

на правах рукописи

Белов Александр Андреевич

**Дистанционный мониторинг коронных разрядов с
использованием монофотонного датчика УФ-С
излучения**

Специальность 01.04.01.–
Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2012

Работа выполнена в Институте химической физики РАН им. Н.Н.Семенова

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
Калинин Александр Петрович
доктор физико-математических наук,
Родионов Игорь Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
Линкин Вячеслав Михайлович
кандидат технических наук,
Мальшкин Михаил Александрович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-технологический центр уникального приборостроения
(НТЦ УП РАН).

Защита диссертации состоится 17 мая 2012 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 002.113.01
при Институте космических исследований РАН
по адресу: 117997, Москва, ГСП-7, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
космических исследований РАН.

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета, к.ф.-м.н.

Акимов В.В.

Актуальность работы

В последние годы по мере повышения потребления электроэнергии все более острой становится проблема качества ее передачи. Увеличение эксплуатационной нагрузки на объекты электроэнергетики, снижение уровня их обслуживания, текущего ремонта и замены изношенного оборудования ведет к возникновению аварийных режимов, сопровождающихся различного рода электрическими пробоями и искровыми разрядами и, в частности, коронным разрядом. Коронный разряд представляет собой физическое явление, сопровождающее многие природные и техногенные процессы. Так, например, по характеристикам коронного разряда судят о состоянии высоковольтных электрических установок. При этом именно коронный разряд является фактором, характеризующим состояние элементов высоковольтных линий (изоляторов), силовых трансформаторов и т.п. В связи с этим является актуальной разработка эффективных методов дефектоскопии электроизоляторов и иных элементов высоковольтных электроустановок и линий электропередач (ЛЭП), основанных на регистрации коронных разрядов. Особый практический интерес представляют дистанционные методы диагностики, базирующиеся на регистрации излучений в различных спектральных диапазонах (ультрафиолетовом, видимом, инфракрасном, акустическом), сопровождающих коронный разряд. Среди них наиболее широкое применение получил метод, основанный на регистрации излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Существующие на сегодня методы дистанционной диагностики, базирующиеся на обнаружении УФ-излучения коронных разрядов, позволяют лишь регистрировать наличие излучения. В связи с этим возникает необходимость разработки метода дистанционной диагностики силовых высоковольтных установок, который бы позволял не только регистрировать УФ излучение, но и выделять из него особый вид коронных разрядов – так называемые частичные разряды, и по их измеряемым характеристикам делать заключение о наличии неисправностей элементов высоковольтного оборудования, вызванных дефектами изоляции, ее

механическими повреждениями, наличием поверхностных загрязнений и т.п. Именно частичные разряды возникают в первую очередь при зарождении неисправностей и, таким образом, служат чувствительным индикатором последних.

Весь УФ-диапазон можно условно разделить на поддиапазоны: УФ-А (длины волн 315-400 нм), УФ-В (280-315 нм), УФ-С (200- 280 нм). Последний представляется наиболее перспективным для задач дистанционной диагностики, поскольку он является «солнечно-слепым» и, тем самым, обладает низким уровнем аддитивных помех. Это позволяет существенно повысить чувствительность сенсоров, работающих в этом диапазоне вплоть до регистрации отдельных фотонов, что реализовано в монофотонном датчике УФ-С излучения. Такой датчик может найти альтернативные применения в таких областях науки и техники, как изучение озонового слоя Земли, обнаружение пожаров, извержений вулканов, исследование процессов горения и взрыва, транзиентных люминесцентных явлений в верхней атмосфере и т.п.

В связи с этим тематика настоящей диссертационной работы, посвященной разработке метода дистанционного мониторинга коронных и частичных разрядов с помощью монофотонного датчика УФ-С излучения для целей дефектоскопии высоковольтных электроустановок, представляется актуальной, учитывающей злободневные потребности электроэнергетики, экологии, физики верхней атмосферы и др.

Цель работы состояла в разработке метода дистанционного мониторинга коронных разрядов с помощью монофотонного датчика УФ-С излучения, а также качественного улучшения характеристик монофотонного датчика, способного обеспечивать решение задач диагностики состояния высоковольтного электрооборудования по регистрации и определению характеристик частичных разрядов.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- **разработка** концепции дистанционной дефектоскопии элементов высоковольтных электрических установок, основанной на обнаружении частичных разрядов;
- **разработка** частотных методов дистанционного мониторинга частичных разрядов с целью определения качественных и количественных характеристик состояния элементов высоковольтных электрических установок;
- **усовершенствование** монофотонного датчика УФ-С излучения для решения задач дистанционной дефектоскопии;
- **создание** экспериментальной установки для лабораторного моделирования коронных и частичных разрядов.
- **разработка** программного обеспечения обработки данных монофотонного датчика УФ-С излучения для дистанционной диагностики элементов высоковольтных электрических установок.
- **проведение** лабораторных исследований усовершенствованной аппаратуры и разработанного метода дистанционной дефектоскопии.
- **проведение** натурных исследований коронных разрядов на участках линий электропередач и апробация методов дистанционной дефектоскопии.

