

*Кузнецов С.Е.<sup>1</sup>, Горева Т.С.<sup>2</sup>, Портнягин Н.Н.<sup>3</sup>*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ПОДАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ - АНАЛИЗА**

<sup>1</sup>Государственная морская академия им. адм. С.О. Макарова,

г. Санкт – Петербург, Россия

<sup>2</sup>Дальневосточный государственный технический университет им. Куйбышева

г. Петропавловск-Камчатский, Россия

<sup>3</sup>Камчатский государственный технический университет

г.Петропавловск – Камчатский, Россия

Применение электрооборудования на судах современного флота позволяет повысить эффективность работы различных систем и механизмов, способствует повышению производительности труда судовых экипажей, дает значительный экономический эффект, сокращает затраты энергии и материалов [5].

Наиболее распространенными являются устройства, содержащие аналоговые и цифровые компоненты, комбинационные схемы и элементы с памятью: они применяются практически во всех типах СЭ, где требуется реализовать специальные характеристики, обеспечить плавность и точность регулирования, повысить производительность и мощность судовых электроэнергетических систем [1,5].

Возросшие возможности мощной полупроводниковой техники, появление мощных JBT-транзисторов, способных управлять токами в сотни ампер и выдерживать напряжения до 1500 вольт, а также мощных тиристоров и семисторов, фотосемисторов и других силовых электронных приборов, используемых в разработках современных компаний, поставляющих аппаратуру для промышленных судов, делают актуальным рассмотрение вопросов электромагнитной совместимости [5].

Проблема повышения качества судовой электроэнергии и надежности

системы электропитания выдвигается на одно из первых мест.

В этой ситуации задачи подавления помех от мощного судового электронного оборудования выступают на передний план, так как выход из строя мощных полупроводниковых приборов во время ведения промысла может приводить к значительным экономическим потерям, а в случае выхода из строя систем управления ответственными энергетическими процессами к потере безопасности мореплавания.

Данная работа посвящена вопросам многомасштабного анализа дискретных сигналов. Термин «сигнал» применяется для обозначения любого упорядоченного набора численно зафиксированной информации о каком-либо процессе, объекте, функции и т.п. Под «анализом» сигнала имеется в виду не только его чисто математическое преобразование, но и получение на основе этого преобразования выводов о специфике соответствующего процесса или объекта [2].

Одним из методов многомасштабного анализа является вейвлет-анализ (от англ. «wave» – волна). Он используется уже более десятка лет и хорошо зарекомендовал себя в таких областях как архивация данных, медицина и биология (анализ интервалов сердцебиений, ЭКГ, последовательностей ДНК), анализ наблюдательных данных (метеорология, акустика, сейсмология). [3]

Принципиально новым методом многомасштабного анализа является структурная индексация. Её суть заключается в выявлении структурных особенностей сигналов для последующего анализа этих особенностей.

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. 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 предлагаемых решений 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.

Предложенные методы позволяют:

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:

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

Когда коэффициенты  $x_1, x_2, \dots, x_r$  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  $g_i = 1/s_i^2$ :

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

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.[7,8]

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

$$L^2(R) = \sum_{j \in Z}^{\oplus} W_j := \dots \oplus W_{-1} \oplus W_0 \oplus W_1 \oplus \dots, \text{ где } W_j := \text{clos}_{L^2(R)}(\Psi_{j,n}; n \in Z) \quad (2)$$

Функция  $f$  при этом представляется в виде суммы компонент:

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

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  $\Psi_j = \{\Psi_{j,n}\}_{n \in Z}$  – ортонормированный базис пространства  $W_j$ . Коэффициенты  $c_{j,n}$  определяются из соотношения:  $c_{j,n} = \langle f, \Psi_{j,n} \rangle$ .

Определим функции  $f_j$  как  $f_j = \frac{v_j}{x_j}$ , в силу соотношения (3) получаем представление сигнала в виде:  $f(t) = \dots + x_{-1}f_{-1}(t) + x_0f_0(t) + x_1f_1(t) + \dots$

В силу ортогональности базиса  $\Psi$ :  $\sum_i \frac{1}{S_i^2} f_j(t_i) f_l(t_i) = 0$ , если  $j \neq l$ .

