

Дистанционный мониторинг техногенных источников УФ-излучения с помощью монофотонного сенсора

А.А. Белов¹, В.В. Егоров², А.П. Калинин³, И.В. Крысюк¹, И.Д. Родионов⁴,

¹ Научно-технический центр «Реагент»,

125190 Москва, ул.Балтийская, 14

E-mail: abelov@reagent-rdc.ru

²Институт космических исследований РАН,

117997 Москва, Профсоюзная 84/32

³ Институт проблем механики РАН

119526 Москва, пр-кт Вернадского 101, корп. 1

⁴ Институт химической физики РАН им.Семенова

119991 Москва, ул.Косыгина, 4

Предложен метод дистанционного мониторинга техногенных источников УФ-излучения, основанный на возможности регистрации временной зависимости интенсивности излучения с помощью монофотонного время-координатно-чувствительного детектора (ВКЧД). Описан принцип действия ВКЧД и основные аспекты его применения. В качестве наиболее показательного примера использования разработанного метода рассмотрен дистанционный мониторинг коронных разрядов, возникающих на высоковольтных электроустановках. Особое внимание удалено рассмотрению принципов обработки выходной временной информации датчика, в основу которых заложено преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Предложенный метод позволяет получить количественные результаты, свидетельствующие о состоянии элементов высоковольтных установок.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, монофотонный датчик, коронный разряд, частичный разряд, вейвлет преобразование, дистанционный мониторинг, озоновый слой.

Введение

В настоящее время в различных областях науки и техники все более широкое применение находит использование ультрафиолетового (УФ-С) спектрального диапазона. Интерес к этой области обусловлен тем, что УФ-С диапазон имеет сравнительно низкий уровень фоновых помех. Основным источником естественных помех оптического диапазона является солнечная радиация. Однако благодаря озоновому слою планеты, а также атмосфере основная часть солнечной УФ радиации поглощается. Спектр оптического солнечного излучения, достигшего Земной поверхности, в основном сконцентрирован в области видимого и инфракрасного излучения. Отсутствие естественных помех, обусловленных солнечной радиацией, низкий уровень фоновых помех в УФ-С диапазоне, делает этот диапазон солнечно слепым и весьма привлекательным для использования в фотоприемной аппаратуре, решающей различные технические задачи. Для регистрации УФ-С излучения был создан специальный прибор – монофотонный сенсор (рис. 1), главной особенностью которого является способность определения координат регистрируемого фотона и времени его прихода [1]. Это позволяет с помощью этого сенсора проводить измерение и анализ временной зависимости регистрируемого излучения, что обеспечивает ему инновационное качество – определение особенностей источника УФ-С излучения. Таким образом, существенно увеличивается потенциал созданного сенсора по сравнению с имеющимися российскими и зарубежными аналогами (DayCor-II, COROCAM-504 и Филин также работают в УФ-С диапазоне). На основе этого сенсора был разработан метод

анализа временной зависимости интенсивности УФ-С излучения высоковольтных установок переменного тока. Для демонстрации возможностей разработанного метода для дистанционного мониторинга техногенных источников было проведено исследование электроизоляторов линий высокого напряжения. Проведенный анализ метода показал его возможность обнаруживать предаварийное состояние исследованного высоковольтного электрооборудования [2].

