

УДК 621.315.3: 621.316.99

М.Н. Дубяго, Н.К. Полуянович

**МЕТОД СЕЛЕКЦИИ СИГНАЛА ЧР С ПОМОЩЬЮ
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Работа посвящена прогнозированию остаточного ресурса изоляции силовых кабельных линий, основанном на электрическом методе измерения частичных разрядов ЧР. Ставится задача выделения полезных сигналов (ЧР) среди помех различного происхождения. Для решения задачи предлагается использовать метод вейвлет-преобразования. Приведены математические модели импульсов ЧР. Приведена математическая модель фильтрации исходного сигнала. В работе выдвинуты некоторые требования к реализации вейвлет-преобразования. Установлено, что выдвигаемым требованиям наиболее полно удовлетворяют вейвлеты Добеши, что подтверждается расчетами.

Частичные разряды; диагностика; силовые кабельные линии; дискретное вейвлет-преобразование.

M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich

**SIGNAL FREQUENCY DISCHARGES SELECTION METHOD USING
WAVELET TRANSFORM**

The paper is devoted to forecasting of a residual resource of isolation of the power cable lines, based on an electrical method of measurement of partial discharge PD. The posed problem is to pick out useful signals (PD) among different types of noises. To solve the problem wavelet transform method is introduced. Mathematical models of PD impulses are given. Mathematical model of original signal filtering is given. The paper advances some requirements for the wavelet transform implementation. There was determined that Daubechies wavelet fully meets those requirements. This is proved by computing results.

Partial discharge; diagnostics; power cable lines; discrete wavelet transform.

Отсутствие алгоритма методики измерения собственно сигналов ЧР на фоне промышленных помех до сих пор не позволяет создать эффективные автоматические системы измерения ЧР в режиме мониторинга под рабочим напряжением и обеспечить тем самым надлежащий контроль технического состояния оборудования. Особая роль отводится методу регистрации ЧР, как наиболее эффективному в выявлении локальных дефектов. Сложность методики измерения ЧР заключается в трудности выделения полезных сигналов (в данном случае сигналов ЧР) среди помех разнообразного вида.

Диагностика изоляции СКЛ неразрушающим методом диагностики по характеристикам ЧР затруднительна, что связано с наличием разного рода помех, уровень которых на действующих объектах значительно выше, чем при стендовых испытаниях, а интенсивность помех зачастую превышает интенсивность измеряемых ЧР. Поэтому основной 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.).

Успешное решение задачи связано с выбором материнского вейвлета, базисной функции – $\psi(t)$, наиболее полно описывающей форму импульса ЧР. Импульс ЧР характеризуется временем нарастания порядка 10нс и длительностью разряда порядка 100 нс., A – амплитудой, о.е., t_r – время нарастания тока от 0,1 до 0,9 A , t_w – время спада тока до уровня 0,5 A , t_d – время снижения тока с уровня 0,9 A до 0,1 A .

При использовании схем регистрации ЧР вида RC- или RLC-цепи, на выходе получаем два импульса напряжения, затухающий экспоненциальный и затухающий колебательный соответственно рис. 1,а,б. Функции изменения напряжения получены из решения дифференциального уравнения второго порядка вида $a_1p^2+a_2p+a_3=0$. Для экспоненциального вида зависимость напряжения от времени $U_e(t)$ будет иметь вид

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

Для колебательного импульса:

$$U_0(t) = A \sin \omega t (e^{\alpha_1 t} + e^{\alpha_2 t}), \tag{2}$$

где α_1, α_2 – корни 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.

Для удаления шума при реконструкции сигнала используем функцию wrbtrepl с применением глобального порога THR, который описывается функцией wrbtrepl и получается по «штрафному» методу Бирге–Массарта [3]. Графики исходного и очищенного сигналов приведены на рис. 2.

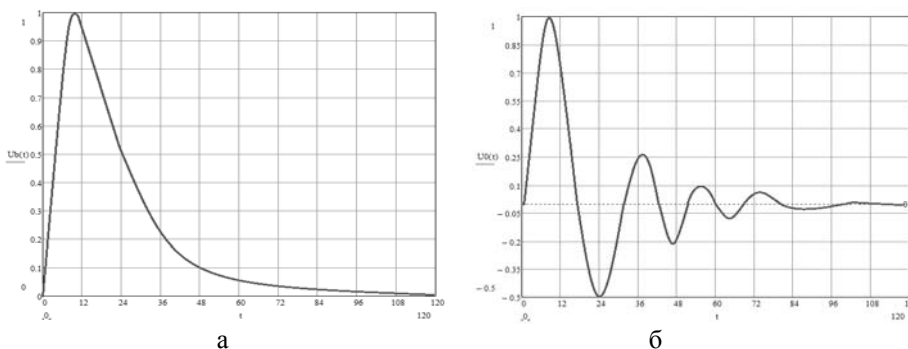


Рис. 1. Два импульса напряжения: а – затухающий экспоненциальный импульс ЧР; б – затухающий колебательный импульс ЧР