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. Получим представление сигнала в виде:

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

где  $g_{j_i} \in W_{j_i}$  – детализирующие компоненты сигнала,  $W_{j_i}$  – пространства вейвлет-пакета,  $f_{-m} \in V_{-m}$  – аппроксимирующая компонента сигнала,  $V_{-m} = \dots \oplus W_{-m-2} \oplus W_{-m-1}$ ,  $V_{-m} = \text{clos}_{L^2(\mathbb{R})}(f(2^{-m}t - n))$ ,  $f$  – скэйлинг-функция.

Каждая компонента (4) единственным образом определяется последовательностями коэффициентов  $\bar{d}^{j_i} = \{d_n^{j_i}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  и  $\bar{c}^{-m} = \{c_n^{-m}\}_{n \in \mathbb{Z}}$ :  $d_n^{j_i} = \langle f, \Psi_{j_i, n} \rangle$  и  $c_n^{-m} = \langle f, f_{-m, n} \rangle$ .

При разложении некоторого узла ниже слева находятся аппроксимирующие коэффициенты, а справа – детализирующие коэффициенты. [4]

Пусть  $I_M^l$  – множество индексов  $M$  векторов  $b^l$ , которые максимизируют  $\langle f, q_m^l \rangle$ . Наилучшая нелинейная аппроксимация  $f$  в  $b^l$  есть  $f_M^l = \sum_{m \in I_M^l} \langle f, q_m^l \rangle q_m^l$ .

Погрешность аппроксимации есть:  $e^l[M] = \sum_{m \notin I_M^l} |\langle f, q_m^l \rangle|^2 = \|f\|^2 - \sum_{m \in I_M^l} |\langle f, q_m^l \rangle|^2$ .

Тогда базис  $b^a = \{q_m^a\}_{1 \leq m \leq N}$  лучше, чем базис  $b^g = \{q_m^g\}_{1 \leq m \leq N}$  при аппроксимации  $f$ , если при всех  $M \geq 1$ ,  $e^a[M] \leq e^g[M]$ .

Полученное условие лучшего базиса эквивалентно тому, что  $\forall M \geq 1$ ,  $\sum_{m \in I_M^a} |\langle f, q_m^a \rangle|^2 \geq \sum_{m \in I_M^g} |\langle f, q_m^g \rangle|^2$ .

При выборе базиса таким способом мы обеспечиваем выполнение основных критериев качества аппроксимации: минимизацию числа аппроксимирующих слагаемых и минимизацию погрешности аппроксимации. Аппроксимирующие векторы, выбранные из этого «наилучшего» базиса, наилучшим образом приспособлены для аппроксимации конкретного сигнала и описывают важные структуры сигнала, фильтруя шум. Модель сигнала в этом случае имеет вид:

$$\tilde{f}(t) = \sum_{-i \in I_M^a} \sum_k d_{-i, k} \Psi_{-i, k}(t) + \sum_l c_{-i, l} f_{-i, l}(t),$$

где  $c_{-i,l}$  – коэффициенты вейвлет-преобразования, соответствующие сглаженной составляющей сигнала,  $d_{-i,k}$  – детализирующие коэффициенты вейвлет-преобразования,  $\Psi_{-i,k}$  – вейвлет,  $f_{-i,k}$  – скэйлинг-функция.

Построение полного дерева разложения:  $W_j^0: W_j^0 = \bigoplus_{i=1}^j W_{j_i}^{p_i}$ ,  
 $\{\Psi_{j_i}^{p_i}(2^{j_i}t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$  есть базис пространства  $W_{j_i}^{p_i}$ .

Компоненты  $g_j$  в  $y_0(t) = \sum_i (g_i(t) + e_i(t)) + f_j(t)$  являются детализирующими и включают в себя приращения порядка  $2^{-j}$ : выбирая апостериори  $n$  векторов  $\Psi^{j,k}$ , зависящих от свойств функции  $f$ , мы получаем приближение сигнала  $n$  векторами, индексы которых принадлежат  $I_n: f_1(t) = \sum_{j,k \in I_n} d_{j,k} \Psi^{j,k}$ . Данная составляющая модели нацелена на выделение изолированных особенностей в сигнале в виде пиков, всплесков, перегибов и т.п. Поэтому естественно определить в качестве параметров этой составляющей коэффициенты  $\bar{d}^j = \{d_k^j\}$ , где  $j, k \in I_n$ , т.е.  $f_1(t) = \sum_j g_j(t) = \sum_{j,k \in I_n} d_k^j \Psi^{j,k}$ .