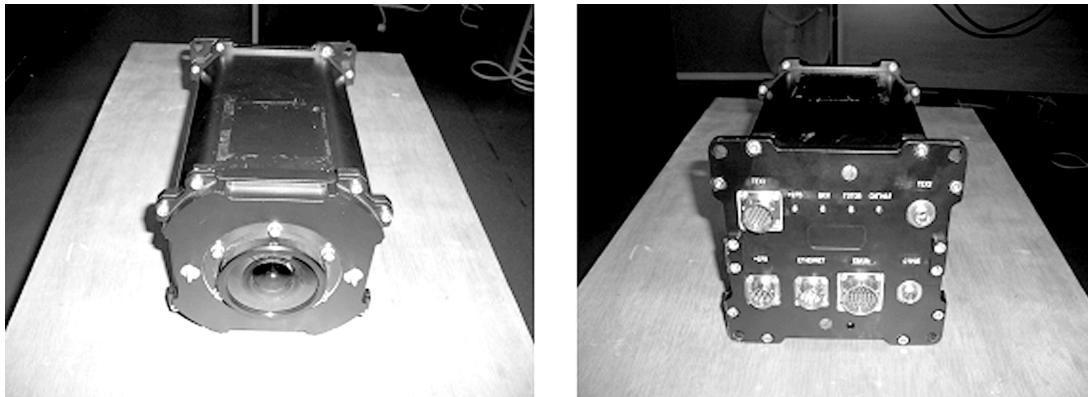


Рис. 1. Внешний вид монофотонного сенсора

Необходимость диагностики высоковольтных электроустановок очевидна. Это лишний раз подтверждается не так давно произошедшей аварией на подстанции «Чагино» в Москве, повлекшей за собой массовые отключения электроэнергии. Наиболее распространенный метод обнаружения неисправностей на высоковольтных установках основан на регистрации коронного и так называемого частичного разряда (ЧР). Коронный разряд возникает в областях пространства с высокими значениями напряженности электрического поля. Согласно определению стандарта IEC-60270 [3], ЧР – это локализованный электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между проводниками, который может возникать как в прилегающих, так и в не прилегающих к проводнику объемах изоляции. В отраслевой энергетике именно частичные разряды являются индикатором повреждения электроустановки [4]. В связи с этим уже разработано немало методов их регистрации (рис. 2) [4,5]. До настоящего времени общим недостатком используемых дистанционных методов являлось то, что они могли регистрировать лишь факты наличия коронных разрядов, но не могли определять наличие и в них частичных разрядов и измерять их количественные характеристики. Например, ИК-термография фиксирует всего лишь увеличение температуры. Основной недостаток акустического метода – влияние помех, создаваемых самими же электроустановками. Разработанный монофотонный датчик дает качественно новую возможность обнаруживать частичные разряды, определять их количественные характеристики и на этой основе делать вывод о состоянии исследуемых элементов высоковольтных установок.

Другим интересным применением УФ-С датчика является возможность мониторинга лесных пожаров. Можно отслеживать факты возникновения пожаров с космических аппаратов и получать информацию для своевременного принятия соответствующих мер. Мониторинг лесных пожаров может проводиться, в том числе и светлое время суток, так как УФ-С датчик работает в солнечно-слепом диапазоне.

Еще одно применение датчика – космический мониторинг состояния озонаового слоя Земли. В настоящее время для этих целей используется американский прибор TOMS (<http://toms.gsfc.nasa.gov>). Разработанный нами сенсор позволит получить аналогичные результаты (будучи перестроенным в УФ-В диапазон с помощью подбора кристалла и

УФ-фильтров в объективе сенсора [1]) путем измерения отражательной способности в УФ-диапазоне, при этом угол обзора будет равняться 120^0 с разрешающей способностью $0,1^0$. При этом не будет требоваться сканирование по углам, что качественно отличается от проекта TOMS.



Рис. 2. Классификация методов обнаружения неисправностей на высоковольтных электроустановках

Коронный и частичный разряды

Как было сказано во введении, одним из важных и интересных применений монофотонного датчика является дистанционная дефектоскопия высоковольтных электроустановок, принцип которой основан на регистрации УФ-С излучения элементов высоковольтных установок (коронное излучение и частичные разряды). В большинстве случаев высоковольтные установки работают на переменном токе. Так как интенсивность излучения короны зависит от мгновенного напряжения, мощность излучения короны также имеет периодический характер. Зависимость интенсивности излучения от времени может быть измерена УФ-С датчиком. В действительности коронный разряд излучает импульсы, которые УФ-С датчик также различает благодаря его высокому временному разрешению (рис. 3а). Если электроизолятор неисправен, например, загрязнен или имеет трещины и сколы, то в этом случае на нем возникают ЧР. Внешне они выражаются в виде искр, возникающих в отдельных частях изолятора. Мощность излучения искр ЧР во много раз превышает мощность короны, и, кроме этого, важно отметить то, что ЧР следуют друг за другом на более высокой частоте по сравнению с частотой электросети (рис. 3б). Таким образом, отличить чистый коронный разряд от ЧР можно по наличию отдельных УФ-С импульсов, возникающих с определенной частотой на полуволнах переменного напряжения.

Устройство монофотонного УФ-датчика

Схема устройства разработанного и созданного монофотонного сенсора представлена на рис. 4.

В состав устройства входят входной объектив, детектор, предварительные электронные тракты, модуль ввода цифровых данных (ВЦД) и вывода сигналов управления, блок вычислителя и модуль отображения. Входной объектив состоит из системы линз, специальных кристаллов с хорошим пропусканием выбранного УФ-С диапазона и подав-

лением других длин волн, УФ-фильтров. Детектор включает в себя время-координатно-чувствительный-детектор (ВКЧД), многоканальный источник высоковольтного питания (ВИП), зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) и стартовый канал. Также имеется система регистрации времени прихода фотона.

