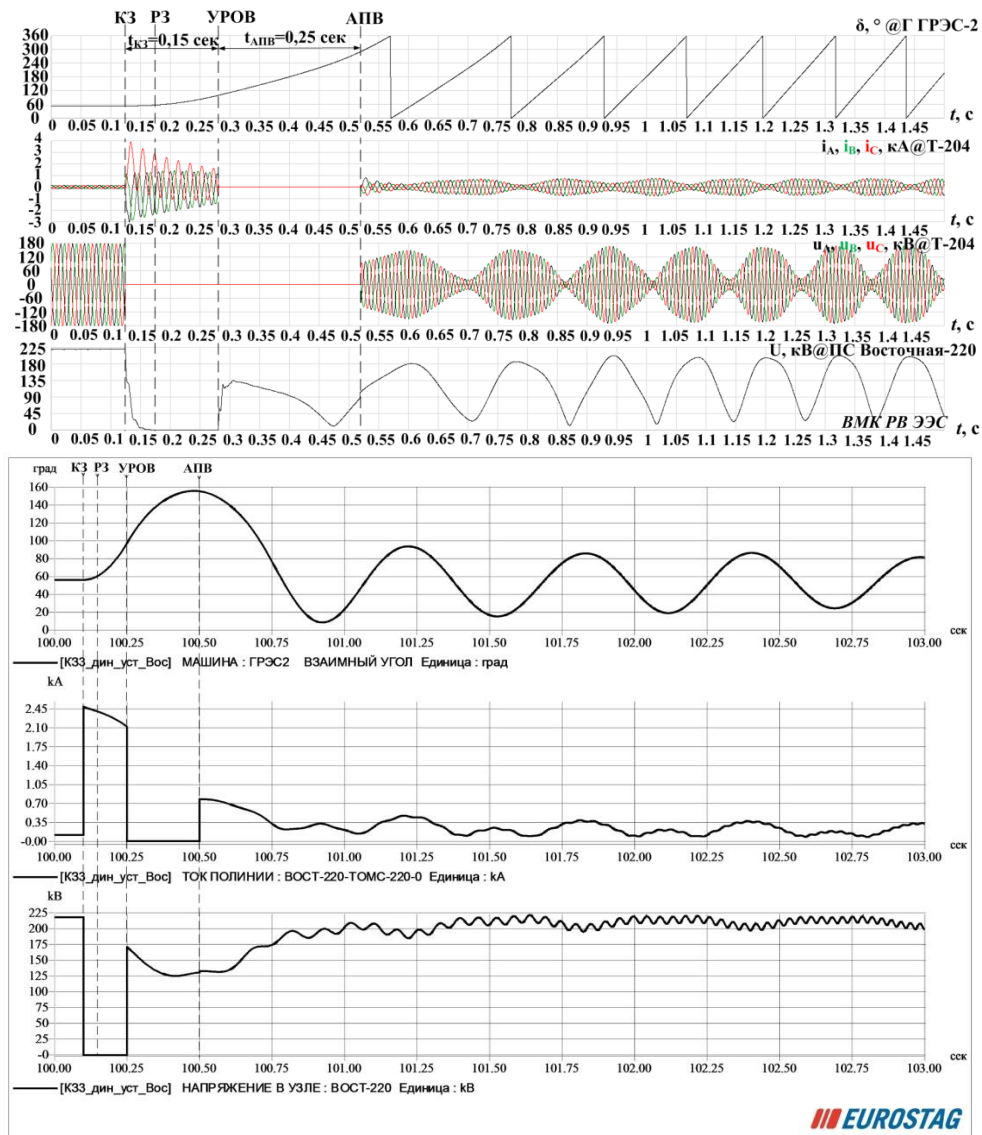


Рисунок 9 – Осциллограммы процессов в генераторе ГРЭС-2 (электрически близко расположенного к месту КЗ) и ЛЭП 220 кВ Т-204 при трехфазном КЗ на ПС Восточная, иллюстрирующие оценку динамической устойчивости

