

УДК 681.2.088

Т.В. БЫКОВА, Г.А. ЧЕРЕПАЩУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

## МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА ПРИ КОРРЕКЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ

*В статье проведен анализ методов вейвлет-фильтрации сигналов с целью определения оптимального для применения при коррекции динамических погрешностей тензометрических измерительных преобразователей. Исследованы параметры распределения вейвлет-коэффициентов преобразования белого шума, на основании чего разработаны рекомендации по расчету величины порогового значения. Предложен метод подавления шума во время коррекции результатов динамических измерений с использованием ортогональных вейвлетов, заключающийся в обработке вейвлет-коэффициентов оператором с адаптивным порогом, величина которого определяется в ходе обработки сигнала.*

**Ключевые слова:** динамические измерения, динамическая погрешность, корректирующий оператор, вейвлет-фильтрация, пороговая обработка.

### Введение

Для тензорезисторных измерительных преобразователей (ТИП), которые применяются при установочных испытаниях всевозможных транспортных конструкций (летательных аппаратов, автомобилей, железнодорожных вагонов и др.) и работают в динамическом режиме весьма важно производить коррекцию результатов измерений на этапе обработки измерительной информации с целью компенсации динамических погрешностей. Эта задача относится к обратным задачам динамики и требует для решения специальный регуляризующий подход. В настоящее время для коррекции динамических погрешностей рационально использовать вейвлет-преобразование, имеющее ряд преимуществ по сравнению с классическим математическим аппаратом, в частности, преобразованием Фурье, и позволяет обеспечить регуляризацию решения обратных задач [1]. Процесс коррекции динамических погрешностей с использованием вейвлет-преобразования помимо ряда операций, направленных непосредственно на компенсацию искажений сигнала, вызванных инерционными свойствами измерительного преобразователя, включает этап подавления шума, например, методом пороговой обработки коэффициентов [2]. Однако практических рекомендаций по применению и выбору нужных параметров этих методов в конкретных ситуациях не имеется. Целью данной работы является исследование существующих методов вейвлет-фильтрации, выявление тех, которые могут применяться при решении задачи коррекции результатов динамических измерений

ТИП, и разработка практических рекомендаций по выбору необходимых параметров, в частности величины порогового значения.

### Анализ методов вейвлет-фильтрации

Методы вейвлет-фильтрации, которые еще называются методами «жесткой», «мягкой» и «сверхмягкой» пороговой обработки, состоят в полном удалении или частичном подавлении детализирующих коэффициентов вейвлет-преобразования, не превосходящих некоторое пороговое значение [3]. Эти методы используют три вида пороговых операторов. Если обозначить величину порогового уровня как  $T$ , то операторы пороговой обработки будут иметь следующий вид:

- жесткий пороговый оператор:

$$P_{Th}(d) = \begin{cases} d, & |d| \geq T, \\ 0, & |d| < T; \end{cases} \quad (1)$$

- мягкий пороговый оператор:

$$P_{Ts}(d) = \begin{cases} d - \text{sign}(d)T, & |d| \geq T, \\ 0, & |d| < T; \end{cases} \quad (2)$$

- сверхмягкий пороговый оператор:

$$P_{Tss}(d) = \begin{cases} d - \text{sign}(d)(1 - \mu)T, & |d| \geq T, \\ \mu d, & |d| < T. \end{cases} \quad (3)$$

Параметр  $\mu$  в выражении (3) выбирается из диапазона  $0 < \mu < 1$ . В случае, когда  $\mu=0$ , сверхмягкая обработка переходит в мягкую, а когда  $\mu=1$  фильтрация не происходит.

Пороговая обработка, как метод фильтрации, основана на предположении, что обрабатываемый

сигнал аппроксимируется выбранным вейвлетом таким образом, что вся энергия сигнала сосредоточена в малом числе больших коэффициентов, при этом малые коэффициенты принимаются носителями шума. Так как это предположение на практике не выполняется и всегда некоторая часть полезного сигнала содержится и в коэффициентах малой амплитуды, а в коэффициенты большой амплитуды попадает шум, то жесткая пороговая обработка может повлечь за собой значительные искажения в восстановленном сигнале. Мягкий пороговый оператор, как и жесткий также применим при условии, что в малых коэффициентах не содержится энергия полезного сигнала, однако при достаточно высоком уровне шума он, очевидно более эффективен, чем предыдущий метод. Сверхмягкий пороговый оператор изменяет расстояние между большими и малыми коэффициентами, тем самым, подавляет большую часть шума и сохраняет определенную часть сигнала. Такой вариант может быть наилучшим решением при обработке сигналов, о параметрах и составе которых нет достаточного объема априорной информации., но для применения на практике сверхмягкого порогового оператора необходимо установить, как выбирать параметры  $\mu$  и  $T$ .

