

## ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ В ВОПРОСАХ СЖАТИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### Введение

Наметившаяся в последнее время тенденция создания так называемых «умных электросетей» (Smart Grid), объединение коммуникационных сетей с энергетической системой, использование основной информационной базы режимов электропотребления – графиков электрических нагрузок, требует применения более качественного и эффективного математического аппарата для их анализа, компактного хранения, восстановления и передачи.

В последние пять лет широкое распространение для анализа и обработки сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только общую частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения об определенных локальных координатах, на которых себя проявляют те или иные группы частотных составляющих, или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала применяется вейвлетный анализ. Вейвлеты (wavelets – короткая волна) – функции определенной формы, локализованные по оси аргументов (независимых переменных), инвариантны к сдвигу и линейные к операции масштабирования (сжатия, растяжения) [1].

По сравнению с разложением сигналов в ряды Фурье [2] вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью выявить локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов 1-го рода (скачков). В настоящее время вейвлет-преобразования и вейвлетный анализ используются во многих областях науки и техники для самых различных задач: для распознавания образов, для численного моделирования динамики сложных нелинейных процессов, для анализа аппаратной информации и изображений, для эффективного сжатия сигналов и передачи информации по каналам с ограниченной пропускной способностью и т.п. То есть, другими словами, применение вейвлет-анализа существенно расширяет инструментальную базу информационных технологий обработки данных [3].

**Постановка задачи.** Одна из основополагающих идей вейвлет-представления сигналов заключается в разбивке приближения к сигналу на две составляющие – грубую (аппроксимирующую) и уточненную (детализирующую) – с последующим их дроблением с целью изменения уровня декомпозиции сигнала. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами. Структурная схема вейвлет преобразования (декомпозиции) сигнала представлена на рис. 1.

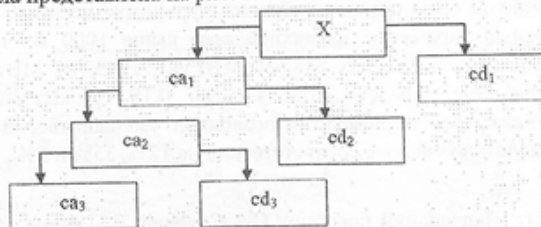


Рис. 1. Структурная схема декомпозиции сигнала  
 $cd_j$  – детализирующие коэффициенты;  
 $ca_j$  – аппроксимирующие коэффициенты.

Декомпозированный сигнал будет состоять из одного аппроксимирующего коэффициента  $ca_j$  и ряда детализирующих коэффициентов  $cd_j \dots cd_o$ . В связи с тем, что мы рассматриваем график электрической нагрузки (дискретные значения) операции с аппроксимирующими и детализирующими коэффициентами задаются видом вейвлета Хаара [5]. Вейвлеты Хаара имеют по два коэффициента каждого фильтра (низкочастотного и высокочастотного), его

масштабирующая (скейлинг) функция  $\varphi(t)$  с единичным значением интеграла

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \cdot dt = 1,$$

определяющая грубое приближение (аппроксимацию) сигнала и вейвлет-функция  $\psi(t)$  с нулевым значением интеграла

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) \cdot dt = 0,$$

определяющая детали сигнала и порождающая детализирующие коэффициенты, хорошо приспособлены для учета перепадов и ступенек сигналов.

**Декомпозиция/композиция графика электрической нагрузки.** Как следует из рис. 1, осуществив декомпозицию сигнала, мы перешли от представления независимых значений графика электрической нагрузки к приближенным (аппроксимирующим) значениям и приращениям относительно их (детализирующим значениям). Коэффициенты вейвлет-представления графика нагрузки значительно меньше числа, чем представление отсчетов графика нагрузки. Для реальных графиков многие коэффициенты по уровню оказываются настолько малыми, что ими можно пренебречь при хранении и дальнейшей композиции (восстановлении) графика нагрузки. Это означает возможность значительного сокращения объема информации о графике электрической нагрузки, выполнение его компрессии.