Научная новизна работы

- **Разработаны** методы дистанционного мониторинга и анализа время-амплитудной зависимости УФ-С излучения коронных и частичных разрядов, основанные на Фурье- и вейвлет-преобразованиях.
- **Создан** метод дистанционной диагностики элементов силовых энергетических установок высокого напряжения.
- **Проведены** с помощью усовершенствованного монофотонного датчика натурные экспериментальные исследования по дистанционной диагностике линий электропередач высокого напряжения и высоковольтных силовых трансформаторов, впервые позволившие определять количественные характеристики частичных разрядов.

Основные положения, выносимые на защиту

- Усовершенствованный монофотонный датчик УФ-С излучения.
- Частотные методы анализа данных, полученных при регистрации коронных разрядов, на основе Фурье- и вейвлет-преобразования, позволяющих установить соответствие результатов такого анализа наличию дефектов элементов силовых электрических установок.
- Метод дистанционной дефектоскопии силовых энергетических установок высокого напряжения на основе измерения характеристик частичных разрядов, таких как фазовая интегральная характеристика и амплитудно-фазовое распределение.
- Результаты измерения характеристик частичных разрядов, полученных на специально созданной экспериментальной установке, подтверждающие разработанные в диссертации методические положения.
- Результаты натурных испытаний, основанных на дистанционном измерении характеристик частичных разрядов, возникающих на неисправных участках ЛЭП, подтверждающие возможность дистанционной дефектоскопии.
- Лабораторная установка для исследования коронных разрядов.

Достоверность работы подтверждается следующим

- Результатами экспериментальных лабораторных исследований.
- Результатами натурных экспериментов, в ходе которых произведено измерение параметров частичных разрядов, возникающих на неисправных участках ЛЭП.
- Патентом на изобретение №2402030 «Способ дистанционного контроля качества изоляции объектов высоковольтных электрических установок переменного тока».

Научная и практическая ценность работы

Научная ценность работы заключается в комплексном использовании методов частотного и временного анализа данных, поступающих с

монофотонного датчика, что позволяет делать обоснованные заключения о состоянии элементов конструкций ЛЭП, силовых установок и т.п.

Практическая ценность работы заключается в усовершенствовании монофотонного датчика УФ-излучения на основе время-координато-чувствительного детектора (ВКЧД). Монофотонный датчик и разработанная методика могут быть использованы для предотвращения аварий на ЛЭП и на электроустановках высокого напряжения. Прибор доведен до промышленного образца (литера О₁). Разработаны методики использования прибора и его функциональных узлов, а также испытательная база в объеме, необходимом для серийного производства в промышленном масштабе. Усовершенствованный монофотонный датчик может использоваться в альтернативных областях, таких как мониторинг толщины озонового слоя Земли, объемное наблюдение стратосферных и тропосферных электрических явлений, мониторинг лесных пожаров, активная трехмерная локация.

Работы по созданию нового поколения монофотонных УФ-С датчиков, использующих современную элементную базу и основанных на достижениях направленного выращивания новых оптических кристаллов, проводились в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы». Данная программа является приоритетным направлением Роснауки «Осуществление комплексных проектов, в том числе разработка конкурентно-способных технологий, предназначенных для последующей коммерциализации в области индустрии наносистем и материалов».

Апробация работы

Способ дистанционного контроля качества изоляции объектов высоковольтных электрических установок переменного тока запатентован в федеральной службе РФ по интеллектуальной собственности, патентам товарным знакам [7].

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Втором Международном форуме по нанотехнологиям, Москва, 6 – 8 октября 2009.
- Седьмой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса» в ИКИ РАН, Москва, 16 – 20 ноября 2009 г.
- Двенадцатой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» в ИПУ РАН, Москва, 31 марта – 2 апреля 2010 г.
- Восьмой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса» в ИКИ РАН, Москва, 15 – 19 ноября 2010 г.
- Шестнадцатой международной выставке-конгрессе «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции. HI-Tech», Санкт-Петербург, 10 – 12 марта 2010 г.
- Симпозиумах химической физики
- Семинарах ИПМех РАН.
- Семинарах ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН
- Семинарах ЗАО НТЦ «Реагент».

Результаты работы опубликованы в периодических изданиях:

- Доклады Академии наук [3, 12]
- Датчики и системы [11, 8]
- Приборы и техника эксперимента [2]

Личный вклад автора

Все оригинальные результаты, приведенные в диссертации и вынесенные на защиту, получены лично автором, либо при его определяющем участии. Все работы, в которых опубликованы результаты диссертации, написаны в соавторстве с коллегами.

Авторским в диссертации является: разработка частотных методов регистрации частичных разрядов на основе вейвлет-преобразования, а также

методика получения фазовой интегральной характеристики и амплитудно-фазового распределения.