### Исследование вейвлет-преобразования белого шума

Практический опыт показывает, что шум, присутствующий в канале преобразования сигналов тензодатчиков, по своим параметрам соответствует белому шуму.

Проведем исследование статистических параметров коэффициентов вейвлет-преобразования сигнала на разных уровнях разложения, являющегося белым гауссовым шумом с нулевым матожиданием и единичной дисперсией (рис. 1).

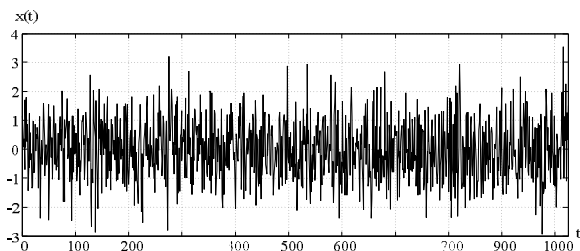


Рис. 1. График сигнала, соответствующего белому шуму

Вейвлет-коэффициенты экспериментального сигнала, полученные на пяти уровнях декомпозиции с использованием базиса  $\text{sym10}$ , показаны на рис. 2 (а-д). Из этих рисунков можно увидеть, что происходит с абсолютными значениями коэффициентов, содержащих шум.

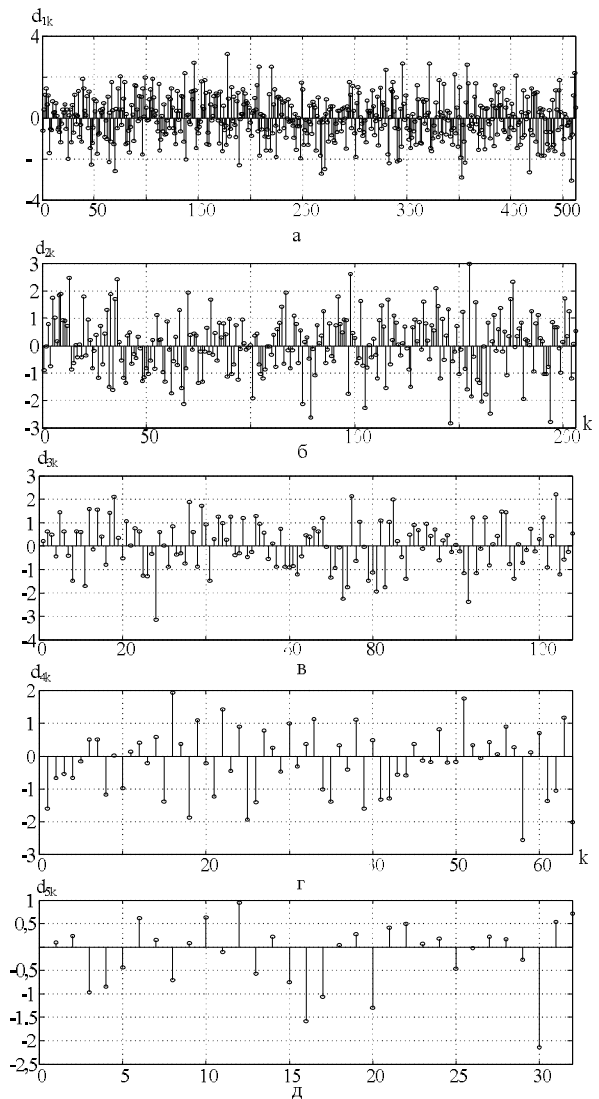


Рис. 2. Коэффициенты детализации вейвлет-разложения белого шума

Статистический анализ распределения коэффициентов показывает, что они остаются нормально распределенными на всех уровнях разложения сигнала. Результаты вычисления среднеквадратического отклонения (СКО)  $\tilde{\sigma}$  этих коэффициентов занесены в табл. 1.

