

УДК 621.315:621.314

Д. В. МАКСУДОВ, Е. М. ФЕДОСОВ**МЕТОДЫ СЕЛЕКЦИИ
СИГНАЛОВ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ
В ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Приводится анализ методов селекции сигналов частичных разрядов. Производится анализ формы импульса частичного разряда. Предлагается метод селекции импульсов частичных разрядов посредством вейвлет-анализа. Приводятся основные требования к базисной функции вейвлет-преобразования. *Диагностика оборудования ; силовые трансформаторы ; частичные разряды ; вейвлет-преобразование*

Надежность современного оборудования высокого напряжения во многом определяется надежностью его изоляции.

Оптимальным методом диагностики силовых трансформаторов с твердой изоляцией представляется неразрушающий метод диагностики изоляции по характеристикам частичных разрядов (ЧР). При этом возможно обеспечить контроль текущего состояния оборудования под рабочим напряжением.

Данный метод широко применяется при заводских и лабораторных испытаниях в России и многих зарубежных странах [1...3]. Тем не менее, при контроле действующего оборудования измерение ЧР пока применяется сравнительно редко. Это связано, прежде всего, с наличием разного рода помех, уровень которых на действующих объектах значительно выше, чем при стендовых испытаниях, а интенсивность помех зачастую превышает интенсивность измеряемых ЧР. Таким образом, главной задачей при измерении сигналов ЧР в условиях эксплуатации является отделение сигналов ЧР, возникающих в высоковольтной изоляции контролируемого оборудования, от внешних и внутренних помех различного происхождения (сигналы короны, ВЧ связи, различного рода коммутаций и т. д.).

**1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ
СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛОВ ЧР**

К основным методам, отделяющим сигналы ЧР от сигналов помех, можно отнести семь методов.

1. Частотный метод. Данный способ основан на правильном выборе частотного диапазона, в котором отношение сигнал/помеха является максимальным, т. е. регистрация не производится в полосах частот, характерных для сигналов помех.

Недостатком данного способа является то, что на различных контролируемых объектах возможны различные частотные спектры помех, что в общем случае при каждом измерении требует определения частотных характеристик помех, присутствующих на данном объекте.

2. Временная (фазовая) селекция. Способ основан на регистрации сигналов в определенные отрезки времени, синхронизированные с определенной фазой напряжения на объекте (метод временного окна). Увеличение отношения сигнал/помеха обеспечивается тем, что при измерениях исключаются интервалы с высоким уровнем помех. Очевидно, что данный метод эффективен только в случае, когда моменты возникновения ЧР и помех не совпадают. Например, в положительном полупериоде фазного напряжения сигналы короны на порядок больше, чем в отрицательном. Следовательно, только при измерениях в отрицательном полупериоде отношение сигнал/помеха будет на порядок большим.

Также данный способ эффективен при подавлении помех от тиристорных регуляторов возбуждения генераторов.

3. Анализ амплитудно-фазовых диаграмм (АФД). Сигналы ЧР, в отличие от сигналов короны, как правило, имеют практически симметричное распределение. Анализ АФД сигналов и их временных параметров позволяет отсеять

сигналы короны, имеющие характерную форму и легко распознаваемые по АФД. Сигналы от искровых разрядов в элементах магнитопровода тоже имеют весьма характерные АФД, которые позволяют идентифицировать дефекты такого типа. Метод АФД является мощным средством и позволяет также отличать сигналы ЧР от различных источников. Однако применение анализа АФД для силового трансформаторного оборудования затруднено, поскольку из-за искажений и затухания сигналов ЧР по мере его прохождения от точки возникновения к точке регистрации АФД одного и того же дефекта, но с различным местом положения, могут существенно различаться. Кроме того, на АФД трудно выделить нерегулярные сигналы ЧР, связанные с разрядами в магнитопроводе или в РПН.

4. Вычитание фона. Сигналы внешних помех, в общем случае, не отличаются от сигналов ЧР, так как их источником могут быть ЧР в окружающем оборудовании. Данный метод селекции основан на отдельном измерении сигналов при отсутствии напряжения на контролируемом объекте (измерение фона) и измерении суммы сигналов ЧР и внешних помех. Вычитание результатов этих измерений позволяет выделить только сигналы ЧР (сигнал минус фон). Недостатком данного метода является то, что интенсивность помех может изменяться во времени, однако, согласно опытным данным, метод позволяет в значительной степени снизить их влияние и выделить сигналы ЧР из сигналов внешних помех.

Подавить сигналы короны таким образом нельзя, так как она, так же как и ЧР, появляется только при подаче на объект напряжения. Поэтому отделение сигналов короны производится, как правило, методом анализа АФД и частотным методом.

