

DOI 10.23859/1994-0637-2019-2-89-1  
УДК 681.518.5, 53.083.8, 621.398

©Андреев А. Н., Колесниченко Д.А. 2019

**Андреев Александр Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент,  
Вологодский государственный университет  
(Вологда, Россия)  
E-mail: aanccs@mail.ru

**Andreev Aleksandr Nikolaevich**

PhD in Technical Sciences,  
Associate professor,  
Vologda State University  
(Vologda, Russia)  
E-mail: aanccs@mail.ru

**Колесниченко Дмитрий**

**Александрович**  
Старший преподаватель,  
Вологодский государственный университет  
(Вологда, Россия)  
E-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

**Kolesnichenko Dmitrii**

**Aleksandrovich**  
Senior lecturer,  
Vologda State University  
(Vologda, Russia)  
E-mail: dimakolesnichenko@gmail.com

**МЕТОД И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ  
СИГНАЛА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ  
ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

**METHOD AND ALGORITHM  
OF SIGNAL PROCESSING FOR  
CONTROL AND DIAGNOSTICS OF CY-  
CLIC ACTION MECHANISMS IN  
METALLURGICAL PRODUCTION**

**Аннотация.** Предложены метод и алгоритм фильтрации сигналов датчиков в системах управления и диагностирования объектов циклического действия металлургического производства.

**Abstract.** The article presents the method and algorithm for filtering sensor signals in control systems and diagnosing cyclic action mechanisms of metallurgical production.

**Ключевые слова:** фильтрация, вейвлет-преобразование, обработка информации, системы автоматизации, диагностирование

**Keywords:** filtering, wavelet transform, information processing, automation systems, diagnostics

---

---

**Введение**

Повышение точности управления циклическими агрегатами металлургического производства, а также применение для них систем диагностирования является важнейшей задачей для предприятий этой отрасли. Решение этой проблемы позволяет снизить расходы производства и повысить качество производимой продукции [3].

При решении задачи повышения качества управления можно выделить проблему зашумленности сигнала, приходящего с нижних уровней автоматизации (рис. 1) [2]. Это обусловлено наличием инверторных преобразователей, блоков питания и других импульсных систем, которые создают наводки на линии связи, что, в свою очередь, негативно сказывается на качестве управления и диагностирования агрегатов металлургического производства.

Задача подавления шума или, более точно, задача фильтрации сигнала из смеси с шумом представляет одну из актуальных задач цифровой обработки сигналов. Сложность проблемы состоит в том, что в реальном сигнале обычно довольно трудно отделить шум от некоторых составляющих полезного сигнала. Вследствие этого практически все известные методы подавления шума в той или иной степени приводят к искажению полезного сигнала. Поэтому решение поставленной задачи – фильтрация сигналов датчиков – повысит достоверность информации и приведет к улучшению качества управления и диагностирования объектов циклического действия металлургического производства.

### **Основная часть**

Использование вейвлет-преобразования как альтернативы преобразованию Фурье, традиционно используемому при анализе и первичной обработке данных датчиков физических величин быстро изменяющихся во времени (например, коммутационных перенапряжений, сквозных токов, величин магнитных индукций, вибросигналов и др.), позволяет выявлять артефакты с привязкой к времени их появления с высокой информативностью и достоверностью. Преобразование Фурье работает в частотной области без локализации на временной оси отдельных составляющих анализируемых сигналов [3]. Идентификационные свойства вейвлет-анализа заложены непосредственно в его структуре. Известные вариации с оконным преобразованием Фурье частично решают проблему привязки артефактов к времени их возникновения, но только при дополнительном искусственном манипулировании полученными данными на конечных временных интервалах, тогда как базовые алгоритмы Фурье требуют бесконечной области определения анализируемой эмпирической функции.

Учитывая существенную значимость и практическую вариативную реализацию методов анализа на основе преобразования Фурье, методы вейвлет-преобразования в ряде случаев дополняют его, а в некоторых алгоритмах полностью его заменяют за счет возможностей масштабирования и вычисления как усредненных параметров, так и экстремальных значений с их привязкой к точным временным меткам.

Практическая реализация положительных свойств вейвлет-анализа сдерживается существенными объемами вычислений, снижающими скорость обработки данных. Последний недостаток существенно нивелируется за счет роста вычислительных ресурсов, в том числе и вычислительной техники, используемой в промышленности, и применения рекурсивных алгоритмов реализации базовых вычислительных процедур.

В настоящий момент применяются алгоритмы и методы быстрого вейвлет-преобразования, но они не всегда могут быть использованы при произвольных данных, что ведет к поиску универсальных более оптимальных алгоритмов, которые снижают загрузку вычислительной техники.

Актуальность задачи заключается в повышении достоверности первичной обработки сигналов измерительных каналов в электромеханических комплексах и системах агрегатов циклического действия металлургического производства, где получаемые данные содержат множество посторонних шумов и артефактов [4].

