

На правах рукописи

Куценко Сергей Михайлович

**РАЗРАБОТКА ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛИНЕЙНОЙ
ИЗОЛЯЦИИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность – 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет
путей сообщения» ФАЖТ России

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Климов Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Анненков Ю.М.
доктор технических наук,
профессор Овсянников А.Г.;

Ведущая организация: Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Защита диссертации состоится 18 декабря 2006 г. в 15 часов на заседании
диссертационного Совета К 212.269.02 при Томском политехническом
университете по адресу: 634004, г. Томск, пр. Ленина, 2а, НИИ высоких
напряжений при ТПУ, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского
политехнического университета

Автореферат разослан «___» ноября 2006 года

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
к.т.н.

М.А. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На железной дороге пробой изоляторов контактной сети практически всегда приводит к существенному уплотнению потока поездов и резкому уменьшению скорости их движения. Из анализа работы хозяйства электроснабжения следует, что до 75 процентов отказов приходится на контактную сеть, а четверть из них на повреждения изоляции. Изолятор – это один из наиболее ответственных, но и один из самых ненадежных элементов контактной сети. Чаще всего выходят из строя подвесные фарфоровые тарельчатые изоляторы, которых в эксплуатации находится 8,7 млн. штук, что составляет больше половины от общего количества изоляторов. Значительные динамические удары и вибрации в момент прохода электроподвижного состава способствуют быстрому старению изоляторов контактной сети по сравнению с изоляторами линий электропередач. При наличии запаса по электрической прочности полное повреждение одного из изоляторов в гирлянде может не вызывать сразу нарушения нормальной работы контактной сети. Однако постепенное накопление дефектных изоляторов ведет к перекрытиям, особенно в грозовой период, и нарушению графика движения поездов.

Для предотвращения опасных ситуаций в период эксплуатации контактной сети разработаны мероприятия по проведению контроля состояния изоляции. В последнее время большое распространение получили дистанционные методы. Различные процессы, связанные с ухудшением состояния изоляции и появлением диагностических признаков, исследованы ведущими организациями в этой отрасли, такими как: ВНИИЭ, СибНИИЭ, ОРГРЭС, ВНИИЖТ, коллективами служб энергосистем, ведущими специалистами: Г. С. Кучинским, А. Г. Овсянниковым, П. М. Сви, В. П. Вдовико и др.

Используемые в настоящее время на железной дороге методы диагностики изоляции не совершенны, так как они не учитывают, в достаточной мере, совокупность проявления физических процессов, приводящих к потере

изолирующих свойств. Более того, значительная протяженность контактной сети и неравномерное распределение нагрузки приводят к тому, что уровень напряжения в ней изменяется в широких пределах. Это, в свою очередь, негативно сказывается на надежности диагностики, не обладающей высокой степенью достоверности. Поэтому задача повышения надежности диагностики изоляторов контактной сети является **актуальной**.

В связи с этим **целью исследования** является разработка комплексного акусто-электромагнитного метода дистанционной диагностики состояния линейной изоляции контактной сети. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие основные **задачи**, а именно:

1. Экспериментально исследовать характеристики акустического и электромагнитного излучения частичных разрядов (ЧР) в гирляндах фарфоровых изоляторов контактной сети железной дороги.
2. Установить диагностические признаки неисправных гирлянд с дефектными изоляторами.
3. Исследовать уровень напряженности электрического поля под контактным проводом на различных участках железной дороги.
4. На основе полученных результатов разработать комплексный метод определения неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Определены основные параметры ЧР в фарфоровых изоляторах контактной сети переменного тока: длительность и частота следования импульсов, их спектральный состав, энергетические характеристики, выделяемая при ЧР мощность.
2. Установлен первый диагностический признак выхода из строя гирлянд фарфоровых изоляторов, заключающийся в том, что с ростом числа неисправных изоляторов в гирлянде регистрируемая частота следования акустических и электромагнитных импульсов ЧР увеличивается в два и более раз.

3. Разработана методика дистанционного определения напряжения контактной сети по измерениям напряженности электрической составляющей электромагнитного поля в пространстве между рельсами и контактным проводом.
4. По оценкам мощности электромагнитного излучения ЧР установлен критический уровень принимаемого антенной высокочастотного сигнала. Его превышение позволяет принять решение о наличии в гирлянде дефектных изоляторов, что является вторым диагностическим признаком неисправных гирлянд.
5. На основе результатов измерений электромагнитного поля вблизи контактной сети разработан мобильный комплекс, который осуществляет спектральный анализ тягового тока с оценкой содержания гармоник и коэффициента нелинейных искажений.

Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, использованием современных методов измерений и современного измерительного оборудования. Полученные в экспериментах физические характеристики излучения ЧР находятся в качественном и количественном согласии с результатами независимых исследований, опубликованных ранее другими авторами.

Защищаемые положения:

- В гирлянде фарфоровых изоляторов увеличение числа импульсов ЧР при выходе из строя одного изолятора объясняется повышением вероятности пробоя газовой полости в структуре фарфорового диэлектрика.
- Для повышения эффективности, надежности и достоверности диагностики линейной изоляции контактной сети на основе выявленных диагностических признаков неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов предлагается использовать комплексный акусто-электромагнитный метод. Суть его заключается в дистанционном контроле напряжения контактной сети и регистрации акустического и электромагнитного излучения ЧР с анализом частоты следования импульсов ЧР и уровнем принимаемого сигнала.

Практическая значимость работы заключается в использовании разработанного комплексного метода дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети в хозяйстве электроснабжения ОАО «Российские железные дороги (РЖД)».

Методика дистанционного определения напряжения в контактной сети внедрена в практическую деятельность Восточно-Сибирской железной дороги (ВСЖД) (акт внедрения прилагается).

Результаты работы использованы в НИОКР

“Совершенствование метода диагностики неисправностей изоляторов подвески контактной сети и линий электроснабжения ж.д. транспорта (усовершенствование прибора УД-8)” N 41-03-01. ИрГУПС, 2003 г.