Лично автором или под его непосредственным руководством осуществлено создание усовершенствованного монофотонного сенсора УФ-С излучения.

Лично автором осуществлено: создание лабораторной экспериментальной установки получения коронных разрядов с известными характеристиками, разработка программного обеспечения на языке MATLAB для реализации частотных алгоритмов распознавания частичных разрядов, разработка программного обеспечения (ПО) цифровой системы монофотонного датчика, проведение лабораторных и натуральных экспериментов и обработки их результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы. Она изложена на 151 странице и содержит 5 таблиц, 95 рисунков и списка литературы из 56 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, излагается цель работы, указан личный вклад автора в работу, новизна, научная и практическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации.

В **первой** главе дан анализ литературы, посвященной источникам УФ-излучения, в том числе коронных разрядов, представляющий интерес с точки зрения разработки методов дистанционной дефектоскопии. Приведен обзор существующих на сегодняшний день методов и средств измерения характеристик источников УФ-излучения, в том числе коронных разрядов.

В параграфе 1.1. рассмотрены некоторые виды источников УФ-излучения, которые могут быть объектами наблюдения, измерения и анализа

монофотонным датчиком. К отдельному виду источников УФ-излучения относятся коронные разряды, возникающие на высоковольтных электроустановках и на линиях электропередач (ЛЭП). Коронный разряд излучает в широком спектре, в том числе в диапазоне УФ-С. Так как большинство электроустановок работает на переменном токе, то частотный образ мощности излучения коронного разряда должен содержать соответствующие частоты и их гармоники. Монофотонный датчик, обладающий высоким временным разрешением, производит различными методами преобразование принимаемого сигнала в частотную область и анализирует максимумы частотного распределения, на основе чего создана система для селектирования этого типа источников УФ-излучения. Разновидностью коронного разряда является так называемый частичный разряд (ЧР), возникающий в тех случаях, когда разрядный промежуток заполнен средой с неоднородной проводимостью. На практике подобные неоднородности возникают в связи с дефектами изоляторов, например, с газовыми включениями в стекло, или в связи с загрязнениями. В таких случаях разряд проходит не по всему разрядному промежутку, а лишь в местах повышенной напряженности поля. Используя метод анализа, основанный на регистрации отдельных фотонов координатно-чувствительным детектором с определением времени прихода фотонов, можно не только определить координаты места излучения, но и измерять их временное распределение и на его основе извлекать из получаемой информации параметры частичных разрядов, такие как частота следования ЧР, частота повторения ЧР, фазные углы, а также напряжения возникновения ЧР. Кроме этого, в режиме дистанционного зондирования возможно получение амплитудного и амплитудно-фазового распределения (по аналогии с существующей в настоящее время методикой получения данных распределений с использованием устройства присоединения).

В качестве высокочувствительного сенсора УФ-С излучения использовался усовершенствованный монофотонный датчик на основе сборки

микроканальных пластин (МКП), подробное описание которого приводится во 2 главе.

В параграфе 1.2 рассмотрены существующие методы регистрации коронных разрядов и измерения характеристик частичных разрядов. Все методы подразделяются на контактные и дистанционные. Достоинством контактного метода является то, что при его использовании возможны измерения почти всех параметров ЧР, в том числе скрытых. Главный недостаток контактного метода – это невозможность проведения массовой проверки. Дан обзор приборов контактного измерения параметров ЧР.

Дистанционные методы основаны на регистрации акустического или светового излучения (ИК, УФ и видимого диапазона). Как уже было сказано, протекание ЧР сопровождается характерным звуком, что объясняется движением объемного заряда ионов в электрическом поле (более подробно см. §1.2). На данном явлении основан акустический метод. Этот метод в чем-то схож с предлагаемым в данной работе методом, так как методики обработки полученного сигнала также основаны на частотно-временном анализе. К числу недостатков акустического метода следует в первую очередь отнести его уязвимость к шумовым помехам, которые создаются электроустановками.

В параграфе 1.3 рассмотрены существующие методы регистрации коронных разрядов в солнечно-слепом диапазоне УФ-излучения. Рассмотрены аналоги монофотонного датчика, применяемые также для диагностирования коронных разрядов, такие как израильский прибор DayCor-II, УФ-камера COROCAM-504, разработанная в ОАЭ, а также российский прибор Филин-6, разработанный в г.Новосибирске. Основным недостатком всех уже существующих методов регистрации коронных разрядов в солнечно-слепом диапазоне УФ-излучения является невозможность регистрировать частичные разряды.

В параграфе 1.4 ставится задача, решаемая в диссертации. В данной работе на основе имеющегося датчика УФ-излучения должен быть сконструирован прибор, специально предназначенный для дистанционной регистрации частичных разрядов. Для усовершенствованного прибора должны

быть разработаны методы обработки выдаваемой им информации. В результате обработки информации на специальное устройство отображения должны выводиться сведения об измеренной мощности сигнала, о частоте сигнала, а также о плотности мощности сигнала на заданной частоте и количественные характеристики ЧР, определенные международным стандартом МЭК 60270. Необходимо также разработать алгоритмы определения фазового сдвига при регистрации одновременно двух коронных разрядов, возникающих на отдельных фазах одной ЛЭП.