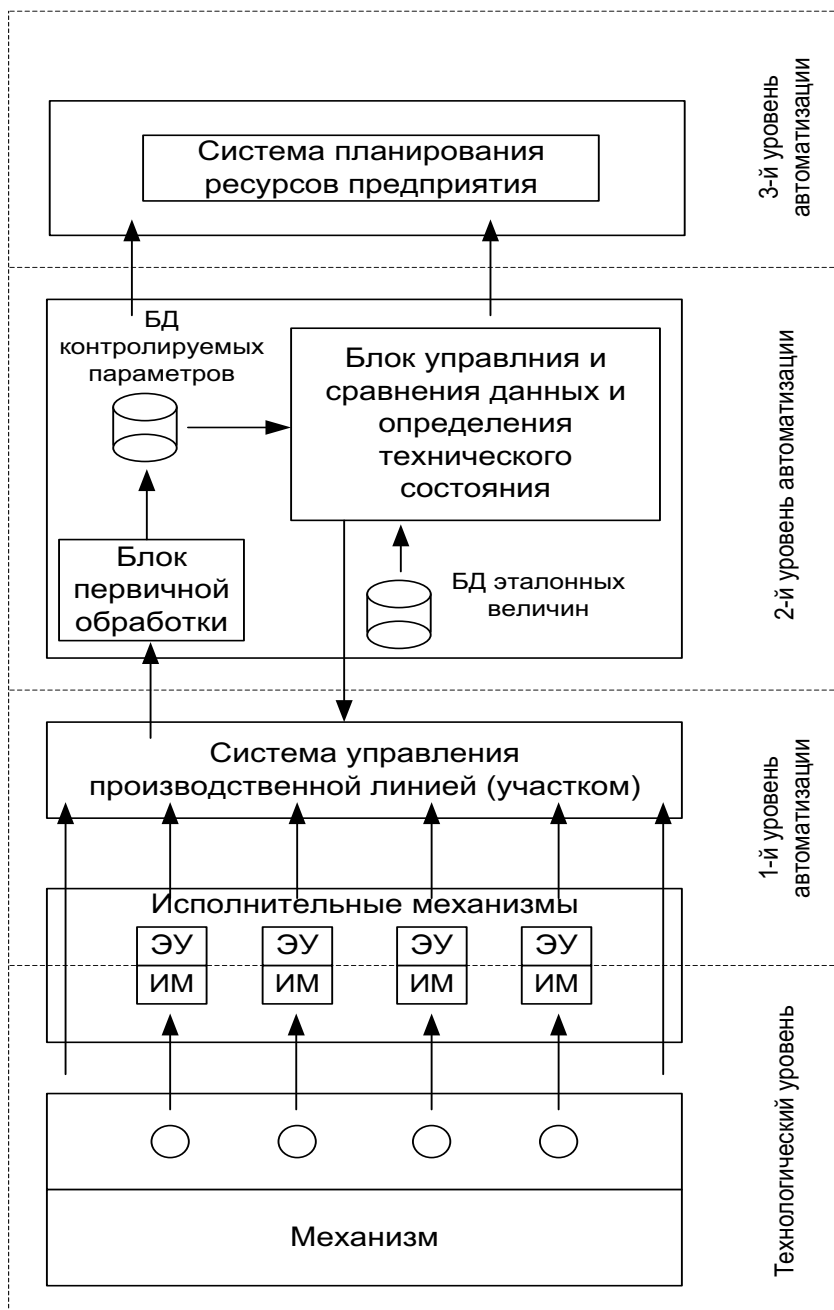


Рис. 1. Система автоматизации предприятия с системой первичной обработки информации, системой управления и с подсистемой диагностирования

На рис. 1 приняты следующие сокращения: ИМ – исполнительный механизм, ЭУ – электрический усилитель, БД – база данных.

Процесс быстрого вейвлет-преобразования в системах управления и диагностирования механизмов циклического действия металлургического производства может быть реализован для поступающего сигнала –  $X(n)$ , который содержит  $N$  отсчетов ( $N = 2J$ , где  $J$  – число масштабов или количество каскадов фильтров), в матричной форме дискретного вейвлет-преобразования [4]–[7]:

$$c_j = H_j c_{j-1},$$

$$d_j = G_j c_{j-1},$$

где  $c_j = (c_j(0), c_j(1), \dots, c_j(N/2^j-1))$  и  $d_j = (d_j(0), d_j(1), \dots, d_j(N/2^j-1))$  – векторы-столбцы выходов скейлинг-фильтра и вейвлет-фильтра для произвольного  $j$ , в котором содержатся коэффициенты, определяющие спектр сигнала  $X(n)$  и полученные прореживанием в два раза;

$$H_j = \begin{pmatrix} h^T(1) \\ h^T(2) \\ \vdots \\ h^T(N/2^j) \end{pmatrix}_{(N/2^j)(N/2^j-1)} \quad G_j = \begin{pmatrix} g^T(1) \\ g^T(2) \\ \vdots \\ g^T(N/2^j) \end{pmatrix}_{(N/2^j)(N/2^j-1)}$$

– матрицы преобразования размером  $(N/2^j)(N/2^j-1)$  на  $j$ -й итерации, представляющие собой наборы векторов-строк  $h^T(n)$  и  $g^T(n)$  и описывающие скейлинг- и вейвлет-фильтры соответственно;  $h^T(n)$  и  $g^T(n)$  – векторы-строки, состоящие из коэффициентов, дополненных нулевыми коэффициентами, для вейвлет-фильтров и скейлинговых фильтров соответственно;  $j = 1, 2, \dots, J$ .

Результатом преобразования будут два вектора половинной длины, первый из которых представляет сглаженную версию сигнала, а второй – локальные особенности выбранного уровня детализации. Основные преимущества декомпозиции исходного сигнала в представленном формате следующие:

- сглаженный сигнал характеризует общие или глобальные свойства исходной последовательности данных;
- локальные особенности второго вектора характеризуют величины помех, включая резкие перепады, выбросы и даже разрывы функции без потери привязки к временным меткам.

В случае недостаточности усреднения (глобальные свойства не выявлены) или если артефакты не достаточно локализованы на временной оси, рекурсивный алгоритм позволяет выполнить все перечисленные операции на следующем этапе детализации. На рис. 2 представлен алгоритм прямого вейвлет-преобразования.