С повышением уровня разложения СКО коэффициентов уменьшается, поэтому если в качестве порогового значения принять величину, равную  $3\tilde{\sigma}$ , то на первом уровне будет подавлено 99,73 % шума. На всех последующих уровнях коэффициенты шума также не будут превосходить это пороговое значение и будут подавлены. На практике частота дискретизации сигнала с целью уменьшения погрешности его восстановления выбирается такой, что превышает требуемую по теореме Котельникова. Тогда вейвлет-преобразование сигнала соответствует его разбиению на спектральные полосы, как показано на рис. 3.

Таблица 1

СКО коэффициентов вейвлет-преобразования белого шума на разных уровнях

Номер уровня разложения	1	2	3	4	5
Оценка СКО, $\tilde{\sigma}$	1,05	1,03	0,96	0,85	0,74

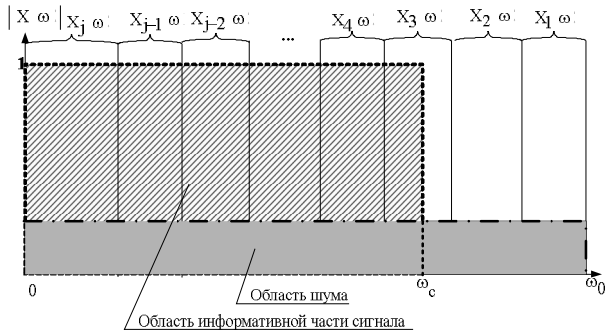


Рис. 3. Схема разбиения спектра измеряемого сигнала в результате вейвлет-декомпозиции

На первом уровне вейвлет-декомпозиции коэффициенты детализации содержат только компоненты шума, поэтому предлагается пороговое значение при обработке произвольной реализации сигнала вычислять по СКО коэффициентов детализации первого уровня. На последующих уровнях разложения в спектре присутствуют коэффициенты, относящиеся к информативной части сигнала, следовательно, подавлять шум нужно более осторожно.

### Разработка рекомендаций по выбору параметров пороговой обработки на практике

Сложность подавления шума на верхних уровнях обусловлена в первую очередь отсутствием достаточного объема априорной информации об измеряемом сигнале. Исследуем поведение сверхмягкого порогового оператора на сигнале, состоящем из последовательности колебательных и импульсоподобных участков (рис. 4). Такой сигнал характерен для испытаний железнодорожных вагонов в реальных режимах движения. На этот сигнал наложим белый гауссов шум с СКЗ, равным 10 % от амплитудного значения сигнала (рис. 5). В качестве порогового значения зададим величину  $T = 3\tilde{\sigma}$ , что соответствует подавлению 99,73 % шума. Фильтрацию сигнала будем производить сверхмягким пороговым оператором, изменяя при этом параметр  $\mu$  в пределах от 0 до 1.

Анализ вейвлет-спектра заданного сигнала показывает, что полезные составляющие принадлежат уровням, начиная с четвертого (рис. 6). Так как на практике неизвестен заранее спектральный состав измеряемого сигнала, то следует проверить качество

фильтрации сигнала, поочередно добавляя уровни разложения, начиная с первого.

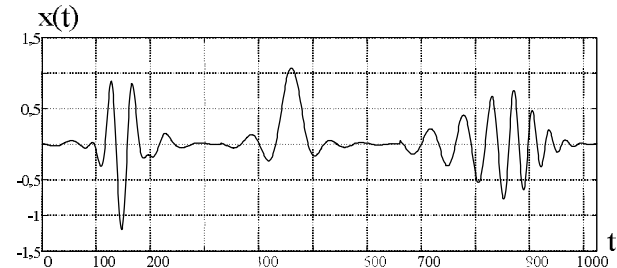


Рис. 4. График экспериментального сигнала без шума

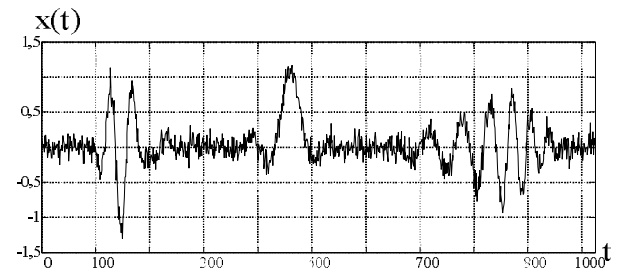


Рис. 5. График экспериментального сигнала с шумом

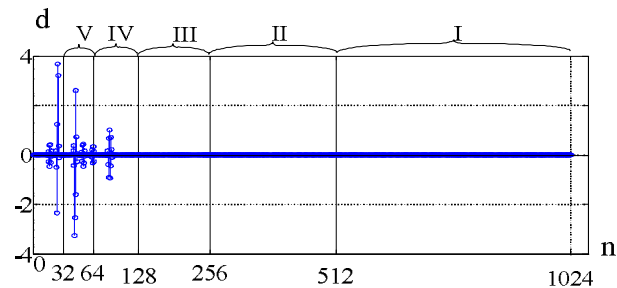


Рис. 6. Вейвлет-преобразование заданного сигнала без шума до пятого уровня (I, II, ..., V – номер уровня)

