УДК 51-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОСЕЧЕК НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

[1]Горева Т.С., [2]Кузнецов С.Е., [3]Портнягин Н.Н.

[1]Дальневосточный государственный технический университет им. Куйбышева, Петропавловск-Камчатский;

[2]Государственная морская академия им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург;

[3]Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru

Рассмотрены вопросы обоснования применения методов цифровой обработки сигналов при решении задач активной фильтрации помех различной природы, возникающих в системах электроснабжения. На основе вейвлет-преобразования в данной работе предложены методы обработки и анализа формы питающих электрических напряжений, которые базируются на следующих операциях: выбор «наилучшего» аппроксимирующего базиса; идентификация структурных компонентов сигнала; локализация особенностей. Предложенный метод позволяет выделять изолированные особенности в структуре сложного сигнала; классифицировать локальные особенности. Новизна предлагаемого решения состоит в обосновании целесообразности применения вейвлет-разложения с целью определения локальных особенностей в сигнале питающего напряжения.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, подавление импульсных помех, ортогональный базис

DESIGN OF PROCESS OF LOCALIZATION OF HINDRANCES OF TENSION ON THE BASIS OF WAVELET-TRANSFORMATIONS

[1]Goreva T.S., [2]Kuznetsov S.E., [3]Portnjagin N.N.

[1]Far East state technical university of Kuibyshev, Petropavlovsk-Kamchatka;

[2]The state sea academy of admiral S.O. Makarova, St.-Petersburg;

[3]The Kamchatka state technical university, Petropavlovsk-Kamchatka, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru

Questions of a substantiation of application of methods of digital processing of signals are considered at the decision of problems of an active filtration of hindrances of the various nature arising in systems of an electrical supply. On the basis of wavelet-transformation to the given work methods of processing and the analysis of the form of feeding electric pressure which are based on following operations are offered: a choice of the «best» approximating basis; identification of structural components of a signal; localization of features. The offered method allows: to allocate the isolated features in structure of a difficult signal; to classify local features. Novelty of the offered decision consists in a substantiation of expediency of application wavelet – decomposition for the purpose of definition of local features in a signal of feeding pressure.

Keywords: wavelet analysis, suppression of impulsive hindrances, ortogonal base

Современное состояние электроэнергетических систем характеризуется активным внедрением различного электронного оборудования [3, 5], применяемого в качестве нагрузок низковольтной электрической сети – компьютеры, телевизоры, электроплиты с питанием от ШИМ преобразователей и другое аналогичное оборудование. Современные электронные устройства различного назначения имеют, как правило, импульсные источники вторичного питания, характер воздействия которых, на синусоидальную форму питающих напряжений, недостаточно точно описывается обычным спектральным Фурье-анализом, который оперирует со спектрами сигналов, определенных единым образом для всего временного интервала анализа. Конечно, и в спектральной области Фурье наблюдаются паразитные гармонические составляющие, но в силу их широкополосности выделение каких-либо особенностей затруднено. Для выделения особенностей при импульсном характере нарушений (просечках) лучшие результаты в решении задач локализации нарушений формы синусоидальной кривой могут быть получены на основе вейвлет-преобразования, которое находит все большее применение в задачах цифровой обработки сигналов[1−3].

Данная работа посвящена решению задач, связанных с обработкой и анализом сложных сигналов, имеющих сложную внутреннюю структуру. Сигналы питающего напряжения содержат разномасштабные локальные особенности. Относительная величина и временная протяженность таких особенностей зависит от природы возмущения.

Естественным и наиболее эффективным способом представления таких сигналов является построение нелинейных адаптивных аппроксимирующих схем на основе экстраполирующих фильтров. Инструментом, позволяющим реализовать такую процедуру для сигналов с подобными особенностями, является вейвлет-преобразование [4]. На основе вейвлет-преобразования в данной работе предложены методы обработки и анализа формы питающих электрических напряжений, которые базируются на следующих операциях:

1) выбор «наилучшего» аппроксимирующего базиса;

2) идентификация структурных компонентов сигнала;

3) локализация особенностей.