Недостатком данного метода также является необходимость отключения оборудования.

5. Амплитудный способ. При данном способе селекции заключение о наличии ЧР делается при существенном (10–20 дБ) превышении уровня сигнала по сравнению с данными предыдущих измерений или с уровнями сигнала на аналогичных объектах [2]. Данный способ является наиболее простым и позволяет выявить интенсивные ЧР, однако обладает низкой чувствительностью.

6. Селекция с использованием различных датчиков. Способ основан на сравнении сигналов от различных датчиков, например электрического канала с сигналами акустического и электромагнитного каналов регистрации. Этот

способ наиболее часто применяется при исследованиях на практике [4, 5], так как обеспечивает достаточно четкую селекцию сигнала. Недостатками данного метода являются его высокая стоимость, поскольку требуется несколько каналов регистрации, и трудоемкость процесса (для четкой селекции требуется установить порядка 10 различных датчиков) [4].

7. Селекция по форме сигнала ЧР. Сигнал ЧР имеет характерную форму импульса напряжения [6, 7]. Сравнивая исходные формы – шаблоны импульсов ЧР – с полученным сигналом, можно регистрировать наличие ЧР. С помощью данного способа можно различать различные виды помех, корону, а также виды ЧР, размер и форму дефекта. Также при использовании селекции по форме сигнала ЧР возможно определить локализацию дефекта [6].

Однако такая селекция связана с применением сложных технических средств.

Таким образом, каждый из приведенных методов селекции обладает своими преимуществами и недостатками.

2. ФОРМА ИМПУЛЬСА ЧР

Наиболее перспективной представляется селекция по форме импульса ЧР с использованием программных средств, в частности, с использованием вейвлет-анализа.

Успешное решение этой задачи связано с выбором так называемого «материнского» вейвлета (mother wavelet) – базисной функции $\psi(t)$, наиболее полно описывающей форму импульса ЧР.

Согласно экспериментальным данным, импульс тока частичного разряда характеризуется временем нарастания порядка 10 нс и длительностью разряда порядка 100 нс. Также импульс тока ЧР характеризуется следующими параметрами: A – амплитуда, о.е., t_r – время нарастания тока от 0,1 А до 0,9 А, t_w – время спада тока до уровня 0,5 А, t_d – время снижения тока с уровня 0,9 А до 0,1 А.

При использовании схем регистрации ЧР вида RC- или RLC-цепи, на выходе получены два вида импульса напряжения, затухающий экспоненциальный и затухающий колебательный соответственно. Функции изменения напряжения получены из решения дифференциального уравнения второго порядка вида $a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$. Для экспоненциального вида зависимость напряжения от времени $U_c(t)$ будет иметь вид:

$$U_c(t) = A(e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t}) . \quad (1)$$

Для колебательного импульса:

$$U_o(t) = A \sin \omega t (e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t}), \quad (2)$$

где α_1, α_2 – корни дифференциального уравнения (коэффициенты затухания), зависящие от параметров импульса $t_d, t_r, t_w, \omega=2\pi f_p$, – частота колебательного импульса. Для измеренных импульсов получены следующие данные: $t_r = 5$ нс, $t_d=10$ нс, $t_w = 20$ нс, $f_p=20$ МГц.

В графическом виде эти зависимости представлены на рис. 1, а и рис. 1, б соответственно.

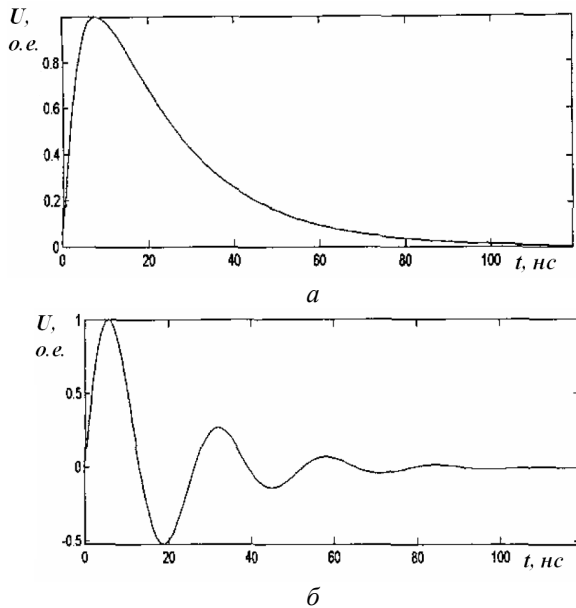


Рис. 1. а – затухающий экспоненциальный импульс ЧР, б – затухающий колебательный импульс ЧР

3. МЕТОД СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛА ЧР С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Предлагаемый метод селекции сигнала ЧР от помех заключается в следующем. Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) исходного сигнала $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ определяется выражением:

$$W_{\psi}^{f(s,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) d\tau ds, \quad (3)$$

$s, \tau \in \mathbb{R}, s \neq 0,$

где s – оператор масштаба («сжатия» базисной функции), τ – оператор сдвига по времени, под символом «*» понимается комплексное сопряжение.