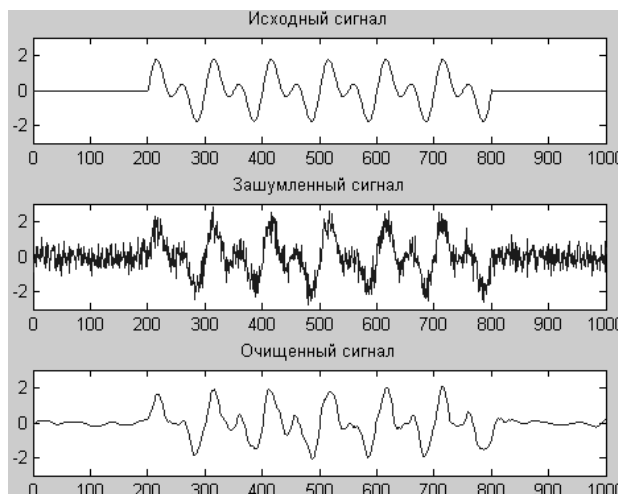


Рис. 2. Графики исходного и очищенного сигналов

Таблица 1

| Уровень декомпозиции, lev | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Значение шума после ВП, σ_y , В | 0,307 | 0,208 | 0,128 | 0,108 | 0,087 |
| Погрешность, $\Delta\psi$, град | -5,346 | -5,050 | -4,901 | -4,657 | -9,449 |
| Фазовый сдвиг, σ_ψ , град | 14,81 | 14,79 | 14,09 | 13,78 | 18,25 |

Вывод. Оптимальное значение $lev(lev_{opt} = 4)$, при котором отклонение $\Delta\psi$ и среднеквадратическая ошибка в измерении фазового сдвига эхосигнала минимальны. При $lev > lev_{opt}$ наряду с дальнейшим подавлением шума происходит искажение формы бигармонического импульсного сигнала, что приводит к росту $\Delta\psi$ и σ_ψ .

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

$$W_\psi^{f(s,\tau)} = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int f(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt ds, \quad s, \tau \in \mathbb{R}, s \neq 0, \quad (3)$$

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 $f(t)$:

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

где c_ψ – константа, зависящая от используемого материнского вейвлета. Условием для восстановления сигнала по его ВП путем обратного преобразования является ортонормальность базиса.

Исходя из полученных данных формы импульса ЧР (рис. 1,б), помимо условия ортонормальности базиса к вейвлетам установлены требования: компактность, ограниченная продолжительность и асимметрия. При ДВП параметр масштаба s дискретизируется по логарифмической сетке, а параметр времени дискретизируется 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:

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

Обратное ДВП осуществляется по формуле

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

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. 3,а. При прохождении сигнала через пару фильтров, низкочастотный h и высокочастотный g , ДВП выделяет 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 $x[n]$, $n \in \mathbb{I}$. Фильтрация сигнала соответствует операции математической свертки сигнала и импульсной характеристики фильтра:

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

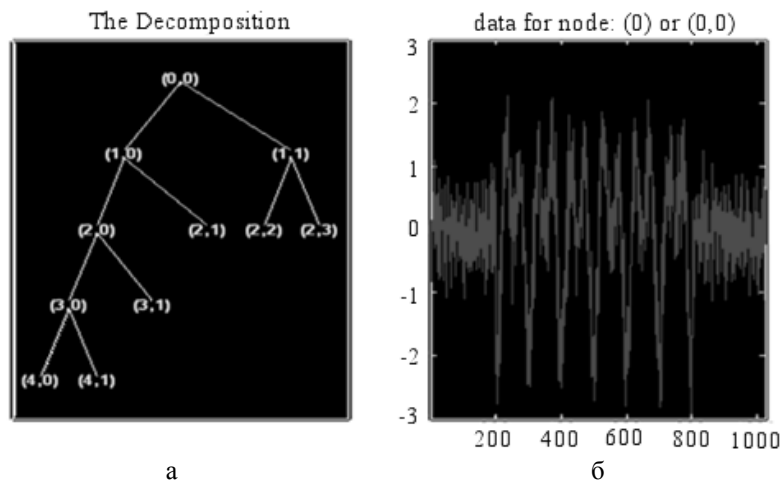


Рис. 3. Очистка от шума бигармонического сигнала: а – структура 4-уровневой декомпозиции сигнала посредством ДВП; б – исходный сигнал, временная зависимость в узле (0,0)

Один уровень ДВП можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} y_g[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k - n] \\ y_h[k] = \sum_n x[n] \cdot h[2k - n] \end{cases} \tag{10}$$

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:

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

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

$$\begin{aligned} y_g[k] &= \sum_n x[n] \cdot g[-n + 2k] \\ y_h[k] &= \sum_n x[n] \cdot h[-n + 2k] \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

Очевидна очистка аппроксимированного сигнала и его сжатие (соответственно в 4 и 16 раз). Для восстановления очищенного сигнала (в первоначальном масштабе) необходимо выполнить обратное ДВП, отсекая при этом высокочастотные компоненты, т.е. осуществляя пороговую обработку.

