

На правах рукописи



ШЕВЧУК
Роман Эдуардович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВИБРОСОСТОЯНИЯ
ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ**

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в публичном акционерном обществе «Силловые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт».

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор
Петрениа Юрий Кириллович

Официальные оппоненты: **Абрамян Андрей Карэнович,**
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
машиноведения Российской Академии Наук,
главный научный сотрудник лаборатории
математического моделирования волновых
процессов
Шевченко Денис Владимирович,
кандидат технических наук, общество с
ограниченной ответственностью
«Всесоюзный научно-исследовательский
центр транспортных технологий»,
заместитель генерального директора по науке

Ведущая организация: Научно-производственная корпорация
«Механобр-техника» (Акционерное общество)

Защита состоится «03» апреля 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.13 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 1 корпус, аудитория 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», <http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.13,
доктор технических наук,
профессор

 Б.С. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время область проектирования и разработки турбогенераторов характеризуется появлением широкого спектра мощных генераторов новых типов. Это вызвано стремлением к повышению единичной мощности оборудования, эффективности производства электроэнергии, увеличению экономичности при одновременном обеспечении максимальной надежности и безопасности эксплуатации турбоагрегата.

Одной из основных проблем, связанных с тенденцией к увеличению мощности турбогенераторов, является повышение действующих на основные конструктивные элементы нагрузок. Ввиду циклического характера электродинамических сил, происходит увеличение амплитуд вибрации элементов, что напрямую влияет на усталостную прочность статоров, при этом снижается их виброндежность. Как следствие, для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации турбоагрегатов, возрастают требования к обеспечению достаточной степени точности оценки вибрационного состояния основных элементов статоров.

Повышение эксплуатационных характеристик турбогенераторов является актуальной научно-технической проблемой и может быть обеспечено за счет разработки и использования новых методов расчетов, позволяющих получить более точную, по сравнению со стандартными подходами, расчетную оценку вибрационного состояния основных элементов конструкции статоров. Одним из наиболее передовых методов решения задач указанного класса является цифровое моделирование, сравнительно широко применяемое в инженерной практике, в том числе, в области энергетического машиностроения.

Ввиду значительной сложности системы статоров, обусловленной многообразием используемых конструктивных решений, многоуровневой (Multiscale) структурой, где размеры основных элементов варьируются в диапазоне от микро до макроуровня, наличием композитных материалов с зачастую неизвестными анизотропными физико-механическими свойствами, неопределенностями возникающих в процессе эксплуатации изменений в поведении системы, связанности проблем, требующих проведения комплекса электромагнитных, тепловых, механических и др. расчетов и вытекающими сложностями в определении основных действующих нагрузок, при построении модели специалист неминуемо вводит в рассматриваемую систему ряд допущений. Корректность принятых гипотез на различных этапах мероприятий, связанных с разработкой модели, определяется степенью соответствия ключевых характеристик, описывающих комплексное состояние, объекта исследования и цифровой модели в условиях работы и требует высокой квалификации специалиста.

Степень разработанности темы исследования.

Проблемам теоретической оценки вибрационных и прочностных характеристик основных элементов статоров посвящены труды авторов Г.М. Хуторецкого, Ф.М. Детинко, Г.А. Загородной, В.М. Фридмана, В.М. Подреза, Л.Я. Станиславского, В.М. Рабиновича. Дополнительно следует отметить работы В.Э. Школьника, В.И. Иогансена, И.Д. Урусова, S.P. Verma, С.Н. Кострицкого, O.P. Chabra.

В целом, в большинстве предлагаемых подходов анализируемые элементы статора представлены в виде тонких стержней или балок с различными вариантами закреплений. Безусловно, такие модели обладают определенными преимуществами, в частности, в простоте анализа чувствительности, т.е. выявления степени влияния конкретного параметра на комплексное состояние элемента. Вместе с тем, модели, построенные с принятыми таким образом допущениями, зачастую оказываются ограниченно применимыми для проведения достаточно точных для инженерной практики оценок механического состояния основных элементов статоров, что отмечается в ряде исследований.

Для повышения степени корректности проводимых оценок, в современной инженерной практике зачастую применяются методы цифрового моделирования, позволяющие выполнять построение и анализ существенно более сложных и многофакторных моделей. Применительно к проблеме моделирования и оценки вибрационного состояния статора и его элементов, стоит отметить исследования авторов P. Arend, A. Tampon, Y. Wang, Y. Tamiya, B. Yan, K.A. Кучинского, X. Liu.

Несмотря на достаточно широкую проработку в литературе указанной темы, остается нерешенным ряд проблем, зачастую связанных со сравнительно высоким отклонением расчетных результатов от данных натурных испытаний, что может являться неприемлемым как для целей вибрационной отстройки, так и для оценки механического состояния основных элементов статора.

Цель работы.

Основной целью работы является разработка методов оценки вибрационного состояния основных элементов статоров турбогенераторов с использованием цифрового моделирования, чья корректность определяется валидацией с расчетно-экспериментальными данными.

Задачи исследования.

– Разработать аналитический метод расчета собственных частот сердечника статора, основанный на его представлении в виде длинного толстостенного цилиндра. Сопоставить точность определения частот со стандартно применяемыми в инженерной практике методами, используя результаты модального анализа.

– Для сердечника статора, имеющего композитную шихтованную структуру, разработать метод определения эффективных свойств и цифровую модель. Оценить степень корректности разработанной модели

сопоставлением спектров собственных частот и форм колебаний, полученных расчетным и экспериментальным путем.

– В целях упрощения трудоемкого процесса определения эффективных физико-механических свойств, заключающегося в расчетном решении ряда базовых задач, разработать программу, позволяющую автоматизировать указанный процесс.

