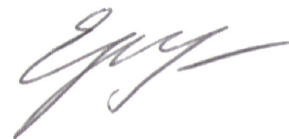


На правах рукописи



ЕРМАКОВ Евгений Григорьевич

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ДИАГНОСТИКИ СИЛОВЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ ВЫСШИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.14.12 –Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель - кандидат технических наук
Монастырский Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты : доктор технических наук, профессор
Андреев Александр Михайлович;

кандидат технических наук
Привалов Игорь Николаевич

Ведущая организация - ОАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Северо-Запада»

Защита состоится «26» ноября 2010 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «21» октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие промышленности в России в последние годы обуславливает увеличение потребления электрической энергии и, как следствие, рост нагрузки на электроэнергетическое оборудование. В то же время большое количество (50 % – 60 % эксплуатируемого парка) силовых трансформаторов, которые являются наиболее важным и дорогостоящим оборудованием электроэнергетики, эксплуатируются с превышением назначенного ресурса (расчетного срока службы). С другой стороны, многие специалисты отмечают, что менять трансформатор по истечении его назначенного ресурса (25 – 30 лет) зачастую оказывается нецелесообразно. Дело в том, что, если условия работы оборудования на протяжении срока эксплуатации соответствовали расчетным, а нагрузки не превышали номинальных значений, велика вероятность того, что состояние его твердой изоляции (основной параметр, определяющий реальный срок службы трансформатора) после завершения назначенного ресурса останется удовлетворительным. Вместе с тем для обеспечения требуемого уровня надежности работы энергосистемы, при дальнейшей эксплуатации оборудования, исчерпавшего назначенный ресурс, особое внимание должно быть уделено контролю его технического состояния. Таким образом, на современном этапе развития энергетики повышается актуальность вопросов диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения.

Необходимо отметить, что за прошедшие годы была проделана большая работа по созданию методов диагностики трансформаторного оборудования, позволяющих при комплексном их применении адекватно оценить состояние обследуемого объекта с надежностью, достигающей 98 %. Однако, несмотря на это, количество трансформаторов, "доживающих" до отказов по причине термохимического старения твердой изоляции (естественный износостойкий отказ), составляет по разным источникам от 7 % до 20 %. То есть причиной отказа от 80 % до 93 % трансформаторов являются различные своевременно не выявленные дефекты. Данная ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Традиционная схема (проведение плановых комплексных обследований) разрабатывалась для условий плановой экономики СССР, принципы которой исключали возможность эксплуатации большого количества оборудования сверх расчетного периода. Соответственно, период комплексных обследований выбирался с учетом вероятностей появления и скоростей развития дефектов в трансформаторах с наработкой до 25 лет и не учитывает особенности развития дефектов в состаренном оборудовании. Вследствие этого в современных условиях участились случаи, когда за период между обследованиями дефект успевает зародиться, развиваться и вызвать аварийный отказ трансформатора. При этом простое сокращение интервала проведения обследований приводит к неприемлемому увеличению затрат на диагностику, что говорит о необходимости разработки схемы диагностики, эффективной в современных условиях.

Объектом исследования в данной работе является схема диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения. **Предметом исследования** – методы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения.

Современные условия заставляют отказаться от плановых единовременных измерений всех контрольных параметров (физико-химических величин, определяющих процессы, развивающиеся в оборудовании) с тем, чтобы обеспечить учащенный контроль наиболее опасных дефектов без дополнительных затрат на контроль развития дефектов, появление которых маловероятно. Появляются попытки дифференцировать интервалы измерений параметров с учетом их информативности и опасности соответствующих выявляемых дефектов: специалисты эксплуатационных служб энергетических предприятий выбирают параметры для учащенного контроля, основываясь зачастую прежде всего лишь на собственном опыте и интуиции. Так, например, в ОАО «МРСК Северо-Запада», если по результатам проведения на трансформаторе хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ) контрольные параметры выходят за допустимые пределы, трансформатор ставится на учащенный контроль по ХАРГ (проводится 1 раз в 3 месяца).

Безусловно, данные меры в ряде случаев способны повысить надежность эксплуатируемого оборудования. Однако субъективность при выборе методов учащенного контроля существенно снижает эффективность данного подхода. Например, в случае развития разрядных процессов в трансформаторах с длительной наработкой, хроматография обладает значительным запаздыванием (время, необходимое для накопления достаточной для регистрации дефекта концентрации соответствующих газов, зачастую сопоставимо со временем развития дефекта до критической стадии) и неспособна выявить дефект на ранней стадии развития. Таким образом, оборудование ОАО «МРСК Северо-Запада», стоящее на учащенном контроле (в основном эксплуатируется более 25 лет), фактически не диагностируется на предмет развития частичных разрядов (ЧР). Между тем наличие частичных разрядов является индикатором состояния изоляции трансформатора.

Вышеизложенное формирует **цель работы**: оптимизация традиционной схемы диагностики трансформаторов высших классов напряжения.

Достижение поставленной цели связывается в данной диссертационной работе с **решением следующих задач**:

- изучение дефектов, возникающих в силовых трансформаторах высших классов напряжения, определение наиболее опасных из них;
- изучение методов диагностики, применяемых для выявления соответствующих дефектов;
- оценка эффективности традиционной схемы контроля технического состояния силовых трансформаторов;
- определение наиболее эффективных методов диагностики для учащенного контроля наиболее опасных дефектов;

- исследование проблем выявления дефектов методом диагностики трансформаторов, основывающимся на измерении характеристик частичных разрядов, и предложение их решений;
- разработка оптимизированной двухступенчатой схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения;
- оценка эффективности применения оптимизированной схемы.

