

К Р А Т К И Е С О О Б Щ Е Н И Я
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

**Классификация акустических сигналов разрядных процессов
в изоляции на основе формы их вейвлет-спектров**

А. И. Чуличков^a, Н. Д. Цыбульская, С. К. Цветаев, О. С. Сурконт

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра компьютерных методов физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^aach@cmp.phys.msu.ru*

Предложено описание результатов регистрации акустических сигналов, являющихся предвестниками пробоя изоляции высоковольтного энергетического оборудования. Описание инвариантно относительно временного сдвига и нелинейных монотонных амплитудных искажений. Проведена классификация сигналов, являющаяся основой автоматического контроля и мониторинга энергооборудования.

PACS: 02.50.Le, 02.30.Zz.

Ключевые слова: математическое моделирование, акустическая диагностика, анализ изображений, принятие оптимальных решений, вейвлет-анализ.

Статья поступила 08.09.2008, подписана в печать 26.12.2008.

Как известно [1], акустические сигналы, возникающие при разрядах в изоляции, несут информацию о состоянии высоковольтного оборудования и могут служить основой для предотвращения аварий. Существующие методы диагностики энергооборудования основаны на экспертных оценках. В работе предлагается метод автоматической классификации акустических сигналов на основе анализа формы вейвлет-спектра результатов регистрации акустических сигналов датчиками звукового давления.

Согласно терминологии специалистов по акустической диагностике электрооборудования [1], анализируемые сигналы разделяются на четыре класса: возникающие в результате «одиночных искровых разрядов» (класс V_1); «одиночных частичных электрических разрядов» (класс V_2); «многочисленных разрядов» (класс V_3); «виброударных механических процессов» (класс V_4). Первые три класса связаны с разной степенью опасности аварии, четвертый — с безаварийной ситуацией.

Пусть задан класс преобразований акустического сигнала, не выводящих результат из того класса, которому принадлежал сигнал, и известен инвариант этих преобразований. Тогда задачу классификации естественно решать в терминах этих инвариантов, поскольку они не содержат информации о различиях сигналов внутри классов. Эти инварианты называются формой сигнала. Успех классификации зависит от того, насколько различаются значения инвариантов на сигналах из разных классов.

Особенности акустических сигналов, позволяющие решать задачу классификации, заключены в локальных свойствах огибающей и спектра сигнала. Для характеристики локальных свойств сигналов было выбрано их представление в виде вейвлет-разложения Мейера [2]. Характерный вид сигналов и их вейвлет-спектров представлен на рис. 1.

Для анализа особенностей вейвлет-спектров сигналов из каждого класса на основе анализа тестовых сигналов была построена математическая модель вейвлет-спектра сигнала каждого класса.

Пусть $f(\omega, t)$ — модуль значения вейвлет-образа акустического сигнала в момент времени t на частоте ω . Следуя работам [3–5], будем называть пару (ω, t) точкой поля зрения $X = \{(\omega, t) : \omega \in (0, \Omega), t \in (0, T)\}$, а $f(\omega, t)$ — яркостью изображения f вейвлет-спектра сигнала в точке $x \equiv (\omega, t) \in X$.

Анализ яркостей характерных фрагментов изображения вейвлет-спектров сигналов позволяет заметить, что их можно приблизить кусочно-постоянными функциями

вида $f(x) = \sum_{j=1}^N c_j \chi_j(x)$. Здесь $\chi_j(x) = \begin{cases} 1, & x \in A_j, \\ 0, & x \notin A_j, \end{cases}$ —

индикаторная функция множества A_j поля зрения, во всех точках которого изображение $f(x)$ имеет одну и ту же яркость c_j , $j = 1, \dots, N$. Множества A_j , $j = 1, \dots, N$, не пересекаются и в сумме составляют выбранный фрагмент поля зрения. Яркости изображения $f(x)$ упорядочены согласно неравенствам $c_1 \leq \dots \leq c_N$. Классы V_1, V_2, V_3 отличаются числом и формой множеств A_j , $j = 1, \dots, N$: для классов V_1 и V_2 нами было выбрано значение $N = 3$, а для V_3 значение $N = 2$. Вид множеств постоянной яркости для классов V_1, V_2, V_3 приведен на рис. 2.