Вторая глава посвящена описанию разработанного в НТЦ «Реагент» монофотонного датчика, а также описанию узлов, усовершенствованных в рамках настоящей работы. Слово монофотонный означает, что сенсор работает в режиме счета отдельных зарегистрированных фотонов. Для каждого зарегистрированного фотона определяются его угловые координаты и время прихода. Измеряемые значения координат и времени прихода каждого фотона могут быть переданы через высокоскоростной последовательный интерфейс для дальнейшей обработки и отображения.

В параграфе 2.1 рассмотрено устройствомонофотонного датчика. Датчик состоит из следующих функциональных блоков: входной объектив, УФ-фильтр, монофотонный детектор, предварительные электронные тракты, модуля цифрового ввода данных и модуля вычислителя. В состав прибора может также входить модуль отображения. Функциональная схема датчика изображена на рис. 1.

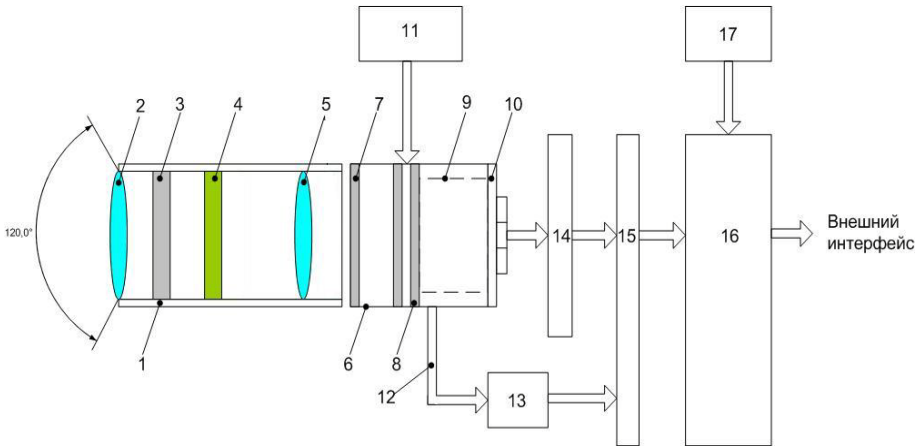


Рис. 1. Функциональный состав монофотонного УФ-датчика

Принцип действия датчика.

Фотон от источника УФ-излучения попадает в оптическую систему. Оптическая система 1 пропускает фотоны выбранного спектрального диапазона УФ-излучения и подавляет все остальные длины волн (следует отметить, что выбором кристаллов 3 и фильтров 4 можно выделить любой нужный нам диапазон длин волн). Оптическая система 1 служит для формирования изображения на поверхности входного окна время-координатно-чувствительного детектора 6. Благодаря оптической системе для прибора, описываемого в данной работе, обеспечивается солнечно-слепой режим регистрации УФ-С излучения, и прибор может работать в условиях интенсивной солнечной радиации, попадающей в объектив. Прошедший фотон УФ-С излучения попадает на фотокатод 7 ВКЧД детектора. Коэффициент подавления фотонов с длинами волн, отличными от УФ-С излучения, после прохождения объектива и детектора может достигать 10^{-14} .

Стартовый канал 13 – это электронный узел, обеспечивающий формирование логического импульса (сигнала старта), соответствующего времени прихода фотона (с точностью лучше 1 нс). Стартовый сигнал в дальнейшем используется в модуле ввода цифровых данных 16 для определения времени прихода фотона, управление интегратором, режектирования наложенных импульсов. Предварительные электронные

тракты 15 осуществляют аналого-цифровое преобразование зарядовых сигналов, а также их предварительную обработку. Модуль ввода цифровых данных и вывода сигналов управления (ВЦД) 16 – это составная часть монофотонного датчика, основные функции которого – чтение данных с АЦП, фиксация времени прихода фотонов, подготовка данных для передачи в вычислитель. Кроме этого модуль ВЦД формирует сигналы управления многоканальным высоковольтным источником питания 11, устанавливает порог стартового канала 13, формирует тестовые импульсы для системы внутреннего самоконтроля. Выходной информацией модуля ВЦД является последовательность $\{Q(N)_{n,t_n}\}$, формируемая на основании данных предварительных электронных трактов и стартового канала.

Для выполнения низкоуровневых аппаратно-программных функций ВЦД в качестве аппаратной платформы выбрана программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Этот выбор обусловлен тем, что ПЛИСы предназначены для реализации параллельных процессов. Более того, если ранее ПЛИСы имели довольно ограниченные возможности, то в настоящее время некоторые современные ПЛИСы имеют в своем составе процессоры средней мощности, что упрощает организацию взаимодействия низкоуровневых аппаратно-программных функций и функций цифровой обработки сигналов. Главным аргументом в пользу выбора ПЛИС является необходимость управления модулями с быстродействием до единиц наносекунд и частотой обработки событий до 50 МГц.