При решении поставленных задач использовались следующие **методы исследования**: анализ статистических данных по отказам трансформаторов; проведение экспериментов на модельных образцах изоляции трансформатора; компьютерное моделирование.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, и **основные положения, выносимые на защиту**:

1. Выявлены особенности развития дефектов различного вида по характеристикам частичных разрядов в продольной и главной изоляции трансформатора.

2. Разработана методика проведения измерения частичных разрядов в образцах бумажно-масляной изоляции. Разработаны и изготовлены испытательные камеры и модельные образцы изоляции для проведения соответствующих исследований.

3. Разработана схема измерителя частичных разрядов, позволяющая минимизировать влияние длительности ЧР на достоверность измерений.

4. Разработана двухступенчатая схема диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения, обеспечивающая большую эффективность контроля технического состояния трансформаторов по сравнению с традиционной схемой.

Прикладная ценность полученных результатов:

1. Выявлены характерные признаки развития дефектов, позволяющие идентифицировать дефект изоляции трансформатора по характеристикам частичных разрядов.

2. Усовершенствована методика измерения ЧР: минимизировано влияние параметров трансформатора и измерительной цепи на результаты измерений частичных разрядов.

3. Разработаны алгоритмы проведения обследований трансформаторов по оптимизированной схеме диагностики, обеспечивающие минимальное число коммутаций обследуемого оборудования, а также минимальные трудозатраты.

Реализация результатов. Результаты исследования используются специалистами ООО «Дизкон» (Санкт-Петербург) и ЗАО «Энергобаланс» (Санкт-Петербург) при проведении обследований силовых трансформаторов высших классов напряжения. Результаты исследования включены в материал лекции «Диагностика силовых трансформаторов по характеристикам частичных разрядов», которая читается в Петербургском энергетическом институте повышения квалификации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях «Неделя

науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2006, 2009); всероссийских форумах студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010); политехнических симпозиумах «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона» (Санкт-Петербург, 2008, 2009, 2010); восемьдесят первом всероссийском семинаре с международным участием «Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики» (Санкт-Петербург, 2009); XII международной научно-технической конференции «Трансформаторостроение 2009» (Украина, Запорожье, 2009); тридцать третьем международном семинаре «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования» (Казань, 2009); седьмом ежегодном семинаре «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования» (Пермь, 2010); пятой международной научно-технической конференции «Электрическая изоляция – 2010» (Санкт-Петербург, 2010); международной научно-технической конференции «Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы» (Екатеринбург, 2010).

Проект «Индикативная диагностика трансформатора», разработанный на основе материалов, содержащихся в данной диссертационной работе, является победителем «Конкурса на лучшие инновационные проекты в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга в 2009 году» в номинации «*Лучшая научно-инновационная идея*» (Санкт-Петербург, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано одиннадцать работ, из них две работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, общим объемом 128 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет, цель, задачи и методы исследования, раскрыты научная новизна и практическая ценность результатов исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, дан краткий обзор диссертации по главам.

В первой главе произведен обзор дефектов, возникающих в основных элементах конструкции трансформаторов (обмотках, изоляции, магнитопроводе, устройствах РПН, системе охлаждения, высоковольтных вводах и др.). На основании анализа статистики отказов определены наиболее опасные дефекты (табл. 1). На долю дефектов, приведенных в табл. 1 приходится в среднем около 90 % аварийных отказов силовых трансформаторов. Причем на первый план однозначно выходят изоляционные проблемы. На их долю по оценкам различных авторов приходится от 43 % до 70 % и выше отказов силовых трансформаторов высших классов напряжения.

В данной главе для анализа использованы данные о повреждаемости силовых трансформаторов, полученные из книг А.Б. Алексева и

А.Е. Монастырского, а также данные других авторов, опубликованные в сборниках трудов научно-технических семинаров и конференций.

Таблица 1

Наиболее опасные дефекты силовых трансформаторов

Дефекты продольной и главной изоляции	Загрязнение твердой изоляции
	Увлажнение твердой изоляции
	Старение масла
	Загрязнение масла
	Разряд в масляном клине
	Пробой масляного канала
	Скользкий разряд по поверхности твердой изоляции
	Ползущий разряд
Дефекты обмоток	Ослабление прессовки
Прочие дефекты	Дефекты РПН
	Дефекты высоковольтных вводов
	Повреждение двигателей системы охлаждения

Во второй главе описаны методы диагностики для выявления дефектов силовых трансформаторов в эксплуатации как нормативные, применение которых регламентируется РД 34.45-51.300-97, так и альтернативные, находящие широкое применение в последние годы. Проанализирована традиционная схема диагностики, отмечена ее низкая эффективность.

Традиционная схема диагностики предполагает проведение плановых комплексных обследований трансформаторов как нормативными, так и альтернативными методами. При таком подходе состояние оборудования определяется с максимальной достоверностью, так как выявляются все основные виды дефектов. Однако высокая достоверность комплексного обследования сопряжена с высокой стоимостью, поэтому, исходя из соображений экономической целесообразности, его проводят не чаще одного раза в 8 – 12 лет. Вместе с тем период развития дефектов твердой изоляции от начальной до критической стадии в трансформаторах с длительной наработкой может составлять 1 год и менее, что не позволяет традиционной схеме своевременно выявлять в трансформаторе развивающиеся дефекты.

Исходя из изложенного и учитывая тот факт, что 90 % отказов трансформаторов обусловлено сравнительно небольшой группой дефектов (см. табл. 1), становится очевидно, что современные условия вынуждают отказаться от практики плановых обследований трансформаторов на предмет выявления всех известных дефектов и сконцентрироваться на выявлении ключевых. Необходимо обеспечить контроль ключевых дефектов в адекватные сроки методами, позволяющими выявлять дефекты с минимальным запаздыванием, и обеспечить возможность измерения контрольных параметров без отключения оборудования.