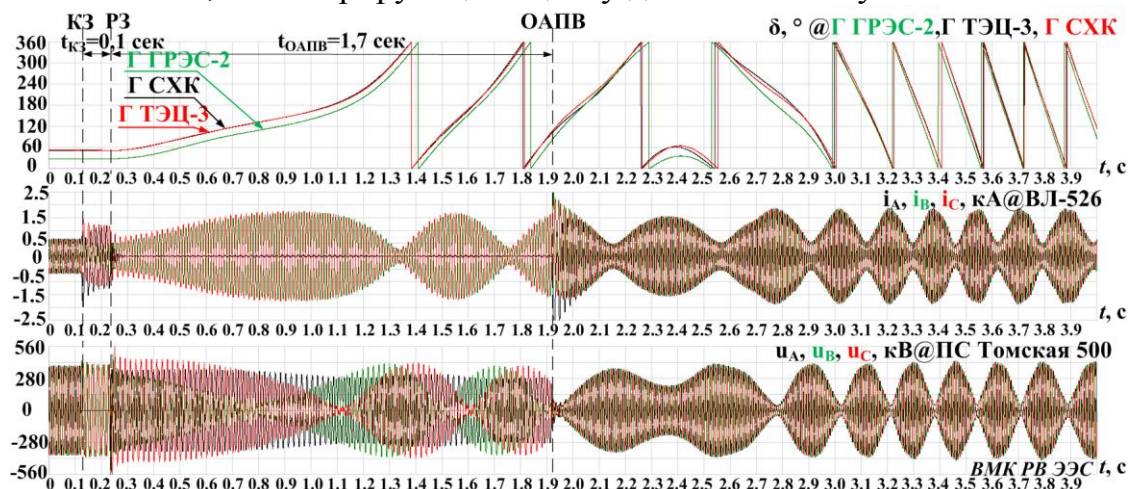


Рисунок 10 – Осциллограммы процессов в основных генераторах ТЭЭС при однофазном КЗ на ЛЭП 500 кВ ВЛ-526 ПС Томская и успешном ОАПВ, иллюстрирующие оценку динамической устойчивости при ОАПВ

