

УДК 004.021:004.942:621.914.1

В.И. Дубровин, П.А. Каморкин, Ю.В. Твердохлеб

## **МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ВОЛНИСТОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОФИЛОГРАММ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА**

*Аннотация:* предложен метод делинеации сигнала сложной формы на независимые компоненты. При разработке метода в качестве методов исследования использованы: математический аппарат вейвлет-преобразования, методы теории информации и методы математической статистики. Разработанный метод применен к задаче выделения профилей волнистости и шероховатости профилограмм металлических поверхностей и показана его эффективность.

*Ключевые слова:* вейвлет-преобразование, разделение сигнала, оптимальная декомпозиция сигнала, профилограмма, оценка качества обработки поверхности.

### **Введение**

Повышение качества выпускаемой продукции требует решения многочисленных проблем в самых различных областях. Технологические проблемы относятся к ряду важнейших, так как их успешное решение определяет, в конечном итоге, эксплуатационные показатели спроектированных изделий. Одной из таких проблем является оценка влияния шероховатости, волнистости и отклонений формы поверхностей деталей на их функциональные свойства.

Эксплуатационные свойства машин и приборов, их точность, надежность и долговечность зависят от качества поверхности, ее микрогеометрического и физико-механического состояния. Качество обработанной поверхности характеризуется двумя основными признаками: физико-механическими свойствами поверхностного слоя металла и степенью шероховатости поверхности. Изучение качества поверхности и, в частности, шероховатости является важной инженерной задачей [1].

Действующая методика разделения исходного профиля на профили волнистости и шероховатости представлена в ДСТУ 4287:2002 «Технічні вимоги до геометрії виробів. Структура поверхні. Профільний метод» и ДСТУ 4288:2002 «Структура поверхні. Профільний метод. Правила и процедури оцінювання структури поверхні». Данная методика предполагает получение профиля шероховатости с помощью цифрового профильного фильтра; при этом его длина волны соответствует базовой длине профиля, которую определяют после процедуры вычисления ряда параметров для

---

© В.И. Дубровин, П.А. Каморкин, Ю.В. Твердохлеб, 2015

исходного профиля. После этого определяют класс шероховатости для поверхности.

Недостатком данной методики является то, что каждый параметр фильтра определен на несколько классов шероховатости.

Для решения этой проблемы перспективно использовать одно из активно развивающихся направлений цифровой обработки сигналов – вейвлет-преобразование. Уникальные математические свойства вейвлетов сделали их мощным инструментом анализа и последующего синтеза любого сигнала. Свойство ортогональности позволяет получать независимую информацию на разных масштабах. Нормируемость обеспечивает сохранение информации на различных этапах преобразования. Свойство локальности помогает получить характеристики конкретных областей, в которых проявляют себя изучаемые частоты (масштабы). Полнота вейвлет-базиса, образованного сжатиями и сдвигом некоторой функции, обеспечивает возможность совершить обратное вейвлет-преобразование.

Вышеописанные свойства вейвлет-преобразования и теория информации позволяют определить оптимальный уровень декомпозиции сигнала и выбрать оптимальный вейвлет-базис, что позволит решить задачу разделения профиля.

Таким образом, целью данной работы является разработка новых и модификация существующих методов для разделения исходной профилограммы на профили волнистости и шероховатости.

### **Определение параметров шероховатости и волнистости поверхности**

Под качеством поверхности следует понимать совокупность свойств (шероховатость, остаточные напряжения, поверхностная твердость и другие), определяющих пригодность поверхностного слоя для использования его по назначению. А поскольку поверхность должна выполнять свои функции в заданных пределах, качество ее выполнения должно соответствовать определенным нормам (допускам). Все работы велись в соответствии с ГОСТ 2789:73 [2], ДСТУ 25142:2009 [3] и международным стандартом ISO 468-1982 [4].