Восстановление сигнала (наиболее характерно для задач управления) по вейвлет-образу реализуется алгоритмом, который является обратным по отношению к алгоритму декомпозиции. Выполняемые операции представляют собой аппроксимацию коэффициентов  $c_j$  и  $d_j$  на новый, в 2 раза меньший, шаг дискретизации. Происходит реконструкция спектра коэффициентов  $c_j$  в низкочастотную область нового главного диапазона спектра  $c_{j-1}$ , а спектра коэффициентов  $d_j$  в высокочастотную часть спектра  $c_{j-1}$ . Расстановка нулевых значений между коэффициентами  $c_j$  и  $d_j$  с увеличением в 2 раза числа отсчетов; фильтрация полученных массивов низкочастотным  $h_k^r$  и высокочастотным  $g_k^r$  фильтрами реконструкции и сложение результатов фильтрации восстанавливает сигнал. Частотные характеристики фильтров пря-

мого и обратного преобразования должны быть согласованными и идентичными по модулю. Фазовый сдвиг односторонних фильтров декомпозиции при реконструкции коэффициентов  $c_{j-1}$  должен быть устранен, что обеспечивается реверсом значений коэффициентов названных фильтров. Блок-схема алгоритма реализации трехстадийного многоканального банка фильтров обратного дискретного вейвлет-преобразования приведена на рис. 3.

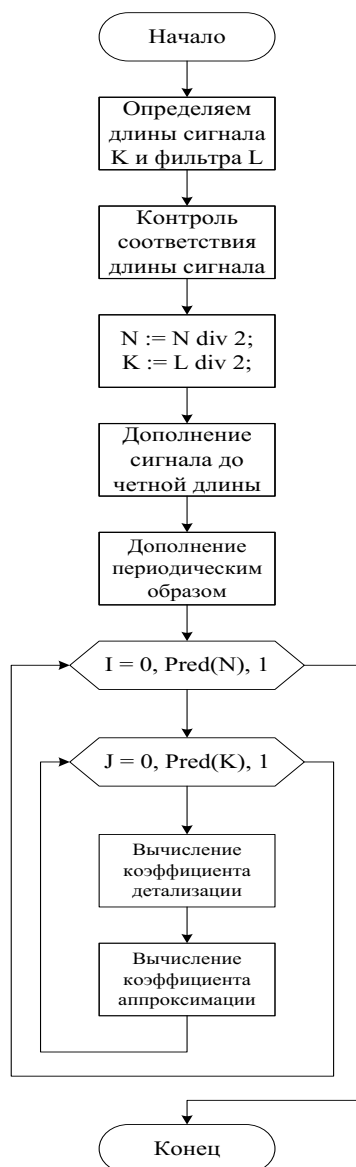


Рис. 2. Алгоритм прямого вейвлет-преобразования

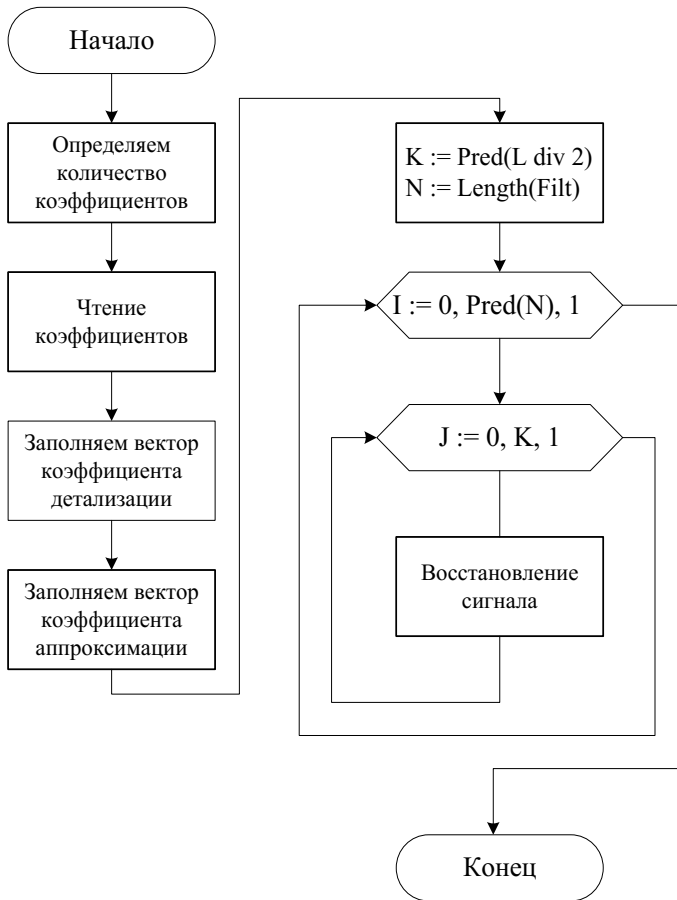


Рис. 3. Алгоритм обратного вейвлет-преобразования

Таким образом, произведение транспонированных матриц коэффициентов на усредненный (сглаженный) вектор и вектор детализации и их поэлементное сложение представляет вычислительную процедуру обратного вейвлет-преобразования (восстановление сигнала).

$$c_{j-1} = \sqrt{2}E_{j,j}^T c_j + \sqrt{2}F_{j,j}^T D_j,$$

где  $E_j = H_j^T$  и  $F_j = G_j^T$ .

На точность восстановления сигналов влияют потери информации при прореживании спектров исходных данных. Потери выглядят очевидными на срезах полос пропускания фильтров высоких и низких частот, что в свою очередь определяется порядком фильтров, степенью их согласования и типом базового вейвлета. Очевидно, что углубление уровня декомпозиции ведет к росту потерь, а погрешности реконструкции сигналов растут.