Величина $W_{\psi}^{f(s,\tau)}$ представляет собой степень подобия между исследуемым участком функции $f(t)$ и сжатыми и сдвинутыми вейвлетами.

Вейвлет-функция каждого масштаба s умножается с сигналом и интегрируется на всем временном интервале. Если вейвлет совпадает с сигналом ЧР, т. е. в сигнале присутствуют спектральные компоненты, соответствующие текущему значению масштаба, то произведение вейвлета с сигналом на интервале, где данная компонента присутствует, даст относительно большое значение. В противном случае произведение будет иметь малое значение или равно 0. Зная ненулевые значения $W_{\psi}^{f(s,\tau)}$, т. е. значения базисных параметров s и τ , можно произвести реконструкцию исходного сигнала ЧР, используя обратное вейвлет-преобразование сигнала $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{c_{\psi}^2} \int_s \int_{\tau} W_{\psi}^{f(s,\tau)} \frac{1}{s^2} \psi \left(\frac{t-\tau}{s} \right) d\tau ds, \quad (4)$$

где c_{ψ} – константа, зависящая от используемого материнского вейвлета. Необходимым условием для возможности осуществить восстановление сигнала по его ВП путем обратного преобразования является ортонормальность базиса.

Исходя из полученных данных формы импульса ЧР (рис. 1), помимо условия ортонормальности базиса, для успешного анализа сигнала ЧР к вейвлетам установлены следующие требования: компактность, ограниченная продолжительность и асимметрия. Кроме того, для оценки опасности ЧР необходимо знать их частотные характеристики и фазовое распределение (время появления ЧР относительно фазы питающего напряжения).

Существуют три основных семейства вейвлетов. К первой группе относятся вейвлеты, использующие временную локализацию (вейвлеты Гаусса, Морле и др.). Второй тип вейвлетов (вейвлет Мейера) использует локализацию по частоте. При этом для первого типа вейвлетов характерна потеря информации о частотной составляющей сигнала, а при использовании второго типа вейвлетов не фиксируется локализация сигнала по времени. Третий тип вейвлетов определяется фильтрами, называемыми квадратурными зеркальными фильтрами (КЗФ). В данном случае под термином «фильтр» понимается некоторая функция, с помощью которой рассчитывается преобразование сигнала (как прямое, так и обратное) путем вычисления свертки сигнала в каждой его точке с этой функцией, называемой фильтром. Квадратурные зеркальные фильтры – фильтры с конечной импульсной характеристикой, частотная харак-

теристика которых симметрична относительно половины частоты дискретизации.

Установлено, что из всех вейвлетов, основанных на КЗФ (вейвлеты Добеши, Симлет, вейвлеты Лемарье и др.), для селекции сигналов ЧР оптимальными являются вейвлеты Добеши как наиболее отвечающие вышеперечисленным условиям, необходимым для анализа сигналов ЧР. При обработке данных о сигнале ЧР на ПК, для сокращения большого числа вычислений и большого объема памяти для хранения информации, требуемого при НВП, выполнено дискретное вейвлет-преобразование (ДВП).

При ДВП параметр масштаба s дискретизируется по логарифмической сетке, а параметр времени дискретизируется впоследствии в соответствии с параметром масштаба, т. е. на разных масштабах – разная частота дискретизации. Дискретные значения параметров s и τ предлагается задать в виде степенных функций $s = s_0^m$ и $\tau = ns_0^m$, где m, n – целые числа $\{-\infty, \infty\}$, $s_0 > 1$. Значение s_0 принято равным 2.