Данные с выхода модуля ВЦД через внешние интерфейсы передаются в модуль вычислителя и далее в модуль отображения (в состав прибора не входит).

Параграф 2.2 посвящен усовершенствованным узлам монофотонного датчика. Усовершенствованный датчик, получивший название «Корона», отличается большей чувствительностью, увеличенным динамическим диапазоном, а также наличием обзорной видеокамеры. Для увеличения динамического диапазона было введено стробирование фотокатода, заключающееся в кратковременном снятии с него напряжения, что при

больших засветках позволяет избежать эффекта обеднения МКП и наложения импульсов ЗЧУ. При обеднении МКП падает коэффициент усиления ВКЧД, в результате чего прибор теряет пространственное разрешение. При наложении импульсов ЗЧУ возникает искажение формы импульсов, в результате чего прибор также теряет пространственное разрешение. Наличие обзорной камеры усовершенствованного прибора «Корона» позволяет визуально определить, на каком из объектов, находящихся в поле зрения прибора (подстанция, опора ЛЭП, изолятор и т.п.) возникает коронный разряд (Рис. 2).

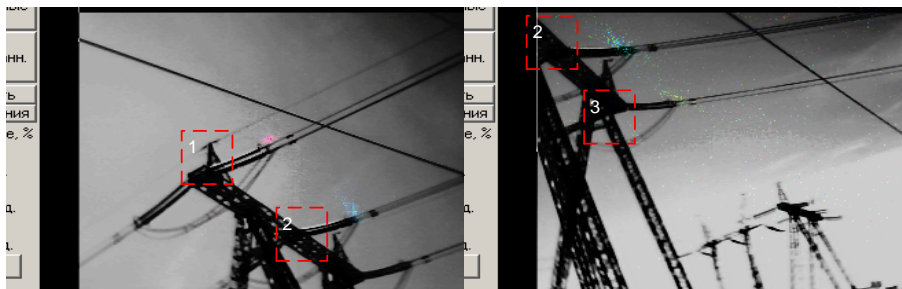


Рис. 2. Пространственное распределение фотонов при регистрации фотонов УФ-излучения от опоры ЛЭП

Третья глава посвящена методам обработки информации монофотонного датчика. В данной главе рассмотрены методы анализа информации с целью получения координат источников излучения коронных разрядов, а также информации о свойствах источников. Последнее в свою очередь дает возможность определить количественные характеристики частичных разрядов. Данные методы основаны на преобразовании Фурье (ПФ) и вейвлет-преобразовании (ВП). Метод ВП более современный и в отличие от ПФ позволяет визуализировать ЧР. Однако ПФ также имеет свои преимущества, о которых будет сказано ниже.

В параграфе 3.1. рассмотрено использование метода преобразования Фурье, метода кратковременного преобразования Фурье и метода вейвлет-преобразования для частотного анализа временного распределения зарегистрированных фотонов. Изображение Фурье временного ряда,

получаемого монофотонным датчиком, содержит полезную информацию о его гармонических составляющих, и в случае коронного разряда - о частоте переменного тока электросети. Коронный разряд, возникающий на электроустановках, является периодическим процессом. В случае переменного тока разряд возникает только на полуволнах высокого напряжения, таким образом, в спектре сигнала должна быть удвоенная частота колебаний электросети 100 Гц. Изображение Фурье $\{S_k\}$ показывает наличие основной гармонической составляющей на частоте сети, что с одной стороны подтверждает то, что это УФ-излучение от коронного разряда, возникающего на ЛЭП переменного тока, и с другой стороны позволяет контролировать отклонение частоты электросети от заданных норм. Кроме этого в коронном разряде могут возникать частичные разряды – импульсы большой мощности. Лабораторные эксперименты показали, что частота следования ЧР лежит в диапазоне от 0,2 до 5 кГц. Временное разрешение и чувствительность монофотонного фотоприемника позволяют выделять излучение от ЧР, что важно, так как именно они являются признаком нарушения качества изоляции.

Помимо ПФ, базисная функция которого жестко задана, в данной работе использовано ВП. Для исследования методом ВП в качестве базисных функций был выбран вейвлет Морле, имеющий вид (1).

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{\alpha^2}} \left(e^{ik_0 t} - e^{\frac{k_0^2 \alpha^2}{4}} \right), \quad (1)$$

где k_0 - параметр центральной частоты

α - параметр ширины спектра

Из материнского вейвлета может быть сконструировано множество дочерних вейвлетов (или базисов) в соответствии с выражением (2).

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

где a – масштабный коэффициент, b – переменная сдвига.