Определение шероховатости конкретной поверхности начинают с того, что выбирают направление измерения неровностей. Поверхность рассекают перпендикулярной плоскостью, получая реальный профиль. Относительно этого профиля проводят базовую линию. На определенном участке этой линии выделяют неровности, характеризующие шероховатость поверхности [1]. По требованию ГОСТ 2789-73 определены следующие параметры шероховатости: среднеарифметическое отклонение профиля ( $Ra$ ), высота неровностей профиля по 10 точкам ( $Rz$ ), наибольшая высота профиля ( $Rmax$ ), средний шаг неровностей ( $Sm$ ), средний шаг местных вы-

ступов профіля ( $S$ ), относительная длина профіля ( $tp$ ). Важнейшим параметром, характеризующим шероховатость, является среднее арифметическое отклонение профіля  $Ra$ . Соотношение параметров  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  и базовой длины  $l$ , обусловленные [2], представлены в таблице 1.

Таблица 1

Соотношение параметров  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  и базовой длины  $l$

$Ra$ , мкм	$Rz = Rmax$ , мкм	$l$ , мм
0 – 0.025	0 – 0.10	0.08
0.025 – 0.4	0.10 – 1.6	0.25
0.4 – 3.2	1.6 – 12.5	0.8
3.2 – 12.5	12.5 – 50	2.5
12.5 – 100	50 – 400	8.0

### Определение оптимальной декомпозиции сигнала

Сигнал, имеющий размерность  $N$ , может быть разложен многоуровневым одномерным вейвлет-преобразованием на  $2^{N/2}$  уровней, которые представляют собой набор аппроксимирующих ( $cA$ ) и детализирующих ( $cD$ ) коэффициентов. Число уровней разложения достаточно велико и установление ограничения глубины декомпозиции во многом зависит от опыта исследователя.

В работе Р.Р. Кофмана [5] для получения оптимальной декомпозиции сигнала предложено использовать критерий минимума энтропии.

Информационная энтропия – это мера неопределенности или непредсказуемости информации. Энтропия характеризует вероятность  $P$ , с которой устанавливается то или иное состояние, и является мерой хаотичности или необратимости. Все процессы в природе протекают в направлении увеличения энтропии. Термодинамическому равновесию системы, в которую не поступает энергия извне, соответствует состояние с максимумом энтропии. Равновесие, которому соответствует наибольший максимум энтропии, называется абсолютно устойчивым. Таким образом, увеличение энтропии системы означает переход в состояние, имеющее большую вероятность. Необратимые процессы протекают самопроизвольно до тех пор, пока система не достигнет состояния, которому соответствует наибольшая вероятность, а энтропия достигнет своего максимума. Согласно теории К. Шеннона, прирост информации равен утраченной неопределенности системы:

$$H = - \sum_{j=1}^N P_j^2 \log(P_j^2).$$

Суть метода Кофмана состоит в следующем: на очередном уровне разложения сигнала рассчитывается значение суммы энтропий аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения; если полученное значение больше, чем на предыдущем уровне разложения, декомпозицию продолжают, в противном случае предыдущий уровень (уровень, полученный на предыдущей итерации) является заключительным. Итоговая декомпозиция сигнала представляет собой набор уровней: с первого до уровня с минимальной энтропией.

### **Метод вейвлет-делинеации сигнала сложной формы на компоненты**

Авторами разработан метод оптимальной декомпозиции сигнала сложной формы на независимые составляющие [6]. Метод отличается тем, что не использует сопоставление с базой эталонных образцов, но использует критерий минимизации суммарной энтропии вейвлет-коэффициентов обоих компонент сигнала при определении оптимального уровня декомпозиции сигнала. При реализации данного метода используется также восстановление сигнала по аппроксимирующим вейвлет-коэффициентам оптимального уровня декомпозиции сигнала при определении компонент сигнала.

Процедура выделения компонент сигнала состоит из следующих этапов:

1. Вычислить начальное значение энтропии профилограммы;
2. Установить уровень декомпозиции  $i = 2$ ;
3. Разложить сигнал на глубину  $i$ , получая волнистость ( $W_i$ );
4. Вычесть из профиля волнистость, получив шероховатость ( $R_i$ );
5. Вычислить энтропию Шеннона для волнистости и шероховатости поверхности ( $H_{W_i}$  и  $H_{R_i}$ ):  $H_{W_i} = - \sum_{j=1}^N W_{ij}^2 \log(W_{ij}^2)$ ,  
 $H_{R_i} = - \sum_{j=1}^N R_{ij}^2 \log(R_{ij}^2)$ ;
6. Вычислить суммарную энтропию:  $H_i = H_{W_i} + H_{R_i}$ ;
7. Если  $H_i > H_{i-1}$  установить  $i = i + 1$  и перейти к шагу 3;
8. Останов.