Результаты экспериментальных данных сведем в табл. 2 и построим графики зависимости среднеквадратической погрешности (СКП)  $\sigma$  от значения параметра  $\mu$  при разложения на разное количество уровней.

Анализ табл. 2 и графиков (рис. 7) показывает, что при «неглубоком» разложении сигнала лучшие результаты дает мягкий пороговый оператор, причем качество фильтрации увеличивается с ростом уровня разложения до третьего.

Таблица 2

Относительная среднеквадратическая погрешность восстановления сигнала после фильтрации, %

№ п.п.	Значение параметра $\mu$	Количество уровней разложения					
		1	2	3	4	5	6
1.	0	7,2	4,7	3,1	3,6	4,9	5,7
2.	0,1	7,2	4,8	3,3	3,5	4,6	5,3
3.	0,2	7,3	5,0	3,7	3,8	4,6	5,1
4.	0,3	7,5	5,4	4,3	4,3	4,8	5,2
5.	0,4	7,7	5,9	5,0	4,9	5,3	5,5
6.	0,5	8,0	6,6	5,8	5,7	5,9	6,0
7.	0,6	8,4	7,2	6,7	6,6	6,6	6,7
8.	0,7	8,8	8,0	7,6	7,5	7,5	7,5
9.	0,8	9,3	8,7	8,5	8,4	8,4	8,4
10.	0,9	9,8	9,5	9,4	9,3	9,3	9,3
11.	1,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

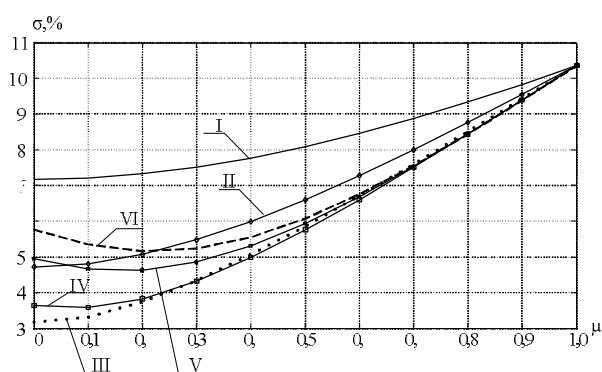


Рис. 7. Графики зависимости СКП сигнала от параметра сверхмягкой фильтрации при декомпозиции сигнала на разное количество уровней (I, II, ..., V – номер уровня)

Начиная с четвертого уровня, более эффективной оказывается сверхмягкая пороговая обработка. На шестом уровне наблюдается увеличение роста погрешности, что объясняется подавлением полезных составляющих сигнала. Подобные эксперименты повторены для измеряемых сигналов других форм. Они показали, что для произвольного сигнала наилучшим решением является обработка сверхмягким пороговым оператором с адаптивным выбором значения

порога. Так на начальных уровнях, где мощность полезного сигнала невелика, следует производить мягкую пороговую обработку, которая является частным случаем сверхмягкой пороговой обработки ( $\mu=0$ ). На более высоких уровнях, где сосредоточена основная энергия сигнала, целесообразно дополнительно устанавливать параметр  $\mu$  и использовать оператор вида (3). Значение порога  $T$  лучше выбирать завышенным, т.е. равным  $3\tilde{\sigma}$ . При таком выборе удаляется большая часть высокочастотного шума на начальных уровнях вейвлет-разложения, а потом в низкочастотных областях степень подавления шума будет регулироваться параметром  $\mu$ .