Для этих целей предложена группа методов, включающая: ХАРГ, физико-химический анализ масла (ФХА), вибродиагностику, измерение ЧР. Последний метод является основным в данной группе, так как выявляет изоляционные дефекты, на долю которых приходится подавляющее количество отказов

трансформаторов. Регистрация ЧР электрическими методами позволяет без запаздывания не только выявить дефект, но и определить его вид и степень развития, а также определить место развития дефекта при одновременном применении акустических методов регистрации. Но регистрация частичных разрядов в трансформаторном оборудовании на действующих подстанциях имеет ряд технических трудностей, в силу чего до настоящего времени эта методика является скорее искусством, нежели инженерной практикой. В большой степени это связано с отсутствием данных для идентификации дефектов по характеристикам ЧР и влиянием на регистрируемые характеристики ЧР параметров трансформатора и элементов измерительной цепи. Исходя из изложенного, оптимизация схемы диагностики силовых трансформаторов требует поиска путей решения данных проблем.

Третья глава посвящена поиску уникальных отличительных признаков развития дефектов по характеристикам ЧР.

К основным видам дефектов, развивающихся в изоляции трансформаторов, относятся: пробой масляного канала, разряды в масляном клине, ползущий разряд, скользящий разряд. Поскольку детальное изучение характеристик ЧР при развитии различных видов дефектов в реальных силовых трансформаторах 110 кВ и выше связано с определенными организационными и материальными трудностями, на первом этапе исследования проводились на модельных образцах изоляции в лабораторных условиях.

Модель разряда в масляном канале представляла собой два скрещенных металлических цилиндра с намотанной на них бумагой толщиной 1 мм. Зазор между бумажными покрытиями составлял 1 мм. Модель разряда в масляном клине аналогична предыдущей, но с отсутствием масляного канала. Для моделирования скользящего разряда использовались два плоских круглых электрода диаметрами 114 мм и 40 мм с проложенной между ними картонной пластиной. Ползущий разряд исследовался с плоскими электродами одинакового диаметра (114 мм), но картонный барьер устанавливался под углом к поверхности электродов, а для зарождения ползущего разряда имелась иницирующая игла. Модели устанавливались в специально разработанной испытательной камере. Перед проведением экспериментов изоляционные конструкции помещались на 24 часа в термостат для сушки целлюлозной изоляции. Заливка моделей маслом производилась под вакуумом, что позволяло практически исключить возможность появления пузырьков воздуха в образцах.

Исследования проводились по следующей методике. На испытательную камеру от высоковольтной установки подавалось напряжение 50 Гц, значение которого плавно поднималось до появления ЧР с уровнем кажущегося заряда выше 50 пКл. После регистрации характеристик частичных разрядов на данном уровне напряжение выдерживалось 10 минут, после чего производилась повторная регистрация. В случае если развитие дефекта на этом уровне не выявлялось, напряжение поднималось ступенчато с шагом 2 кВ. Эта процедура повторялась либо до появления постоянно повторяющихся мощных ЧР, либо до выявления развития дефекта. После этого без изменения напряжения 1 раз в

десять минут производился съем характеристик ЧР до пробоя образца. В ходе экспериментов при помощи прибора «СКИТ ЧР» происходила регистрация осциллограмм импульсов частичных разрядов, фазовых диаграмм (каждый ЧР изображался в виде точки в фазе, соответствующей моменту фиксации разряда с соответствующим кажущимся зарядом) и амплитудных спектров (представляют собой графики, изображающие количество регистрируемых частичных разрядов в секунду соответственно амплитудным значениям их кажущегося заряда). На основании полученных результатов выявлялись характерные особенности для данного вида дефекта (см., например, рис. 1). Характерными признавались результаты, повторяемость которых наблюдалась не менее чем в 70 % экспериментов. После пробоя модельного образца его целлюлозная изоляция изучалась на предмет выявления наглядных признаков дефекта исследуемого вида для подтверждения корректности полученных результатов (см., например, рис. 2).

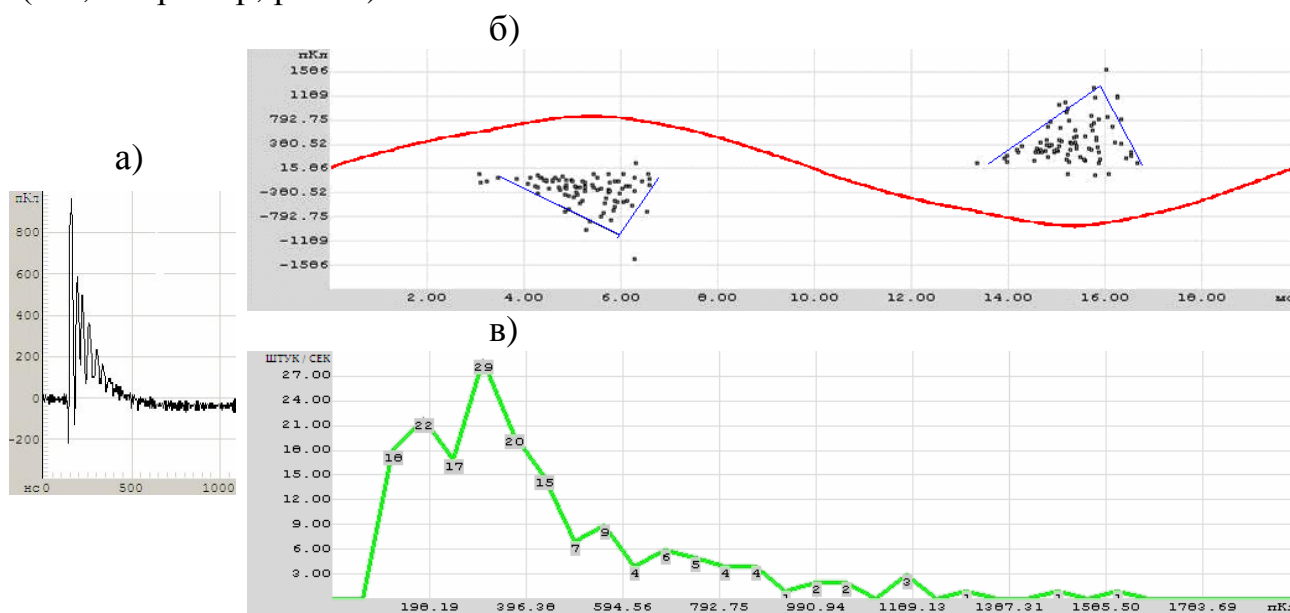


Рис. 1. Пробой масляного канала, II стадия: а) характерная осциллограмма ЧР; б) характерная фазовая диаграмма; в) характерный амплитудный спектр