Классическая схема вейвлет-преобразования (схема Малла) предполагает рекурсивное применение процедуры реконструкции сигнала в частотной области. Первый шаг алгоритма Малла поясняется следующей диаграммой вейвлет-декомпозиции сигнала:

$$X \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow Lo\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cA_1 \quad (\text{коэффициенты аппроксимации уровня } 1), \\ \rightarrow Hi\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cD_1 \quad (\text{детализирующие коэффициенты уровня } 1). \end{array} \right.$$

Сигнал  $X$  подается на фильтры декомпозиции низких ( $Lo\_D$ ) и высоких ( $Hi\_D$ ) частот, после чего с помощью операции децимации  $\downarrow 2$  (уменьшения числа частотных составляющих вдвое) получаем коэффициенты аппроксимации на выходе фильтра низких частот и детализирующие коэффициенты на выходе фильтра высоких частот.

На рис. 1. этому соответствуют коэффициенты  $cA_1$  и  $cD_1$  (уровень  $j=1$ ). Далее этот алгоритм продолжается по схеме:

$$cA_j \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow Lo\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cA_{j+1} \quad (\text{коэффициенты аппроксимации уровня } j+1), \\ \rightarrow Hi\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cD_{j+1} \quad (\text{детализирующие коэффициенты уровня } j+1). \end{array} \right.$$

В результате мы получили полный набор аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов, вплоть до уровня декомпозиции  $j = 4$  (рис. 1.). Это и есть вейвлет-декомпозиция графика электрической нагрузки.

Вейвлет-реконструкция (композиция) графика электрических нагрузок будет происходить следующим образом. Используя операцию, обратную децимации  $\uparrow 2$  (увеличение вдвое составляющих путем добавления нулевых компонентов к имеющимся компонентам (рис. 2)), получаем диаграмму понижения уровня коэффициентов аппроксимации:

$$\left. \begin{array}{l} cA_j \rightarrow \uparrow 2 \rightarrow Lo\_R \rightarrow \\ cD_j \rightarrow \uparrow 2 \rightarrow Hi\_R \rightarrow \end{array} \right\} \rightarrow cA_{j-1}.$$

Это означает постепенное приближение к исходному графику электрической нагрузки. В целом, несколько упрощенно, процесс декомпозиции – реконструкции можно представить общей диаграммой вейвлет-преобразований:

$$X \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow Lo\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cA \rightarrow \rightarrow cA \rightarrow \uparrow 2 \rightarrow Lo\_R \\ \rightarrow Hi\_D \rightarrow \downarrow 2 \rightarrow cD \rightarrow \rightarrow cD \rightarrow \uparrow 2 \rightarrow Hi\_R \end{array} \right\} \xrightarrow{+} x_e.$$

Обозначение  $|i|$  указывает на итерационный характер вычислений.

