

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Е.В. БАСОВА, аспирант., НТУ «ХПИ»;
А.А. РЕПЕТА, студент, НТУ «ХПИ»

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В роботі наведені області застосування вейвлетних перетворень. Представлене обґрунтування перспектив застосування вейвлет-аналізу в технології машинобудування. Розглянуті переваги даного методу над перетворенням Фур'є. Наведені способи розрахунку шорсткості поверхні за допомогою вейвлет-аналізу.

В работе приведены области использования вейвлет-преобразований. Представлено доказательство перспектив использования вейвлет-анализа в технологии машиностроения. Рассмотрены преимущества данного метода над преобразованием Фурье. Приведены способы расчета шероховатости поверхности с помощью вейвлет-анализа.

The paper presents the application of wavelet transforms. Prospects for the application of wavelet analysis in mechanical engineering were presented. The advantages of this method over Fourier transforms were considered. Methods for calculating the surface roughness using wavelet analysis were given.

Введение. Вейвлет-анализ является на сегодняшний день одной из самых перспективных технологий анализа данных, его инструменты находят применение в самых различных сферах интеллектуальной деятельности.

Вейвлетное преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа, типичный представитель которого – классическое преобразование Фурье. Термин "вейвлет" (wavelet) в переводе с английского означает "маленькая (короткая) волна". Вейвлеты - это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны во времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) посредством ее сдвигов и растяжений по оси времени. Вейвлет-преобразования рассматривают анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте. Как правило, вейвлет-преобразования (WT) подразделяют на дискретное (DWT) и непрерывное (CWT).

DWT используется для преобразований и кодирования сигналов, CWT – для анализа сигналов. Вейвлет-преобразования в настоящее время принимаются на вооружение для огромного числа разнообразных применений, нередко заменяя обычное преобразование Фурье. Это наблюдается во многих областях науки. В последнее время существует тенденция к использованию вейвлет-анализа в машиностроении для описания шероховатости, которую рассматривают как аналог сигнала.

Теория вейвлетов не является фундаментальной физической теорией, но она дает удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала.

Постановка задачи. Одна из наиболее актуальных задач получения качественной поверхности – задача снижения шероховатости. Одним из параметров качества механически обработанной поверхности считается высота ее микронеровностей, которую можно выявить из профилограммы.

Профиль обработанной поверхности (даже после высококачественной обработки) не является идеально гладким. Он имеет большое количество отклонений различной формы и размеров и нуждается в последующем анализе, который можно осуществить посредством преобразования Фурье. Недостатком этого метода является невысокая точность представления локальных особенностей сигналов.

Вейвлетный анализ – это современный и перспективный метод обработки данных, одним из его преимуществ является способность выполнения местного анализа, то есть анализ ограниченной области большого сигнала. Аппарат вейвлет-анализа получил своё развитие в начале 1980-х годов в работах Морле, Гросмана и некоторых других учёных [1-3]. Результаты, полученные в самых различных областях с помощью вейвлет-анализа, усилили интерес к этому направлению и способствуют его непрерывному развитию, в том числе и в области технологии машиностроения. В работе Дианова А. А. [4] вейвлет-анализ использовался для исследования профиля поверхности деталей с износостойкими покрытиями, обработанных прерывистыми кругами. Хвостиков А.С., Курдюков В.И. и др. исследователи применили вейвлет-анализ для диагностики режущего инструмента [5, 6].

Однако проведенный анализ современных работ показал, что научно-техническая литература недостаточно рассматривает результаты применения вейвлет-анализа для исследования шероховатости после процесса высокоскоростного фрезерования.

В настоящий момент существует необходимость разработки алгоритма описания шероховатости поверхности детали на базе вейвлет-анализа, аналогично принципу обработки широкополосного случайного шума из измеренного сигнала, а также разрешения группы дефектов сплошности в изделии и количественной оценки геометрических параметров отдельных дефектов.