Апробация работы.

Результаты работы обсуждались на:

- ежегодных конференциях в ИрГТУ и ИрГУПСе, посвященных дню Радио (2003 – 2006 г.);
- международной конференции «Энергосберегающие технологии и окружающая среда», ИрГУПС, Иркутск, 2004;
- VIII научно-практическом семинаре: «Проблемы диагностики электрической изоляции высоковольтного оборудования», СибНИИЭ, Новосибирск, 2005 г.;
- Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте», Красноярск, 2005 г.

Публикации. Основное содержание и результаты исследований опубликованы в 12 печатных работах и одном электронном ресурсе, перечень которых представлен в конце автореферата. Одна статья опубликована в реферируемом научном журнале.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 170 ссылок. Общий объем диссертации - 143 страниц текста, включая 66 рисунков, 5 таблиц и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, приведены защищаемые положения.

В первой главе проведен обзор литературы по теме диссертации, рассмотрены и проанализированы современные методы диагностики изоляции, как контактной сети железной дороги, так и высоковольтного оборудования в целом. Обсуждаются имеющиеся к моменту начала работы экспериментальные данные о характеристиках ЧР. Анализ литературы показывает, что для улучшения диагностики линейной изоляции необходимо провести исследования акустических и электромагнитных характеристик ЧР в фарфоровых изоляторах и выявить диагностические признаки неисправных гирлянд изоляторов контактной сети для разработки нового метода диагностики, повышающей ее надежность и достоверность.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры, схем измерений и методикам проведения экспериментов. Объектом исследований являлись гирлянды фарфоровых изоляторов, которые были выявлены работниками ВСЖД как неисправные ультразвуковым дефектоскопом УД-8. В лаборатории эксперименты проведены на высоковольтной установке типа WPT 4,4/100 фирмы TuR, напряжение и ток измерялись киловольтметром и амперметром магнитоэлектрического типа с классом точности 1,5 процента. Регистрация акустических и электромагнитных импульсов осуществлялась цифровыми осциллографами типа DSO 3202A и Tektronix 3052B при помощи ультразвуковых дефектоскопов (УД-8 и Ultraprobe) и антенн типов: полуволновой вибратор, телевизионная логопериодическая, рамочная и высокочастотный пояс Роговского. Основные результаты получены при помощи широкополосного вертикального штыря высотой 86 мм и шириной 24 мм. Схема реализации измерений приведена на рис. 1.

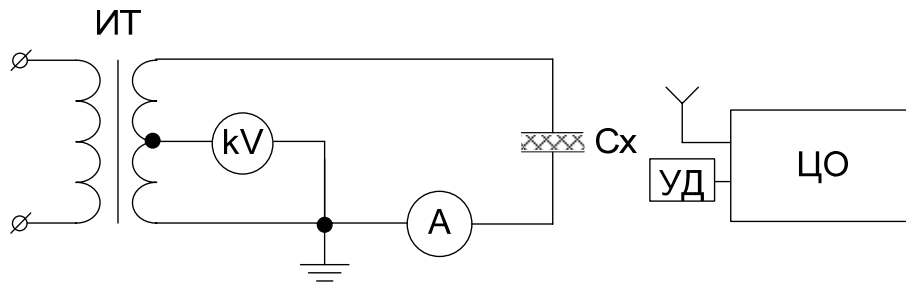


Рис. 1. Схема регистрации ЧР в изоляторах дистанционным способом.

ИТ– испытательный трансформатор, Сх – исследуемая гирлянда фарфоровых изоляторов, УД – ультразвуковой дефектоскоп, ЦО – цифровой осциллограф.

На железной дороге измерения проводились непосредственно под обнаруженной неисправной гирляндой изоляторов. Для записи информации о характеристиках поля использовались антенны, измеритель напряженности электромагнитного поля ПЗ-50 и переносной компьютер, соединенный с осциллографической приставкой PSC 64i, с частотой опроса двух каналов до 64 МГц и 8 разрядным аналого-цифровым преобразователем.

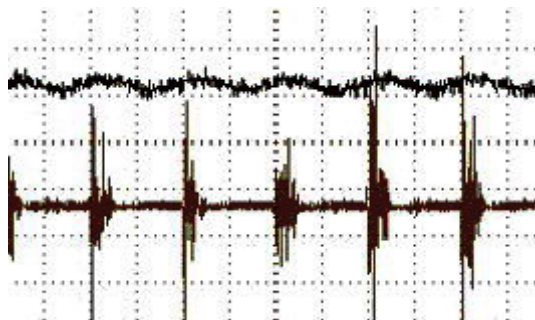
При пониженном напряжении в контактной сети количество выявляемых гирлянд изоляторов уменьшается. Поэтому для увеличения надежности диагностики изоляции предложено дистанционно контролировать уровень напряжения в конкретной точке наблюдения путем измерения вертикальной составляющей напряженности электрического поля. В этой главе изложены результаты измерений электромагнитного поля вблизи контактной сети.

Измерения электромагнитного поля контактной сети позволили получить спектр ее тока и оценить качество его электроэнергии согласно ГОСТ 13109-97. Для этих целей был изготовлен двухканальный комплекс на базе ПЗ-50 и PSC-64i с одновременной регистрацией электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля контактной сети, позволяющий осуществлять спектральный анализ с оценкой содержания различных гармоник и коэффициента нелинейных искажений, учитывая амплитудно-частотную характеристику приемного тракта.

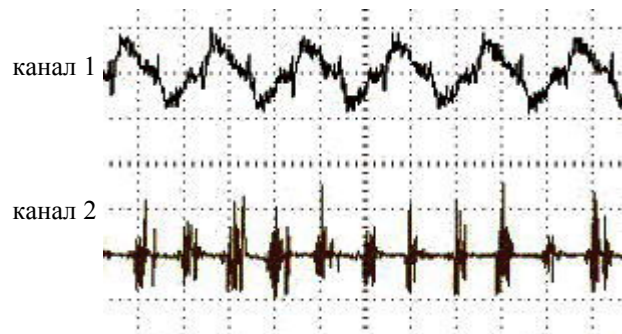
Частота следования регистрируемых импульсов определяется при помощи разработанного алгоритма подсчета импульсов, реализованного в среде Matlab.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований характеристик ЧР в фарфоровых изоляторах, полученных с помощью акустического и электромагнитного методов регистрации ЧР, и выявлены диагностические признаки неисправных гирлянд.