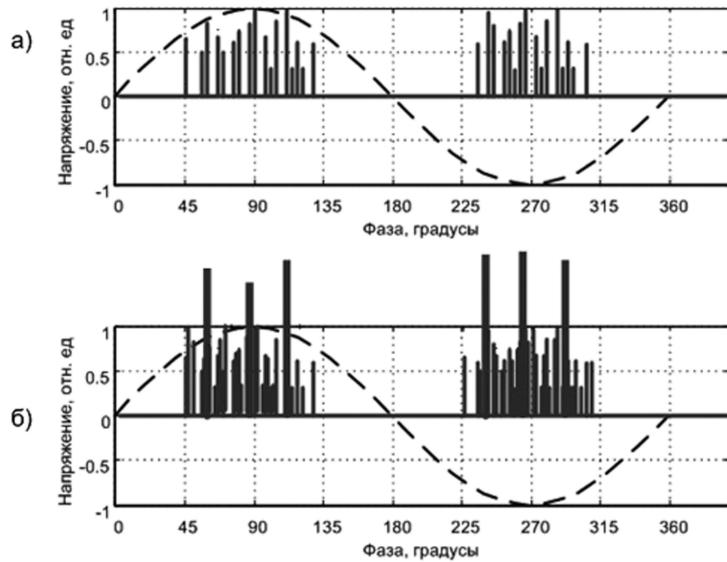


Рис. 3. Регистрация свечения изолятора высоковольтной установки переменного тока.
а) – коронный разряд (исправный изолятор),
б) – с частичными разрядами (неисправный изолятор)

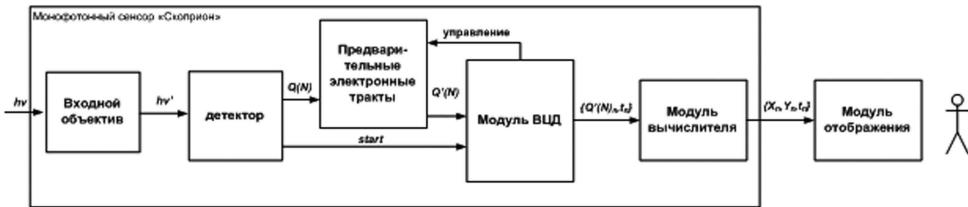


Рис. 4. Схема монофотонного УФ датчика

Устройство работает следующим образом. Пришедший фотон УФ-С излучения попадает на фотокатод ВКЧД детектора. Коэффициент подавления фотонов с длинами волн, отличными от УФ-С излучения, после прохождения объектива и детектора может достигать 10^{-14} . ВКЧД формирует на выходе пять зарядов $Q(N)_n$, из соотношения которых определяются координаты зарегистрированного фотона. Предварительные электронные тракты производят измерение зарядов и подготавливают их для аналого-цифрового преобразования (АЦП). Основные функции модуля ввода цифровых данных и вывода сигналов управления – 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, устанавливает порог стартового канала, формирует тестовые импульсы для системы внутреннего самоконтроля. Выходной информацией модуля ВЦД является последовательность $\{Q(N)_n, t_n\}$. Модуль вычислителя производит обработку последовательности $\{Q(N)_n, t_n\}$, формируя выходную последовательность координат и времен прихода фотонов $\{X_n, Y_n, t_n\}$, используя при этом специальные алгоритмы преобразования.

Частотные методы обработки фотонной информации

Анализ выходной информации монофотонного датчика при регистрации излучения от коронного и частичного разрядов, возникающих на элементах электроустановок высокого напряжения переменного тока, заслуживает особого внимания. Используя оригинальный метод анализа фотонной информации, основанный на регистрации отдельных фотонов координатно-чувствительным детектором с определением времени прихода фотонов, можно не только определить координаты места излучения, но и извлечь из получаемой информации факт появления в коронном разряде частичных разрядов, которые и являются основным критерием оценки качества изоляции [4]. На выходе монофотонного прибора формируется информация о координатах X, Y и времени прихода t каждого зарегистрированного фотона. Так как монофотонный датчик регистрирует координаты излучения коронного разряда, то полученный массив информации может быть фильтрован путем задания углового окна наблюдения ($\Delta X, \Delta Y$), отбросив, тем самым, посторонние источники излучения. Для последующего анализа методами преобразования Фурье (ПФ) и вейвлет-преобразования (ВП) будет использоваться только информация о времени прихода фотонов $\{t_n\}$. Временная последовательность $\{t_n\}$ должна быть квантована, т.е. представлена в виде временного распределения числа фотонов. В результате квантизации образуется последовательность $\{s_n\} = \{s(nT)\}$, где n - номер временного отсчета от начального момента времени, T – шаг временного распределения (период дискретизации сигнала $\{s_n\}$). Элемент s_n последовательности $\{s_n\}$ - это количество фотонов, пришедших за время $[n(T-1); nT]$.