– Разработать модель и провести термомеханический анализ изоляции токоведущего стержня обмотки в наиболее термонагруженной зоне – пазовой части статора. Сопоставить расчетные температуры с данными натурных замеров. Выявить наиболее нагруженные зоны изоляции. Оценить изменения поля температур и теплового потока при применении изоляции с различными коэффициентами теплопроводности.

– Построить рациональную цифровую модель токоведущей шины, установить величину отклонения в определении собственных частот при использовании стандартных подходов к моделированию вибрационного состояния шины, используемых в современной инженерной практике. Оценить корректность моделей путем сопоставления с натурными данными.

– На базе конструкции статора турбогенератора мощностью 1200 МВт (проект АЭС-2006) разработать цифровую модель торцевой зоны. Выполнить модальный и гармонический расчеты, определить собственные частоты и формы колебаний, построить АЧХ основных элементов модели, сопоставить с натурными данными в исследуемом диапазоне частот.

Научная новизна.

1. Разработан новый аналитический метод расчета собственных частот плоских колебаний сердечников статоров, основанный на представлении сердечника в виде длинного толстостенного цилиндра, в отличие от модели тонкого кольца, применяемой в инженерной практике.

2. Область применения метода прямой гомогенизации расширена на случай полых цилиндрических тел, для базовых задач сформулированы граничные условия.

3. Впервые предложен трехэтапный метод определения эффективных физико-механических свойств сердечников статоров, основанный на методе прямой гомогенизации.

4. На базе проблемы моделирования вибрационного состояния сердечников статоров разработана программа UCH (Unit Cell Homogenizator), автоматизирующая процесс расчетного определения эффективных физико-механических свойств композитных материалов.

5. На основании проведенного термомеханического анализа пазовой части статора на базе турбогенератора мощностью 220 МВт установлено, что наиболее нагруженной областью изоляции является угловая зона верхнего стержня обмотки, здесь наиболее вероятен риск зарождения и развития дефектов в виде расслоений структуры изоляции или отслоений от токоведущей части. Для снижения вероятности появления дефектов в изоляции является целесообразным снижение общего уровня

температур и ее перепада по толщине, что может быть обеспечено за счет увеличения теплопроводности изоляции.

6. Показана рациональность прямого моделирования контактных зон в элементах крепления токоведущих шин.

7. Впервые разработана цифровая модель торцевой зоны статора турбогенератора мощностью 1200 МВт (проект АЭС-2006), учитывающая основные особенности конструкции, в т.ч. моделирующих наличие контактных зон, и позволяющая проводить оценку основных вибрационных характеристик и анализ прочности.

Практическая значимость работы.

Результаты исследования могут быть напрямую применены для целей вибрационной отстройки основных элементов статора и проведения уточненной оценки их комплексного состояния. Используемые в работе подходы к цифровому моделированию могут послужить основой для разработки нормативных документов, регламентирующих подготовку моделей, проведение расчетов и анализ комплексного состояния статоров в различных эксплуатационных режимах. В рамках нового технологического уклада Industry 4.0 и сопутствующему тренду по цифровизации предприятий, разработанные подходы могут быть применены для создания цифровых двойников (Digital Twins) статоров, что позволит управлять полным жизненным циклом турбогенератора.

Методы исследования.

При решении указанных задач использовались методы сопротивления материалов, теоретической механики, теории колебаний и теории упругости. Цифровое моделирование осуществлено с помощью метода конечных элементов, позволяющего проводить расчеты напряженно-деформированного состояния объекта исследования в статической и динамической постановке, а также модальный анализ с определением собственных частот и форм колебаний. Для решения указанных классов задач используется лицензионная версия программной системы конечно-элементного анализа Ansys, прошедшая тщательные процедуры верификации и валидации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Аналитический метод расчета собственных частот плоских колебаний сердечников статоров.

2. Расчетный метод определения эффективных физико-механических свойств тел цилиндрической формы.

3. Трехэтапный метод определения эффективных физико-механических свойств сердечников статоров.

4. Программа UCH (Unit Cell Homogenizator), автоматизирующая процесс расчетного определения эффективных физико-механических свойств композитных материалов на базе системы Ansys.

5. Наиболее нагруженной областью изоляции является угловая зона верхнего стержня обмотки. При прочих равных условиях, увеличение

теплопроводности изоляции позволяет снизить уровень действующих напряжений и вероятность появления и развития дефектов в виде расслоений и отслоений.

6. Целесообразность выполнения прямого моделирования контактных зон в элементах крепления токоведущих шин.

7. Цифровые модели основных элементов статоров мощных турбогенераторов: сердечника, изоляционных материалов, токоведущих шин и стержней обмотки, торцевой зоны статора.

8. Результаты расчетных оценок вибрационных характеристик, сопоставление с данными натурных испытаний.

Степень достоверности результатов.

Достоверность результатов определяется строгостью используемого в работе математического аппарата, применением теоретически обоснованного современного расчетного метода – метода конечных элементов, а также сравнительным анализом результатов, полученных в ходе данной работы, с теоретическими и экспериментальными данными, результатами, приведенными в публикациях других авторов.

Личный вклад автора.

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором или при его определяющем участии. Автор занимался постановкой и решением задач, разработкой моделей и программных кодов, проведением расчетов, интерпретацией результатов и подготовкой материалов для публикаций.

Апробация результатов.

Основные положения работы докладывались на следующих конференциях, форумах и семинарах.

1. VII международная научно-техническая конференция «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» ОАО «ВТИ». Москва, 19-21 ноября 2013 г.

2. XLII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки». С.-Петербург, 2-7 декабря 2013 г.

3. VIII международная научно-технических конференция «Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций» ОАО «ВТИ». Москва, 17-19 ноября 2015 г.

4. Форум с международным участием «Неделя науки 2015». С.-Петербург, 30 ноября – 4 декабря 2015 г.

