

УДК 004.021

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗУ

- Дубровін В. І. канд. техн. наук, професор кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vdubrovin@gmail.com;
- Могильна М. В. студентка кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: marymary309@gmail.com;
- Твердохліб Ю. В. канд. техн. наук, Web Developer ІТ-компанії «Freshcode», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: julia.tverdohleb@gmail.com

Мета роботи. Проаналізувати ефективність використання вейвлет-аналізу для оцінки якості поверхонь металів. Розробити інформаційну технологію програмного продукту для автоматизації процесу оцінки якості обробки металевих поверхонь методом вейвлет-аналізу.

Методи дослідження. Розглянуто основні параметри оцінки обробки металевих поверхонь. Проведено багаторівневу декомпозицію профілограми за допомогою вейвлет функцій.

Отримані результати. Розроблене програмне забезпечення дозволяє розрахувати параметри оцінки обробки металевих поверхонь, чим допомагає звести до мінімуму число рутинних операцій та складних математичних розрахунків, а також надає наочні графіки хвилястості та шорсткості.

Перевагою розглянутого програмного продукту є те, що він – вузьконаправлений, створений саме для аналізу сигналів-профілограм металевих поверхонь і є безкоштовним.

Даний програмний продукт при подальшій розробці зможе бути застосований у машинобудівній (фрезерувальній) галузі та дозволить зменшити витрати на придбання програмної продукції.

Наукова новизна. Розглянуто метод оптимальної декомпозиції сигналу складної форми, який використовує критерій мінімізації сумарної ентропії вейвлет-коефіцієнтів обох його компонент при визначенні оптимального рівня декомпозиції, відновлення сигналу за апроксимуючими вейвлет-коефіцієнтами оптимального рівня декомпозиції при визначенні компонент сигналу, що дозволяє розкласти сигнал складної форми на дві незалежні складові, які характеризують певні властивості об'єкту дослідження. Створено відповідне програмне забезпечення.

Практична цінність. Розроблена інформаційна технологія програмного продукту оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів може бути застосована в аналізі та діагностуванні об'єктів різної природи, зокрема в машинобудівній (фрезеруванні) галузі в наступних задачах: виділення профілів хвилястості та шорсткості профілограм металевих поверхонь.

Ключові слова: вейвлет, дискретне вейвлет-перетворення, розкладання сигналу, профілограма, видалення шумів, ентропія, інформаційна технологія, Matlab, Wavelet Toolbox.

Вступ

Більшість експлуатаційних властивостей деталей та вузлів виробів машинобудування в багато чому залежить від стану їх поверхневого шару. Поверхневий шар передусім характеризується сукупністю параметрів шорсткості і хвилястості, фізико-механічних властивостей та мікроструктури. Для оцінки даних параметрів використовується велика різноманітність вимірювальних засобів.

Після обробки на фрезерному верстаті на поверхні металу утворюються нерівності – гребінці і впадини (шорсткості і хвилі). Такі зміни впливають на властивості готових виробів і, відповідно, на якість їхніх поверхонь. Всі ці характеристики і визначають клас обробки металу.

Двомірне вимірювання і аналіз профілю має велику вагу в оцінці шорсткості поверхності. Перевагами даної методики є малий час вимірювання,

забезпечення еталонною базою та відносно низька ціна обладнання [1].

Вейвлетний аналіз – це сучасний та перспективний метод обробки даних, однією з його

переваг є здатність до виконання місцевого аналізу, тобто аналіз обмеженої області великого сигналу.

Основною перевагою вейвлет-перетворення або методів перед традиційним перетворенням або методами Фур'є є використання локалізованих базових функцій – вейвлетів, які дозволяють виконувати більш швидкі обчислення.

Вейвлети як локалізовані базисні функції найкраще підходять для аналізу реальних фізичних ситуацій, у яких сигнал має розриви, різкі зміни та різкі стрибки.

До галузей застосування вейвлет-перетворень належать:

- стиснення даних і зображень;

- виявлення перехідних процесів;
- розпізнавання образів;
- аналіз текстури;
- зменшення шуму / тенденції [2].

Аналіз останніх досліджень

Одне з найактуальніших завдань отримання якісної поверхні – завдання зниження шорсткості. Одним із параметрів якості механічно обробленої поверхні вважається висота її мікронерівності, яку можна виявити з профілограми.

Профіль обробленої поверхні (навіть після високоякісної обробки) не є ідеально гладким. Він має велику кількість відхилень різної форми та розмірів і потребує подальшого аналізу, який можна здійснити у вигляді перетворення Фур'є. Недоліком цього є невисока точність уявлення локальних особливостей сигналів.

Серед професійного та найсучаснішого програмного забезпечення, здатного вирішувати досить складні завдання практичного застосування вейвлетів та вейвлет-перетворень, можна виділити три основні програмні пакети Mathcad 14 Professional, Matlab 7, Mathematica 4/4.1. Ці програмні комплекси застосовні як і для самого аналізу властивостей вейвлет-функцій та вейвлет-перетворень, так і для їх використання в задачах обробки цифрових сигналів та зображень промислові деталі.

Безпосередньо для роботи з вейвлетами використовуються відповідні розширення, інтегровані в ці програмні пакети: Wavelet Toolbox (Matlab), Wavelet Extension Pack (Mathcad), Wavelet Explorer (Mathematica) [3].

Робота [3] містить аналіз сучасного стану проблеми комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів. Розглянуті принципи роботи вейвлет-перетворення, та вейвлет-фільтри, методи побудови вейвлет-частотної характеристики (ВЧХ), розглянуто задачу вейвлет-розкладання вихідного сигналу складної форми на дві незалежні складові, поняття ентропії. Розроблені методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів ВП нестационарних сигналів практично застосовані в аналізі та діагностуванні об'єктів різної природи, зокрема в медичній (кардіології) та машинобудівній (фрезеруванні) галузях.