Сглаженная компонента модели единственным образом идентифицируется на основе коэффициентов вейвлет-преобразования  $\bar{c}^j = \{c_k^j\}_{k \in \mathbb{Z}}$ , где  $c_k^j = \langle f, f_k^j \rangle$ ,  $f$  – скэйлинг-функция. Коэффициенты  $\bar{c}^j = \{c_k^j\}_{k \in \mathbb{Z}}$  содержат устойчивые (более стационарные) характеристики структуры сигнала.

Для оценки эффективности предложенного метода проведены эксперименты по модельной генерации рис.1 – 2 [6], обработке и анализу полученных модельных данных рис.3 - 6:

- произведен выбор структуры наилучшего дерева рис.3;
- произведено компонентное восстановление сигнала рис.4;
- произведен выбор наиболее информативной компоненты восстановления сигнала после вейвлет – обработки рис.5;
- произведен анализ спектрограммы сигнала рис.6.[2]

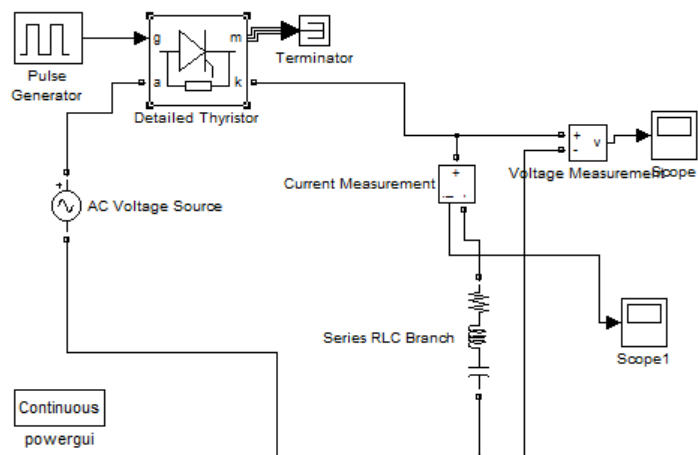


Рис.1. Модель в Simulink.

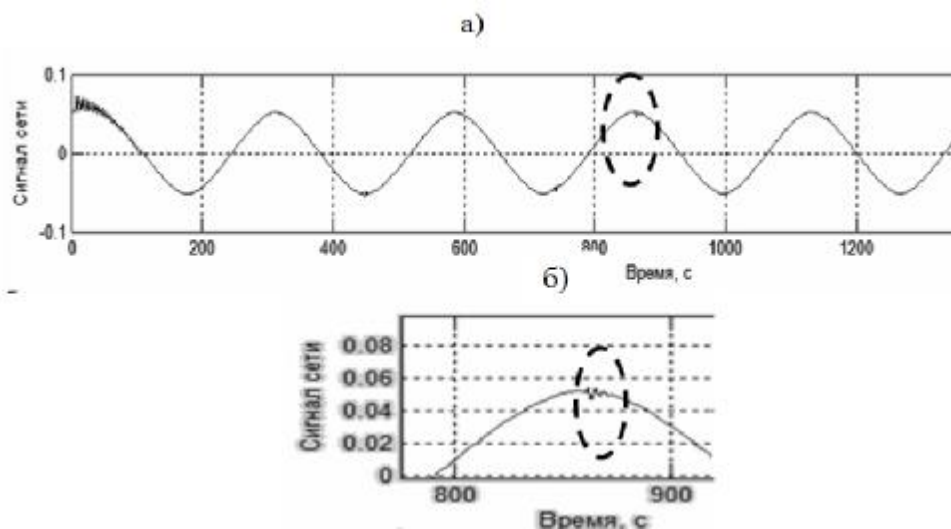


Рис.2. Модельный сигнал с импульсной помехой (а) и её фрагмент (б).