Качественное восстановление сигнала однозначно связано с заданием числа отсчетов (точек), равного  $N=2j$ . Значение  $j \geq 1$  определяет максимальное количество уровней декомпозиции сигнала при целочисленных величинах кратности сдвигов операторов фильтров числу отсчетов вейвлет-коэффициентов каждого уровня декомпозиции. Названное условие выполняется дополнением до ближайшего большего целого значения  $N_c$  учетом начальных и/или конечных условий, заранее известных нулевых областей сигнала, возможностями аппроксимации на каждом новом интервале дискретизации заданным заранее количеством точек.

Максимальная вычислительная сложность дискретного вейвлет-преобразования (прямого и обратного) определяется количеством операций, равным  $4LN$  операций, где  $N$  – число отсчетов в сигнале,  $L$  – число коэффициентов импульсной характеристики фильтров анализа и синтеза.

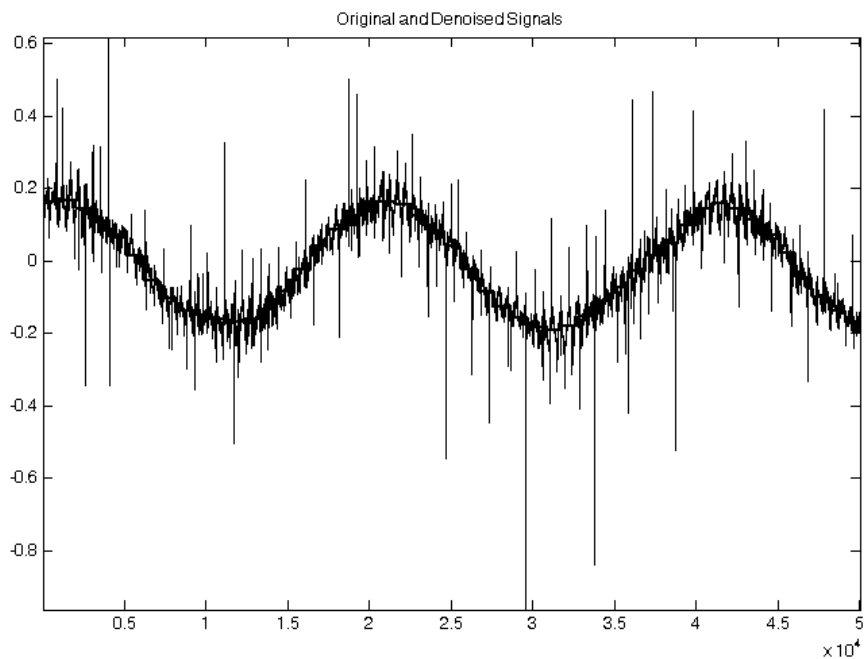
Правила и рекомендации по выбору материнского (базового) вейвлета для задач первичной обработки сигналов в настоящий момент не выработаны [4]–[7]. Наиболее распространенным и известным способом подбора материнского вейвлета является эмпирический метод, в ходе которого экспериментально оцениваются как качественные, так и количественные характеристики всего процесса, например, такие как степень искажения сигнала и время преобразования.

Для исследования возможности применения вейвлет-преобразования для цифровой обработки сигналов измерительных каналов был проведен ряд апробаций по очистке экспериментальных данных, полученных в результате измерения тока в обмотке статора электродвигателя и магнитной индукции в воздушном зазоре того же двигателя, который является приводным для агрегатов циклического действия металлургического производства. Результаты обработки практических сигналов различными вейвлетами разных порядков и уровней приведены на рис. 4–8.

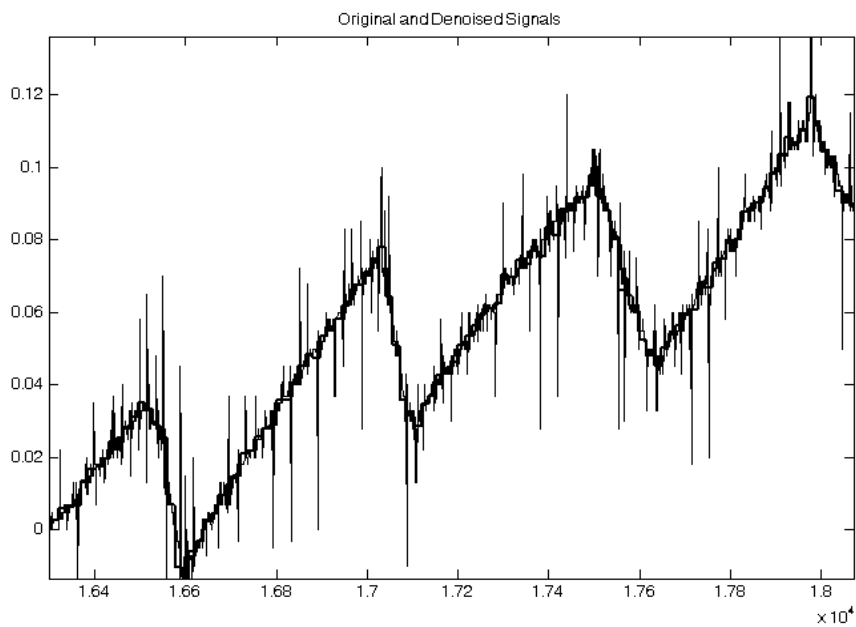
Выбор используемого вейвлета и глубины разложения в общем случае зависит от свойств конкретного сигнала и требований к точности восстановления. Глубина разложения по базисному вейвлету влияет на масштаб отсеиваемых деталей. При его увеличении модель вычитает шум все большего уровня, пока не наступит «переукрупнение» масштаба деталей и преобразование начнет искажать форму исходного сигнала. Необходимо отметить, что при дальнейшем увеличении глубины разложения преобразование формирует сглаженную версию исходного сигнала, в результате чего отфильтровывается не только шум, но и некоторые локальные особенности.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- при обработке экспериментальных данных вейвлетами высоких порядков информация о сигнале в целом не теряется, однако происходит «переукрупнение», что сильно сглаживает локальные особенности сигнала. Анализ такого сигнала упрощает выявление его основных характерных свойств;
- использование фильтра меньшей силы позволяет лучше отслеживать пики и локальные особенности сигнала. Анализ локальных особенностей позволяет не только определить характер и параметры помех, но и четко локализовать «особые точки» сигнала: выбросы, пропущенные значения, резкие скачки уровня и т. д.;
- восстановление близкой к исходной форме сигнала можно достигнуть только при использовании дискретного вейвлет-преобразования;
- использование фильтрации на основе пакетного вейвлет-преобразования нецелесообразно по причине больших требований к вычислительным и временным ресурсам.