5. Научный семинар на кафедре «Механика и процессы управления» Института прикладной математики и механики СПбПУ. С.-Петербург, 15 декабря 2015 г.

6. Научный семинар ИПМаш РАН. С.-Петербург, 16 июня 2016 г.

7. XLV научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки». С.-Петербург, 14-19 ноября 2016 г.

8. Семинар академика Морозова Н.Ф. С.-Петербург, 20 февраля 2017 г.
9. VII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «КОМАНДА-2017». С.-Петербург, 5-9 июня 2017 г.
10. XIV конференция пользователей CADFEM/Ansys. С.-Петербург, 31 октября-2 ноября 2017 г.
11. XLVI научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки». С.-Петербург, 13-19 ноября 2017 г.
12. VIII конференция молодых специалистов инженерно-технических подразделений ПАО «Силовые машины» - «Энергия молодости». С.-Петербург, 16-17 ноября 2017 г.
13. IX Международная научно-техническая конференция «Элмаш-2018». Москва, 16-19 апреля 2018 г.
14. X Российская конференция «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность». Сочи, 8-12 октября 2018 г.
15. XV конференция пользователей CADFEM/Ansys. Москва, 16-18 октября 2018 г.
16. Научный семинар на кафедре «Механика и процессы управления» Института прикладной математики и механики СПбПУ. С.-Петербург, 27 ноября 2018 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 статей, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, публикации которых признаются Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России и 7 статей в материалах международных научно-технических конференций. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. В приложении представлен акт внедрения результатов работ. Общий объем диссертации составляет 184 страницы, включая 81 рисунок и 21 таблицу. Список литературы содержит 107 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемых в работе задач, сформулированы цели и задачи исследования, дана оценка ее научной и практической значимости.

В первой главе приведены общие сведения, необходимые для понимания особенностей конструкции и эксплуатации статоров турбогенераторов.

Выполнен краткий обзор типичных повреждений, которые могут появиться в основных элементах статоров в процессе эксплуатации. С точки зрения обеспечения электрической надежности машины, одними из

наиболее опасных являются дефекты непосредственно изоляции токоведущих элементов статоров. Более половины отказов генераторов связано с повреждениями изоляции, приводящими к ее пробое. Недостаточно тщательный контроль состояния элементов статора или несвоевременный ремонт могут привести к аварийному останову турбогенератора и более тяжелым технико-экономическим последствиям.

Расчетно-экспериментальное сопровождение по актуализации комплексного состояния элементов статора позволит своевременно выявлять возможные технологические нарушения в работе агрегата и принимать эффективные меры по их предупреждению и устранению. Одной из ключевых проблем здесь является проведение оценки вибрационного состояния основных элементов статора. В работе представлен краткий обзор теоретических методов и подходов цифрового моделирования.

В целом, в большинстве теоретических подходов анализируемые элементы статора представлены в виде тонких стержней или балок с различными вариантами закреплений. Безусловно, такие модели обладают несомненными преимуществами, в частности, в простоте анализа чувствительности, т.е. выявления степени влияния конкретного параметра на механическое состояние элемента. Вместе с тем, модели, построенные с принятыми таким образом допущениями, зачастую оказываются ограниченно применимыми для проведения достаточно точных для инженерной практики оценок вибрационного состояния, что было отмечено в некоторых рассмотренных исследованиях.

Несмотря на достаточно высокую степень проработки проблем, связанных с проведением расчетных оценок вибрационного состояния с использованием методов цифрового моделирования, последние зачастую обладают недостаточно высокой точностью для целей проведения вибрационной отстройки, поэтому дальнейшее совершенствование подходов к моделированию вибросостояния не теряет своей актуальности.

Вторая глава посвящена анализу проблемы определения вибрационного состояния сердечника статора. В главе оценивается точность аналитических подходов, обычно используемых в инженерной практике в задаче определения собственных частот и форм колебаний сердечника. Его математическая модель в таких подходах описывается уравнениями теории стержней, что, вообще говоря, является корректным только при условии его тонкостенности. Однако на практике, радиальная ширина спинки сердечника статора турбоагрегата сопоставима со средним радиусом спинки, поэтому применение указанных моделей может повлечь неудовлетворительную точность результатов расчетов.

Следует отметить, в литературе встречаются и более корректные модели колебаний сердечника, в которых он геометрически представляет собой диск, однако, в инженерной практике указанные подходы не получили широкого распространения. Пожалуй, наиболее комплексный подход представлен в кандидатской диссертации В.Э. Школьника, где автор смог

получить трансцендентное уравнение для определения собственных частот изгибных колебаний, чьим несомненным преимуществом является учет в математической модели влияния пазовой части. Но, в то же время, он не дает представления о радиальных частотах, являющихся не менее важными при проведении процедуры вибрационной отстройки сердечника.

В настоящей работе разработана математическая модель, позволяющая определять как изгибные, так и радиальные собственные частоты колебаний сердечника статора во всем спектре. Наличие пазовой части при этом учитывается в качестве дополнительной инерционной нагрузки путем соответствующего приведения плотности материала $\rho \rightarrow \rho M/M_0$, где M – масса сердечника, M_0 – масса сердечника без учета пазовой части.