Дочерние вейвлеты обладают теми же свойствами, что и материнский вейвлет, различаясь друг от друга по масштабу в зависимости от коэффициента a , и по положению на временной оси в зависимости от

переменной сдвига b , что позволяет локализовывать всплески сигналов как в частотной, так и во временной области. В данной работе использован комплексный вейвлет Морле, так как он позволяет более четко локализовывать гармонические всплески.

Вейвлет-преобразование описывается выражением (3), результатом которого является вейвлет-спектр $W_s(a, b)$.

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где a - временной масштаб,

b - сдвиг

$s(t)$ - исследуемая функция

$\psi(t)$ - анализирующая функция (вейвлет)

Вейвлет-спектр $W_s(a, b)$ в отличие от Фурье-спектра является функцией двух аргументов: первый аргумент a аналогичен периоду осцилляций, т.е. обратно пропорционален частоте, а второй аргумент b – аналогичен смещению сигнала по оси времени. В большинстве случаев вместо трехмерного изображения функции $W_s(a, b)$ используется ее проекция изоуровней на плоскость (a, b) , или так называемая спектрограмма (рис. 3б).

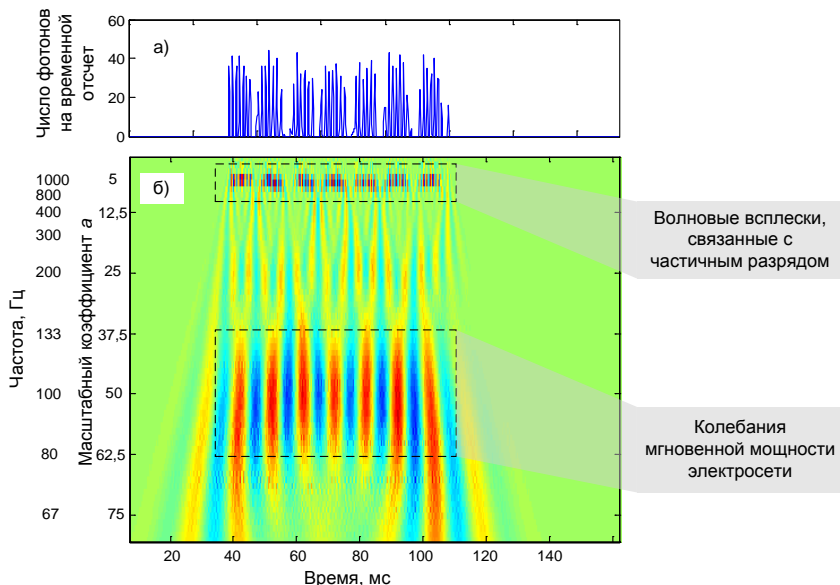


Рис. 3. Спектрограмма частичного разряда, полученного в лаборатории на стенде исследования коронного разряда.

На рис. 3а изображена спектрограмма $W_s(a, b)$ (рис. 3б) при $a \in (1; 75)$ и $b \in (0; 160)$ в пересчете на миллисекунды. Последовательность $\{s_n\}$ получена при регистрации излучения от поверхности изолятора, по которому проходил частичный разряд. Спектрограмма дает наглядное представление о гармонических составляющих сигнала $\{s_n\}$ и о том, в каких временных интервалах произошли данные гармонические всплески.

Значению $a \approx 50$ соответствует подмножество вейвлетов $\psi_b(t)$, спектр которых согласно (4) имеет максимум на удвоенной частоте сети $f \approx 100$ Гц. На этой горизонтали виден набор всплесков, обусловленных колебаниями мгновенной мощности электросети. В данном случае получен тот же результат, что был получен при применении дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Значению $a \approx 5$ соответствуют вейвлеты на частоте $f \approx 1$ кГц,

при котором наблюдаются всплески, связанные с появлением частичных разрядов (стримеров). Они различимы на графике $\{s_n\}$, однако не могут быть выявлены на Фурье-изображении по той причине, что все группы стримеров имеют приблизительно равные частоты, однако их фазы различны.

В параграфе 3.2. рассмотрены вопросы получения количественных характеристик ЧР. Алгоритм их вычисления основан на выделении фазы сигнала на фоне шума. Выделение фазы сигнала может быть осуществлено несколькими способами: при использовании ПФ, ВП или на основе преобразования Гильберта. В данном разделе обсуждаются достоинства и недостатки этих методов, а также влияние недостатков на получение конечного результата.