Непрерывная вейвлет-функция

$$\Psi_{s,\tau} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (5)$$

в дискретном представлении примет вид:

$$\Psi_{m,n} = s_0^{-m/2} \Psi(s_0^{-m} t - n). \quad (6)$$

Вейвлет-коэффициенты прямого преобразования:

$$\Psi_{\psi_{m,n}}^f = \int f(t) \Psi_{m,n}^* dt. \quad (7)$$

Обратное ДВП осуществляется по формуле:

$$f(t) = \sum_m \sum_n \Psi_{\psi_{m,n}}^f \Psi_{m,n}(t). \quad (8)$$

ДВП основывается на схеме фильтрации пары КЗФ. Для анализа сигнала на разных частотах использованы фильтры с различными частотами среза. Сигнал пропущен через древовидно соединенные высоко- и низкочастотные фильтры, как показано на рис. 2. При прохождении сигнала через пару фильтров, низкочастотный h и высокочастотный g , ДВП выделяет, соответственно, низкочастотную и высокочастотную составляющую сигнала. НЧ составляющая называется «аппроксимацией» сигнала, а ВЧ составляющая – «детальями». Выход НЧ фильтра подается на такую же схему обработки, выход ВЧ фильтра считается вейвлет-коэффициентами.

Сигнал является функцией дискретного времени, поэтому понятие «функция» заменено понятием «последовательность», обозначаемая как $x[n]$, $n \in I$. Фильтрация сигнала соответствует операции математической свертки сигнала и импульсной характеристики фильтра:

$$x[n] \cdot h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] \cdot h[n-k]. \quad (9)$$

Один уровень ДВП можно записать следующим образом:

$$y_g[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k-n], \quad (10)$$

$$y_h[k] = \sum_n x[n] \cdot h[2k-n],$$

где $y_g[k]$ и $y_h[k]$ – прореженные в 2 раза выходы ВЧ и НЧ фильтров соответственно. Важным свойством КЗФ, используемых при ДВП, является взаимосвязь между импульсными характеристиками ВЧ и НЧ фильтров:

$$g[L-1-n] = (-1)^n \cdot h[n], \quad (11)$$

где L – длина фильтра (число точек). Операции фильтрации и прореживания могут быть записаны как:

$$y_g[k] = \sum_n x[n] \cdot g[-n+2k], \quad (12)$$

$$y_h[k] = \sum_n x[n] \cdot h[-n+2k].$$

Алгоритм синтеза сигнала аналогичен алгоритму анализа, фильтры анализа и синтеза идентичны, за исключением обратного порядка следования коэффициентов. Поэтому формула реконструкции для каждого уровня ОДВП:

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (y_g[k] \cdot g[-n+2k]) + (y_h[k] \cdot h[-n+2k]). \quad (13)$$

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ ПОМЕХ

Для оценки степени соответствия выбранного вейвлета каждого масштаба для сигнала ЧР определены коэффициенты корреляции γ . В таблице приведены вычисленные коэффициенты корреляции между экспоненциальными и колебательными импульсами ЧР и вейвлетами Добеши, с масштабами от 2 до 20, обозначенных как db2, db3 и т.д.