Материнский вейвлет и вейвлет-функции. Существует большое количество различных материнских вейвлет функций: гладкие вейвлет функции, функции с простым математическим описанием, вейвлет с простыми связанными функциями, сжатые вейвлет функции (Добеши) [7,8]. Материнский вейвлет используется для преобразования, масштабирования и трансформирования остальных функций (1):

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-a}{b}\right), \quad (1)$$

где b – параметр перевода и параметр масштабирования.

Непрерывное вейвлет-преобразование. Непрерывное вейвлет - преобразование похоже на преобразование Фурье (ПФ) [9], за исключением того, что вместо основания бесконечных синусов и косинусов различных частот SWT сравнивает сигнал с растяжением и репринтами версий одной основной функции – материнским вейвлетом. Определяется SWT следующим образом (2):

$$W_{(a,b)} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(s(t) / \sqrt{|a|} \right) \psi((t-b)/a) dt, \quad (2)$$

где $s(t)$ – любой, зависящий от времени, сигнал; $\psi(t)$ – материнский Вейвлет (расширенный/масштабированный) ; b – сдвиг во времени; $W_{(a,b)}$ – вычисляемый

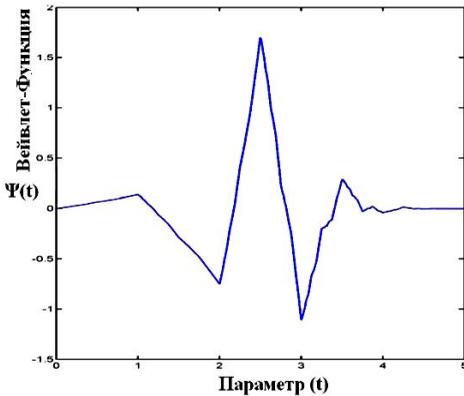


Рисунок 1 – Вейвлет Добеши

вейвлет-коэффициент масштаба a и положения b .

Временные и частотные расширения SWT зависят от масштаба. В области высокочастотной гармоники наблюдается хорошее разрешение во времени, но частотное разрешение оставляет желать лучшего. Это связано с тем, что вейвлет-анализ хорошо локализован во времени, но плохо локализован по частоте. В области низкочастотной гармоники наоборот наблюдается хорошее частотное разрешение и слабое временное разрешение. Это означает, что для сигнала с быстрыми изменениями по частоте на высоких частотах и малыми изменениями - в области низких частот, вейвлет-анализ в результате даст лучшее временное представление частоты сигнала, чем ПФ (рис. 1).

Программное обеспечение. Среди профессионального и наиболее современного программного обеспечения, способного решать довольно сложные задачи практического применения вейвлетов и вейвлет-преобразований, можно выделить три основных программных пакета Mathcad 14 Professional, Matlab 7, Mathematica 4/4.1. Эти программные комплексы применимы как и для самого анализа свойств вейвлет-функций и вейвлет-преобразований, так и для их использования в задачах обработки цифровых сигналов и изображений промышленных деталей. Непосредственно для работы с вейвлетами используются соответствующие расширения, интегрированные в эти программные пакеты: Wavelet Toolbox (Matlab), Wavelet Extension Pack (Mathcad), Wavelet Explorer (Mathematica).

Математическая модель вейвлет-анализа в исследовании шероховатости поверхности. Любая поверхность представляет собой не только основную кривую шероховатости, но и микрошероховатость наложенную на контур основной [10,11]. Представим шероховатость в виде сигнала, а микрошероховатость в виде шумов. Для повышения качества детали необходимо уменьшить шероховатость поверхности. Следовательно сгладить микрошумы с помощью вейвлет-преобразования исходного сигнала.

Модель такой шероховатости можно записать следующим образом (3):

$$S(t) = f(t) + \sigma e(t), \quad (3)$$

где $f(t)$ – основная кривая шероховатости, $e(t)$ – микрошероховатость, σ – уровень микрошероховатости, $s(t)$ – исследуемая шероховатость.