Изображения вейвлет-спектров сигналов из класса V_4 не имеют характерных ярко выраженных областей одинаковой яркости, поэтому в качестве их модели мы использовали изображения $f(x) = c = \text{const}$, $x \in X$.

Заметим, что выбор базисной функции Мейера обусловлен тем, что множества одинаковой яркости изображения вейвлет-спектров верифицированных тестовых сигналов, полученных в аварийных ситуациях (из классов V_i , $i = 1, 2, 3$), в наибольшей степени отличались друг от друга, а изображения спектров сигналов из класса V_4 были как можно ближе к константе.

Отождествим далее классы V_i , $i = 1, 2, 3, 4$, и множества характерных фрагментов изображений их вейвлет-спектров. Эти множества являются выпуклыми замкнутыми конусами в евклидовом пространстве всех изображений, заданных на поле зрения X ,

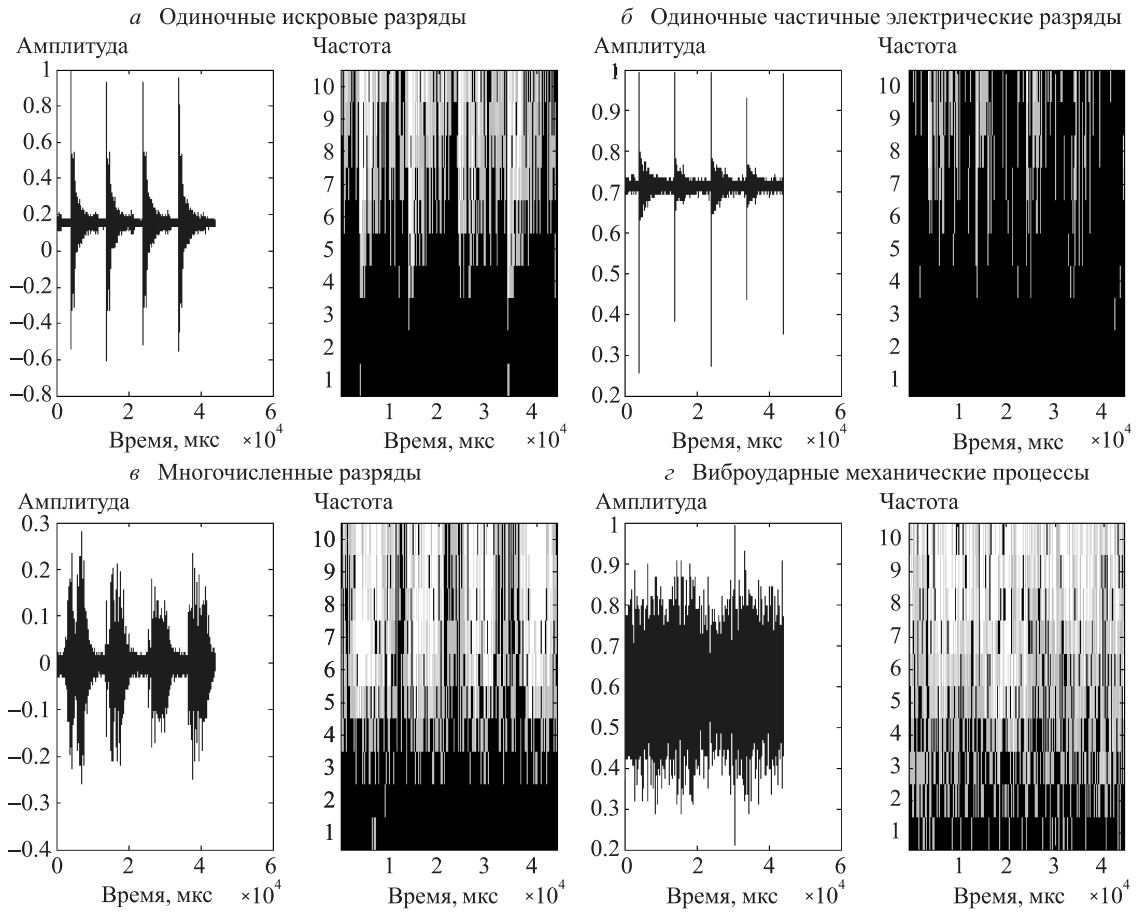


Рис. 1. Характерный вид сигналов и их вейвлет-спектров: *a* — класс V_1 , *б* — класс V_2 , *в* — класс V_3 , *г* — класс V_4

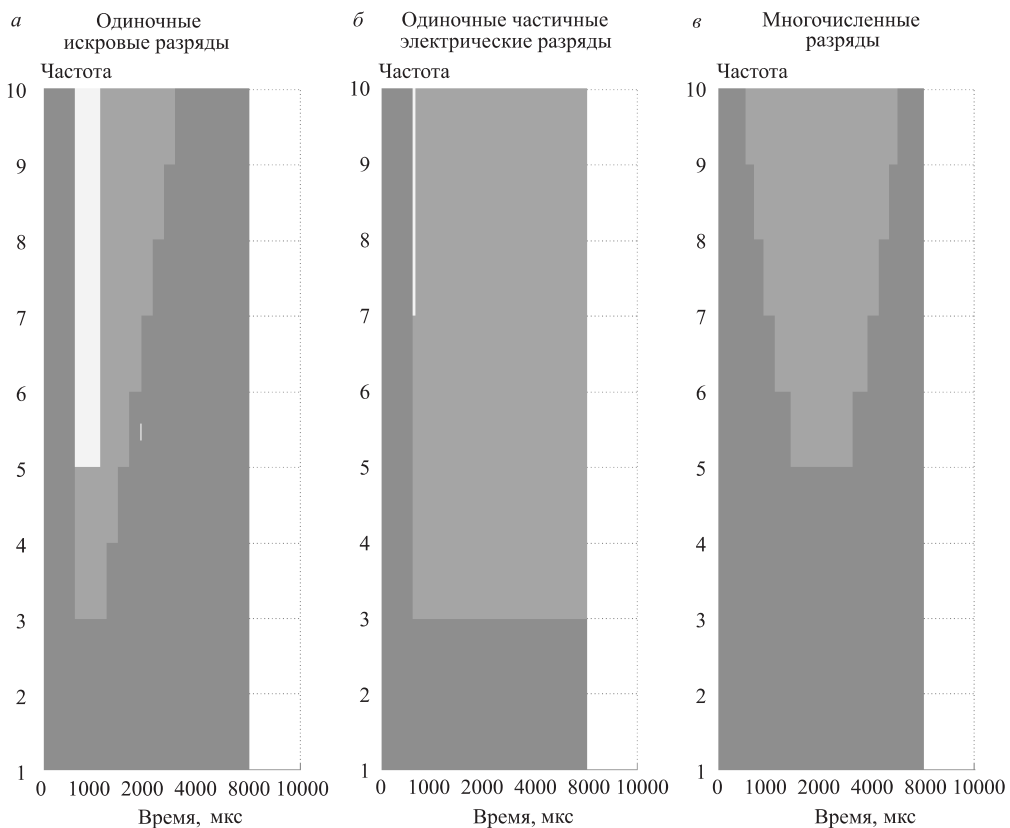


Рис. 2. Множества постоянной яркости фрагментов изображений вейвлет-спектров: *a* — класс V_1 , *б* — класс V_2 , *в* — класс V_3