Основной количественной характеристикой является фазовая интегральная характеристика (ФИХ) – это интегральная зависимость интенсивности счета фотонов от фазы напряжения электросети, определяемая из выражения (5). Определяющее значение ФИХ при исследовании частичных разрядов объясняется тем, что из нее могут быть вычислены фазовые количественные характеристики частичных разрядов, определенные МЭК 60270.

$$\bar{s}_j = \frac{\sum_{n=1}^N s_{nj}}{N}$$

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям, которые были проведены для проверки методики определения количественных характеристик частичных разрядов, которая описана в главе 3. Для исследования коронных разрядов при помощи монофотонного датчика была создана экспериментальная установка, описание которой приведено в §4.1. В лабораторных экспериментах на установке осуществлялась генерация коронного разряда без ЧР и с ЧР, проводилось контактное измерение параметров разрядов, а также выполнялась регистрация УФ-С излучения монофотонным датчиком. При генерации коронного разряда

последовательно с разрядным промежутком был включен осциллограф с токовым пробником, что позволяло фиксировать появления частичных разрядов, проявляющихся в виде скачков тока на осциллограмме. На основе полученных данных было установлено соответствие между контактными ЧР и дистанционными методами регистрации ЧР. Анализ записанной информации монофотонного датчика также показал наличие ЧР в коронном разряде, причем моменты времени появления импульсов тока на осциллографе соответствуют моментам времени появления всплеска на временном распределении фотонов (время-амплитудная характеристика) и на вейвлет-спектрограмме. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что наблюдение ЧР при использовании предлагаемого дистанционного метода эквивалентно наблюдению ЧР при использовании контактного метода, каковым в данном случае является осциллографирование.

Для подтверждения пригодности разработанного прибора и алгоритмов обработки данных для диагностирования высоковольтных электроустановок были проведены также натурные исследования. В качестве места проведения испытаний были выбраны зоны ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) 500 кВ, а также районы, находящиеся в непосредственной близости от объектов электростанции Чагино на юге Москвы. Описание методики проведенных экспериментов приведено в §4.2. Результаты лабораторных и натурных испытаний и выводы из них приведены в §4.3 и §4.4. На рис. 4 приведена фазовая интегральная характеристика, полученная при обработке информации, записанной монофотонным датчиком при регистрации УФ-излучения от одного из изоляторов.

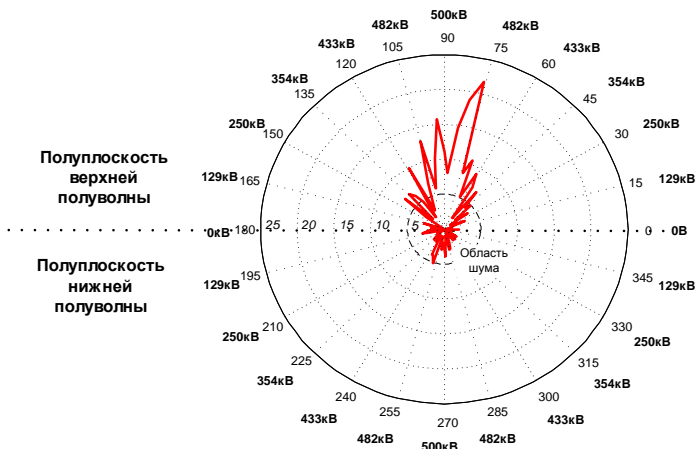


Рис. 4. ФИХ от источника 1. По внутреннему кругу значений отсчитывается фаза электросети, по внешнему кругу указано мгновенное напряжение, соответствующее данной фазе, по радиусу указано число накопленных ЧР

Вид фазовой интегральной характеристики свидетельствует о наличии ЧР. Этот факт позволяет сделать вывод о том, что предлагаемый метод дистанционной диагностики может быть использован для проверки качества изоляции высоковольтного электрооборудования.

Пятая глава. Помимо мониторинга коронных разрядов, описанного выше, существуют и другие области научного и практического применения монофотонного датчика. С точки зрения космического применения данного прибора одной из актуальных проблем является мониторинг состояния озонового слоя Земли. В настоящее время этот мониторинг проводится при использовании прибора TOMS, который осуществляет измерение интенсивности отраженного УФ-излучения на четырех длинах волн из диапазона УФ-С и УФ-В.

С точки зрения исследования верхней атмосферы интересным применением монофотонного датчика является наблюдение стратосферных электрических явлений. В их числе находятся грозные разряды в верхних слоях атмосферы, трудно доступные для изучения с поверхности Земли. В литературных источниках описаны типы стратосферных электрических

явлений: красные эльфы (elves), синие джеты (jets), спрайты, гномы и др. При использовании монофотонного датчика становится возможным с высокой точностью (до 1 нс) определять время появления стратосферных вспышек, изучать их сложную пространственно-временную структуру, а также исследовать периодические процессы на различных частотах, являющиеся причиной УФ-излучения.