На рис. 4 представлена декомпозиция сигнала в узлах. Формы отфильтрованного (аппроксимированного) НЧ-сигнала (левые ветви) и подавляемой ВЧ составляющей (детали), где: а – НЧ составляющая 4-го уровня, б – ВЧ составляющая 4-го уровня.

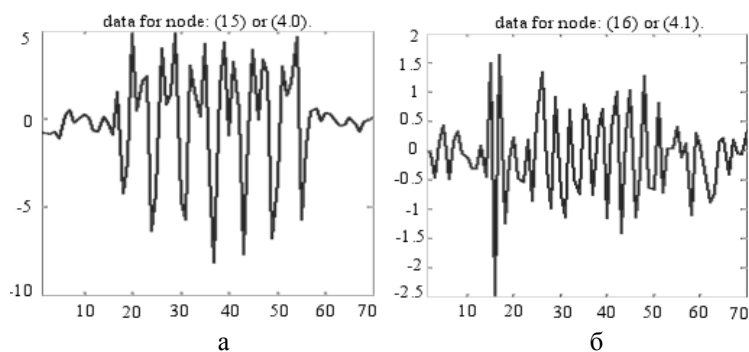


Рис. 4. Декомпозиция сигнала в узлах: а – НЧ составляющая 4-го уровня; б – ВЧ составляющая 4-го уровня

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
2. *Привалов И.Н.* Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно: Учебное пособие. – СПб., 2008.
3. *Яковлев А.Н.* Введение в вейвлет-преобразования: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
4. Патент РФ №112525, Автоматизированная система диагностики и контроля состояния изоляции силовых кабельных линий / Полуянович Н.К., Стульнева А.В., Дубяго М.Н. Оpubл. 10.01.2012 БИ №1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Лаврентьев.

Дубяго Марина Николаевна – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: w_m88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89508519304; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Полуянович Николай Константинович – e-mail: nik1-58@mail.ru; тел.: 88634610421, 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

Dubyago Marina Nikolaevna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508519304; the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – e-mail: nik1-58@mail.ru; phones: +78634610421, +79185693365; the department of electrical engineering and mechatronics; associate professor.

УДК 625.14:681.3.06

А.И. Долгий, М.М. Железнов

НЕЧЕТКО ВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ ПУТИ

Предлагается гибридный подход к построению интеллектуальных диагностических моделей для интегрированных систем диагностики железнодорожного пути (ИСДП), которые основаны на объединении нескольких типов диагностических моделей, оперирующих структурно временной диагностической информацией. Указанный подход базируется на модели представления нечетких темпоральных образов временных рядов в виде многоуровневой иерархической системы, каждый уровень которой отражает определенные темпорально логические концепты знаний, и позволяет организовать извлечение «неявных» знаний из баз данных. Использование такого метода построения может способствовать повышению объективности продукционного вывода ИСДП за счет выявления неточностей, ошибок и «пробелов» в оценке текущего состояния эксплуатируемого участка пути.

Нечетко-временная модель; диагностика; зондирование; сканирование; интегрированные системы; иерархическая система.

A.I. Dolgy, M.M. Zheleznov

FUZZY TEMPORAL MODEL OF INFORMATION REPRESENTATION IN INTEGRATED SYSTEMS OF THE RAILWAY BED DIAGNOSTICS

The paper proposes a hybrid construction method of intelligent diagnostic models for integrated systems of the railway bed diagnostics (ISRBD) based on combining several types of diagnostic models that operate on structurally-time diagnostic information. This method is based on a representation model of fuzzy temporal patterns of time series in the form of a multilevel hierarchical system in which each level represents some temporal-logical concepts of knowledge and allows organizing the extraction of "implicit" knowledge from databases. Using this method of construction we can improve the objectivity of production output ISRBD, due to inaccuracies, errors, and "gaps" detection in assessment of the current state of the exploited section of the railway bed.

Fuzzy temporal model; diagnostics; probing; scanning; integrated systems; hierarchical system.

Комплексный контроль и диагностика состояния железнодорожного пути включает в себя в качестве обязательных компонент системы диагностики элементов верхнего и нижнего строения пути, а также прилегающих потенциально-