Результаты проведенного исследования (в общей сложности более ста экспериментов) позволили сформулировать характерные уникальные отличительные признаки дефектов и стадий их развития по характеристикам ЧР (табл. 2). Результаты исследования, в том числе показали, что частичные разряды в масле и целлюлозе существенно различаются по длительностям процессов: регистрируемые на осциллограммах электрические импульсы ЧР имеют длительности фронта порядка десятков нс («короткие») и сотен нс («длинные») соответственно (см., например, рис. 3). Следовательно, выявлению «длинных» импульсов, как индикатору необратимого разрушения



Рис. 2. Характерный след развития ползущего разряда

твердой изоляции трансформатора, должно быть уделено особое внимание при измерении ЧР.

Таблица 2

Характерные уникальные отличительные признаки дефектов

Вид дефекта	Признаки
1	2
Пробой масляного канала	<p>I стадия (твердая изоляция не повреждена):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Фазовая диаграмма в форме треугольника, вершина которого смещена на 1 – 2 мс вправо относительно экстремумов синусоиды воздействующего напряжения. • Амплитудный спектр в виде экспоненты с экстремумом, соответствующим ЧР с минимальным кажущимся зарядом. • Кажущийся заряд ЧР не превышает 300 пКл; длительность фронта импульса ЧР порядка десятков нс. <p>II стадия (начало разрушения твердой изоляции):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Рисунок фазовой диаграммы по геометрии подобен первой стадии. • Амплитудный спектр подобен первой стадии. • Кажущийся заряд ЧР не превышает 1000 пКл; фронт порядка десятков нс. • Звуковой эффект в виде отдельных щелчков от наиболее мощных ЧР. <p>III стадия (глубокое повреждение твердой изоляции с последующим пробоем):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Рисунок фазовой диаграммы по геометрии подобен предыдущим стадиям, несколько увеличивается разброс фаз наиболее мощных ЧР, ослабевает их привязка к экстремумам синусоиды воздействующего напряжения. • На амплитудном спектре появляются 2 экстремума, соответствующие ЧР с максимальным кажущимся зарядом на отрицательной и положительной полярностях. • Сложные каскады ЧР: появляются «длинные» разряды (фронт порядка сотен нс), на которые накладываются ЧР второй стадии. «Длинные» разряды в разы уступают «коротким» по величине кажущегося заряда. Длительность каскада составляет в среднем от 5 до 10 мкс. • Звуковой эффект в виде отдельных щелчков от наиболее мощных ЧР.
Разряд в масляном клине	<p>Две стадии развития дефекта. Вторая стадия (предпробойная) отличается резким увеличением частоты следования ЧР, очень скоротечна. Общие признаки дефекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Рисунок фазовой диаграммы в виде фигуры, состоящей из двух треугольников: в начале периода воздействующего синусоидального напряжения количество и кажущийся заряд ЧР возрастают, однако, начиная с третьей мс и до экстремума, образуется некий провал, разбивающий треугольник фазовой диаграммы на два. • Каскады ЧР, представляющие собой последовательность «коротких» (фронт порядка десятков нс) и «длинных» (фронт порядка сотен нс (до 1 мкс)) разрядов; доля «длинных» разрядов в каскаде с развитием дефекта увеличивается. Кажущийся заряд «длинных» разрядов на порядок меньше «коротких». Длительность каскада составляет в среднем от 5 до 10 мкс. • Амплитудный спектр в виде экспоненты с экстремумом, соответствующим ЧР с минимальным кажущимся зарядом. • Звуковой эффект: отдельные щелчки от наиболее мощных разрядов.

Таблица 2 (продолжение)

1	2
Скользящий разряд	<p>Постепенное развитие дефекта без ярко выраженных границ стадий. Общие признаки:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Рисунки фазовых диаграмм: вначале имеют форму треугольника с вершиной, соответствующей экстремуму воздействующего на образец синусоидального напряжения. По мере развития дефекта область, содержащая ЧР с максимальным кажущимся зарядом, постепенно расширяется, захватывает практически всю синусоиду и обособливается от остальной части фазовой диаграммы. • Амплитудные спектры: в начале развития имеют вид экспоненты с экстремумом, соответствующим ЧР с минимальным кажущимся зарядом. Затем на спектрах появляются 2 экстремума, соответствующие ЧР с максимальным зарядом на отрицательной и положительной полярностях воздействующего напряжения. • В начале развития дефекта следуют только «короткие» импульсы (фронт порядка десятков нс); затем появляются каскады ЧР длительностью от 10 до 20 мкс и более, содержащие «длинные» разряды (фронт порядка сотен нс), на которые накладываются «короткие» ЧР. «Длинные» разряды имеют величину кажущегося заряда того же порядка, что и «короткие». • Звуковой эффект: непрерывный треск от наиболее мощных разрядов.
Ползущий разряд	<p>Постепенное развитие дефекта без ярко выраженных границ стадий. Общие признаки дефекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Рисунки фазовых диаграмм: вначале имеют форму треугольника с вершиной, соответствующей экстремуму воздействующего на образец синусоидального напряжения. По мере развития дефекта область, содержащая ЧР с максимальным кажущимся зарядом, постепенно расширяется, захватывает практически всю синусоиду и затем постепенно сосредотачивает в себе все развивающиеся частичные разряды. • Амплитудные спектры: в начале развития имеют вид экспоненты с экстремумом, соответствующим ЧР с минимальным кажущимся зарядом. Затем на спектрах появляются 2 экстремума, соответствующие ЧР с максимальным кажущимся зарядом на отрицательной и положительной полярностях воздействующего напряжения. На поздней стадии развития экстремум, соответствующий разрядам с минимальным зарядом исчезает. • Каскады ЧР, содержащие «длинные» разряды (фронт порядка сотен нс), на которые накладываются «короткие» ЧР. «Длинные» разряды существенно превышают «короткие» по величине кажущегося заряда. Длительность каскада составляет в среднем от 5 до 10 мкс. • Звуковой эффект: непрерывный треск от наиболее мощных разрядов.