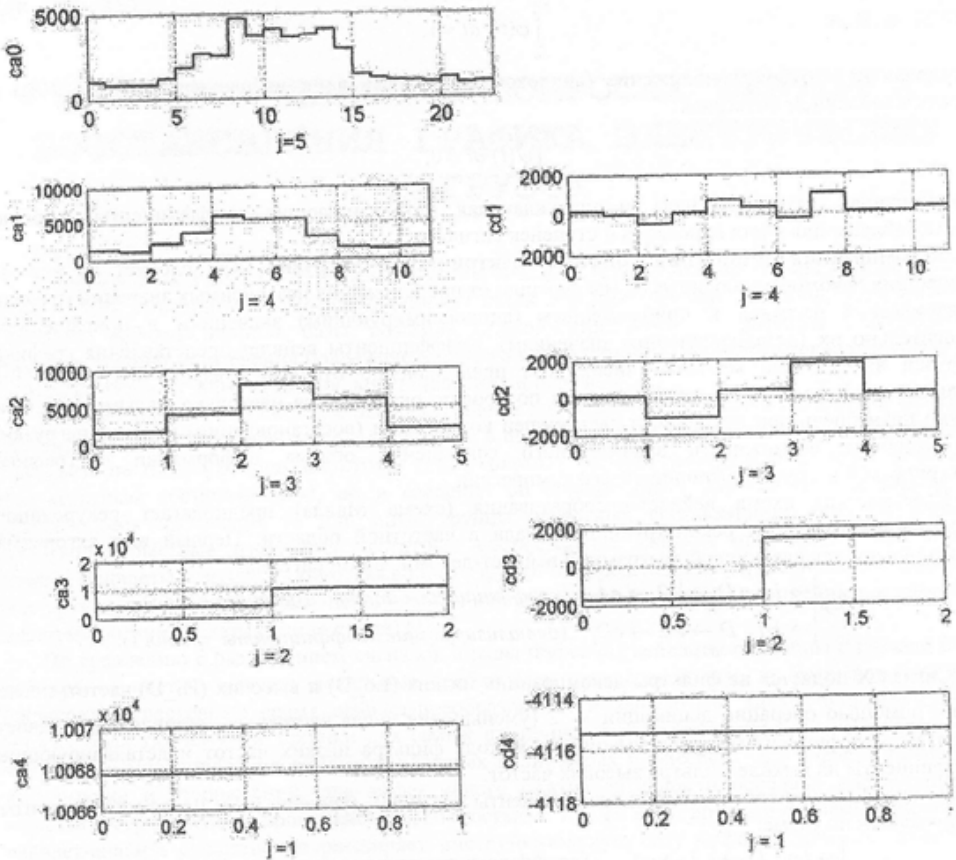


Рис. 2. Декомпозиция графика электрических нагрузок на аппроксимирующие  $ca_j$  и детализирующие  $cd_j$  коэффициенты

То есть, в результате этого процесса исходный график нагрузки  $X$  раскладывается на вейвлет-компоненты вплоть до заданного уровня декомпозиции, после чего в ходе реконструкции восстанавливается до приближенного графика  $x_e$ . Степень приближения зависит от уровня декомпозиции и реконструкции. Нулевой уровень соответствует точному восстановлению графика нагрузки  $x=x_e$  [4].

На рис. 3. приведены графики электрической нагрузки, восстановленные с различных уровней декомпозиции. График с уровня  $j=4$  восстановлен всего по двум значениям – одного аппроксимирующего коэффициента (равного средней активной мощности)  $ca_4$  и одного детализирующего коэффициента  $cd_4$ . Восстановление графика нагрузки с третьего уровня декомпозиции ( $j=3$ , рис. 3.) производилось по одному аппроксимирующему  $ca_4$  и детализирующим  $cd_4, cd_{3,1}, cd_{3,2}$  коэффициентами и т.д.

На рис. 4, а показан график зависимости погрешности восстановления от уровня декомпозиции.

Точность восстановления графика электрической нагрузки в значительной степени зависит от его коэффициента формы. Проанализируем данное утверждение, проведя операции декомпозиции/реконструкции графиков нагрузок с различными коэффициентами форм и с различных уровней восстановления. Результаты приведены на рис. 4, б.

Анализ данных результатов подтверждает зависимость точности восстановления графика от коэффициента формы. Это также позволяет сделать вывод о том, что чем больше размерность группового графика нагрузки (большое промышленное предприятие, район-предприятие электрических сетей, Энерггорынок и т.п.), тем с меньшего уровня декомпозиции он может быть восстановлен с заданной погрешностью, что влечет за собой:

- 1) значительное уменьшение объема памяти, необходимого для его хранения в базе данных (БД);
- 2) увеличение пропускной способности каналов связи;
- 3) повышение скорости доступа к данным, хранящимся в БД и т.п.