Исследование акустического и электромагнитного излучений ЧР в звуковом диапазоне. Исследования акустического излучения ЧР проводились по схеме, приведенной на рис.1. Посредством ультразвукового дефектоскопа осциллографом регистрировался временной сигнал. Эти измерения нам впервые позволили получить следующий результат: при наличии в гирлянде из трёх изоляторов одного неисправного изолятора частота следования пачек импульсов акустического сигнала равна 50 Гц (рис. 2а). Если в гирлянде два неисправных изолятора, то регистрируемая частота возрастает в два и более раз (рис. 2б), при этом уровень напряжения в контактной сети должен быть не ниже номинального.



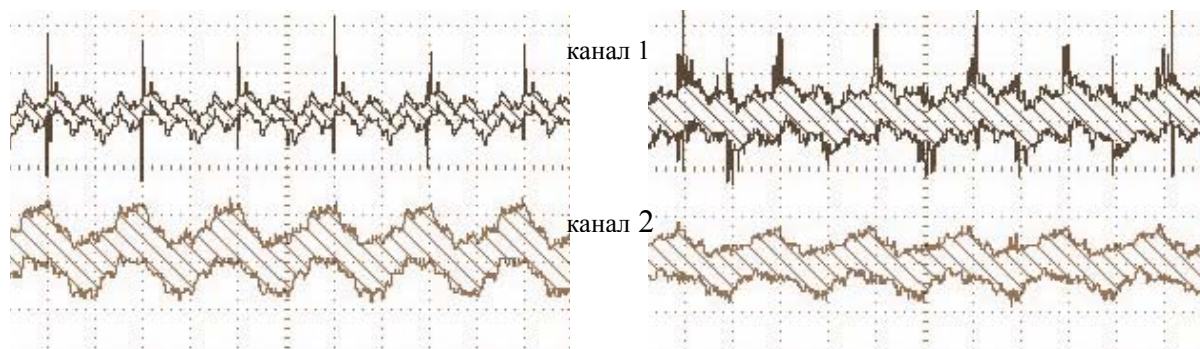
а) Осциллограммы в гирлянде из двух исправных и одного неисправного изоляторов, масштаб: по оси X – 10 мс/дел, по оси Y – канал 1 – 2 мВ/дел, канал 2 – 100 мВ/дел.



б) Осциллограммы в гирлянде из одного исправного и двух неисправных изоляторов, масштаб: по оси X – 10 мс/дел, по оси Y – канал 1 – 10 мВ/дел, канал 2 – 500 мВ/дел.

Рис. 2. Осциллограммы акустического излучения разрядов, возникающих на гирлянде из трех изоляторов при номинальном напряжении контактной сети 27,5 кВ. Канал 1 – регистрация электромагнитной эмиссии антенной, канал 2 – регистрация акустической эмиссии ультразвуковым дефектоскопом Ultraprobe.

На рис.3 представлены данные по регистрации электромагнитной эмиссии ЧР для гирлянд фарфоровых изоляторов.



а) Осциллограммы в гирлянде из двух исправных изоляторов и одного неисправного. Масштаб: по оси X – 10 мс/дел, по оси Y – канал 1 – 5 мВ/дел и канал 2 – 10 мВ/дел.

б) Осциллограммы в гирлянде из одного исправного изолятора и двух неисправных. Масштаб: по оси X – 10 мс/дел, по оси Y – канал 1 – 2 мВ/дел и канал 2 – 10 мВ/дел.

Рис. 3. Осциллограммы последовательности электромагнитных импульсов ЧР в гирляндах из трех изоляторов. Сигнал зарегистрирован при помощи штыревой антенны (канал 1) и пояса Роговского (канал 2). Напряжение на исследуемых гирляндах равно 27,5 кВ.

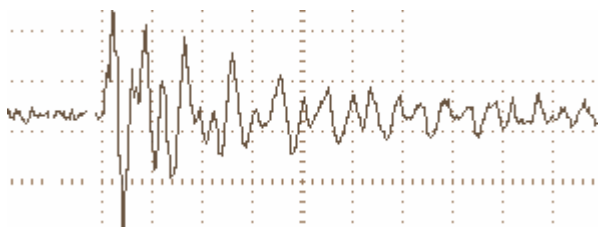
Сопоставление результатов, приведенных на рис.2 и 3 свидетельствует о том, что частота следования электромагнитных и акустических импульсов ЧР зависит от числа неисправных изоляторов в гирлянде. А именно, с ростом числа дефектных изоляторов в гирлянде, она увеличивается. **Данный эффект рассматривается нами как первый диагностический признак неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов контактной сети.**

Исследование электромагнитного излучения ЧР в высокочастотном диапазоне. Для улучшения надежности диагностики нами были проведены исследования высокочастотного излучения ЧР по схеме приведенной на рис.1.

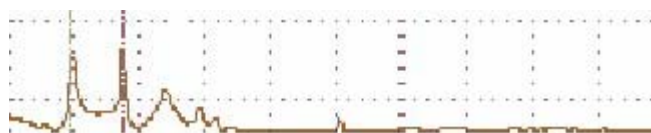
Известно, что форма импульсов ЧР представляет собой видеоимпульс¹. Довольно часто он регистрируется как радиоимпульс. Проведенные нами исследования нескольких десятков дефектных гирлянд фарфоровых изоляторов позволили определить параметры электромагнитных импульсов ЧР в фарфоровых изоляторах. Результаты зарегистрированных осциллограмм и спектра ЧР показаны на рис. 4.