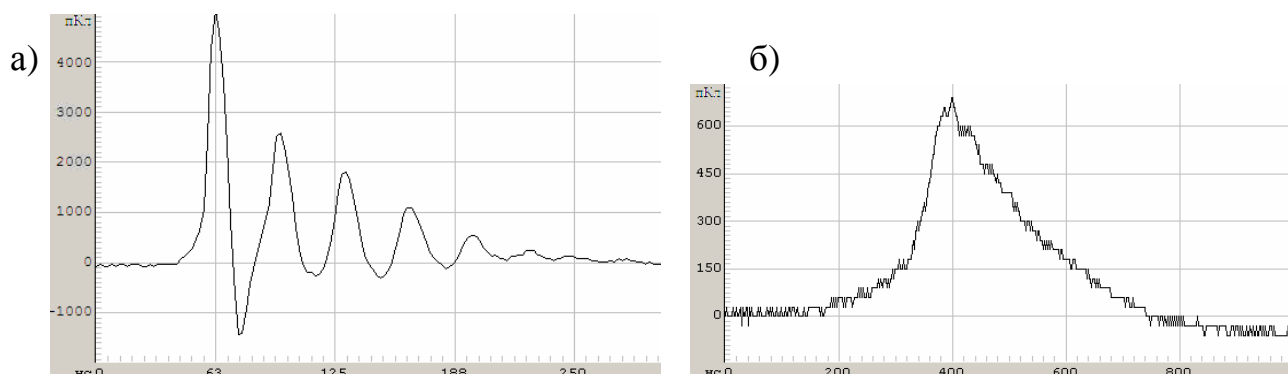


Рис. 3. Модель развития разрядов в масляном клине, характерные осциллограммы ЧР: а) «короткий» ЧР, 63 нс/дел.; б) «длинный» ЧР, 200 нс/дел.

Выявленные характерные уникальные отличительные признаки дефектов и стадий их развития могут быть использованы для идентификации дефектов изоляции по характеристикам частичных разрядов. Однако необходимо учесть, что в случае измерения частичных разрядов на реальном трансформаторе, на регистрируемые характеристики влияют параметры данного оборудования и измерительной цепи, что может изменить характерные признаки дефектов. Таким образом, необходимо оценить и учесть данное влияние либо принять меры по его устранению.

В четвертой главе разработан способ минимизации влияния на регистрируемые характеристики частичных разрядов параметров трансформатора и элементов измерительной цепи. При измерении ЧР электрическим методом, кроме уровня внешних помех, достоверность регистрируемых электрических характеристик частичных разрядов зависит от:

1) места возникновения ЧР в обмотке (чем дальше путь сигнала от очага разряда до измерительной аппаратуры, тем больше его затухание);

2) длительности фронта импульса ЧР (разряды, различающиеся по длительности процесса, регистрируются аппаратурой с различной достоверностью);

3) времени нарастания градуировочного импульса (влияет на точность градуировки).

Исследования по определению степени влияния данных факторов на достоверность измерений и поиску возможностей его минимизации проводились расчетным путем с использованием программного комплекса «Orcad» на примере трансформатора типа ТРДН-80000/110. В ходе исследований составлялась схема замещения обмотки трансформатора и измерительной цепи, параметры которой рассчитывались по каталожным данным по методике, использовавшейся д.т.н., проф. Г.С. Кучинским. Для возможности моделирования ЧР в различных местах обмотки, она разбивалась на 10 равных ячеек (нумеруются по порядку от заземленного края обмотки). После этого рассчитывалась достоверность измерения частичных разрядов, которая определялась следующим образом. Прежде всего, рассчитывался процесс градуировки измерительной схемы (градуировочные импульсы моделировались импульсами прямоугольной формы с временами нарастания $t_{фг}$, соответствующими требованиям ГОСТ 20074-83 и МЭК (IEC 60270)). Затем в одной из ячеек обмотки моделировался ЧР – импульс прямоугольной формы с определенным кажущимся зарядом $q_{чр0}$ и длительностью фронта импульса $t_{фчр}$, и на измерительном элементе схемы регистрировался расчетный измеряемый кажущийся заряд частичного разряда $q_{чр}$. Достоверность результатов определялась путем вычисления отношения расчетного измеряемого значения кажущегося заряда ЧР к исходному моделируемому значению кажущегося заряда частичного разряда – коэффициента достоверности:

$$K_d = q_{чр}/q_{чр0}. \quad (1)$$

Значение K_d показывает долю значения кажущегося заряда возникшего в изоляции обмотки ЧР, которую регистрирует измерительная схема и,

следовательно, в идеале оно должно составлять единицу. Соответственно, величина обратная коэффициенту достоверности показывает, во сколько раз результат измерений кажущегося заряда занижен.