Новизна предлагаемого решения состоит в обосновании целесообразности применения вейвлет-разложения с целью определения локальных особенностей в сигнале питающего напряжения. Используя основы современной теории обработки сигналов, выстроена цепочка рассуждений от задач моделирования до эффективных вычислительных решений. Предложенный метод позволяет:

1) выделять изолированные особенности в структуре сложного сигнала;

2) классифицировать локальные особенности;

3) предотвращать сбои работы персональных компьютеров в режиме реального времени при выполнении ими управления различными внешними приборами: коммуникационным оборудованием или технологическими процессами;

4) контролировать качество электрической энергии в точках общего присоединения потребителей к системам электроснабжения;

5) контролировать качество энергии (а в случае необходимости и компенсации возмущений) на тяговых подстанциях 6–35 кВ.

Представим сигнал в виде линейной комбинации разномасштабных компонент f_j с различной структурой:

$$f(t) = x_1 f_1(t) + x_2 f_2(t) + \ldots + x_r f_r(t). \quad (1)$$

Когда коэффициенты x_1, x_2, ..., x_r коррелируют между собой, вывод о том, какие аппроксимирующие функции использовать, сделать достаточно трудно, поэтому на функции f_j, $j = \overline{1,r}$ наложим выполнение условия ортогональности относительно величин t_i с весовыми коэффициентами

$$g_i = 1/\sigma_i^2,$$

где σ_i^2 – дисперсия i-го значения:

$$\sum_i g_i\, f_j(t_i)\, f_k(t_i) = \delta_{jk}.$$

Поскольку функции f_j имеют разную структуру, подверженную изменению в случайные моменты времени, наиболее эффективным способом их идентификации является применение методов аппроксимации, основанных на разложении функции по базису. Учитывая локальный характер анализируемых особенностей и их разномасштабность, наиболее подходящим пространством для их представления является пространство, натянутое на базис смещенных функций или вейвлет – базис.

Структура разложения $L^2(R)$, порождённая ортогональным вейвлетом $\Psi \in L^2(R)$, имеет вид:

$$L^2(R) = \sum_{j\in Z}^{\oplus} W_j := \ldots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \ldots, \quad (2)$$

где $W_j := clos_{L^2(R)}\left(\Psi_{j,n}; n \in Z\right)$.

Функция f при этом представляется в виде суммы компонент:

$$\begin{gathered}\forall f \in L^2(R) \exists!\, f(t) = \\ = \ldots + v_{-1}(t) + v_0(t) + v_1(t) + \ldots, \quad (3) \\ v_j \in W_j,\ j \in Z.\end{gathered}$$

Каждая компонента v_j из (3) имеет единственное представление в виде вейвлет-ряда:

$$v_j = \sum_{n\in Z} c_{j,n} \Psi_{j,n}(t),$$

где $\Psi_j = \left\{\Psi_{j,n}\right\}_{n\in Z}$ – ортонормированный базис пространства W_j. Коэффициенты $c_{j,n}$ определяются из соотношения

$$c_{j,n} = \left\langle f, \Psi_{j,n} \right\rangle.$$

Определим функции f_j как $f_j = \dfrac{v_j}{x_j}$, в силу соотношения (3) получаем представление сигнала в виде

$$f(t) = \ldots + x_{-1} f_{-1}(t) + x_0 f_0(t) + x_1 f_1(t) + \ldots$$

В силу ортогональности базиса Ψ (см. (2)):

$$\sum_i \frac{1}{\sigma_i^2} f_j(t_i)\, f_l(t_i) = 0, \text{ если } j \neq l.$$

Случайный сигнал y представляет зависимость

$$y(t) = f(t) + e(t),$$

где f – истинное значение измеряемой величины, – ошибки измерений.