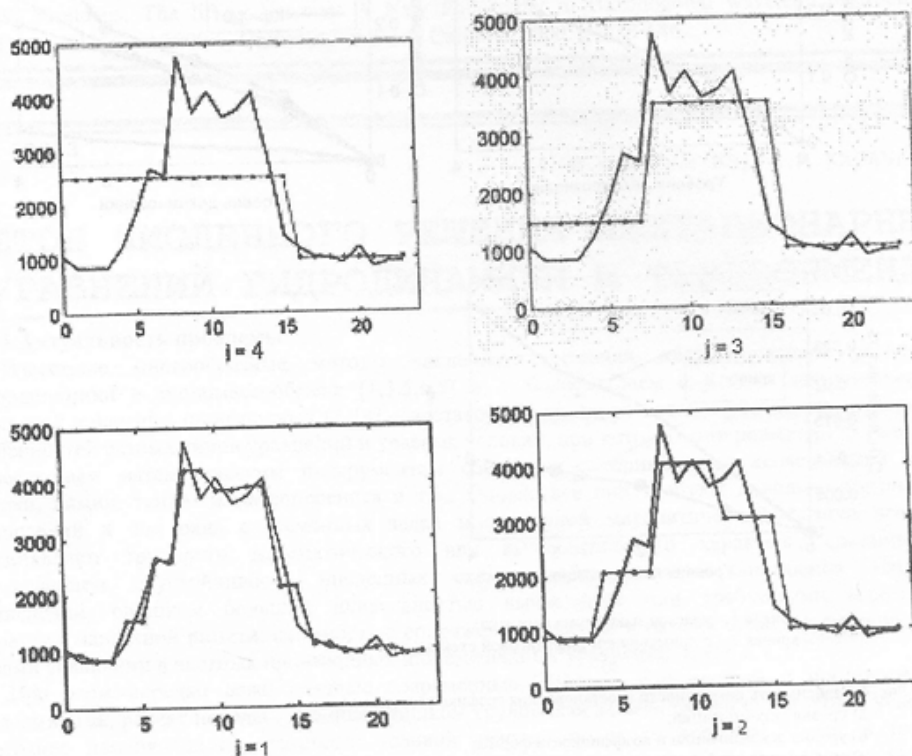


Рис. 3. Восстановление графика электрической нагрузки с различных уровней детализации

Исследуем также вопрос, возникающий при необходимости выделения отдельных, представляющих наибольший интерес, участков графика более точно (периоды максимальных нагрузок), чем остальные. Как известно, коэффициент формы графика в период максимальной нагрузки (гладкость кривой) более приближен к  $K_f=1$ , чем всего графика в целом. Следовательно, и величины детализирующих коэффициентов на данном участке графика нагрузки будут незначительными и мало отличающимися друг от друга, вследствие чего ими можно пренебречь без существенного влияния на точность хранения/восстановления графика нагрузки.

Проанализируем это на примере реального графика нагрузки (его участка дневного максимума). Результаты, приведенные на рис. 4, в, (кривая 1) показывают следующее:

1) возможность разбиения графика нагрузки на отдельные участки, характеризующиеся, в определенных пределах, величиной  $K_f$  и их отдельное хранение/восстановление. Например, хранение/восстановление только максимумов электрических нагрузок, используемых для решения определенных задач;

2) реконструкция таких участков графика может производиться с наперед заданной погрешностью в зависимости от уровня декомпозиции от 0,047 (первый уровень декомпозиции) до 0,031 (пятый уровень декомпозиции).

Повышение точности восстановления при увеличении уровня декомпозиции (рис. 4, в, (кривая 2)) можно достичь вейвлет-анализом с применением процедур оценка-прогнозирование. Другими словами – применением лифтинговой схемы [6].