В соответствии с требованиями ГОСТ 20074-83, при регистрации характеристик частичных разрядов измерительная аппаратура должна измерять сигналы, имеющие частоту до 2 МГц. Однако в настоящее время зачастую высказывается мнение о том, что более целесообразным является измерять сигналы всех частот. Приведенные ниже (табл. 3; левая часть) результаты расчетов K_D опровергают это предположение и показывают недопустимо низкий уровень достоверности измерений характеристик ЧР даже без учета внешних помех.

Таблица 3

Расчетные значения K_D

Ячейка	$t_{фЧР}$, нс	$t_{фэ} =$ 10 нс	$t_{фэ} =$ 30 нс	$t_{фэ} =$ 60 нс	$t_{фэ} =$ 100 нс	$t_{фэ} =$ 10 нс	$t_{фэ} =$ 30 нс	$t_{фэ} =$ 60 нс	$t_{фэ} =$ 100 нс
		Регистрация сигналов всех частот				Пассивный пятиступенчатый RC- фильтр с частотой среза 2 МГц			
1	10	0,009	0,014	0,014	0,017	0,031	0,031	0,031	0,032
	100	0,007	0,012	0,012	0,015	0,031	0,031	0,031	0,032
	1000	0,004	0,006	0,006	0,007	0,028	0,028	0,028	0,029
6	10	0,083	0,136	0,135	0,163	0,289	0,290	0,291	0,292
	100	0,072	0,118	0,117	0,142	0,289	0,290	0,291	0,292
	1000	0,034	0,056	0,055	0,067	0,283	0,284	0,285	0,287
10	10	0,282	0,461	0,460	0,555	0,980	0,983	0,986	0,991
	100	0,244	0,399	0,398	0,481	0,977	0,980	0,983	0,989
	1000	0,115	0,188	0,188	0,227	0,955	0,957	0,960	0,966

Перечислим основные положения, обосновывающие данное утверждение:

1) Ошибка при измерениях менее чем на порядок, возможна только в случае развития разрядов в ближайшей к вводу половине обмотки.

2) Кроме естественного затухания сигнала в зависимости от места возникновения частичного разряда в обмотке (номера ячейки), на значения коэффициента влияет длительность фронта импульса ЧР. Так, различие в достоверности измерения частичных разрядов внутри одной ячейки достигает 2,4 раза. В результате «длинные» ЧР, например десятой ячейки, затухают в 2,4 раза сильнее по сравнению с «короткими». Учитывая, что в ходе экспериментов было установлено, что в ряде случаев «длинные» ЧР изначально имеют кажущийся заряд на порядок меньший «коротких», регистрация «длинных» разрядов становится крайне затруднительной, практически невозможной. Между тем, в третьей главе данной диссертационной работы было установлено, что регистрация именно «длинных» (фронты порядка 100 нс до 1 мкс) импульсов свидетельствует о необратимом разрушении твердой изоляции. Кроме того, в результате зависимости достоверности измерений от фронта импульса частичного разряда серьезно нарушается геометрия рисунков фазовых диаграмм и амплитудных спектров.

3) Обнаруживается зависимость результата измерений от времени нарастания градуировочного импульса. Так, при $t_{\phi z} = 10$ нс имеем результат наихудший по достоверности. Даже при развитии ЧР в непосредственной близости от ввода трансформатора (ячейка 10) невозможно измерить кажущийся заряд ЧР, ошибившись менее чем в 3,5 – 8,7 раз (в зависимости от фронта импульса). С ростом времени нарастания градуировочных импульсов достоверность измерений возрастает, однако ситуация продолжает оставаться неудовлетворительной: в десятой ячейке при $t_{\phi z} = 100$ нс (наибольшее время нарастания градуировочного импульса из диапазона, регламентированного ГОСТ 20074-83) ошибка измерений составляет от 1,8 до 4,4 раза.

Регистрация сигналов всех частот приводит к тому, что на форму и амплитуду регистрируемого импульса оказывают существенное влияние высокочастотные помехи колебательного характера (рис. 4 а, б), возникающие за счет наличия индуктивности отвода (соединяет обмотку и высоковольтный ввод) и индуктивности контура подключения градуировочного генератора. На практике подавить данные колебания путем исключения соответствующих индуктивностей невозможно. Следовательно, необходима отстройка от высокочастотных помех, а значит, регистрация сигналов всех частот при измерении ЧР приводит к значительным погрешностям.