Разработанный монофотонный датчик может быть также использован для дистанционного авиационного мониторинга лесных пожаров, в том числе обнаружения открытого пламени на ярком солнечном фоне. Возможно изучение временной динамики процессов горения.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.А.Белов, Д.Ю.Дубровицкий, М.В.Зверков, В.А.Ильевский, А.П.Калинин, В.И.Козловский, П.И.Кузнецов, А.Ф.Осипов, Ю.В.Петрушенко, А.И.Родионов, И.Д.Родионов, Я.К.Скасырский, Л.К.Субботин, Е.Ю.Федунин, Источники УФ излучения на основе катодного люминофорного кристаллового гетероструктурного III-V соединения, Препринт ИПМех РАН № 727, 39 с., 2003.
2. Белов А. А., Зубков Б. В., Калинин А. П., Криванков С. Н., Крысюк И. В., Модин С. Ф., Родионов А.И., Родионов И.Д., Федунин Е.Ю., Стенд для исследования фотоэлектронных умножителей на основе микроканальных пластин, Приборы и техника эксперимента, №2, с. 157, 2005
3. Непобедимый С.П., Белов А.А., Ильин А.А., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Родионов А.И., Трехмерное техническое зрение на основе монофотонной технологии, Доклады Академии наук, 2006, т.406, №3 с333-336
4. Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В., Родионов И.Д., Родионов А.И. Устройство для генерирования световых импульсов ультрафиолетового излучения, патент №2351034, Заявка: 2007112667/28, Дата подачи заявки: 2007.04.05, Дата начала отсчета срока действия патента: 2007.04.05, Дата публикации заявки: 2008.10.10, Опубликовано: 2009.03.27 в Бюллетене №9
5. Крысюк И.В., Белов А.А., Калинин А.П., Родионов И.Д., Дегтярев А.А., Воронцов Д.В., Ионов И.С., Родионов А.И. «Источник ультрафиолетового излучения для зондирования земной поверхности с малых высот» Шестая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» Москва, ИКИ РАН 10-13 ноября 2008 г. с. 100. http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/reports.pl?conference_num=RSE_6
6. Белов А.А. Егоров В.В., Калинин А.П., Крысюк И.В. , Родионов И.Д. Дистанционный мониторинг техногенных источников УФ-излучения с помощью монофотонного сенсора 7 всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 16-20 ноября 2009 г. <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=170>
7. Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В., Родионов И.Д., Родионов А.И., Степанов С.Н. Способ дистанционного контроля качества изоляции объектов высоковольтных электрических установок

переменного тока, патент №2402030, Заявка 2009137474/28, Дата подачи заявки 12.10.2009, Дата начала отсчета срока действия патента: 12.10.2009, Опубликовано 20.10.2010 в Бюллетене №29.

8. Крысюк И.В., Белов А.А., Калинин А.П., Родионов И.Д., Дегтярев А.А., Воронцов Д.В., Родионов А.И., Источник импульсов УФ-излучения с модуляцией в широком диапазоне частот, Датчики и системы, 2009, №1, с.19-22
9. Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В., Родионов А.И., Родионов И.Д. Дистанционный мониторинг излучения коронных разрядов с помощью монофотонного датчика УФ-С излучения «Современная химическая физика» Туапсе 25 сентября-06 октября 2009, 2009, с. 240
10. Белов А.А., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионов А.И., Крысюк И.В., Степанов С.Н. Дистанционная диагностика коронных разрядов электроустановок высокого напряжения переменного тока Препринт ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН, №907 38с. 2009
11. Белов А.А. Калинин А.П., Крысюк И.В., Порохов М.А., Родионов А.И., Родионов И.Д., Русанов В.В., Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Скорпион», Датчики и системы, №1, 2010 с.47-50
12. Непобедимый С. П., Белов А. А., Калинин А.П., Крысюк И. В., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н., Дистанционная диагностика коронного разряда монофотонным детектором в ультрафиолетовом диапазоне, доклады академии наук, 2010, том 432, с. 764–768
13. А.А.Белов, В.В.Егоров, А.П.Калинин, И.В.Крысюк, И.Д.Родионов. Дистанционный мониторинг техногенных источников УФ-излучения с помощью монофотонного сенсора. Сборник научных статей "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса", том 7, Москва, ИКИ РАН, 2010.
14. Белов А.А., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д., Метод дистанционного исследования характеристик коронных разрядов на основе цифровой обработки временной последовательности регистрируемого ультрафиолетового излучения., Труды Рос научно-тех общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение Выпуск XII-2 .12 Международная конференция и выставка « Цифровая обработка сигналов и ее применение –DSPA- 2010», Москва. 2010 с. 204- 206
15. Белов А.А., Егоров В.В. Калинин А.П, Крысюк И.В., Родионов И.Д., Родионова И.П., Степанов С.Н., Исследование возможностей дистанционного обнаружения экранированных источников УФ-С излучения. Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из

космоса» Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2010 г Сборник тезисов конференции, с.114

16. Белов А.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Крысюк И.В., Родионов И.Д., Дистанционный мониторинг техногенных источников УФ-излучения с помощью монофотонного сенсора., Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. \том 7. Номер 2.-М.: ООО «ДоМира», 2010, с. 233-241
17. Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А.П., Крысюк И. В., Осипов А. Ф., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н. Универсальный монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона, Препринт ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН. №935, 2010., 48с
18. Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А.П.,Коровин Н.А., Родионов И.Д., Родионова И.П. Методика 3D-анализа УФ-излучения силовых электроустановок по данным многопозиционного (многосенсорного) мониторинга, Препринт ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН. №1001, 2011., 33с