Информативная компонента выделялась на основе анализа восстановленных сигналов рис.4.: если искажения сигнала сети имели наибольшую величину, то компонента являлась наиболее информативной. На основе этого анализа была выбрана структура наилучшего дерева разложения сигналов электрической сети рис.3. Согласно этой структуре было произведено восстановление сигнала сети рис.5. Полученное восстановление локализует особенности сети по времени и определяет их величину. Полученные данные являются основой для построения метода компенсации особенностей сигналов сети.

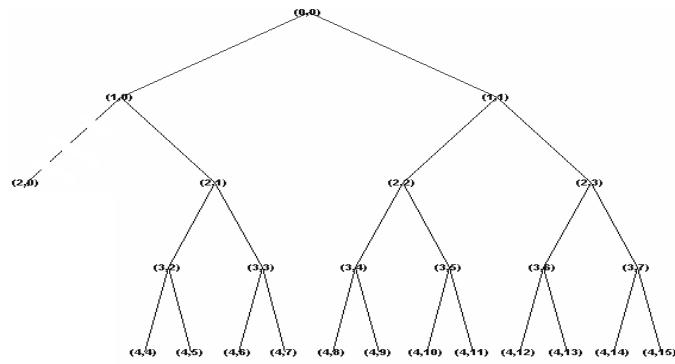


Рис.3. Структура наилучшего дерева: пунктиром обозначены те листья дерева ветвей – коэффициенты, которых будут приравняться нулю при восстановлении сигнала.

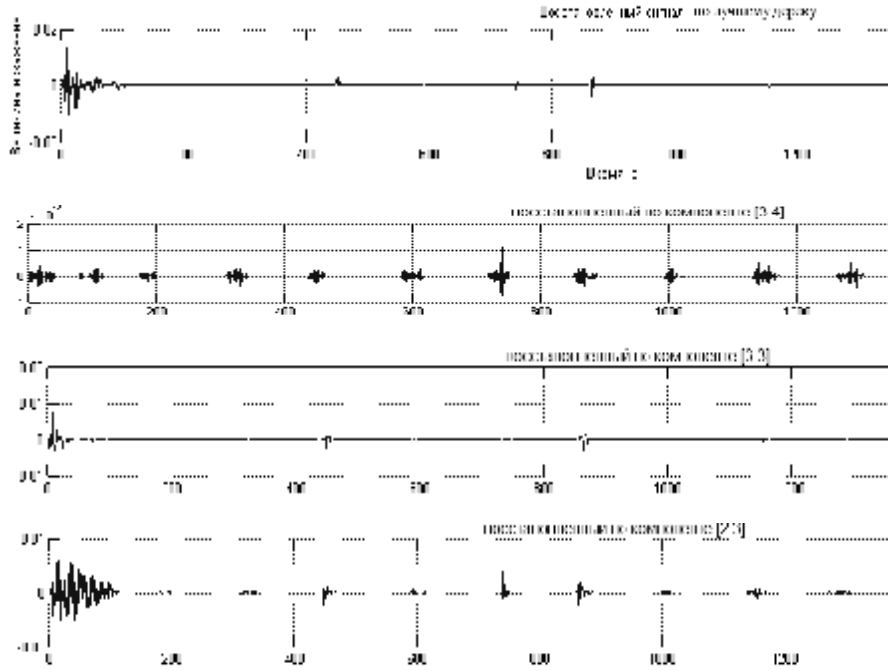


Рис.4. Компонентное восстановление сигнала.

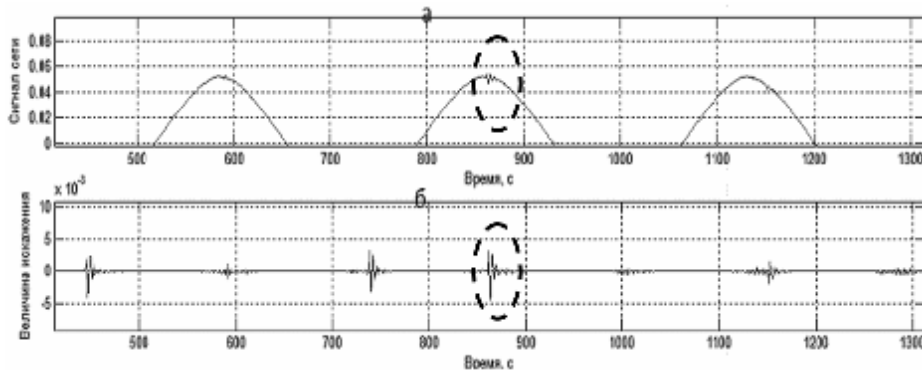


Рис.5. Наиболее информативной компоненты восстановления сигнала: а) исходный сигнал сети, б) восстановленный по наилучшему дереву сигнал.