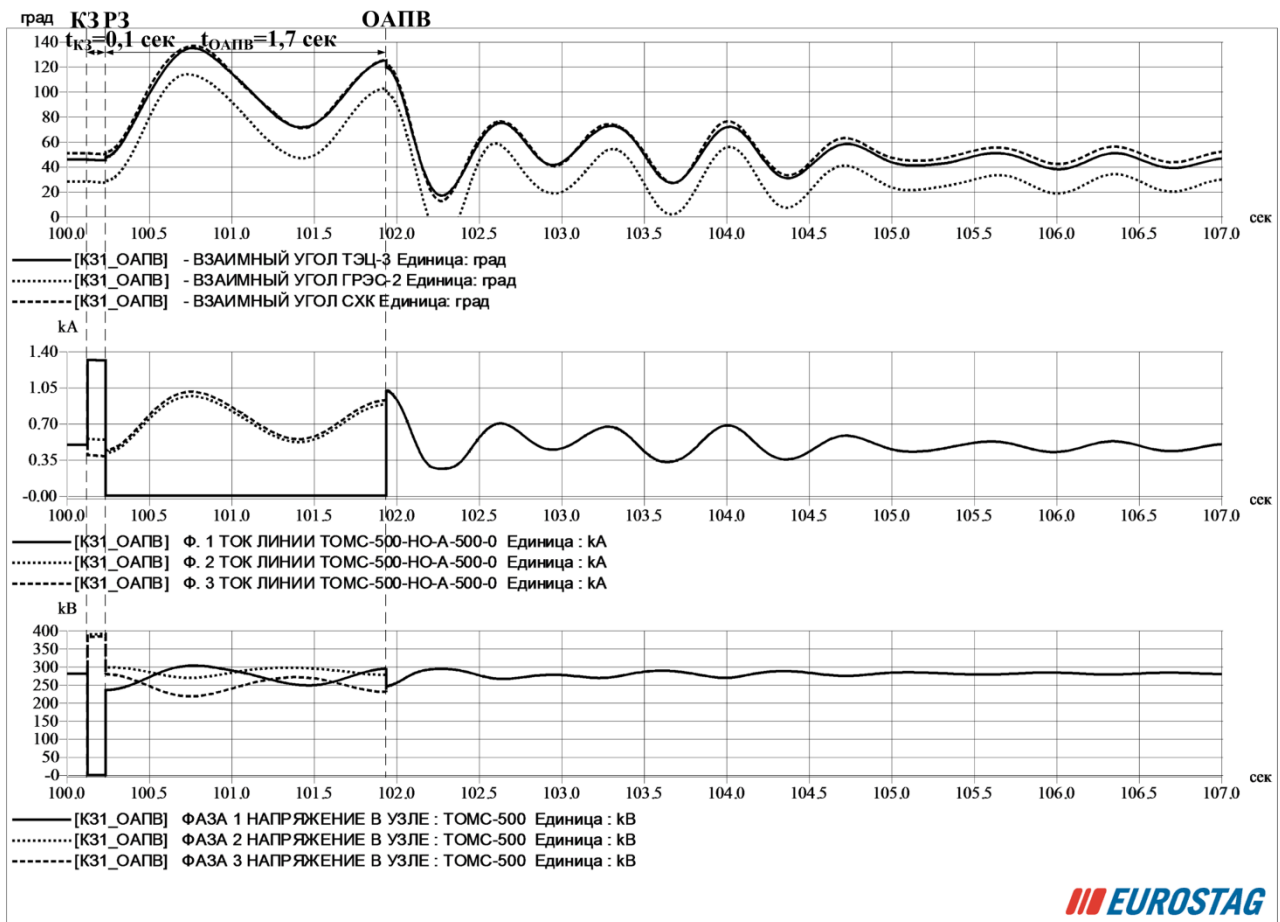


Рисунок 10 – Продолжение

Представленные на рисунках 7-10 фрагменты экспериментальных исследований демонстрируют значительные отличия результатов расчетов режимов и процессов с помощью ПК Eurostag от осциллограмм соответствующих процессов, полученных с помощью МЭ - ВМК РВ ЭЭС, обусловленные ранее отмеченными причинами.

Комплекс экспериментальных исследований содержит также верификацию воспроизведения с помощью ПК Eurostag актуальных для ТЭЭС процессов объединения на ПС Парабель раздельно работающих Южной и Северной частей ТЭЭС, результаты которой демонстрируют рост погрешности расчетов вплоть до радикальной (рисунок 11) при увеличении возмущения, определяемого величиной угла между напряжениями на ПС объединения.

Приведенные на рисунке 12 результаты верификации расчетов коммутационных перенапряжений подтверждают неприменимость верифицируемых средств для данной цели.