¹ Овсянников А.Г. Пространственно – временные и энергетические характеристики частичных разрядов в воздушных полостях твердых диэлектриков // Научный вестник НГТУ. – 1999. - № 2 (5). – С.123 –136.

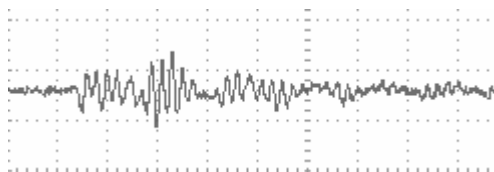
Техника высоких напряжений: учеб. пособие для вузов / под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 2003. – 608 с.



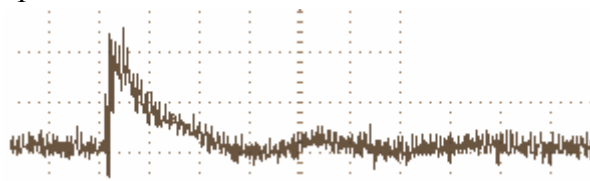
а) Осциллограмма импульсов ЧР, масштаб: по оси X: 50 нс/дел, по оси Y: 5 мВ/дел.



б) Спектр импульса ЧР рис. а, полученного в результате обработки сигнала при помощи алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), масштаб по оси X – 25 МГц/дел, по оси Y – 1 мВ/дел. Маркерами отмечены дискретные частоты 23 и 43 МГц.



в) Осциллограмма последовательности из нескольких импульсов ЧР, уменьшающихся по амплитуде. Масштаб: по оси X – 20 нс/дел, по оси Y-2 мВ/дел.



г) Осциллограмма импульса ЧР, зарегистрированная в форме видеоимпульса. Масштаб: по оси X – 200 нс/дел, по оси Y- 2 мВ/дел.

Рисунок 4. Осциллограммы и спектр ЧР, возникающие в гирляндах с дефектными фарфоровыми изоляторами.

Одиночный видеоимпульс дает спектр, ширина которого зависит от длительности импульса, а серия из нескольких видеоимпульсов формирует линейчатый спектр, дискретные частоты которого позволяют определить частоту следования последовательности из нескольких видеоимпульсов. Анализ результатов регистрации электромагнитного излучения ЧР позволяет заключить, что частота следования импульсов ЧР и их длительность определяют спектральные характеристики сигналов. На рис.4б ширина спектра равна 80 МГц, следовательно, длительность импульса ЧР равна 12,5 нс.

Таким образом измерения позволили впервые определить временные параметры ЧР в фарфоровых изоляторах контактной сети: длительность импульсов изменяется от 5 до 20 нс (в некоторых случаях длительность достигает 100 нс), а интервал между ними составляет 15 – 1000 нс.

Как показали эксперименты, основная доля всей энергии при ЧР сосредоточена в полосе частот до 200 МГц, поэтому данный частотный диапазон предлагается использовать для эффективной диагностики фарфоровой изоляции контактной сети. ЧР Г.С. Кучинским с интенсивностью $10^{-12} - 10^{-11}$

Кл, классифицируются как начальные, они не вызывают быстрого разрушения изоляции. С другой стороны, ЧР с интенсивностью порядка 10^{-10} Кл резко сокращают срок службы изоляции и называются критическими зарядами. В связи с этим нами предложено разработать способ, согласно которого можно различать начальные и критические ЧР в фарфоровых изоляторах контактной сети. Для этих целей оценены энергетические характеристики ЧР и проведен анализ мощности электромагнитного излучения, выделяющейся при ЧР.

Ток ЧР измерен по традиционной схеме регистрации ЧР² (последовательно с исследуемой гирляндой изоляторов включено высокочастотное сопротивление типа BNC-117 номиналом 50 Ом). Измеренные на сопротивлении сигналы по амплитуде изменяются в диапазоне от единиц до сотен мВ, что позволяет определить ток ЧР – он изменяется от 100 мкА до 10 мА. Перемножив полученные значения тока на ранее определенные длительности импульсов ЧР, получим заряд ЧР, его величина изменяется в диапазоне от 0,5 пКл до 1 нКл.

Для оценки, выделяющейся при ЧР мощности необходимо знать напряжение появления ЧР, которое зависит от местоположения импульсов ЧР на синусоиде переменного напряжения частоты 50 Гц. Фазовый угол местонахождения начальных импульсов ЧР, определенный в исследованиях, лежит в диапазоне от 2 до 60 градусов (рис. 5а). Увеличение напряжения приводит к возрастанию интенсивности ЧР и изменению их местоположения на синусоиде (рис. 5б). Это явление объясняется тем, что при ЧР образуется RC-цепь постоянная времени которой определяет промежуток времени накопления заряда до появления ЧР (фазу или временное положение импульсов на синусоиде). Например, на рис. 6 такую цепь образуют элементы схемы замещения гирлянды фарфоровых изоляторов, в которой присутствует неисправный изолятор. В каждом конкретном случае схема замещения имеет сложный характер в зависимости от количества исправных и неисправных изоляторов в гирлянде.

² Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224с.

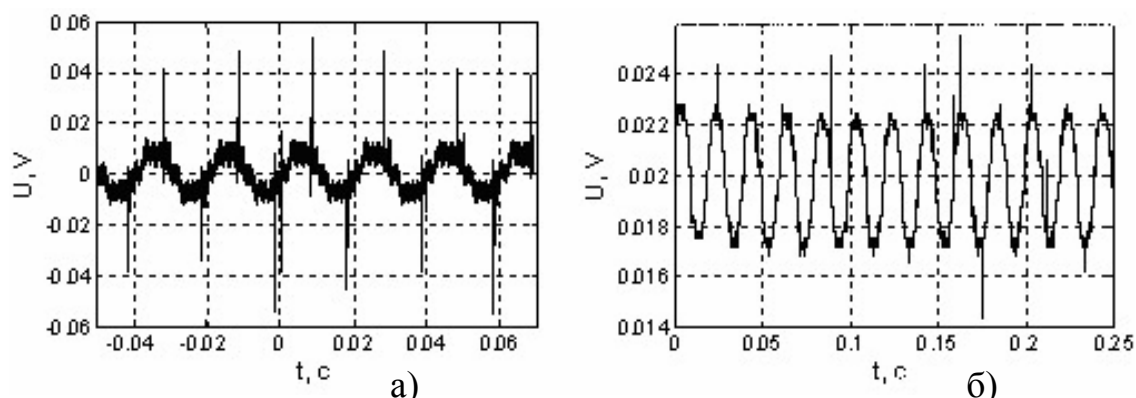


Рис. 5. Осциллограммы, поясняющие местоположение ЧР на синусоиде переменного напряжения частоты 50 Гц; а) – осциллограмма для одиночного изолятора при напряжении 12 кВ, б) – осциллограмма для гирлянды из трех фарфоровых изоляторов с одним неисправным при напряжении 30 кВ.