Для случая цилиндра, границы которого свободны от нагружения, получена матрица S размером 4×4 , соответствующее частотное уравнение может быть получено приравниванием нулю ее определителя. Первые 2 строки матрицы для условий на внутренней поверхности:

$$\begin{aligned}
 S_{1,1} &= -\lambda \left[\frac{a_1}{R_i} \right]^2 J_m(a_1) + 2\mu J_m''(a_1) & S_{2,1} &= \frac{2\mu m}{R_i} \left[-J_m'(a_1) + \frac{1}{R_i} J_m(a_1) \right] \\
 S_{1,2} &= -\lambda \left[\frac{a_1}{R_i} \right]^2 Y_m(a_1) + 2\mu Y_m''(a_1) & S_{2,2} &= \frac{2\mu m}{R_i} \left[-Y_m'(a_1) + \frac{1}{R_i} Y_m(a_1) \right] \\
 S_{1,4} &= \frac{2\mu m}{R_i} \left[Y_m'(a_2) - \frac{1}{R_i} Y_m(a_2) \right] & S_{2,3} &= \mu \left[-J_m''(a_2) - \frac{n^2}{R_i^2} J_m(a_2) + \frac{1}{R_i} J_m'(a_2) \right] \\
 S_{1,4} &= \frac{2\mu m}{R_i} \left[Y_m'(a_2) - \frac{1}{R_i} Y_m(a_2) \right] & S_{2,4} &= \mu \left[-Y_m''(a_2) - \frac{n^2}{R_i^2} Y_m(a_2) + \frac{1}{R_i} Y_m'(a_2) \right]
 \end{aligned} \quad (1)$$

Последние 2 строки для внешней поверхности формулируются аналогичным образом. Здесь λ и μ – параметры Ламе, J_m и Y_m – функции Бесселя, символ ' обозначает дифференцирование по радиальной координате r . Введены обозначения $a_1 = \omega_n R_i / c_1$, $a_2 = \omega_n R_i / c_2$, ω_n – собственная круговая частота, R_i – внутренний радиус полого цилиндра, c_1 и c_2 – приведенные величины, полученные из продольной и сдвиговой скоростей распространения волн в материале соответственно для приведенного значения плотности.

На базе типового сердечника статора показано, что предложенный метод позволяет получить уточненные результаты по сравнению с подходами, обычно применяемыми в инженерной практике. Их использование приводит к достаточно высоким отклонениям от результатов цифрового моделирования, вплоть до 15.2% при оценке только первой изгибной частоты, в то время как разработанный метод дает оценку с величиной отклонения в 1.5%.

В расчетах выше предполагается, что структура сердечника является однородной. В действительности, она является многоуровневой и шихтованной, поэтому прямое цифровое моделирование сердечника

сопряжено с необходимостью высокой степени дискретизации. Проведенная оценка показала, что минимальное количество конечных элементов, необходимых для моделирования сердечника мощного турбогенератора, составит около 200 миллионов, что является неприемлемым объемом для проведения многовариантных расчетов на этапе проектирования.

Целесообразным является представление сердечника в качестве гомогенного макроскопически однородного монолита с эффективными физико-механическими свойствами. Такой подход позволит существенно сократить размерность модели, примерно до 50 тысяч конечных элементов.

В целях определения эффективных физико-механических свойств сердечника предложен трехэтапный метод осреднения, основанный на методе прямой гомогенизации (МПГ). Этапы включают в себя гомогенизацию пакетов, вентиляционных радиальных каналов и их совокупности, составляющей полную структуру сердечника статора.

Кинематико-статические граничные условия, сформулированные в МПГ для ячеек периодичности, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда, однако, не могут быть применены напрямую для вентиляционных радиальных каналов. В целях решения проблемы для базовых задач сформулированы соответствующие граничные условия (ГУ).

Примем, что ось цилиндра совпадает с осью z , а его произвольное поперечное сечение находится в плоскости, параллельной xu . Тогда базовая задача о растяжении ячейки вдоль оси x приобретет следующий вид:

$$\begin{aligned} r = R_o: u_x = Ux, u_y = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \\ z = \pm 0.5c: u_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь U – заданное перемещение, x – проекция на ось x расстояния от начала координат до рассматриваемой точки внешней границы $r = R_o$. ГУ о растяжении каналов вдоль осей y и z формулируются аналогичным образом. В результате расчетного решения указанных задач по осредненным полям напряжений и деформаций из обобщенного закона Гука нетрудно получить значения эффективных модулей упругостей и коэффициентов Пуассона. Аналогичную процедуру необходимо повторить для определения эффективных модулей сдвига. ГУ в задаче о сдвиге в плоскости xz :

$$\begin{aligned} r = R_o: u_z = Ux, u_y = 0, \sigma_x = 0, \tau_{xy} = 0 \\ z = \pm 0.5c: u_x = 0, \sigma_z = 0, \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ГУ в задачах о сдвиге дистанционных распорок соответственно в плоскостях yz и xu формулируются аналогичным образом.

Сопоставление результатов оценок первых 10 собственных частот для гетерогенной и гомогенной моделей элементов сердечника показывает, что отклонение частот последней незначительно и составляет доли процента.

Таким образом, обоснованы: разработанный трехэтапный метод определения эффективных физико-механических свойств сердечника и корректность использования в качестве модели сердечника макроскопически однородного материала с эффективными свойствами.

В целях определения степени корректности расчетной оценки собственных частот и форм колебаний сердечника, приводится сопоставление с данными натурных исследований (рисунок 1).