$\|f\|^2 = \int_X f^2(x) dx$. Для каждого из конусов V_i , $i = 1, 2, 3$, определим проекцию $P_i g$ предъявленного фрагмента $g(x)$ выбранного изображения вейвлет-спектра на множество изображений V_i , $i = 1, 2, 3$, как решение задачи наилучшего приближения:

$$\|g - P_i g\|^2 = \min\{\|g - z\|^2 | z \in V_i\}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Для фрагментов изображений спектров из класса V_4 проекцию определим как решение задачи

$$\|g - P_0 g\|^2 = \min\{\|g - z\|^2 | z = \text{const}\}.$$

В качестве инвариантов произвольных монотонных преобразований яркостей характерных фрагментов изображений выберем функционалы

$$\tau_i(g) = \begin{cases} \frac{\|g - P_0 g\|^2}{\|g - P_i g\|^2}, & \|g - P_i g\|^2 \neq 0, \\ +\infty, & \|g - P_i g\|^2 = 0, \quad \|g - P_0 g\|^2 \neq 0, \\ 0, & \|g - P_i g\|^2 = 0, \quad \|g - P_0 g\|^2 = 0. \end{cases}$$

Действительно, если $g \in V_i$, $i = 1, 2, 3$, то $\tau_i(g) = +\infty$, а при $g = \text{const}$ имеем $\tau_i(g) = 0$. Значение функционалов $\tau_i(g)$ для $g \notin V_i$, $i = 1, 2, 3$, служит мерой

близости изображения g к классам V_i , $i = 1, 2, 3$: значение $\tau_i(g)$ тем больше, чем ближе форма изображения g к форме изображений из множества V_i по сравнению с формой изображения, равного константе. Таким образом, если значение $\tau_i(g)$ для всех $i = 1, 2, 3$ меньше порогового, то предъявленное изображение относится к классу V_4 , в противном случае — к классу с номером k , если $\tau_k(g) \geq \tau_i(g)$, $i = 1, 2, 3$.

Описанный здесь алгоритм не сделал ни одной ошибки на выборке из 28 верифицированных сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-07-00120-а).

Список литературы

1. Долин А.П., Ленякин А.В., Цветаев С.К. // Матер. VIII Симп. «Электротехника 2010». 24–26 мая 2005. Докл. 4.08.
2. Блаштер К.В. Вейвлет-анализ. Основы теории. М., 2004.
3. Пытьев Ю.П. // Докл. АН СССР. 1983. **269**. № 5. С. 1061.
4. Pyt'ev Yu.P. // Pattern Recognition and Image Analysis. 1993. **3**, N 1. P. 19.
5. Пытьев Ю.П. // Сб. «Математические методы анализа природных ресурсов Земли из Космоса». М., 1984.

Classification of discharge process's acoustical signals in isolation based on their wavelet spectrum shapes

A. I. Chuluchkov^a, N. D. Tsybul'skaya, S. K. Tsvetaev, O. S. Surkont

Department of Computer Methods in Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aach@cmp.phys.msu.ru.

Acoustic signals are considered as harbingers of breakdown of isolation of the high-voltage power equipment. The mathematical model of acoustic signals is offered. The modelling description does not depend on time shift of signals and on nonlinear monotonous peak distortions. Classification of signals is lead. It is a basis of the automatic control and monitoring of the power equipment

PACS: 02.50.Le, 02.30.Zz.

Keywords: mathematical modeling, acoustic diagnostics, images analysis, optimal decision making, wavelet analysis.

Received 8 September 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2009).

Сведения об авторах

1. Чуличков Алексей Иванович — д. ф.-м. н., профессор, профессор; тел.: 939-41-78, e-mail: ach@cmp.phys.msu.ru.
2. Цыбульская Надежда Дмитриевна — студентка; тел.: 939-41-78, e-mail: sandratsy@list.ru.
3. Цветаев Сергей Константинович — к. т. н., вед. научн. сотр.; e-mail: tsvetaev@ts-electro.ru.
4. Сурконт Олег Стефанович — мл. научн. сотр.; тел.: 939-41-78, e-mail: sur_oleg@mail.ru.