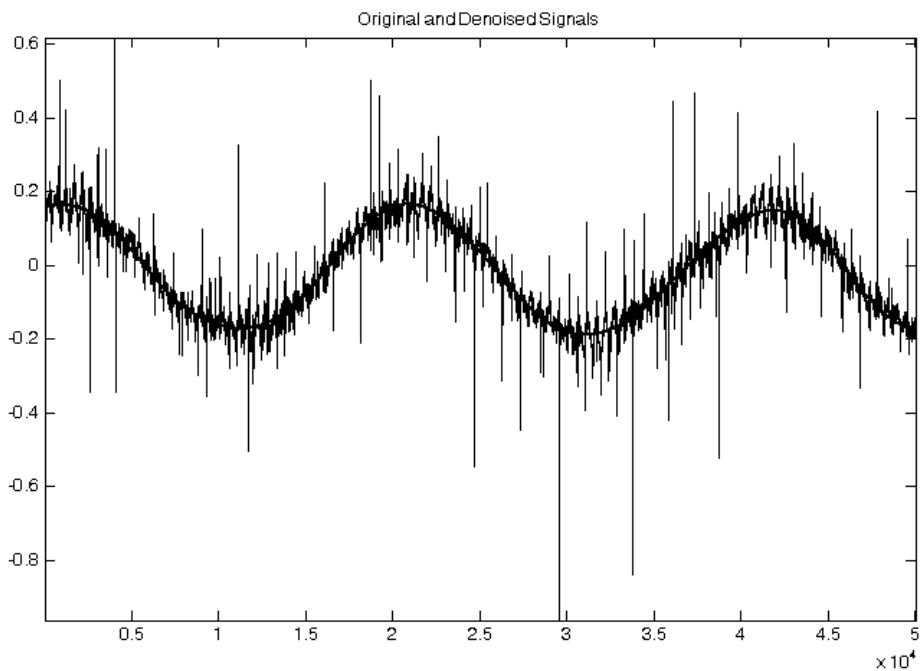


А

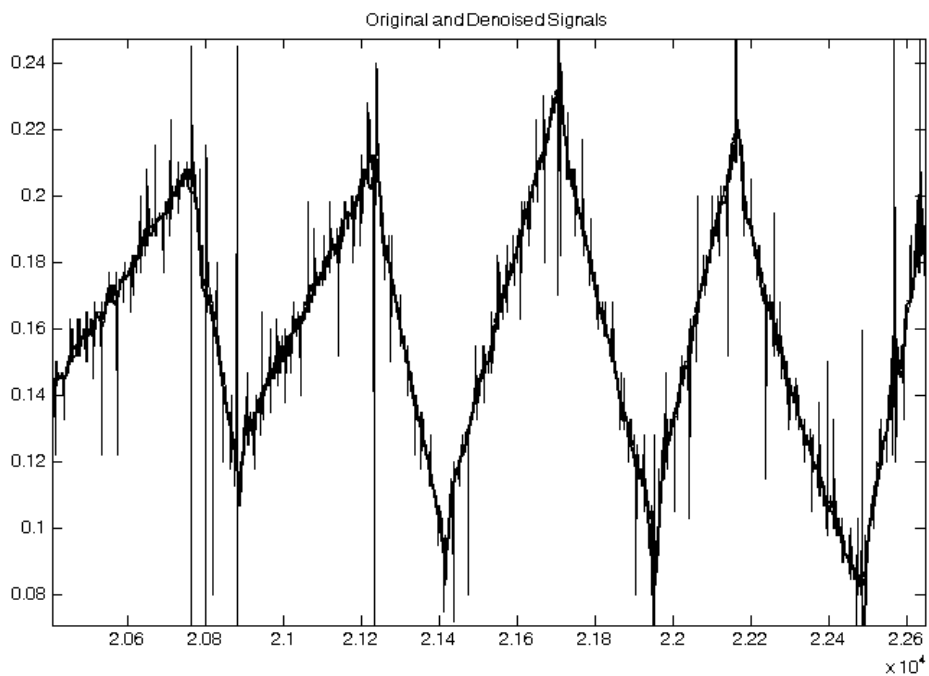


Б

Рис. 4. Результат обработки вейвлетом Хаара 12 порядка (А) и 4 порядка (Б)