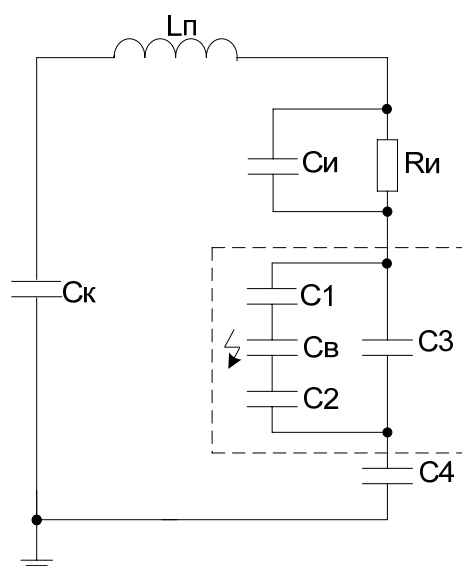


Рис. 6. Схема замещения гирлянды из трех фарфоровых изоляторов (один изолятор неисправен), в которой возникает ЧР. L_p – индуктивность подводящих проводов, C_k – конструктивная емкость (емкость трансформатора и паразитная емкость), R_i и C_i – сопротивление и емкость неисправного изолятора, C_1 и C_2 – емкости изоляции между проводящими поверхностями включения и подводящими электродами, C_3 и C_4 – емкости исправных изоляторов, C_b – емкость включения.

Пунктиром выделена схема замещения изолятора, в котором возникает ЧР³.

Экспериментальные исследования показали, что напряжение появления разряда в фарфоровых изоляторах контактной сети переменного тока изменяется от 200 В до 30 кВ, что позволяет, используя результаты оценки тока ЧР, оценить мощность, выделяющуюся при ЧР, она изменяется в диапазоне от 20 мВт до 300 Вт. Для выявления диагностического признака неисправных гирлянд с помощью регистрации высокочастотного излучения ЧР необходимо рассчитанную мощность сопоставить с мощностью, регистрируемой антенной.

³ Вдовико В. П. Применение характеристик частичных разрядов при диагностике электрической изоляции высоковольтного оборудования // Проблемы диагностики электрической изоляции высоковольтного оборудования: Материалы VIII научно-практ. семинара. – Новосибирск СибНИИЭ. - 2005.

Если представить, что ЧР в свободном пространстве, в однородной не поглощающей среде с относительной диэлектрической проницаемостью равной единице, представляет собой точечный изотропный излучатель с мощностью P , Вт то, на расстоянии r от излучателя, величина потока энергии определяется вектором Умова-Пойтинга.

$$\Pi = \frac{P}{4\pi r^2}, \text{ Вт} / \text{м}^2; \quad (1)$$

Зная среднее значение потока электромагнитной энергии за период, можно определить мощность излучения в радиодиапазоне:

$$P = \frac{r^2}{30} \cdot \int_0^f E_{\partial}^2 \cdot df. \quad (2)$$

где r – расстояние между приемником и источником излучения, м;

E_{∂} - действующее значение напряженности электрического поля радиоволны, В/м и определяется как $E_{\partial} = U / l_{\partial}$, где U – амплитуда импульса ЧР, В, а l_{∂} – размеры антенны, f – максимальная частота электромагнитного излучения ЧР.

Оценивая по формуле (2) мощность электромагнитного излучения, по результатам измерений спектров ЧР установлено, что она изменяется в пределах от 20 мкВт до 300 мВт. Все результаты, полученные в этой главе электромагнитных характеристик ЧР в фарфоровых изоляторах, сведены в табл. 1.

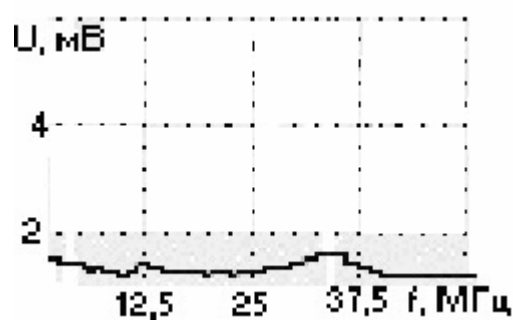
Электромагнитные характеристики ЧР в фарфоровых изоляторах. Таблица 1

Параметры электромагнитных характеристик ЧР в фарфоровых изоляторах	Начальные заряды $10^{-12} - 10^{-11}$ Кл	Критические заряды 10^{-10} Кл
Длительность импульсов ЧР*, нс	5 – 100 нс	
Ток ЧР**, мА	0,1 до 1	Свыше 1 до 10
Напряжение появления ЧР*, кВ	0,2 – 30	
Мощность, выделяемая при ЧР**, Вт	0,02 – 10	300
Мощность, выделяемая при ЧР в диапазоне до 200 МГц**, мВт	1 -10	Свыше 10 до единиц Вт
Уровень сигнала, принимаемого штыревой антенной*** в частотном диапазоне до 200 МГц*, мВ	До 10	Свыше 10
* - измерения значения, ** - оценка, *** - при использовании другого типа антенны уровень сигнала изменится		

Проведенные, в третьей главе оценки выделившийся при ЧР мощности, позволяют установить критерий, согласно которому можно судить о качестве фарфоровых изоляторах. Суть критерия: регистрация штыревой антенной и осциллографом DSO 3202A сигнала в частотном диапазоне от 20 кГц до 200 МГц с амплитудой выше 10 мВ рассматривается как сигнал о дефектности гирлянды фарфоровых изоляторов (рис. 7а). Такую гирлянду следует заменить.