Коронный разряд, возникающий на электроустановках переменного тока, является периодическим процессом. В случае сети переменного тока с частотой 50 Гц разряд возникает на полуволнах высокого напряжения и, таким образом, в спектре сигнала есть удвоенная частота колебаний электросети 100 Гц. Частичные разряды – импульсы большой мощности, протекают на более высокой частоте (от 300 Гц). Именно возможность регистрации появления ЧР и определение их интенсивности и является уникальной особенностью разработанного сенсора и метода обработки получаемой амплитудно-временной информации. Для спектрального представления последовательности $\{s_n\}$ в данной работе применяются: преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Более подробную информацию об этих преобразованиях можно найти в работах [6-8].

Из выходного сигнала $\{s_n\}$ при использовании дискретного преобразования Фурье может быть получен спектр выходного сигнала (1).

$$\{S_k\} = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-\frac{2\pi j}{N} k n} \quad (1)$$

где N – число отсчетов временной последовательности
 $n = 0, 1, 2 \dots N-1$, - временные отсчеты
 $k = 0, 1, 2 \dots N-1$, - отсчеты по частоте

Последовательность $\{S_k\}$ содержит полезную информацию о гармонических составляющих $\{s_n\}$, и в первую очередь о частоте переменного тока электросети. 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, а с другой стороны позволяет контролировать отклонение частоты электросети от заданных норм [3].

Более мощным аналитическим аппаратом по сравнению с преобразованием Фурье является вейвлет-преобразование, появившееся в 80-х года прошлого столетия [7,8]. Это преобразование изначально использовалось в сейсмологии, затем его стали использовать в медицине и в других областях. Кроме этого, вейвлет-преобразование активно используется для анализа и сжатия изображений и для передачи информации. В отличие от преобразования Фурье, базисная функция которого жестко задана, вейвлет-преобразование может иметь различные базисные функции, или так называемые материнские вейвлеты. В настоящее время известно более двадцати типов вейвлетов, например, вейвлет Хаара, «Мексиканская шляпа», вейвлеты Добеши и др., каждый из которых может быть использован в зависимости от поставленной задачи.

В данной работе для анализа фотонной информации от коронных разрядов используется вейвлет Морле, имеющий вид (2)

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

где k_0 - параметр центральной частоты

α - параметр ширины спектра

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

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

Вейвлет-спектр $W_s(a, b)$ в отличие от Фурье-спектра является функцией двух аргументов: первый аргумент a (временной масштаб) аналогичен периоду осцилляций, т.е. обратно пропорционален частоте, а второй аргумент b – аналогичен смещению сигнала по оси времени.

Способы представления спектра $W_s(a, b)$ могут быть различными. $W_s(a, b)$ является поверхностью в трехмерном пространстве. В большинстве случаев вместо трехмерного изображения приводится его проекция изоуровней на плоскость (a, b) , или так называемая спектрограмма. На рис. 5 приведена полученная экспериментально вейвлет-спектрограмма для случая коронного разряда, в котором присутствуют частичные разряды. Из этого рисунка видно, что значению $a \approx 50$ соответствует подмножество вейвлетов $\psi_b(t)$, спектр которых согласно (4) имеет максимум на частоте $f \approx 100$ Гц. На этой горизонтали виден набор всплесков, обусловленных колебаниями мгновенной мощности электросети. Значению $a \approx 5$ соответствуют вейвлеты на частоте $f \approx 1$ кГц, при котором наблюдаются всплески, связанные с появлением ЧР.