Если e – белый шум, то его коэффициенты не коррелируют с одинаковой дисперсией:

$$E\left\{e_\Psi(t_n) e_\Psi(t_k)\right\} = \sum_l \sum_m \Psi_n(t_l) \Psi_k(t_m) E\left\{e(t_l) e(t_m)\right\} = \sigma^2 \delta(n-k). \text{ [7].}$$

Тогда компоненты случайного сигнала в пространстве вейвлет-образов имеют вид

$$y_j(t) = f_j(t) + e_j(t).$$

Для дискретного сигнала не нарушая общности? примем $j = 0$. В качестве базовой конструкции для построения отображения будем использовать конструкцию вейвлет-пакетов ВП, имеющую быстрые алгоритмы преобразования и позволяющую идентифицировать различные типы частотно-временных структур [6, 7]. Получим представление сигнала в виде:

$$y_0(t) = \sum_{j_i} (g_{j_i}(t) + e_{j_i}(t)) + f_{-m}(t), \quad (4)$$

где e_{j_i}, $g_{j_i} \in W_{j_i}$ – детализирующие компоненты сигнала; W_{j_i} – пространства вейвлет-пакета; $f_{-m} \in V_{-m}$ – аппроксимирующая компонента сигнала; $V_{-m} = \ldots \oplus W_{-m-2} \oplus W_{-m-1}$, $V_{-m} = clos_{L^2(R)}\left(\varphi\left(2^{-m}t - n\right)\right)$; φ – скэйлинг-функция.

Каждая компонента (4) единственным образом определяется последовательностями коэффициентов

$$\overline{d}^{j_i} = \left\{d_n^{j_i}\right\}_{n\in Z}, \ \overline{e}^{j_i} = \left\{e_n^{j_i}\right\}_{n\in Z}$$

и

$$\overline{c}^{-m} = \left\{c_n^{-m}\right\}_{n\in Z}, \ d_n^{j_i} = \left\langle f, \Psi_{j_i,n}\right\rangle,$$

$$e_n^{j_i} = \left\langle e, \Psi_{j_i,n}\right\rangle$$

и

$$c_n^{-m} = \left\langle f, \varphi_{-m,n}\right\rangle.$$

Подавление шумовых составляющих e_{j_i}, *и выделение локальных особенностей сигнала*. Имея представление сигнала в виде (4) подавление шума может быть реализовано на основе применения пороговой функции для каждой детализирующей компоненты

$$P_T(x) = \begin{cases} x, \text{ если } |x| \ge T \\ 0, \text{ если } |x| < T \end{cases}, \quad (5)$$

где T – порог.

В вейвлет базисе такая пороговая функция дает адаптированное сглаживание, которое усредняет данные x с ядром, зависящим от гладкости сигнала f [7].

Примем порог $T = \sigma^2$, где σ^2 – дисперсия шума. Следуя работе [7], дисперсию шума σ^2 оценим по медиане:

$$\sigma^2 \approx Med\left(\left\langle y, \Psi_{j,k}\right\rangle\right)_{0\le k<\frac{n}{2}},$$

где Med – медиана, j – наименьший масштаб, n – длина сигнала. В работах Donoho D. по минимаксным оценкам сигнала в смеси с шумом показано, что данный способ подавления шума позволяет получить почти оптимальные минимаксные оценки [7].

Выполнив процедуру (5), получим аппроксимирующую схему сигнала в виде:

$$y_0(t) = \sum_{j_i \in I_M} g_{j_i}(t) + f_{-m}(t),$$

где I_M – множество индексов, определяемое свойствами функции f, g_{j_i} – детализирующие составляющие сигнала, f_{-m} – аппроксимирующая компонента.

Погрешность аппроксимации есть:

$$\varepsilon[M] = \left\|f - f_{I_M}\right\|^2 = \sum_{j_i \notin I_M} \left|\left\langle f, \Psi_{j_i}\right\rangle\right|^2.$$

Из теоремы Жаффара [6] следует, что когда масштаб убывает, амплитуды вейвлет-коэффициентов имеют быстрое убывание до нуля в областях, где сигнал гладкий. Тогда операция выделения локальных особенностей функции f в виде пиков, перегибов и т.п. может быть основана на анализе детализирующих компонентов модели (4) путем определения наибольших значений $\left|d_n^{j_i}\right|$ на малых масштабах.