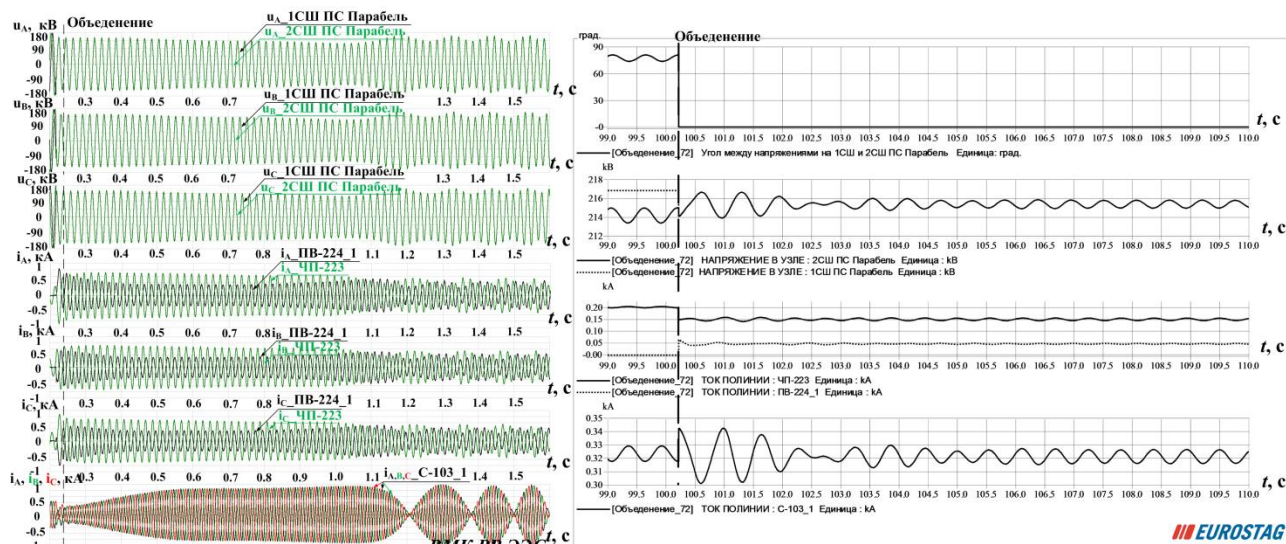


Рисунок 11 – Осциллограммы процессов объединения ТЭС при $\delta_3=72^\circ$ между напряжениями на 1 системе шин (СШ) и 2СШ ПС Паралель

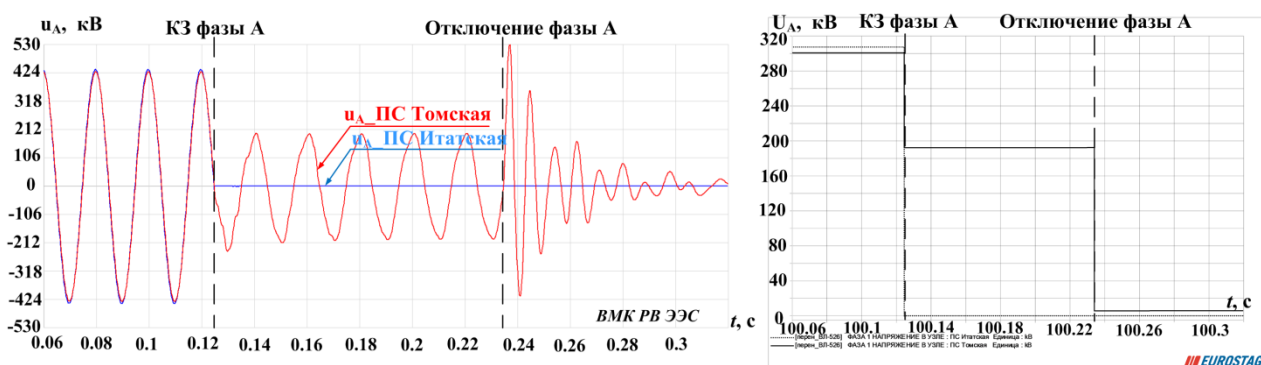


Рисунок 12 – Осциллограммы напряжений по концам поврежденной фазы ЛЭП 500 кВ ВЛ-526 при однофазном КЗ на ПС Итатская и его отключении

Результаты выполненного комплекса экспериментальных исследований разработанных средств всережимной верификации ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, в том числе представленные их фрагменты, полностью подтвердили теоретически обоснованные свойства и возможности этих средств, позволяющие осуществлять гарантированную всережимную верификацию различных ПВК, а также актуальность такой верификации.

Основные выводы:

1. Проведенные в рамках диссертационной работы исследования позволили выявить и теоретически строго обосновать причины существования проблемы всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также её неразрешимости в рамках применяемого подхода, ориентированного на использование натурных данных.
2. Предложено альтернативное решение данной проблемы, заключающееся в использовании адекватной натурным данным всережимной информации, получаемой с помощью созданного на основе комплексного подхода МЭ - ВМК

РВ ЭЭС, обеспечивающего гарантированно достаточно полное и достоверное воспроизведение единого непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов на неограниченном интервале и в реальном времени в оборудовании и ЭЭС в целом.

3. Обоснованы и сформулированы концепция всережимной верификации различных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС, а также методика её реализации.

4. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных средств, позволяющие обосновано определять полноту и достоверность расчетов режимов и процессов в ЭЭС с помощью различных ПВК, а также оказываемое на них влияние применяемых упрощений, ограничений и методической ошибки решения, соответственно адекватность принимаемых с помощью таких расчетов решений различных задач проектирования, исследования, эксплуатации, совершенствования и развития ЭЭС.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

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

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

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

4. Суворов, А.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса / А.А. Суворов, Р.А. Уфа, М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, Н.Ю. Рубан // Газовая промышленность. – 2017. - №5 (752). - С. 18– 27.

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

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

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

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

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

Публикации в других изданиях:

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

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

Патенты на изобретения:

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.