### **Применение разработанного метода к задаче разделения профилограммы металлической поверхности на профили волнистости и шероховатости**

Исходными данными служат профилограммы металлической поверхности, полученные путем фрезерования и представленные

в виде дискретных сигналов. Так как средняя часть образца образует область формирования наиболее стабильной шероховатости поверхности, обработке подвергался участок в 16 мм, который одновременно является базовой длиной и длиной оценивания.

Исследовался образец, который был обработан при следующих режимах: частота вращения шпинделя – 1800 об/мин, глубина резания – 0.5 мм, подача – 90 мм/мин, фрезерование встречное. Профилограмма образца показана на рис. 1.

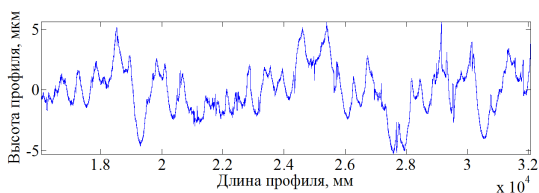


Рис. 1 – Профилограмма образца

Согласно методу, описанному выше, была проведена декомпозиция профилограммы и вычислена на каждом уровне разложения суммарная энтропия Шеннона для профиля волнистости и шероховатости. Минимальная энтропия наблюдалась на 14 уровне разложения (рис. 2-3).

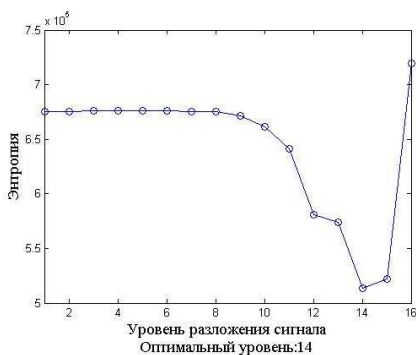


Рис. 2 – Распределение суммарной энтропии по уровням ВП

## Выводы

Авторами предложен метод оптимальной декомпозиции сигнала сложной формы на независимые компоненты с помощью математического аппарата вейвлет-преобразования и теории информации. Метод применен к задаче разделения профилограммы на профили волнистости и шероховатости.

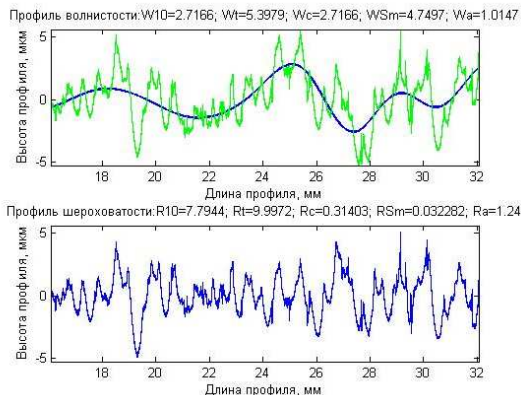


Рис. 3 – Разделение профилограммы

### Список использованных источников

1. Захаров В.И. Взаимозаменяемость, качество продукции и контроль в машиностроении / В.И. Захаров. – СПб.: Машиностроение, 1990. – 302 с.
2. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Взамен ГОСТ 2789-59; введ. 01.01.75. – М.: Госпотребстандарт, 1975. – 7 с.
3. ДСТУ 25142-2009. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 25142-82; введ. 01.02.2009. – К.: Госпотребстандарт, 2009. – 22 с.
4. ISO 468-1982. Surface roughness — Parameters, their values and general rules for specifying requirements. – intr. 01.01.1982. – Switzerland: ISO Central Secretariat. 1982. – 4 p.
5. Coifman R.R. Entropy-based algorithms for best basis selection / R.R. Coifman, Wickerhauser M.V. // IEEE Trans. on Inf. Theory. – 1992. – Vol. 38(2). – P.713-718.
6. Дубровин В.И. Исследование изменений энтропии и энергии на этапах декомпозиции сигнала / В.И. Дубровин, Ю.В. Твердохлеб // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2013. – № 2. – С. 54-58.

Отримано 22.04.2015 р.