В большинстве случаев можно предположить, что функция $e(t)$ описывается моделью Гаусса, и информация о микрошероховатости содержится в высокочастотной области спектра, а о шероховатости – в низкочастотной, если проводить аналогию с сигналом.

Для такой модели удаление микрошероховатости при помощи вейвлет-преобразования выполняется в четыре этапа: 1) Разложение кривой шероховатости по базису вейвлетов; 2) Выбор порогового значения микрошероховатости для каждого уровня разложения. 3) Пороговая фильтрация коэффициентов детализации. 4) Реконструкция кривой.

Традиционно для решения таких задач применяется известный из практики фильтрации метод подавления высокочастотных составляющих спектра. Кроме того, с использованием вейвлетов есть еще один метод – ограничение уровня детализирующих коэффициентов. Задав определенный порог для их уровня и «отсекая» коэффициенты ниже этого порога, можно значительно снизить уровень шума и сжать сигнал. Важным моментом является то, что пороговый уровень можно устанавливать для каждого коэффициента отдельно. Операция сжатия сигналов с удалением малозначимых значений вейвлет-коэффициентов также выполняется на основе определенных пороговых ограничений их значений, и во многом практически тождественна операциям удаления шумов.

Со статистической точки зрения такая методика представляет собой не-

параметрическую оценку регрессионной модели шероховатости с использованием ортогонального базиса. Методика наилучшим образом работает на достаточно гладких кривых, т.е. на шероховатости, в разложении которой лишь небольшое количество коэффициентов детализации значительно отличается от нуля.

Выбор используемого вейвлета и глубины разложения, в общем случае, зависит от свойств конкретной шероховатости. Более гладкие вейвлеты создают более гладкую аппроксимацию кривой, и наоборот – "короткие" вейвлеты лучше отслеживают пики аппроксимируемой функции.

Глубина разложения влияет на масштаб отсеиваемых деталей. Другими словами, при увеличении глубины разложения модель вычитает микрошероховатость все большего уровня, пока не наступит "переукрупнение" масштаба деталей и преобразование начнет искажать форму исходной кривой. Интересно, что при дальнейшем увеличении глубины разложения преобразование начинает формировать сглаженную версию исходной кривой шероховатости, т.е. отфильтровывается не только шум, но и некоторые локальные особенности (выбросы) исходной кривой.

Анализ результатов. При использовании любой технологии получения поверхностей деталей на формирование микрорельефа оказывают влияние многочисленные факторы, включая чисто случайные, независимые друг от друга. Это практически означает, что профиль реальной поверхности можно рассматривать как реализацию случайной функции, а саму микрогеометрию – как реализацию случайного поля. Задачу правильной фильтрации аналогового сигнала профиля мы предпочли решать посредством методики фильтрации профиля с помощью его амплитудного спектра. Известно, что информацию о шероховатости профиля содержит именно падающая часть спектра профиля [12].

Отметим, что при выборе порога микронеровностей используют, как правило, критерии, минимизирующие квадратичную функцию потерь для выбранной модели. Существует множество таких критериев, но их рассмотрение выходит за рамки этой статьи. В качестве примера приведем выражение для так называемого "универсального" критерия, вполне подходящего для модели Гаусса микрошероховатости с матожиданием 0 и дисперсией 1 (4):

$$\theta = \sqrt{2 \ln(n)}, \quad (4)$$

где n – длина выборки, θ – пороговое значение.

Если уровень микронеровностей (для гауссовского распределения – это среднеквадратичное отклонение) отличается от 1, то значение порога должно быть масштабировано на эту величину.

Для фильтрации коэффициентов детализации, выполняемой на следующем этапе, лучше использовать метод "мягкой" пороговой фильтрации. При этом коэффициенты, абсолютное значение которых меньше порогового, обнуляются, а остальные – "подтягиваются" к нулевому значению на величину порога(5):

$$y = \begin{cases} x + \theta, & \text{если } x < 0 \text{ и } |x| > \theta \\ x - \theta, & \text{если } x > 0 \text{ и } |x| > \theta, \\ 0, & \text{если } |x| \leq \theta \end{cases} \quad (5)$$

где x – значение коэффициента до фильтрации, y – значение коэффициента после фильтрации, θ – порог.