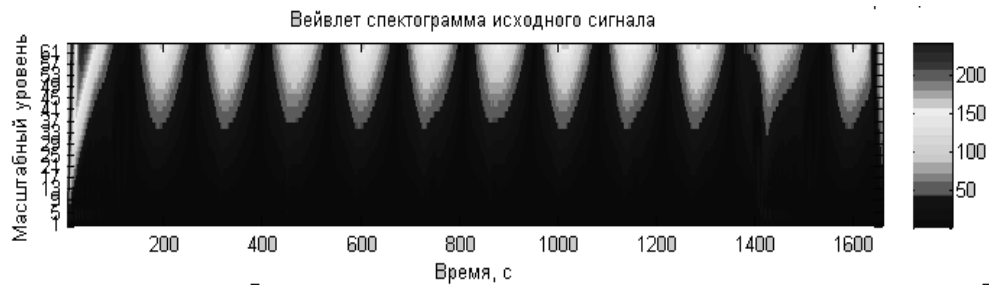


Рис.6. Вейвлет спектрограмма сигнала в масштабном уровне, оттенками серого цвета показаны абсолютные значения вейвлет-коэффициентов соответствующих масштабных уровней (значения масштабных уровней отмечены на вертикальной оси, горизонтальная ось – ось времени), более светлым оттенком серого цвета соответствуют большие значения коэффициентов.

Полученные результаты моделирования, представленные на рис.1 – 6 свидетельствуют о возможности локализации просечек с помощью вейвлет – анализа, в то время как Фурье – анализ не выделяет обозначенных в круговых областях особенностей импульсных помех.

Поэтому при построении систем активного подавления влияния импульсных помех необходимо учитывать полученные модельные результаты, что очевидно приведет к усложнению структуры активных фильтров на алгоритмическом уровне.

### **Выводы:**

Подавление импульсных и высокочастотных помех является актуальной задачей, продиктованной развитием структуры нагрузок современной судовой электроэнергетической системы.

Методы пассивной фильтрации импульсных и высокочастотных помех в мощных цепях малоэффективны.

Методы активной цифровой фильтрации на основе Фурье-преобразования не позволяют обеспечить фильтрацию кондуктивных помех нерегулярных импульсных помех. Предлагаемые в данной работе методы активной фильтрации на основе вейвлет-преобразования обеспечивают эффективное подавление широкого класса помех включающего кондуктивные и импульсные помехи.

## Литература

1. *Агунов А.В.* Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах / СПбГМТУ. - СПб., 2009 г.
2. *Горева Т.С.* Свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16389: «Программный комплекс управления качественными показателями электроэнергии в распределительных сетях» / М.: ИНИМ РАО, 2010 г.
3. *Дремин И.М.* Вейвлеты и их использование. –М: Наука, 2000 г.
4. *Куско А., Томпсон М.* Качество энергии в электрических сетях. – М.: Додэка, 2008 г.
5. *Портнягин Н.Н., Пюкке Г.А., Кузнецов С.Е.* Диагностирование электрических цепей методом изовар / Изв. Вузов. Электромеханика.- ЮРГТУ, Новочеркасск. –1998.-№1.-с.35-40.
6. *Черных И.В.* "Simulink: Инструмент моделирования динамических систем". – Питер: ДМК Пресс, 2008 г.
7. *Ingrid Daubechies, Ten Lectures on Wavelets.* Пер. с английского, – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001 г.
8. *Stephane Mallat, A Wavelet tour of signal processing.* Пер. с английского, – М.: Мир, 2005 г.

e-mail автора:

[tatyana-goreva@yandex.ru](mailto:tatyana-goreva@yandex.ru)