Выбор «наилучшего» базиса. «Наилучшим» базисом будем считать базис, погрешность аппроксимации в котором наименьшая. Выбор «наилучшего» базиса выполним путем реализации следующего *алгоритма*:

1) построение полного дерева разложения: $W_j^0 : W_j^0 = \oplus_{i=1}^{I} W_{j_i}^{p_i}$, $\left\{\Psi_{j_i}^{p_i}\left(2^{j_i}t - n\right)\right\}_{n\in Z}$ есть базис пространства $W_{j_i}^{p_i}$;

2) определение ветвей дерева путем минимизации погрешности аппроксимации: наилучший базис O_j^p пространства W_j^p есть базис

$$O_j^p = \begin{cases} \left\{\Psi_j^p\left(2^j t - n\right)\right\}_{n\in Z}, & \text{если } \sum_{n\in I_M^P} \left|\left\langle y, \Psi_{j,n}^p\right\rangle\right|^2 \ge \sum_{n\in I_M^{2P}} \left|\left\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p}\right\rangle\right|^2 + \sum_{n\in I_M^{2P+1}} \left|\left\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p+1}\right\rangle\right|^2 \\ \left\{\Psi_{j+1}^{2p}\right\}_{n\in Z} \cup \left\{\Psi_{j+1}^{2p+1}\right\}_{n\in Z}, & \text{если } \sum_{n\in I_M^P} \left|\left\langle y, \Psi_{j,n}^p\right\rangle\right|^2 < \sum_{n\in I_M^{2P}} \left|\left\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p}\right\rangle\right|^2 + \sum_{n\in I_M^{2P+1}} \left|\left\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p+1}\right\rangle\right|^2 \end{cases}$$

где множества индексов I_M^l, $l = P, 2P, 2P + 1$ определяются следующим образом: индекс $n \in I_M^l$, если $\left|\left\langle y, \Psi_{j,n}^l\right\rangle\right| \ge T$..

В процессе выполнения данного алгоритма будут подавлены шумовые составляющие сигнала и *идентифицированы его структурные компоненты*. Выполняя операции (1), (2) для различных видов базисных функций и определяя для каждой из таких функций погрешность в «наилучшем» базисе, мы определим *«наилучшую» вейвлет-функцию* для данного сигнала. Аппроксимирующую схему сигнала в этом базисе назовем *наилучшей аппроксимирующей схемой* для данного сигнала.

Для оценки эффективности предложенного метода проведены эксперименты по модельной генерации, обработке и анализу полученных модельных данных рис. 1–2.