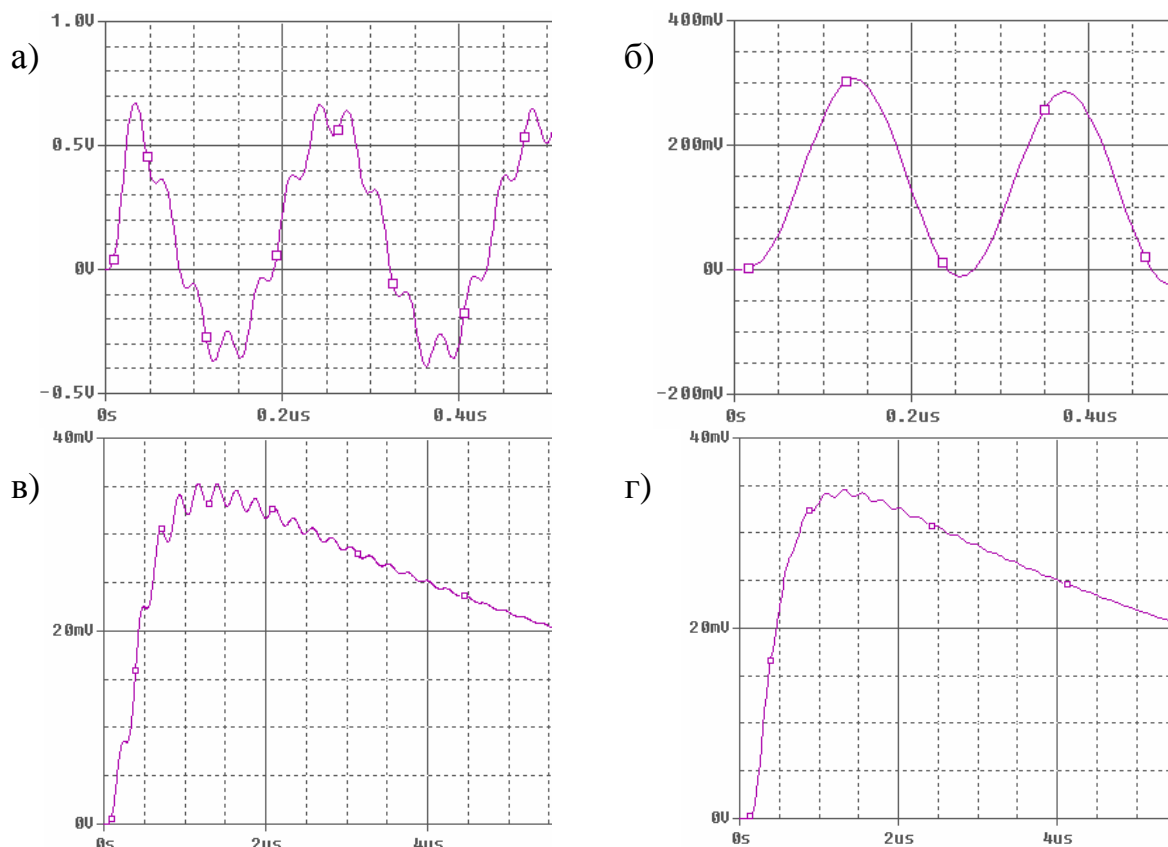


Рис. 4. Расчетные осциллограммы напряжения на измерительном элементе:
а, б) регистрация сигналов всех частот при градуировке (моделируемый импульс: $t_{\phi z} = 30$ нс) и при измерении ЧР (10 ячейка, моделируемый импульс: $t_{\phi ЧР} = 30$ нс), соответственно: $K_D \approx 0,46$;
в, г) случай аналогичный а, б), но с использованием фильтра: $K_D \approx 1$

Так, расчеты показали, что включение в цепь параллельно измерительному импедансу пассивного пятиступенчатого низкочастотного РС-фильтра с частотой среза 2 МГц, позволяет существенно снизить влияние описанных помех (рис. 4 в, г) и добиться результата оптимального по достоверности измерений ЧР (см. табл. 3; правая часть). Удастся максимально снизить зависимость результата измерений ЧР от длительности фронта импульса частичного разряда и времени нарастания градуировочного импульса. Значения коэффициентов достоверности в десятой ячейке близки к оптимальному значению – единице. Фактически остается только естественное затухание импульса ЧР по длине обмотки, не превышающее полтора порядка. Равенство коэффициентов внутри ячеек позволяет достоверно передавать фазовые диаграммы и амплитудные спектры, и, следовательно, дает возможность применять полученные в третьей главе данной диссертационной работы уникальные отличительные признаки дефектов для их выявления по характеристикам частичных разрядов. Также применение данного фильтра обеспечивает достоверную регистрацию «длинных» импульсов ЧР, свидетельствующих о разрушении твердой изоляции.

Отсутствие влияния времени нарастания градуировочного импульса на достоверность измерений позволяет производить адекватную градуировку схемы, используя импульсы с любой длительностью фронта из диапазона ГОСТ 20074-83.

Таким образом, проведенные в третьей и четвертой главах данной диссертационной работы исследования выявили пути решения проблем применения электрического метода измерения ЧР для контроля технического состояния силовых трансформаторов высших классов напряжения. Обнаружены признаки развития дефектов по характеристикам ЧР и способ борьбы с погрешностями при измерениях, вызываемыми внутренними параметрами трансформатора и измерительной цепи. Данные результаты открывают широкие возможности для инженерного применения электрического метода измерения характеристик ЧР и позволяют перейти к дальнейшей оптимизации схемы диагностики.

Пятая глава посвящена разработке оптимизированной схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения. Как уже неоднократно утверждалось, традиционная схема диагностики силовых трансформаторов неэффективна, так как в большинстве случаев не позволяет выявлять дефекты на ранней стадии их развития. В современных условиях становится целесообразным отказ от плановых комплексных обследований и обеспечение учащенного контроля ключевых дефектов трансформатора. Для учащенного контроля наиболее вероятных и опасных дефектов без увеличения затрат на диагностику в данной работе предлагается перейти к диагностике силовых трансформаторов по следующей двухступенчатой схеме.

Задача первой ступени – определить факт наличия или отсутствия в трансформаторе развивающегося дефекта. Если по результатам обследования в объеме первой ступени выявлен дефект, то для подтверждения необходимости

проведения ремонтных работ или замены трансформатора переходят ко второй ступени. Ее роль выполняет комплексное обследование как нормативными, так и альтернативными методами диагностики силовых трансформаторов.

Во второй главе проработан вопрос учащенного контроля наиболее вероятных и опасных дефектов трансформаторов. Для этих целей выбраны следующие методы: ХАРГ, ФХА, вибродиагностика, измерение ЧР. С учетом разработанных в главах 3 и 4 путей решения выявленных проблем измерения характеристик ЧР, можно сделать вывод, что предложенная группа методов успешно решает задачу первой ступени.

Измерения в объеме первой ступени необходимо проводить не реже 1 раза в 0,5 года. Для выполнения работ по проведению измерений контрольных параметров в рамках первой ступени необходима бригада, состоящая из двух инженеров-испытателей. В зависимости от установленного на трансформаторе оборудования, а также от того, требуется ли градуировка схемы измерения частичных разрядов, разработаны алгоритмы проведения измерений с различными временными затратами (от 80 до 190 минут) и количеством отключений трансформатора (от 0 до 2).