а) спектр ЧР на дефектной гирлянде фарфоровых изоляторов.



б) Спектр ЧР на гирлянде фарфоровых изоляторов.

Рис. 7. Спектры ЧР в гирлянде из трех изоляторов при напряжении 25 кВ, зарегистрированные цифровым осциллографом DSO 3202A при помощи антенны.

Установленная закономерность является вторым диагностическим признаком наличия неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов.

Преимущество электромагнитной диагностики по сравнению с акустической заключается в повышении чувствительности, т.е. в снижении порога напряжения на 15÷20%, при котором начинается регистрация ЧР. Например, при подаче высокого напряжения на гирлянду, состоящую из двух неисправных и одного исправного изоляторов, электромагнитный сигнал наблюдается уже при 17 кВ, тогда как акустический сигнал регистрируется с расстояния одного метра ультразвуковым дефектоскопом Ultraprobe при 20 кВ.

Таким образом, результаты исследований акустического и электромагнитного излучения ЧР, приведенные в этой главе, впервые позволили определить временные и частотные параметры ЧР в фарфоровых изоляторах, при помощи которых выявлены два диагностических признака неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов.

Четвертая глава посвящена обобщению результатов исследований параметров ЧР, объяснению механизма появления ЧР в фарфоровой изоляции и разработке комплексной дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети, суть которой заключается в следующем: 1) дистанционный контроль напряжения контактной сети (оно должно быть равно или больше 27,5 кВ); 2) регистрация акустического и электромагнитного излучения ЧР с анализом частоты следования импульсов и 3) регистрация высокочастотного электромагнитного излучения ЧР с оценкой уровня принимаемого сигнала.

Метод дистанционного определения напряжения в контактной сети. Согласно формуле (3)⁴, напряженность электрического поля под контактным проводом зависит от напряжения в контактной сети и количества путей на участке железной дороги.

$$E = \frac{\varphi}{\alpha_{11} + 2 \cdot \alpha_{12}} \left[\frac{h_{\text{э}} + y}{(h_{\text{э}} + y)^2} + \frac{h_{\text{э}} - y}{(h_{\text{э}} - y)^2} + 2 \cdot \frac{h_{\text{э}} + y}{(h_{\text{э}} + y)^2 + d^2} + 2 \cdot \frac{h_{\text{э}} - y}{(h_{\text{э}} - y)^2 + d^2} \right] \quad (3)$$

где φ – потенциал контактного провода, α_{11} и α_{12} – потенциальные коэффициенты, $h_{\text{э}}$ – высота подвеса эквивалентного провода 6,8 м, y – высота измерителя; d – ширина междупутья (5,2 м).

Сопоставляя экспериментальные исследования напряженности электрического поля, проведенные на перегонах и станциях прибором ПЗ-50, с теоретическими расчетами в соответствии с выражением (3) установлено: если напряженность поля на однопутном участке железной дороги свыше 1,6 кВ/м; на 2-х путном участке – 2 кВ/м и на многопутном участке – 2,5 кВ/м, то напряжение в контактной сети переменного тока равно или больше 27,5 кВ. Следовательно, при этих условиях необходимо проводить дистанционную диагностику изоляции. Высота расположения датчика над землей должна быть равна 1,8 м, т. к. согласно данным рис. 8, экспериментальные значения напряженности поля при 27,5 кВ близки с теоретическими именно в этой точке измерений.

⁴ Бессонов В. А. Электромагнитная совместимость. – Хабаровск: Изд-во Дальневосточного государственного университета путей сообщения, 2000. – 110 с.

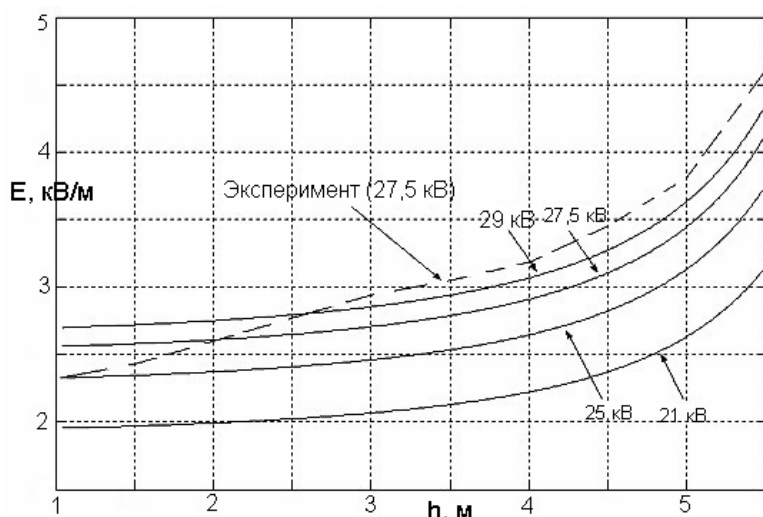


Рис. 8. Зависимость вертикальной составляющей напряженности электрического поля (E) от высоты (h) для 3-х путного участка. Сравнение экспериментальных данных (кривая отмечена пунктиром) с теоретическими расчетами (сплошные линии).

Физическое объяснение первого диагностического признака дефектных гирлянд фарфоровых изоляторов. Проведенные исследования акустического и электромагнитного излучения ЧР в фарфоровых изоляторах показали, что одним из основных диагностических признаков наличия неисправных изоляторов в гирлянде является возрастание частоты следования пачек импульсов ЧР. Первоначально эти импульсы появляются на положительной полуволне синусоиды переменного напряжения частоты 50 Гц (см. рис.2а и рис.3а). Объяснение этому явлению следующее. Исследования нескольких десятков неисправных фарфоровых изоляторов, при помощи мегомметра с рабочим напряжением 2,5 кВ показали, что сопротивление между электродами (шапка и стержень) имеет вентильный характер. Например, у неисправного изолятора сопротивление между электродами в одном направлении было в 4 раза больше, чем в противоположном. При изменении полярности у некоторых образцов сопротивление отличается на порядок. Эти результаты позволяют сделать вывод, что на переходной границе металл - цемент — фарфор, наблюдается вентильный эффект.