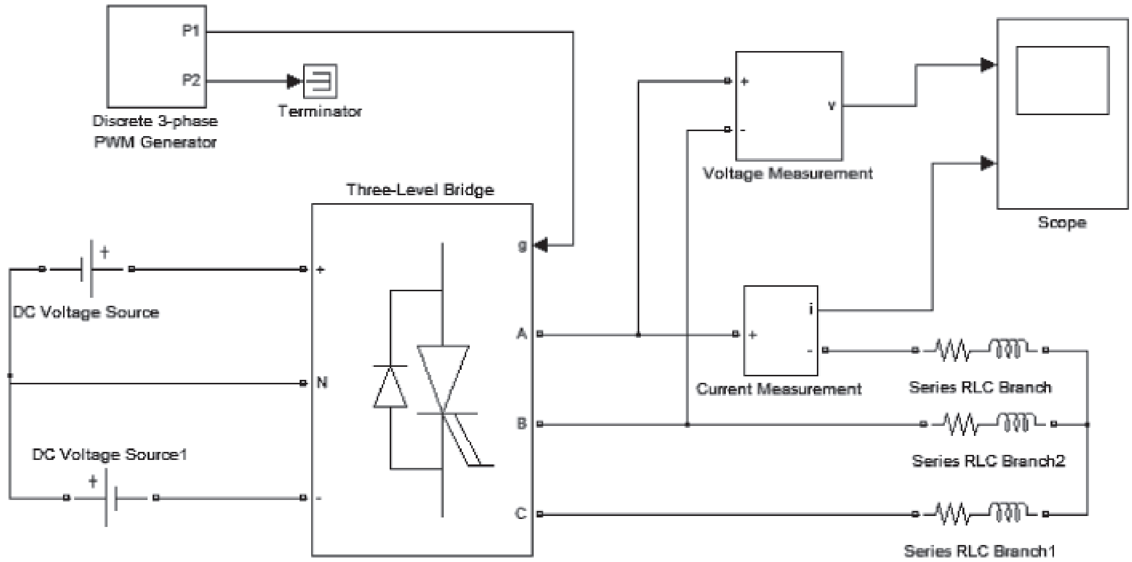

Рис. 1. Модель Simulink, на основе ШИМ-инвертора

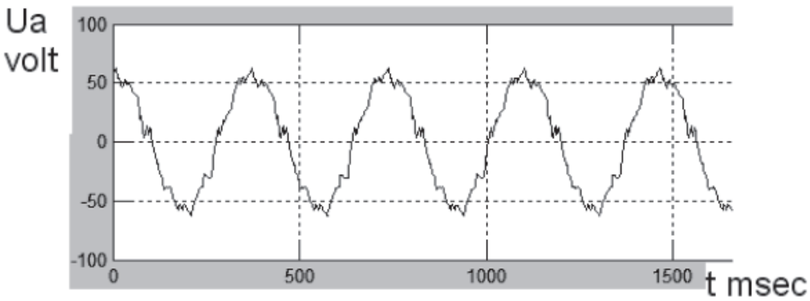

Рис. 2. Модельный сигнал с просечками

Локализация особенностей

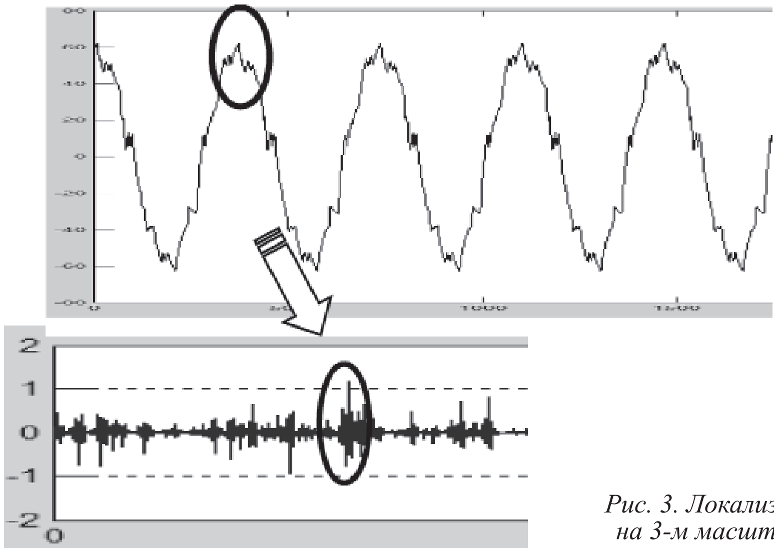

Рис. 3. Локализация просечки на 3-м масштабном уровне

Полученные результаты моделирования, представленные на рис. 3–5, свидетельствуют о возможности локализации просечек с помощью вейвлет-спектрограмм, в то время как спектрограммы Фурье не выделяют обозначенных в круговых областях особенностей просечек.