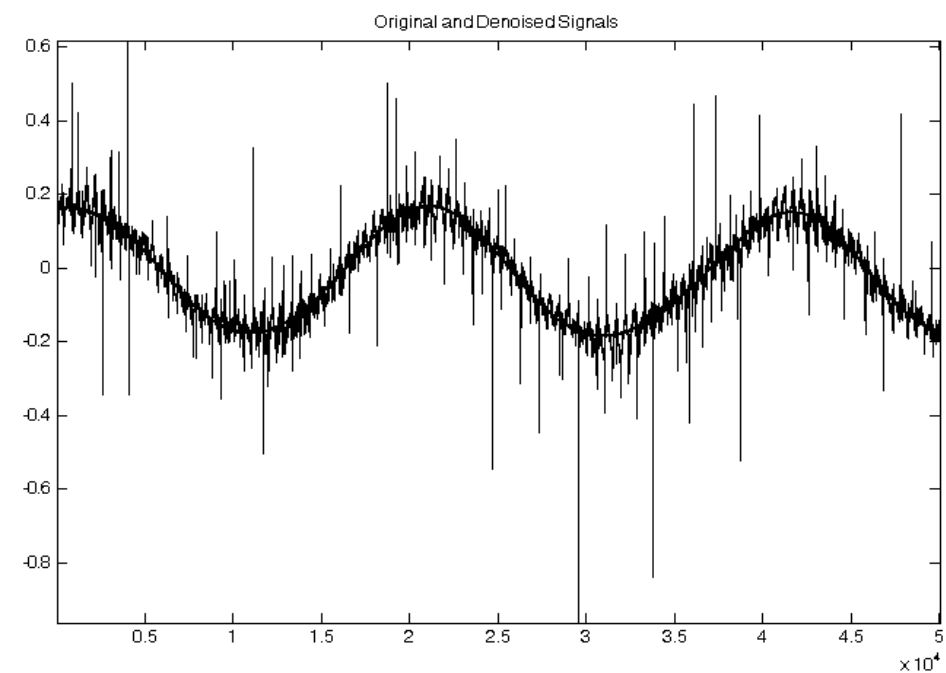


А

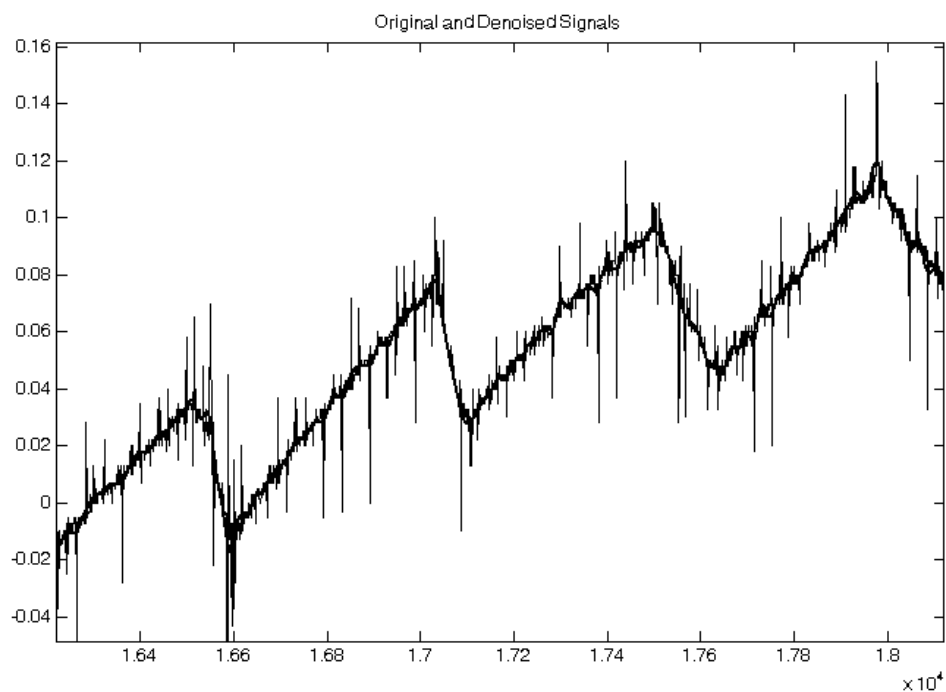


Б

Рис. 5. Результат обработки вейвлетом Добеши 12 порядка (А) и 4 порядка (Б)