Выход из строя еще одного изолятора в гирлянде меняет наблюдаемую картину - ЧР возникают при отрицательной полярности. Это связано с увеличением напряжения на оставшемся исправном изоляторе. Более того, число импульсов при положительной полярности возрастает, в связи с увеличением числа газовых включений в фарфоре, в которых возникают ЧР и

разбросом напряжений зажигания ЧР в отдельных включениях, а также с возрастанием числа разрядов в единичном включении за один полупериод⁵.

Второй диагностический признак дефектных гирлянд фарфоровых изоляторов. ЧР в фарфоровых изоляторах генерируют импульсы, временные и частотные параметры которых определены в третьей главе. Эти импульсы с длительностью от 5 до 20 нс формируют широкий спектр частот (до 200 МГц). Уровень регистрируемого осциллографом при помощи антенны высокочастотного сигнала в указанном диапазоне частот позволяет судить о состоянии гирлянд фарфоровых изоляторов. Если измерения проводятся штыревой антенной, то превышение амплитуды принимаемого сигнала критической отметки 10 мВ говорит о неисправности гирлянды изоляторов.

Совместное использование двух диагностических признаков дефектных гирлянд изоляторов повышает эффективность диагностики.

Определение места возникновения ЧР в фарфоровых изоляторах. При диагностике очень важно отличать ЧР, возникающие внутри фарфора, от коронных и поверхностных частичных разрядов (ПЧР), которые появляются преимущественно на поверхности изоляторов. В эксплуатации ПЧР менее опасны, чем ЧР. Поэтому, для отличия ЧР от ПЧР нами проведены измерения локации источника звукового сигнала, возникающего в фарфоровых изоляторах. Благодаря узкой диаграмме направленности (~3 градуса) акустической антенны ультразвукового дефектоскопа Ultraprobe установлено место появления разряда в фарфоровом изоляторе. Размеры области, которая излучает акустический сигнал, не превышает 1,5 см (рис. 9).

Визуальные наблюдения в темноте подтверждают отсутствие на поверхности сухого изолятора стримеров скользящих разрядов. На увлажненной гирлянде при её частичном высыхании, визуально наблюдаются ПЧР, которые одновременно регистрируются ультразвуковым дефектоскопом по всей поверхности изолятора. В связи с этим установлено, что источником

⁵ Куперштох А.Л., Стамателатос С.П., Агорис Д.П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 32. – В. 15. – С. 74-81.

акустического сигнала в сухой гирлянде изоляторов является ЧР внутри изолятора.

Рис. 9. Локация звука, зарегистрированная ультразвуковым дефектоскопом Ultraprobe на расстоянии 1м от гирлянды, содержащей один дефектный изолятор. Максимальная интенсивность звука зафиксирована на частоте около 30 кГц (белый крест указывает место локации источника звука ЧР).



Этот вывод подтверждают исследования образцов, взятых с исправных и неисправных фарфоровых изоляторов. В образцах, взятых с неисправных изоляторов, при помощи мегомметра обнаружены проводящие каналы - дендриты. Рентгеноспектральный микроанализ позволил получить химический состав дендритов (они оказались загрязненными материалом электродов, которыми проводился поиск) и непроводящих областей (в них загрязнения отсутствовали). Таким образом, эти исследования подтверждают, что ЧР, которые регистрируются в наших экспериментах, возникают внутри фарфоровых изоляторов.

Комплексная дистанционная диагностика линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта. Суть разработанной диагностики заключается в следующем: на участке железной дороги измеряется уровень напряженности электрического поля прибором ПЗ-50 и выносится решение о целесообразности проведения диагностики на основании полученных данных. Диагностику можно проводить в том случае, если уровень напряжения в контактной сети равен или выше номинального. Измерения напряженности электрического поля должны быть проведены под контактным проводом на высоте 1,8 метра от земли датчиком электрического поля прибора ПЗ-50. На однопутном участке показания прибора должны быть выше 1,6 кВ/м; на двухпутном участке – 2 кВ/м и на многопутном – 2,5 кВ/м.

Следующий этап проведения диагностики – традиционное измерение акустического излучения ультразвуковым дефектоскопом типа УД-8 или его

аналогом в соответствии с ПУТЭКС⁶. По возможности рекомендуется распространенный прибор УД-8 заменить на Ultraprobe в связи с его повышенной чувствительностью и эргономичностью. Для принятия решения об обнаружении дефектной гирлянды изоляторов, необходимо выявленные прибором УД-8 (или его аналогом) гирлянды дополнительно проверить следующими методиками:

а) с выхода прибора УД-8 (или его аналога), а также при помощи электрического датчика типа ПЗ-50 и цифрового осциллографа провести измерения частоты следования импульсов ЧР по схеме приведенной на рис. 1. Приборы и датчики необходимо разместить непосредственно под интересующей гирляндой изоляторов. Если по двум каналам осциллографа регистрируется частота следования пачек импульсов 100 Гц и выше, то в гирлянде остался только один исправный изолятор - такую гирлянду необходимо срочно менять. Если частота следования импульсов ЧР равна 50 Гц, то в гирлянде два исправных изолятора, и такую гирлянду в ближайшее время менять не следует, ее необходимо дополнительно проверить по следующей методике;

б) при помощи широкополосной антенны и цифрового осциллографа класса Tektronix, DSO и др. необходимо измерить спектр электромагнитного излучения ЧР в частотном диапазоне до 200 МГц. При регистрации спектра с уровнем напряжения, превышающим 10 мВ, необходимо исследуемую гирлянду заменить, так как в изоляторах присутствуют критические заряды, разрушающие фарфор. Если регистрируемый сигнал меньше критической отметки, то такую гирлянду в ближайшее время можно не менять.