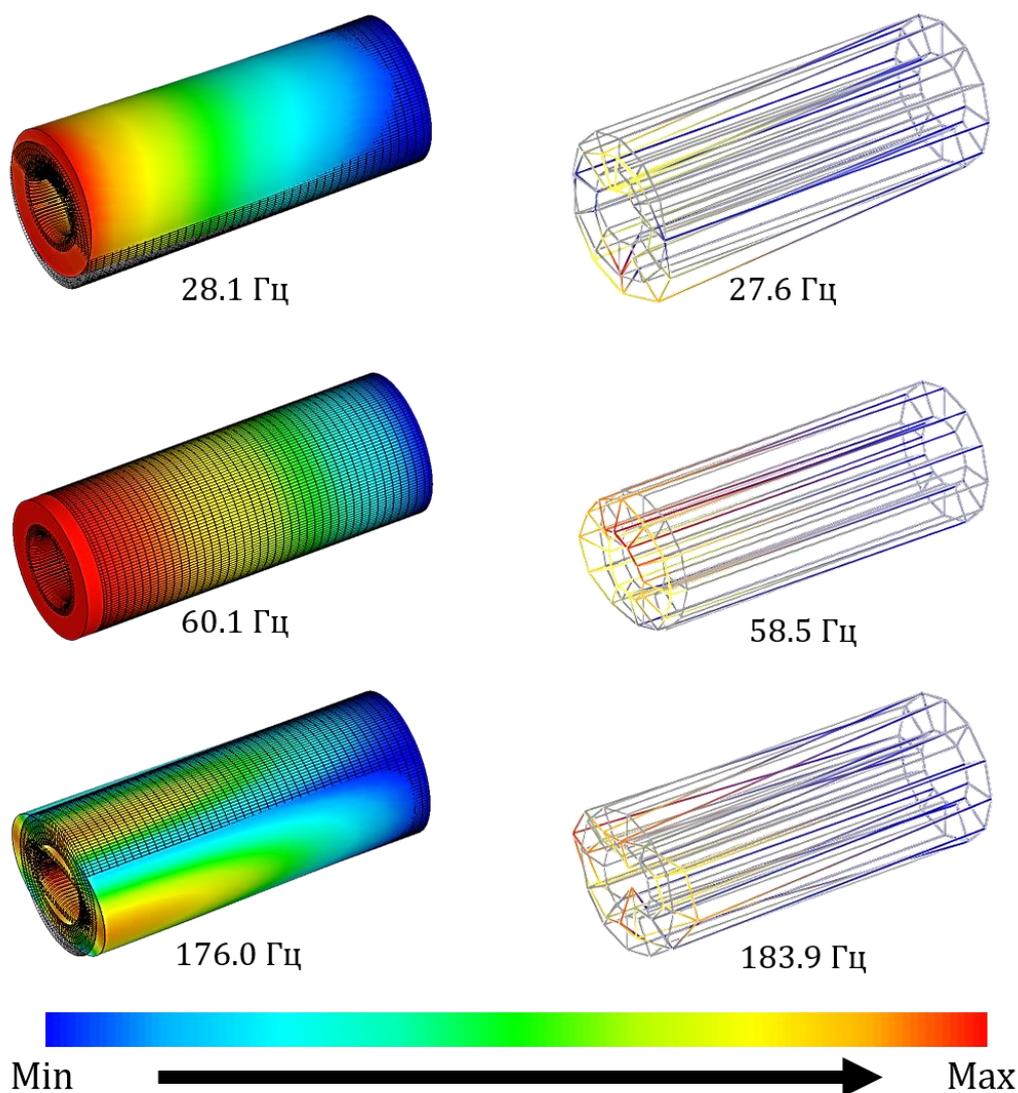


Рисунок 1. Собственные формы и частоты колебаний сердечника по результатам моделирования (слева) и в натурном эксперименте (справа)

Отклонение в определении собственных частот и форм колебаний между разработанной цифровой моделью сердечника и результатами натурных испытаний не превышает 5%, что свидетельствует о достаточной степени точности построенной модели.

Дополнительно, в целях автоматизации трудоемкого процесса определения эффективных физико-механических свойств композитов, разработана программа UCH (Unit Cell Homogenizator). Принцип работы программы заключен в расчетном решении базовых задач для построенной

в системе Ansys модели ячейки периодичности, что позволяет существенно сократить временные затраты на выполнение всего процесса.

Третья глава посвящена анализу влияния одной из основных характеристик изоляции, эффективного коэффициента теплопроводности, на ключевые эксплуатационные параметры изоляции. Для этой цели, разработана термомеханическая модель пазовой части статора, где наблюдаются повышенный уровень температур. Разработанная модель учитывает многослойную структуру изоляции, что позволяет проводить корректную оценку температурных градиентов, возникающих между слоями изоляции и, как следствие, уровней термомеханических напряжений.

Расчетным путем получены распределения температуры в условиях номинального режима работы статора рассматриваемой конструкции (рисунок 2). Натурно определены значения температур в некоторых точках пазовой части. Отклонение расчетных температур обмотки статора от определенных экспериментально значений составляет не более 3%, что может косвенно свидетельствовать о корректности разработанной модели.