На рис. 2, в соответствии с вышеизложенным материалом, нами представлено графическое отображение результата очистки некоторой шероховатости с элементами микронеровностей с помощью гладкого вейвлета (Добеши 7-го порядка, 5 уровней разложения), на рис.3 – то же, но с использованием более короткого вейвлета (Добеши 2-го порядка, лучше отслеживаются пики сигнала), на рис.4 – результат "переукрупнения" (7 уровней разложения, сглаживаются локальные особенности кривой).

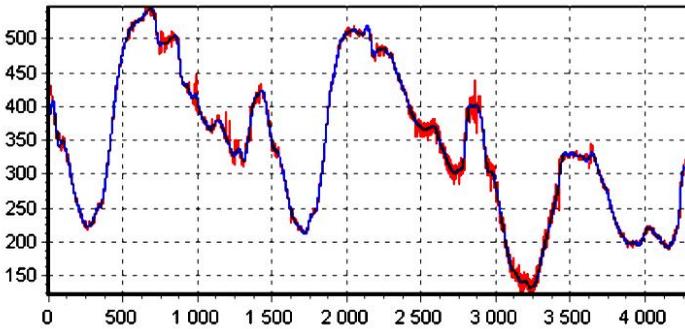


Рисунок 2 – Очистка вейвлетом Добеши 7-го порядка, 5 уровней разложения

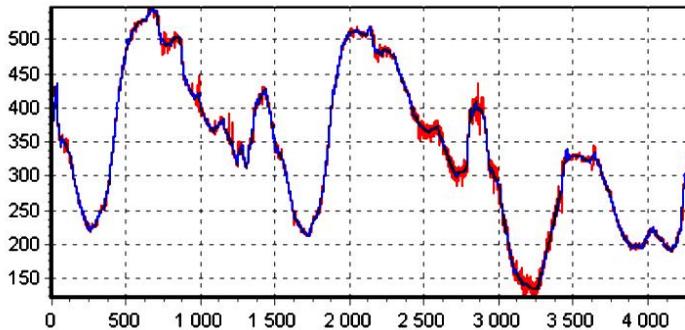


Рисунок 3 – Очистка вейвлетом Добеши 2-го порядка

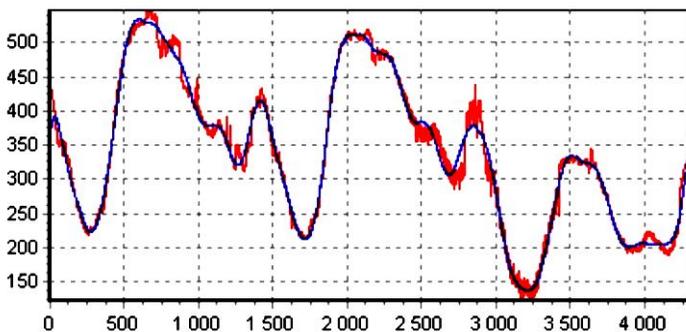


Рисунок 4 – Очистка вейвлетом Добеши в 7 уровней разложения

В результате проведённых экспериментов с использованием вейвлета Добеши мы определили, что структура исследуемого сигнала на самых больших частотах имеет фрактальный характер, следовательно, для её анализа необходимо применение метода стохастического анализа (теории случайных процессов), что в результате позволит оценить и контролировать качество механообработанных поверхностей. Следует отметить, что при стохастическом анализе шероховатости поверхности изначально необходимо установить корреляции размерностей, что, по сути, является базой автоматизации контроля качества поверхностей и критерием различия исследуемых величин от шума.

Выводы. Вейвлет-анализ является на сегодняшний день одной из самых перспективных технологий анализа данных. Вейвлет-преобразования рассматривают анализируемые временные функции в терминах колебаний, локализованных по времени и частоте. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве. Результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала (распределение энергии сигнала по частотным составляющим), но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала.