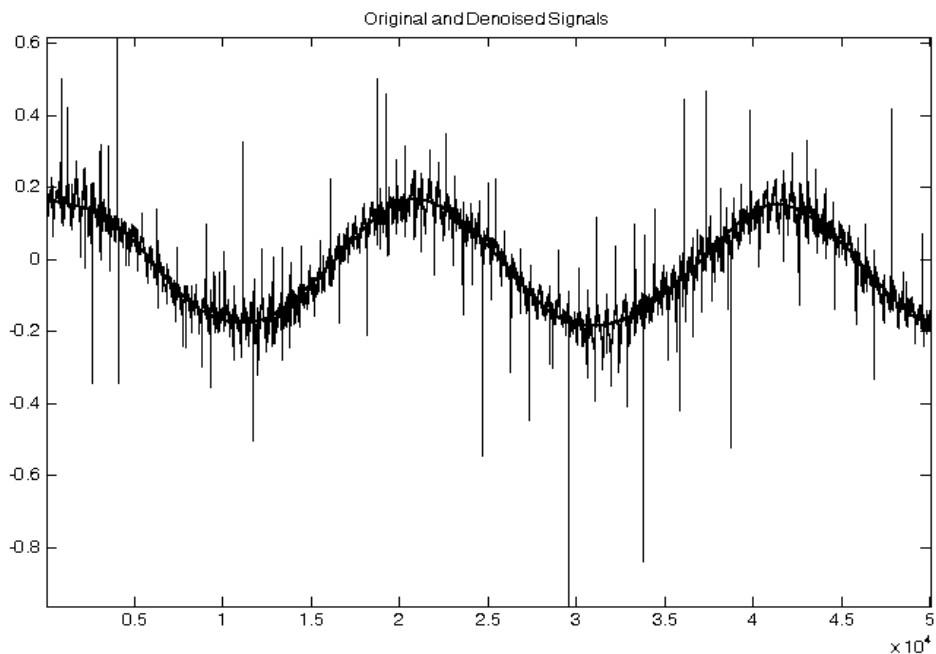


А

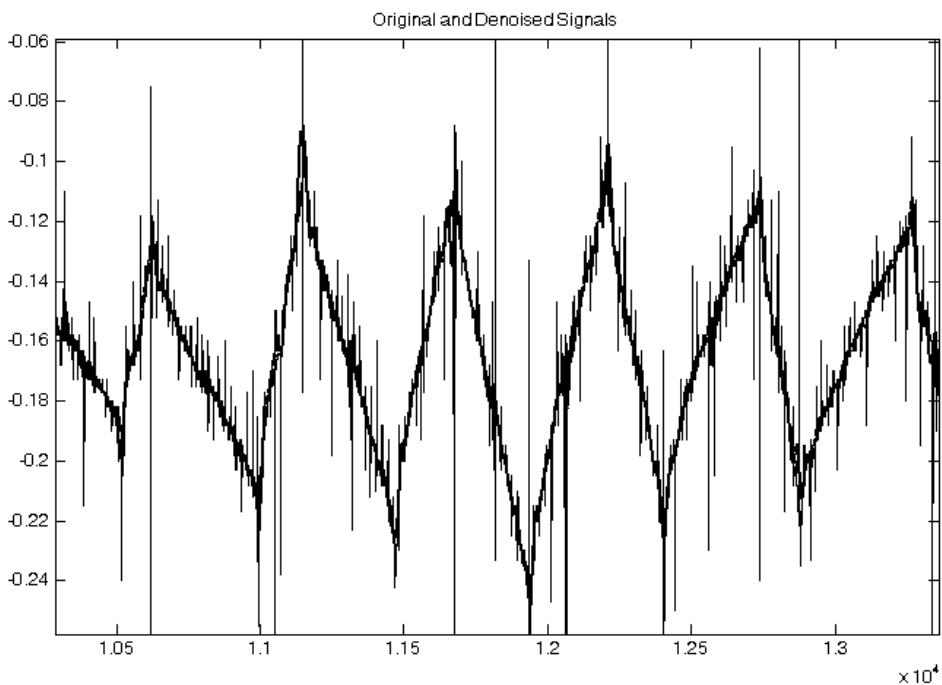


Б

Рис. 6. Результат обработки дискретным вейвлетом Мейера 10 порядка (А) и 4 порядка (Б)



А



Б

Рис. 7. Результат обработки биортогональным вейвлетом 10 порядка (А) и 4 порядка (Б)

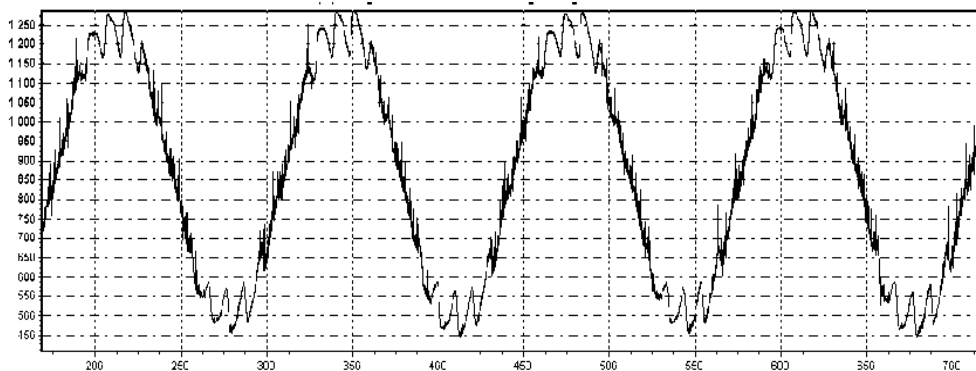


Рис. 8. Экспериментальные данные с датчика магнитной индукции

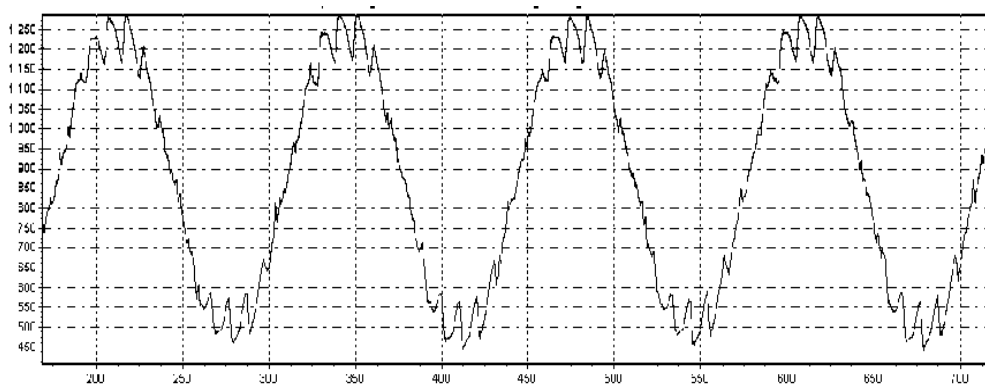


Рис. 9. Отфильтрованный сигнал. Порядок 2, глубина разложения 3

При выборе материнского вейвлета для решения задач фильтрации необходимо соответствие следующим критериям:

1. Пространственная локализация. Кроме частотной локализации, базисные функции должны быть локальными и в пространстве. Необходимость в пространственной локализации преобразования возникает тогда, когда информация о местоположении деталей сигнала является наиболее значимой.

2. Ортогональность и нормируемость. Свойство ортогональности позволяет получать независимую информацию на разных масштабах и упрощает многие вычисления. Нормируемость обеспечивает сохранение величины информации на разных этапах преобразования.

3. Возможность построения вейвлета с компактным носителем. Под компактным носителем непрерывной функции  $f(x)$ , обращающейся в ноль вне некоторого ограниченного интервала, понимают наименьшую замкнутую область, вне которой  $x$  тождественно равна нулю.