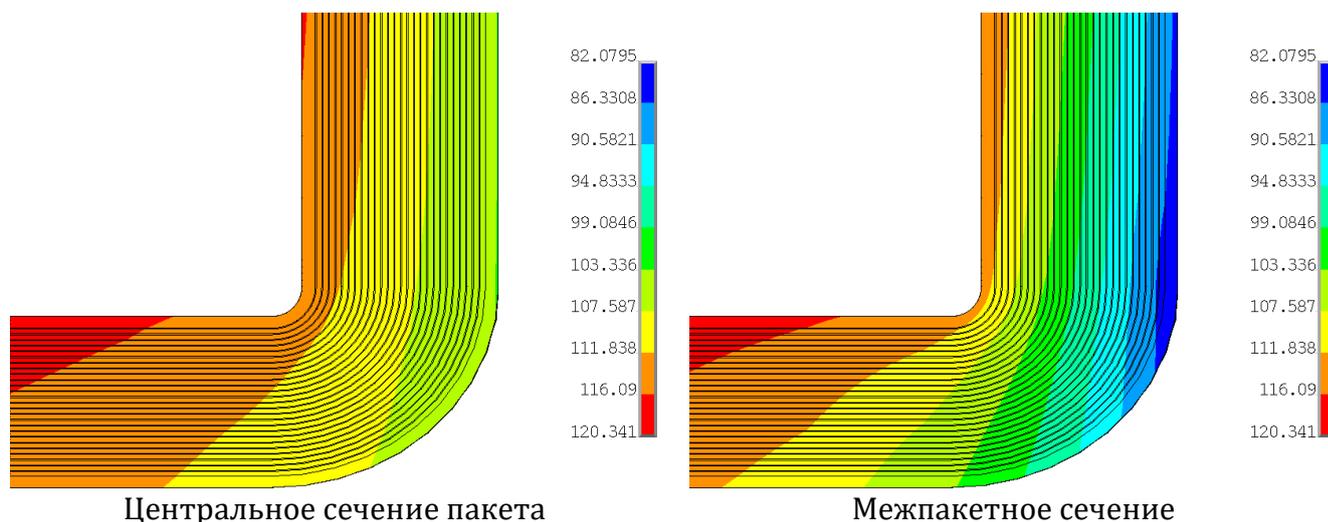


Рисунок 2. Поле температур в пазовой части статора в номинальном режиме, °C

На основе расчетного распределения температурного поля и действующих на стержни обмотки гармонических нагрузок выполнено моделирование возникающих в пазовой части статора термомеханических напряжений в номинальном режиме работы. Результаты гармонического расчета показывают, что наиболее нагруженной зоной изоляции является угловая зона верхнего стержня обмотки, здесь наиболее вероятен риск зарождения и развития дефектов в виде расслоений структуры изоляции или отслоений от токоведущей части.

Для уменьшения зон концентрации и снижения вероятности появления расслоений в изоляции является целесообразным снижение общего уровня температур и ее перепада по толщине, что может быть обеспечено за счет увеличения теплопроводности изоляции. Использование

высокотеплопроводной изоляции, при прочих равных условиях, позволит снизить общий уровень напряжений примерно на 10%.

Разработка и внедрение в конструкцию статора высокотеплопроводной изоляции является актуальной научно-технической проблемой, решением которой занимаются многие ведущие мировые фирмы-производители турбогенераторов, такие как Силовые машины, General Electric, Siemens, Toshiba и др.

В четвертой главе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований вибрационных характеристик шин и стержней обмотки.

Проведена оценка влияния анизотропии свойств композитной изоляции на вибрационные характеристики токоведущей медной шины. Показано, что при значительном изменении каждого из упругих свойств изоляции при фиксированных остальных параметрах, существенно влияющими на величины собственных частот, являются не только модуль упругости, направленный вдоль шины, но и модули сдвига, действующие соосно; влияние остальных параметров составляет доли процента. Таким образом, обычно используемая в инженерной практике изотропная модель материала изоляции может приводить к возникновению существенных отклонений от натуральных характеристик, поэтому, вообще говоря, в расчетах более корректным является использование ортотропной модели.

В инженерных подходах к проведению моделирования вибрационного состояния шин, податливостью крепления обычно пренебрегают, предполагая наличие идеального сопряжения между шиной и держателями. Показано, что моделирование условий идеального сопряжения приводит к существенным отклонениям от фактически измеренных в эксперименте значений собственных частот шины – 10% на первой изгибной частоте и 15% на второй. В то же время, максимальное отклонение расчетной резонансной частоты от экспериментальной при прямом моделировании зон контакта существенно меньше 1% для первой и составляет 4% для второй частоты. Поэтому имеет место предположение, что в задачах подобного класса, в первую очередь, при моделировании вибрационного поведения шин статоров, закрепленных в кронштейнах шинодержателей, в целях увеличения точности проводимых оценок, является целесообразным выполнять прямое моделирование зон контактов.

Полученный экспериментально, а также построенные для разработанных цифровых моделей графики АЧХ представлены на рисунке 3.

Дополнительно разработана цифровая модель стержня обмотки, ввиду его многоуровневой гетерогенной структуры, проведено расчетное определение эффективных физико-механических свойств. Корректность разработанной модели подтверждается сопоставлением спектров собственных частот гетерогенной и гомогенной модели стержня в исследуемом диапазоне.