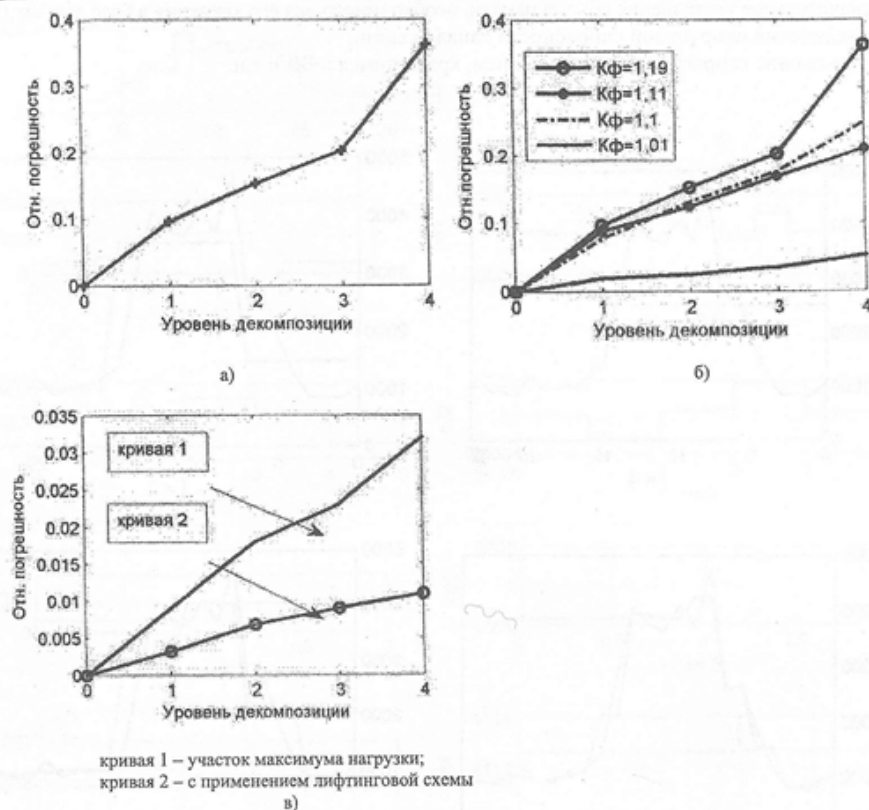


Рис. 4. Зависимость погрешности восстановления графика нагрузки от:  
 а) уровня декомпозиции;  
 б) уровня декомпозиции и коэффициента формы;  
 в) применения «лифтинга»

**Выводы**

Анализ представленных результатов графика позволяет сделать вывод о том, что, в зависимости от поставленных целей, а именно:

- 1) заданной погрешности восстановления графика нагрузки;
- 2) необходимого (или существующего) объема памяти для его хранения;
- 3) характеристики (пропускной способности) канала передачи данных;
- 4) временных ограничений при опросе (снятии) информации со счетчиков электрической энергии;
- 5) временных ограничений при составлении электробаланса предприятия (района и т.д.);
- 6) периодичности корректировки значений об электропотреблении в распределенных базах данных;
- 7) снижения размерности графиков электрических нагрузок на первом этапе оптимизации информационных потоков;
- 8) необходимости выделения отдельных, представляющих наибольший интерес, участков графика нагрузки более точно (период максимальных нагрузок) чем остальные, и т.д., возможно их эффективное решение с помощью вейвлет-анализа применением той или иной степени декомпозиции /реконструкции графика (графиков) электрической нагрузки.

**Литература**

1. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. ВУС, 1999, С.1-204.
2. Федюков Ю.А., Фопкина С.В. Особенности применения рядов Фурье в экспериментальных исследованиях// Известия вузов. Электромеханика. 2006. №5. С.74-79.

3. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения// Успехи физических наук. 1996, т. 166, №11, С. 1145-1170.
  4. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. – М.: СОЛОН – Пресс, 2005. – 576 с.
  5. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005 . – 671 с.
  6. W. Sweldeus. The lifting Scheme: A New Philosophy in Biorthogonal wavelet Constructions. Technical Report 2000:6, University of South Carolina, 2000. p. 138-146.
- 
-