Сравнительная оценка эффективности разработанной двухступенчатой и традиционной схем диагностики проводилась путем расчета так называемых коэффициентов эффективности:

$$K_{эф.} = \frac{N_{эк.}}{N_{треб.}} \nu_{деф.}, \quad (2)$$

где $N_{эк.}$ – количество обследований трансформатора в год, исходя из экономических возможностей служб эксплуатации; $N_{треб.}$ – количество обследований трансформатора в год, необходимое для того, чтобы трансформатор на протяжении периода между обследованиями являлся надежно диагностированным, $\nu_{деф.}$ – процент выявляемых дефектов, являющихся причиной аварийных отказов трансформаторов.

Оценка показала, что разработанная двухступенчатая схема по значениям $K_{эф.}$ превосходит традиционную более чем в 8 раз. Достигается это в первую очередь отсутствием необходимости в проведении плановых комплексных обследований, сопряженных с единовременными высокими затратами.

Также в пятой главе рассмотрена сложившаяся в ОАО «МРСК Северо-Запада» ситуация в области контроля технического состояния силовых трансформаторов напряжением 110, 220 кВ, рекомендовано применение разработанной оптимизированной схемы диагностики, дан ряд практических рекомендаций по ее внедрению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в данной диссертационной работе исследования обеспечили решение комплекса научно-технических проблем по оптимизации традиционной схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения. Была разработана двухступенчатая схема, позволяющая обеспечить эффективный учащенный контроль наиболее опасных дефектов

трансформаторов. Наиболее существенные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1) На основании анализа статистики отказов определены наиболее опасные дефекты трансформаторов.

2) Определены наиболее эффективные для учащенного применения методы диагностики, выявляющие наиболее вероятные и опасные дефекты.

3) Разработаны решения основных проблем, препятствующих эффективному применению электрического метода измерения частичных разрядов:

- разработаны методика исследования, необходимое оборудование, а также модельные образцы изоляции трансформатора, и проведены эксперименты, по результатам которых выявлены характерные признаки развития дефектов главной и продольной изоляции трансформатора и степени их развития по характеристикам частичных разрядов;
- выявлены зависимости достоверности результатов измерения кажущегося заряда частичных разрядов от времени нарастания градуировочных импульсов и длительности ЧР, а также неприемлемо низкая общая достоверность измерений частичных разрядов в случае регистрации сигналов всех частот в измерительной цепи;
- разработана схема измерительной цепи, обеспечивающая оптимальную достоверность измерения кажущегося заряда и наличие влияния на достоверность только естественного затухания сигнала по обмотке.

4) Разработана двухступенчатая схема диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения, и доказана большая эффективность ее применения по сравнению с традиционной схемой.

5) Разработаны возможные алгоритмы проведения обследований трансформаторов в объеме оптимизированной схемы диагностики, обеспечивающие минимальное количество коммутаций обследуемого оборудования, минимальные трудозатраты, и даны рекомендации по внедрению двухступенчатой схемы на примере ОАО «МРСК Северо-Запада».

Максимальное продление реального срока службы и организация безаварийной работы силовых трансформаторов высших классов напряжения – важнейшие задачи современной энергетики. Выполнение данных задач невозможно без оптимизации существующей традиционной схемы диагностики трансформаторов, так как от эффективности диагностической схемы напрямую зависит возможность своевременно выявить дефект в оборудовании, предотвратить его аварийный отказ, принять обоснованное решение о целесообразности дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Ермаков Е.Г.** Методика измерения частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов // Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 2 (78). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 47 – 52.

2. **Ермаков Е.Г.** Исследование характеристик частичных разрядов при различных видах дефектов в силовых трансформаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ, № 4-1 (89). – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 172 – 177.

Публикации в сборниках трудов Международных конференций:

3. **Ермаков Е.Г.** О двухступенчатой схеме диагностики силовых трансформаторов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. II. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 3 – 4.

4. **Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е.** К вопросу идентификации дефектов силовых трансформаторов по электрическим характеристикам частичных разрядов // Электрическая изоляция – 2010: сборник научных трудов пятой Международной научно-технической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 273 – 282.

5. **Ермаков Е.Г., Монастырский А.Е.** О проблемах применения электрического метода регистрации характеристик частичных разрядов для диагностики высоковольтных силовых трансформаторов // Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Виктора Соколова / под ред. А.Г. Овсянникова, В.Н. Осотова. – Екатеринбург: Издательский дом «Автограф», 2010. – С. 39 – 48.

Публикации в сборниках научных трудов и докладов:

6. **Ермаков Е.Г.** Исследование характеристик частичных разрядов при развитии дефектов в силовых трансформаторах // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С.14 – 15.

7. **Ермаков Е.Г.** Определение критериев выявления дефектов в силовых трансформаторах по характеристикам частичных разрядов // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций Политехнического симпозиума. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С.73 – 75.

8. **Ермаков Е.Г.** Оптимизация схемы диагностики силовых трансформаторов высших классов напряжения // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций Политехнического симпозиума. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С.93 – 95.

9. **Ермаков Е.Г.** Исследование характеристик ЧР в модели «твердый диэлектрик – масло – твердый диэлектрик» безотносительно влияния фактора деструкции твердого диэлектрика под действием ЧР в масле // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Третьего Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 13 – 14.

10. **Ермаков Е.Г.** Диагностика силовых трансформаторов высших классов напряжения по характеристикам частичных разрядов // Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференций Политехнического симпозиума. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 62 – 63.

11. **Ермаков Е.Г.** Проблемы диагностики силовых трансформаторов по характеристикам частичных разрядов в их изоляции, поиск путей их решения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 60. Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / Отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджикибаев (ПЭИПК) 2010: изд. Ученого совета ПЭИПК. – СПб.: «Северная звезда», 2010. – С. 519 – 531.