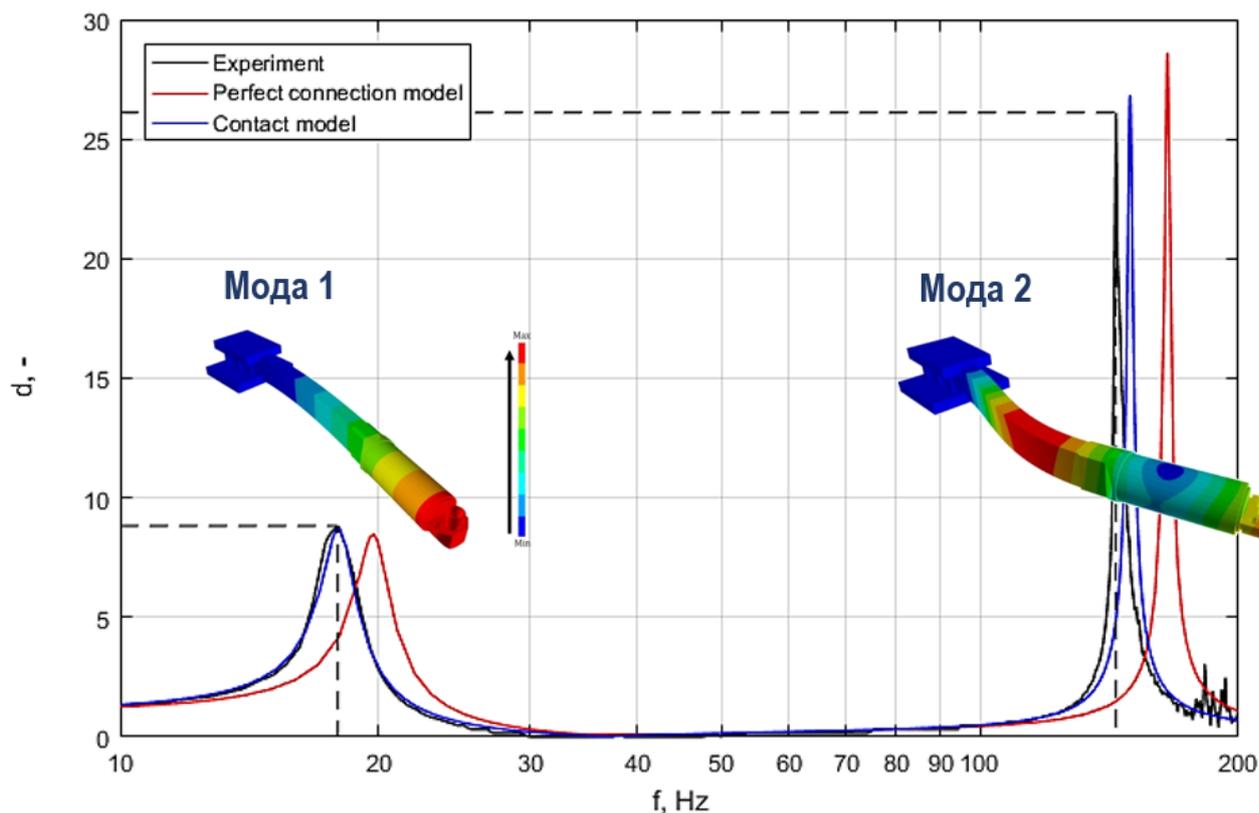


Рисунок 3. Экспериментальная и расчетные АЧХ шины с наконечником

Пятая глава посвящена разработке цифровой модели торцевой зоны статора турбогенератора, позволяющей проводить оценку основных вибрационных характеристик и анализ прочности. Торцевые зоны являются одними из наиболее вибронагруженных частей статора, к их основным элементам относятся лобовые части стержней обмотки, соединительные шины, головки, кронштейны шинодержателей и ряд других.

Для статора рассматриваемой конструкции в ряде точек экспериментальным путем построены АФЧХ в диапазоне 80.0 – 103.3 Гц, на основе которых является возможным определение резонансных частот колебаний элементов с установленными датчиками вибрации. Для разработанной модели торцевой зоны проведен модальный анализ в аналогичном диапазоне частот. Отклонение расчетных и натуральных собственных частот в количестве 12 шт. для рассматриваемых элементов конструкции не превышает 3%, что может косвенным образом свидетельствовать о корректности разработанной модели (рисунок 4).

Гармонический анализ в рассматриваемом диапазоне частот демонстрирует различную степень корреляции между натурными и расчетными АЧХ, от достаточно сильной зависимости до сравнительно невысоких значений для ряда элементов торцевой зоны. Основной причиной отклонений результатов, по всей видимости, является неучет нагрузок от действия электромагнитных сил на элементы шинного кольца и невозможности их определения в рамках применяемой в настоящее время в ПАО «Силловые машины» методики квазидвухмерного электромагнитного

расчета. Поэтому, в целях повышения корректности проводимых вибрационных и прочностных оценок, требуется совершенствование методики проведения электромагнитного расчета.