4. Возможность точного восстановления сигнала. Прямое и обратное вейвлет-преобразование должно обеспечивать точную, локальную реконструкцию сигнала в целом на заданном промежутке времени.

5. Быстрые алгоритмы вычисления. Невозможность практической реализации преобразования в реальном масштабе времени сводит на нет все его положительные свойства.

Проведенные эксперименты показали, что вейвлет-преобразование с использованием функций Добеши является приемлемым для решения рассматриваемой задачи, отвечает всем вышеперечисленным требованиям и может быть рекомендовано для дальнейшего использования.

Выбранный в качестве материнского базиса вейвлет Добеши обладает следующими свойствами:

- функции имеют конечное число нулевых значений, т. е. система вейвлетов Добеши обладает свойствами гладкости и исключения моментов;
- функции обладают свойствами компактности носителя (т. е. быстро нарастают и быстро спадают) и ортогональности, что обуславливает возможность точного восстановления произвольного сигнала;
- вейвлеты Добеши обладают свойствами как классической вейвлет-функции, так и скейлинг-функции, что делает возможным кратномасштабный и быстрый вейвлет-анализ.

### **Выводы**

Результаты работы показали, что основным отличием вейвлет-фильтрации от традиционных методов выделения полезных сигналов из помех и шумов является малая зависимость параметров вейвлетного фильтра от характеристик спектра анализируемого сигнала. Это позволяет избежать трудностей, которые сопровождают выбор параметров частотно-передаточной функции традиционного фильтра, когда слишком узкое частотное окно приводит к искажению формы полезного сигнала и ухудшению разрешающей способности системы, а слишком широкое окно – к неэффективности процесса фильтрации из-за большого уровня шумов в выходном сигнале. Это, в свою очередь, повышает точность управления и диагностирования систем циклического действия металлургического производства за счет устранения артефактов в задачах управления и выявления наиболее значимых признаков при диагностировании систем.

### **Литература**

1. Андреев М. А., Андреев А. Н., Липилина А. П. Использование методов активно-пассивного эксперимента при идентификации параметров регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2009. Вып. 16. С. 30–36.
2. Андреев А. Н., Колесниченко Д. А. Вариативность методов первичной цифровой обработки сигналов датчиков в асинхронном электроприводе // Системы управления и информационные технологии. 2016. № 4.1 (66). С. 203–206.
3. Андреев А. Н., Колесниченко Д. А., Колесниченко Н. М. Система управления исполнительными механизмами циклического действия с организацией канала первичной обработки сигналов датчиков при обеспечении режимов энергосбережения прокатного производства // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. № 3 (78). С. 12–19.
4. Чуи Т. К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. 412 с.

5. Andreev A. N., Kolesnichenko D. A., Kolesnichenko N. M. Measuring and Primary Processing of Signals of a Sensor of Magnetic Induction in the Working Zone of an Electromechanical System // *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61. Iss. 8. P. 812–816.

6. Daubechies I. *Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets*. 1998. Vol. 41. P. 909–996.

7. Daubechies I. Recent Results in Wavelet Applications // *Proceedings of SPIE Aerosense Symposium*, 1999. P. 23–31.

### References

1. Andreev M. A., Andreev A. N., Lipilina A. P. Ispol'zovanie metodov aktivno-passivnogo eksperimenta pri identifikatsii parametrov reguliruemyykh asinkhronnykh elektroprivodov [The application of methods of active and passive experiments while identifying parameters of the variable speed asynchronous electric drive]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы: Mezhvuzovskii sb. nauch. tr.* [Electrotechnical systems and complexes: Inter-university collection of research papers]. Magnitogorsk, 2009, vol. 16, pp. 30–36.

2. Andreev A. N., Kolesnichenko D. A. Variativnost' metodov pervichnoitsifrovoy obrabotki signalov datchikov v asinkhronnom elektroprivode [Variety of methods of primary signal processing from sensors in the variable speed asynchronous electric drive]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technologies], 2016, no. 4.1 (66), pp. 203–206.

3. Andreev A. N., Kolesnichenko D. A., Kolesnichenko N. M. Sistema upravleniia ispolnitel'nymi mekhanizmami tsiklicheskogo deistviia s organizatsiei kanala pervichnoi obrabotki signalov datchikov pri obespechenii rezhimov energosberezheniia prokatnogo proizvodstva [Control system of executive cyclic action mechanisms with organization of the channel for primary signal processing from sensors to provide the energy saving modes of rolling production]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepovets State University Bulletin], 2017, no. 3(78), pp. 12–19.

4. Chui T. K. *Vvedenie v veivlety* [An introduction to wavelets]. Moscow: Mir, 2001. 412 p.

5. Andreev A. N., Kolesnichenko D. A., Kolesnichenko N. M. Measuring and primary processing of signals of a sensor of magnetic induction in the working zone of an electromechanical system. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, iss. 8, pp. 812–816.

6. Daubechies I. *Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets*, 1998, vol. 41, pp. 909–996.

7. Daubechies I. Recent Results in Wavelet Applications. *Proceedings of SPIE Aerosense Symposium*, 1998, pp. 23–31.

---

**Для цитирования:** Андреев А. Н., Колесниченко Д. А. Метод и алгоритм обработки сигнала для управления и диагностирования объектов циклического действия металлургического производства // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2019. № 2 (89). С. 9–22. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-2-89-1

**For citation:** Andreev A. N., Kolesnichenko D. A. Method and algorithm of signal processing for control and diagnostics of cyclic action mechanisms in metallurgical production. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2019, no. 2 (89), pp. 9–22. DOI: 10.23859/1994-0637-2019-2-89-1