Профиль обработанной поверхности (даже после высококачественной обработки) не является идеально гладким. Он имеет большое количество отклонений различной формы и размеров и нуждается в последующем анализе, который можно осуществить посредством преобразования Фурье. Отметим, что профили реальных поверхностей с точки зрения математики представляют собой реализацию случайных функций. Из математики широко известно, что наибольшей информацией о профиле, как о случайной функции, облада-

ют функции плотности распределения его ординат и углов наклона. Отсюда следует вывод, что такие функции целесообразно использовать в качестве критерия оценки и контроля микрогеометрии поверхности. Применение вейвлет-анализа позволяет в полной мере оценить преимущества использования таких графических представлений различных функций в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии как графики функций распределения ординат и углов наклона профиля, графики опорных кривых (кривых Аббота), непосредственно графические изображения самих профилей, и, в идеале, микротопографию поверхности. Выбор используемого вейвлета и глубины разложения, в общем случае, зависит от свойств конкретной шероховатости. Более гладкие вейвлеты создают более гладкую аппроксимацию кривой, и наоборот – "короткие" вейвлеты лучше отслеживают пики аппроксимируемой функции.

Таким образом, результатом данной работы является предложение и обоснование перспектив применения альтернативного метода проведения анализа, который представляет собой особый тип линейного преобразования сигналов и отображаемых этими сигналами фактических данных о процессах и свойствах природных сред и объектов.

Список литературы: 1. *Grossmann A.* / Decompression of Hardy Function into Square Integrable Wavelets of Constant Shape / *A. Grossman, J. Morlet* // *SIAM Journal Mathematical analysis.* – 1984. – Vol. 15. – P. 723-736. 2. *Morlet J.* Sampling Theory and Wave Propagation in NANO ASI Series / *J. Morlet* // *Acoustic signal. Image processing and recognition.* – 1983. – Vol.1. – P.233-261. 3. *Morlet J.* Wave Propagation and Sampling Theory / *J. Morlet, G. Arens, I. Fourgeau et al.* // *Geophysics.* – 1982. – Vol. 47. – P. 203-236. 4. *Дианов А.А.* Технологическое обеспечение качества деталей с износостойкими покрытиями за счёт управления параметрами точности основы и покрытия [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / *Дианов Александр Андреевич*; Алтайск. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Б., 2010. – 16 с. 5. *Хвостиков А.С.* Диагностика износа режущего инструмента на основе вейвлет-анализа сигнала виброакустической эмиссии [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / *Хвостиков Александр Станиславович*; Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2007.–157 с. 6. *Кудряков В.И.* Перспективы применения вейвлет-анализа для диагностики износа режущего инструмента [Текст] / *В.И. Кудряков, А.К. Остапчук, В.Е. Овсянников и др.* // *Известия Тульского государственного университета. Серия : Технические науки.* Т., 2009. – №4. – С. 253-256. 7. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения [Текст] / *Н.М. Астафьева* // *Успехи физических наук.* – 1996. – т.166. – № 11. – С. 1145-1170. 8. *Дремлин И.Л.* Вейвлеты и их использование [Текст] / *И.Л. Дремлин* // *Успехи физических наук.* – 2001. – т.171. – № 5. – С. 465-501. 9. *Дьяконов В.,* MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник [Текст] / *В. Дьяков, И. Абраменкова.* – СПб.: Питер, 2002. – 608 с. 10. Теория и применение вейвлетов [Электронный ресурс]. Теория и применение вейвлет-анализа / *Я. А. Илюшин* // Вейвлеты. – 2009. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM). – Библиогр.: в конце ст. 11. *Петухов А.П.* Введение в теорию базисов всплесков [Текст]/ *А.П. Петухов.* – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1999. – 132с. 12. *Мусалимов В.М.* Динамика фрикционно-го взаимодействия / *В.М Мусалимов, В.А. Валетов* – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.

Поступила в редколлегию 11.04.2011