Измерительную аппаратуру для разработанного метода диагностики можно размещать в специализированных существующих вагон - лабораториях, что, кроме повышения эффективности диагностики, ускорит время ее проведения.

⁶ Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. N ЦЭ-868. Департамент электрификации и электроснабжения. М.: Трансиздат, 2002. – 184с.

Основные результаты и выводы

1. Созданная методика дистанционного контроля напряжения контактной сети позволяет определить условия проведения диагностики линейной изоляции.
2. Установлена зависимость частоты следования акустических и электромагнитных импульсов ЧР от числа неисправных изоляторов в гирлянде, что является первым диагностическим признаком неисправных гирлянд фарфоровых изоляторов.
3. Впервые определены временные и частотные параметры ЧР в фарфоровых изоляторах контактной сети.
4. Проведенные оценки величины заряда, токов ЧР, мощности, выделяющейся при ЧР и расходуемой на электромагнитное излучение, позволили определить пороговую величину принимаемого антенной высокочастотного сигнала, по которой можно судить о качестве фарфоровых изоляторов. Установленная закономерность является вторым диагностическим признаком неисправных гирлянд.
5. Разработана и предложена ВСЖД методика дистанционной комплексной диагностики линейной изоляции контактной сети железной дороги, повышающая эффективность ее использования в сравнении с традиционными методами диагностики.

Автор глубоко благодарен научному руководителю, профессору, д.ф.-м.н. Н.Н. Климову, и выражает признательность за постоянную помощь в работе и обсуждении ее результатов сотрудникам кафедры ТС ИрГУПС: д.т.н., проф. Ю.Б. Башкуеву, зав. лаб. В.И. Муратову, д.ф.-м.н., проф. Ю.Л. Ломухину, д.ф.-м.н., проф. ТПУ, д.ф.-м.н. В.В. Лопатину и д.ф.-м.н. Ю.М. Анненкову, сотрудникам ИрГУПС: к.т.н., доценту В.П. Закарюкину, д.ф.-м.н., проф. В.И. Барышникову, сотрудникам ВСЖД Я.А. Желябину, И.И. Рындиному. Отдельная благодарность за консультации и любезно предоставленные материалы д.т.н., проф. НГТУ А.Г. Овсяникову, сотруднику СибНИИЭ к.т.н. В.П. Вдовико, сотрудникам Бурятского научного центра СО РАН.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Куценко С.М. Диагностика электрической изоляции под рабочим напряжением [Текст] // Материалы третьей междунар. научной конф. творческой молодежи “Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке”. – Хабаровск. - 2003. – С. 235-239.
2. Куценко С.М., Климов Н.Н., Желябин Я.А., Рындин И.И. Об электромагнитных и акустических излучениях неисправных гирлянд изоляторов контактной сети железной дороги [Текст] // X международная научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Сб. докладов. – Воронеж. – 2004. - Т1. - С.712-720.
3. Kutsenko S.M., Klimov N.N., Bahkuev Y.B., Khaptanov V.B. About the possibility of the remote control of the nonlinear distortion in the railway contact network [Текст] // Энергосберегающие технологии и окружающая среда. Тезисы докладов междунар. конф. - Иркутск : ИрГУПС. – 2004. - С. 82 – 84.
4. Куценко С.М., Климов Н.Н., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Дистанционный метод контроля уровня напряжения в контактной сети на железной дороге [Текст] // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. под. ред. А.П. Громыко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. - 2004. - С. 68 – 71.
5. Куценко С.М., Климов Н.Н., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б. Контроль электрических параметров контактной сети железной дороги дистанционным способом [Текст] // Материалы 5-й междунар. научно-техн. конф. Под. общ. ред. А.Г. Якунина. – Барнаул: АЛГУ. – 2004. - С. 41 - 43.
6. Kutsenko S.M., Klimov N.N., Bahkuev Y.B. About an opportunity of the remote control of nonlinear distortions in a contact network of the railway [Текст] // Энергосберегающие технологии и окружающая среда. Тр. междунар. конф. – Иркутск : ИрГУПС. – 2004. - С. 253 – 259.
7. Куценко С.М., Климов Н.Н. Сопоставление результатов измерений акустического и электромагнитного излучения частичных разрядов неисправных гирлянд фарфоровой изоляции контактной сети железной

- дороги [Электрон. ресурс] // Материалы VIII научно-практ. семинара. Проблемы диагностики электрической изоляции высоковольтного оборудования. - Новосибирск: СибНИИЭ. - 2005.
8. Куценко С.М. Об акустической диагностике неисправных изоляторов [Текст] // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте: Материалы Всероссийской научно-техн. конф. с междунар. участием: Гротеск. - Красноярск. – 2005. – Т.2. - С. 165 - 168.
9. Куценко С.М., Козиенко Л.В. Реализация алгоритма скользящего среднего в среде MATLAB [Текст] // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Моделирование и управление производственными процессами: Сб. научных тр. – Иркутск: ИрГУПС. - 2005. – В. 13. – С. 79-87.
10. Козиенко Л.В., Куценко С.М. Предварительная обработка и фильтрация сигналов в среде MATLAB [Текст] // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практ. конф. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 529 – 532.
11. Климов Н.Н., Куценко С.М. О спектральном диапазоне наблюдаемых частот электромагнитного излучения при частичном разряде [Текст] // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практ. конф. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 524 – 527.
12. Куценко С.М., Климов Н.Н., Муратов В.И. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната [Текст] // Известия ТПУ. – 2006. - В. 2. - С. 82-87.
13. Климов Н.Н., Куценко С.М., Муратов В.И., Павлова Л.А. О возможном механизме частичных разрядов в фарфоровых изоляторах [Текст] // Современные проблемы радиотехники и радиоэлектроники. Сб. науч. тр. межвузовской конф. молодых ученых – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 84-96.