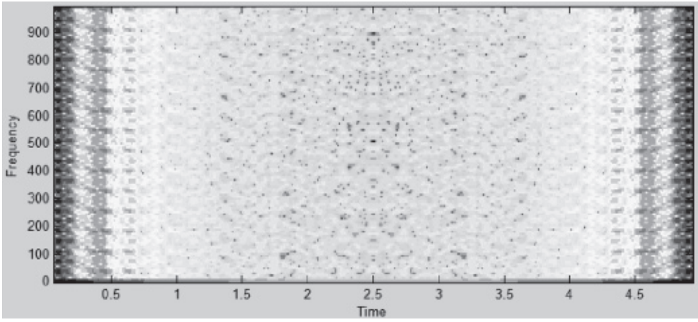

Рис. 4. Фурье спектрограмма сигнала, питающего напряжения с просечками

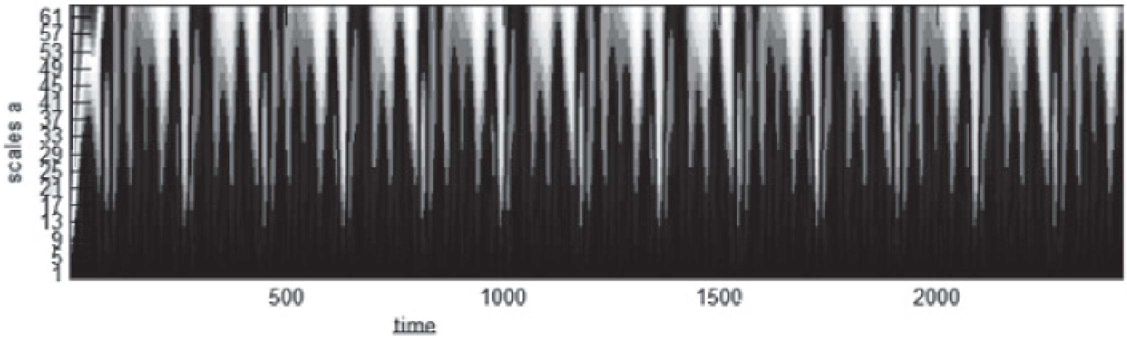

Рис. 5. Вейвлет-спектрограмма сигнала в масштабном уровне, оттенками серого цвета показаны абсолютные значения вейвлет-коэффициентов соответствующих масштабных уровней (значения масштабных уровней отмечены на вертикальной оси, горизонтальная ось – ось времени), более светлым оттенкам серого цвета соответствуют большие значения коэффициентов

Поэтому при построении систем активного подавления влияния просечек необходимо учитывать полученные модельные результаты, что очевидно приведет к усложнению структуры активных фильтров на алгоритмическом уровне, однако постоянно возрастающая производительность микропроцессорных систем позволяет надеяться на аппаратную реализацию методов вейвлет-преобразования.

Список литературы

1. Агунов А.В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах. – СПб.: СПбГМТУ, 2009.

2. Горева Т.С. Программный комплекс управления качественными показателями электроэнергии в распределительных сетях: свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16389. – М.: ИНИМ РАО, 2010.

3. Анализатор импульсных и флуктуационных помех случайного характера в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлет-базисе: Свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16624 / Кузнецов С.Е., Портнягин Н.Н., Горева Т.С., Горева Т.И. – М.: ИНИМ РАО, 2011.

4. Дремин И.М. Вейвлеты и их использование. – М.: Наука, 2000.

5. Техническая эксплуатация судового электрооборудования: учебно-справочное пособие / С.Е. Кузнецов, Л.А. Лемин, Ю.В. Кудрявцев, А.В. Пруссаков, Д.В. Исаков; под ред. С.Е. Кузнецова. – М.: Проспект, 2010. – 512 с.

6. Ingrid Daubechies, Ten Lectures on Wavelets: пер. с англ. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.

7. Stephane Mallat A Wavelet tour of signal processing: пер. с англ. – М.: Мир, 2005.

Рецензенты:

Потапов В.В., д.т.н., зав. лабораторией Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

Шулюпин А.Н., д.т.н., зам. директора по научной работе Научно-исследовательского геотехнологического центра ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

Лубенцов В.Ф., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные системы, электропривод и автоматика» Невинномысский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет», г. Невинномысск.

Работа поступила в редакцию 17.10.2011.