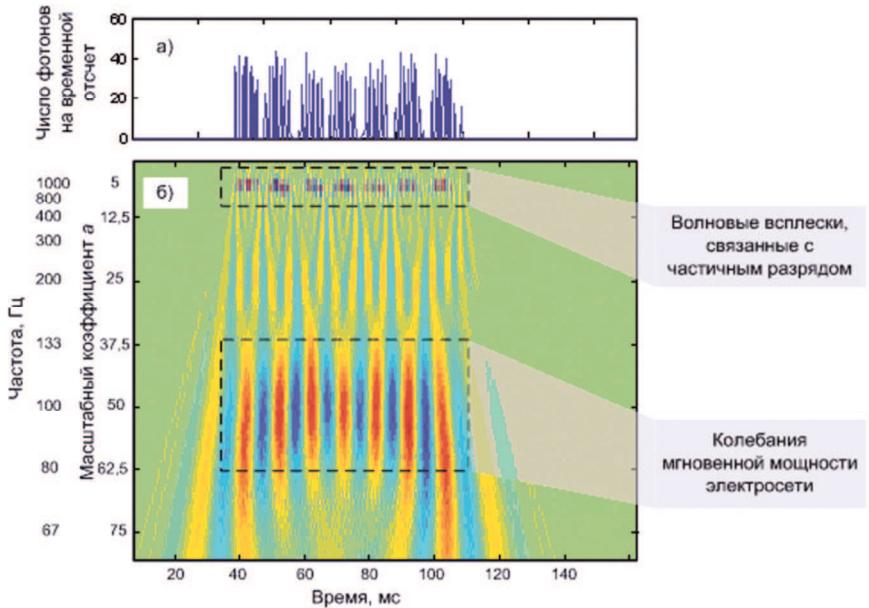


Рис. 5. Спектрограмма частичного разряда, полученного в лаборатории на стенде

Вейвлет-преобразование с возможностью локализовать гармонические всплески является, по сути, уникальным методом, так как оно в данном случае позволяет выделять из время-амплитудных измерений частичные разряды, наличие которых в первую очередь является признаком предаварийного состояния электроустановок. Как видно из рис. 5, вейвлет-спектрограмма довольно наглядно показывает наличие ЧР. При использовании численных алгоритмов реализации ВП стало возможным создание законченного прибора наподобие спектроанализатора со встроенным монитором, отображающим в реальном времени спектрограмму разряда, находящегося в поле зрения объектива. Данный прибор позволяет делать качественные выводы о наличии ЧР, оценивать количественно напряжения его появления и исчезновения и, тем самым, определять состояние исследуемых элементов высоковольтных установок.

Отметим, что с помощью разработанной методики фактически возможно проведение дистанционной диагностики состояния элементов высоковольтных установок (и, в частности, высоковольтных линий электропередачи (ЛЭП)) с получением характеристик соответствующим характеристикам измеряемым при контактной диагностики ЛЭП в соответствие с нормативными документами [3]. Анализ частотных характеристик УФ-С излучения коронного разряда и частичного разряда позволяет сделать не только качественные выводы, но и провести некоторые количественные оценки степени повреждения исследуемых элементов электроустановок.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям.

Литература

- 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, 2010. №1. С.47-50.
- IEC 60270-3. Методы высоковольтных испытаний. Испытание частичных разрядов. – М.: Международная электротехническая комиссия, 2000. – 55 с.: ил.

3. 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 №907 ИПМех РАН, 2009.
4. Рыжков Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для ВУЗов // М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 488 с.
5. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования - // Новосибирск.: Наука, 2007. 155 с.
6. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. // СПб.: Питер, 2006. 572 с.
7. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.
8. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. // СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2001. 58 с.

The remote monitoring of industrial UV-emission sources by means of monophotonic sensor

A. Belov ¹, V. Egorov ², A. Kalinin ³, I. Krysuk ¹, I. Rodionov ⁴,

¹ *Research & Development Center "Reagent"*

125190 Moscow, 14 Baltiyanskaya str/

E-mail: abelov@reagent-rdc.ru;

² *Space Research Institute PAS,*

117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya str.

³ *A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS*

119526 Moscow, 101 Vernadskogo prosp.

⁴ *N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS*

119991 Moscow, 4 Kosigina str.

The method of remote monitoring for industrial UF-emission have been proposed. It is based on the possibility of measuring by time position sensitive detector the intensity of registered photons vs time. Principle of operation and main domains of its using are described. The remote monitoring of coronal discharges on the high voltage electrical equipments as prime example has been considered. Emphasis has been attended to the consideration of time depended data processing by means of Fourier and wavelet transformations. Proposed method permits to get quantitative results on the state of high voltage equipments elements.

Keywords: Ultraviolet emission monophotonic sensor, corona and partial discharges, high voltage devices, wavelet transformation.