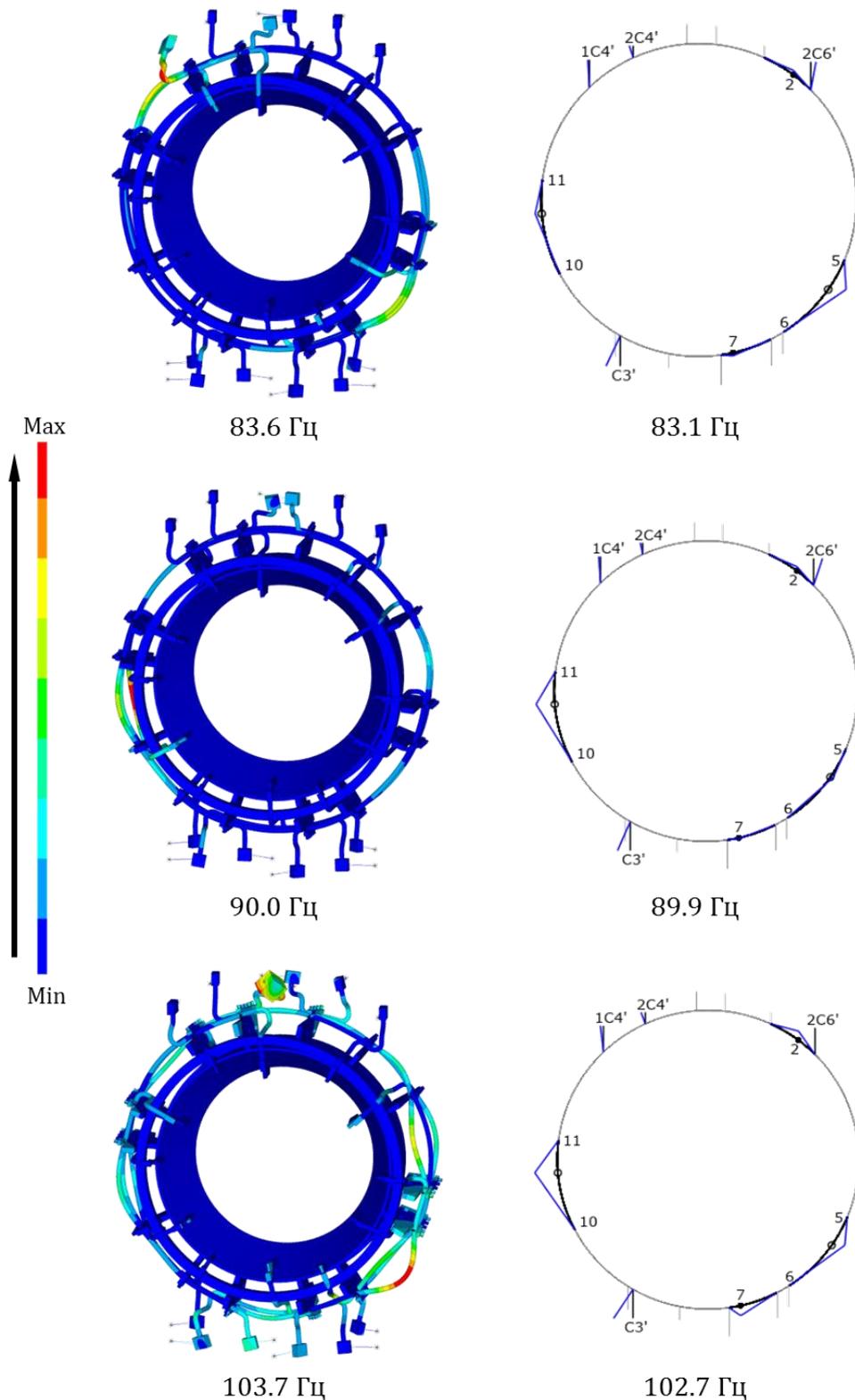


Рисунок 4. Некоторые формы и частоты колебаний торцевой зоны статора по результатам моделирования (слева) и в натурном эксперименте (справа)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования могут быть напрямую применены для целей вибрационной отстройки основных элементов статора и проведения уточненной оценки их комплексного состояния. Используемые в работе подходы к цифровому моделированию могут послужить основой для разработки нормативных документов, регламентирующих подготовку моделей, проведение расчетов и анализ комплексного состояния статоров в различных эксплуатационных режимах. В рамках нового технологического уклада Industry 4.0 и сопутствующему тренду по цифровизации предприятий, разработанные подходы могут быть применены для создания цифровых двойников (Digital Twins) статоров, что позволит управлять полным жизненным циклом турбогенератора.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующих положениях.

1. Разработан новый аналитический метод расчета собственных частот плоских колебаний сердечников статоров, основанный на представлении сердечника в виде длинного толстостенного цилиндра, в отличие от модели тонкого кольца, применяемой в инженерной практике. Проведенные сопоставления с результатами моделирования показывают, что предложенный метод позволяет проводить оценки с заметно более высокой степенью точности, чем обычно используемые в инженерной практике подходы.

2. Область применения метода прямой гомогенизации расширена на случай полых цилиндрических тел, для базовых задач сформулированы граничные условия.

3. Предложен метод определения эффективных физико-механических свойств сердечников статоров, основанный на методе прямой гомогенизации. Корректность определенных эффективных свойств подтверждена сопоставлением расчетных результатов с данными натурных испытаний по определению собственных частот и форм колебаний, проведенных на сердечнике статора турбогенератора мощностью 1000 МВт.

4. На базе проблемы моделирования вибрационного состояния сердечников статоров разработана программа UCH (Unit Cell Homogenizator), автоматизирующая процесс расчетного определения эффективных физико-механических свойств композитных материалов.

5. На основании проведенного термомеханического анализа пазовой части статора на базе турбогенератора мощностью 220 МВт установлено, что наиболее нагруженной областью изоляции является угловая зона верхнего стержня обмотки, здесь наиболее вероятен риск зарождения и развития дефектов в виде расслоений структуры изоляции или отслоений от токоведущей части. Для снижения вероятности появления дефектов в изоляции является целесообразным снижение общего уровня температур и ее перепада по толщине, что может быть обеспечено за счет увеличения теплопроводности изоляции.

6. Показана рациональность прямого моделирования контактных зон в элементах крепления токоведущих шин, сопоставление с данными натуральных испытаний свидетельствуют о существенном повышении точности оценок вибрационных характеристик по сравнению со стандартно применяемыми в инженерной практике подходами, где зоны крепления моделируются условиями идеального сопряжения.

7. Разработана цифровая модель торцевой зоны статора турбогенератора мощностью 1200 МВт (проект АЭС-2006), позволяющая проводить оценку основных вибрационных характеристик и анализ прочности. Отклонение расчетных и натуральных собственных частот для рассматриваемых элементов конструкции не превышает 3%. Гармонический анализ демонстрирует различную степень корреляции между натурными и расчетными АЧХ, от достаточно сильной зависимости до сравнительно невысоких значений для ряда элементов торцевой зоны. Основной причиной отклонений результатов, по всей видимости, является неучет нагрузок от действия электромагнитных сил на элементы шинного кольца, что свидетельствует о необходимости совершенствования применяемой в настоящее время в ПАО «Силовые машины» методики электромагнитного расчета.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 12 статей, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, публикации которых признаются Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России:

1. Petrenya, Y.K., Gaev, A.V. & **Shevchuk, R.E.** Method of Numerical Simulation of the Vibrations of a Stator Core. Power Technology and Engineering, 2018, Volume 52, Issue 2, pp 214–222.

2. Ю.К. Петреня, А.В. Гаев, **Р.Э. Шевчук**. Метод численного моделирования колебаний сердечников статоров // Электрические станции. 2018. № 2 (1039). С. 44-52.

3. **Р.Э. Шевчук**, А.В. Гаев. Метод приближенного решения задачи о колебаниях сердечников статоров // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С.98–106.

4. Гаев А.В., **Шевчук Р.Э.** Расчетно-экспериментальная методика анализа и оценки вибрационного состояния токоведущих элементов электрических машин с композитной изоляцией // Надежность и безопасность энергетики. – М.: «НПО Энергобезопасность», №4 (35), 2016. – с. 60 – 65.

5. Гаев А.В., Данюшевский И.А., **Шевчук Р.Э.**, Журавлев Д.Н. Разработка методики оценки надежности и безопасности тепломеханического оборудования // Надежность и безопасность энергетики. – М.: «НПО Энергобезопасность», №2 (29), 2015. – с. 65 – 69.