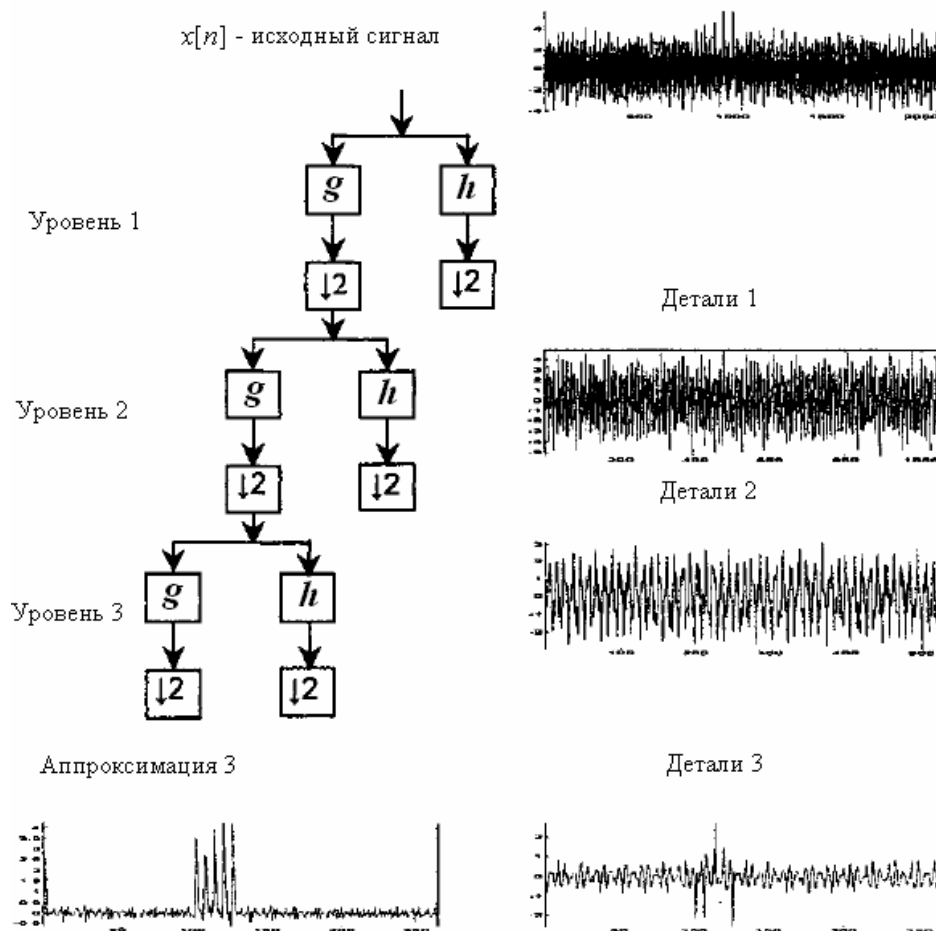


Рис. 2. Структура трехуровневой декомпозиции сигнала посредством ДВП

Значения коэффициентов корреляции γ

Степень вейвлета	Экспоненциальный импульс	Колесательный импульс
db2	0,5272	0,2410
db3	0,4557	0,2042
db4	0,3761	0,3281
db5	0,2213	0,3526
db6	0,1443	0,7747
db7	0,0234	0,7841
db8	0,0447	0,7257
db9	0,0632	0,6590
db10	0,0151	0,5607
db11	0,0196	0,5894
db12	0,0633	0,6108
db13	0,0708	0,6055
db14	0,0622	0,6075
db15	0,0516	0,6057
db16	0,0231	0,5949
db17	0,0212	0,5755
db18	0,0418	0,5648
db19	0,0527	0,5517
db20	0,0484	0,5351

Из анализа полученных данных следует, что для экспоненциального импульса наиболее соответствующими являются вейвлеты db2, а для колебательного импульса – вейвлеты db6 – db9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода диагностики изоляции по характеристикам частичных разрядов в условиях эксплуатации связано с проблемой селекции сигналов ЧР и сигналов помех. В результате анализа существующих методов селекции установлено, что наиболее оптимальным способом является селекция по форме импульса ЧР с помощью дискретного вейвлет-преобразования. Приведены математические модели импульсов ЧР. Приведена математическая модель фильтрации исходного сигнала. Исследованы характеристики единичного импульса ЧР, на основе которых сформулированы требования к базисной функции вейвлет-преобразования. Установлено, что выдвигаемым требованиям наиболее

полно удовлетворяют вейвлеты Добеши, что подтверждается расчетами. Применение обратного вейвлет-преобразования позволит установить исходную форму импульса ЧР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 20074-83.** Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов. М. : Изд-во стандартов, 1983.
2. **Сви, П. М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. М.: Энергоатомиздат, 1992. 128 с.
3. **Кучинский, Г. С.** Изоляция установок высокого напряжения / Г. С. Кучинский. М. : Энергоатомиздат, 1987. 367 с.
4. **Беляевский, О. А.** Система контроля изоляции по характеристикам частичных разрядов СКИ-3 / О. А. Беляевский, Р. М. Идиатулло, А. Ф. Курбатова // Сб. материалов семинара, 19-23 апреля 2004 г. в г. Санкт-Петербург. СПб. : ПЭИпк, 2005. С. 123–128.
5. **Claude, K.** On line monitoring of bushings on large power transformers / K. Claude, A. Golu-bev // Proc. Volume Issue: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. P. 54–60. [Электронный ресурс] (<http://ieeexplore.ieee.org>).
6. **Mohammad, S. N.** Application of wavelet analysis to the determination of partial discharge location in multiple- α transformer windings. / S. N. Mohammad, T. R. Blackburn, B. T. Phung, S. Naderi Mehdi, A. Nasiri // Electric Power Systems Research. 2008. Vol. 78, Issue 2. P. 202–208. [Электронный ресурс] (<http://www.sciencedirect.com>).
7. **Ma, X.** Interpretation of Wavelet Analysis and Its Application in Partial Discharge Detection / X. Ma, C. Zhou, I. J. Kemp // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. Vol. 7, Issue 6. P. 535–546. [Электронный ресурс] (<http://ieeexplore.ieee.org>)

ОБ АВТОРАХ



Максудов Денис Вильевич, доц. каф. электромеханики УГАТУ. Дипл. спец. в области физики (БГУ, 1999). Канд. техн. наук по электротехн. комплексам и системам (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. взаим. эл. полей и диэлектриков.



Федосов Евгений Михайлович, асп. той же кафедры. Дипл. инж. по спец. эл. энерг. системы и сети (УГАТУ, 2005). Готовит дис. в обл. диагностики силовых трансформаторов.