Для определения значения  $\mu$  сопоставим количество коэффициентов, не превышающих пороговое значение, с общим количеством коэффициентов, полученных при вейвлет-разложении на каждом уровне (см. табл. 3). Данные табл. 3 показывает, что величина  $\mu$ , при которой получается минимальная среднеквадратическая погрешность восстановления сигнала, оказывается пропорциональной количеству коэффициентов, принадлежащих полезному сигналу. Эту выявленную закономерность и предлагается брать за основу при принятии решения о величине параметра  $\mu$  на уровнях сверхмягкой фильтрации в

Таблица 3

Количественные соотношения коэффициентов вейвлет-преобразования экспериментального сигнала

Номер уровня разложения	Общее количество вейвлет-коэффициентов, шт.	Количество вейвлет-коэффициентов, не превышающих пороговое значение, шт.	Количество вейвлет-коэффициентов, не превышающих пороговое значение, шт. (в % от общего количества)	Значение $\mu$ , при котором получена минимальная СКП
1	512	512	0 (0 %)	0
2	256	255	3 (0 %)	0
3	128	128	0 (0 %)	0
4	64	57	7 (10 %)	0,1
5	32	27	5 (16 %)	0,2
6	16	11	5 (33 %)	0,3

прикладных задачах, в частности при обработке результатов измерений ТИП. Так, если на уровне вейвлет-декомпозиции получено  $N$  коэффициентов, то в качестве  $\mu$  нужно брать значение

$$\mu = \frac{N_T}{N}, \quad (4)$$

где  $N_T$  – количество коэффициентов, превышающих по величине пороговое значение.

### Выводы

Проведенный анализ методов вейвлет-фильтрации сигналов показал, что при коррекции динамических погрешностей тензометрических измерительных преобразователей наиболее целесообразно использовать сверхмягкую пороговую обработку с адаптивным выбором параметров на каждом уровне вейвлет-преобразования. Требуемые параметры рекомендовано определять путем статистиче-

ской обработки вейвлет-коэффициентов на каждом уровне разложения. Выполненные вычислительные эксперименты подтвердили работоспособность предлагаемого метода фильтрации, что позволяет рекомендовать его на практике.

### Литература

1. Быкова Т.В. Синтез оператора коррекции результатов динамических измерений в базисе ортогональных вейвлетов / Т.В. Быкова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – №2(59). – С. 103-108.
2. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab / Н.К. Смоленцев. – М.: LVR Press, 2005. – 304 с.
3. Storm H. Noise reduction of Speech Signals with Wavelets/ H. Storm. – Goteborg : Mathematics. Department of Mathematics Chalmers University of Technoland Goteborg University, 1997. – 127 p.

Поступила в редакцию 1.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. М.Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### МЕТОД ПРИДУШЕННЯ ШУМУ ПІД ЧАС КОРЕКЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИНАМІЧНИХ ВІМІРЮВАНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ОРТОГОНАЛЬНИХ ВЕЙВЛЕТІВ

*Т.В. Быкова, Г.О. Черепашук*

В статті проведено аналіз методів вейвлет-фільтрації сигналів з метою визначення найкращого для використання під час корекції динамічних похибок тензометричних вимірювальних перетворювачів. Досліджено параметри розподілення вейвлет-коефіцієнтів перетворення білого шуму, на основі чого розроблено рекомендації по розрахунку величини порогового значення. Запропоновано метод придушення шуму під час корекції результатів динамічних вимірювань з використанням ортогональних вейвлетів, який полягає в обробці вейвлет-коефіцієнтів оператором з адаптивним порогом, величина якого визначається під час обробки сигналу.

**Ключові слова:** динамічні вимірювання, динамічна похибка, корегуючий оператор, вейвлет-фільтрація, порогова обробка.

### MUTING METHOD THAT USES ORTHOGONAL WAVELETS DURING DYNAMIC MEASURING RESULTS CORRECTION

*T.V. Bykova, G.O. Cherepaschuk*

An analysis of signals wavelet-filtration methods for the purpose identification the best of them for the use during dynamic error of strain gage transducers correction is carried out in the article. The wavelet-coefficients distribution operation factors of white noise are studied, for reasons given guidelines on the calculation of threshold valuation are made. The muting method that is using during the dynamic measuring results correction end employs orthogonal wavelets that includes wavelet-coefficient processing with adaptive threshold operator, which value is finding at the time of signal processing is proposed.

**Key words:** dynamic measurements, dynamic error, inverse operator, corrective operator, wavelet-filtration, threshold- processing.

**Быкова Татьяна Владимировна** – инженер, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: maxnumber2@list.ru.

**Черепашук Григорий Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.