У статті [4] розглядаються ортогональні вейвлети: вейвлет Добеші, вейвлет Сімлета та вейвлет Койфлета, які забезпечують можливість здійснення процедури дискретного вейвлет-перетворення, а також критерії, які впливають на результативність фільтрації ультразвукового сигналу методами з використанням вейвлет-аналізу, проведення фільтрації ультразвукових сигналів за допомогою

вейвлет функцій.

У статті [5] описані вейвлет-паketне перетворення для отримання профілю шорсткості поверхні, характеристика та виділення текстури поверхні.

Формулювання мети роботи

Метою роботи є аналіз розробленої програми для оцінки якості обробки металевих поверхонь методом вейвлет-аналізу.

Вивчення основного матеріалу і результатів аналізу

Для багатьох сигналів низькочастотний вміст є найважливішою частиною, яка передає його унікальність, а високочастотний вміст відображує особливості сигналів.

У вейвлет-аналізі використовуються поняття коефіцієнтів апроксимації та коефіцієнтів деталізації.

Коефіцієнти апроксимації – це високомасштабні низькочастотні компоненти сигналу.

Коефіцієнти деталізації – низькомасштабні високочастотні компоненти сигналу.

Схема найпростішого процесу фільтрації сигналу виглядає наступним чином (рис. 1). Початковий сигнал, S , проходить через два взаємодоповнюючих фільтри. Результатом є два сигнали (A і D) [6].

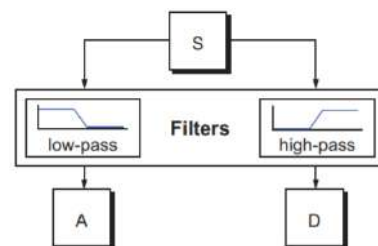


Рис. 1. Схема процесу фільтрації сигналу

Якщо виконати дану операцію на реальному цифровому сигналі, у результаті буде отримано вдвічі більше даних.

Тому існує більш зручний спосіб розкладання за допомогою вейвлетів, який зменшує кількість вибірок (downsampling) (рис. 2).

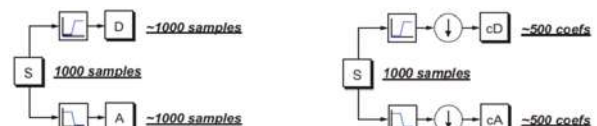


Рис. 2. Результати фільтрації вхідного сигналу без (зліва) та з використанням вейвлетів (справа)

Вейвлет-фільтри дозволяють не тільки очищувати сигнал від шумів, але і вилучати необхідні компоненти сигналу. Оскільки вейвлети мають

непогану частотно-часову адаптацією, вони можуть служити зручним інструментом для дослідження частотних характеристик сигналу.

Для декомпозиції сигналу достатньо використовувати два фільтри з однаковою граничною частотою – низькочастотний (Lo) і високочастотний (Hi), на входи яких подається сигнал S.

Фільтр Lo дає частотний образ для апроксимації сигналу (cA), а фільтр Hi – для його деталізації (cD) (рис. 3).

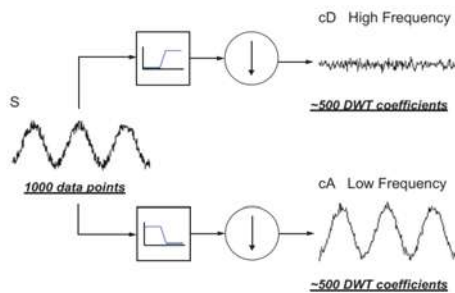


Рис. 3. Діаграма одновимірної декомпозиції сигналу на реальних даних

Процес декомпозиції можна повторювати з послідовним наближенням. Тоді один сигнал розбивається на безліч компонент меншої роздільної здатності. Цей процес називається багаторівневою декомпозицією (рис. 4).

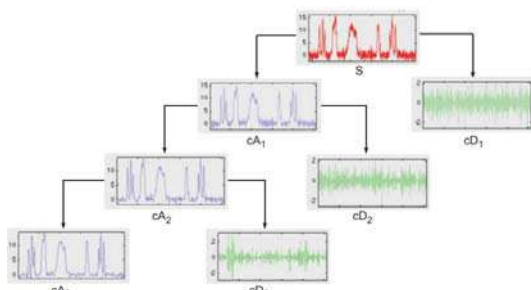


Рис. 4. Приклад багатовимірного розкладу сигналу – дерево вейвлет-декомпозиції

Оскільки процес аналізу сигналу є ітеративним, в теорії його декомпозиція може тривати доти, доки окремі деталі не складатимуться з одного зразка або пікселя.

На практиці необхідно обрати відповідну кількість рівнів, ґрунтуючись на походженні сигналу або за відповідним критерієм – ентропією.

Існує багато різних визначення ентропії, наприклад, визначення за Шенноном:

$$E = -\sum_i S_i^2 \log(S_i^2), \quad (1)$$

або через логарифм енергії:

$$E = \sum_i \log(S_i^2). \quad (2)$$

Проте у них єдина сутність: високе значення ентропії свідчить про «розмазаність» сигналу за базисними функціями; низьке значення ентропії існує тоді, коли велика частина норми сигналу зосереджена на малій кількості базисних функцій.

У другому випадку інформація про сигнал може бути істотно стиснена [7].

У розробленій програмі досліджені та реалізовані алгоритми, описані у [3].

Схема роботи програми представлена на рис. 1.

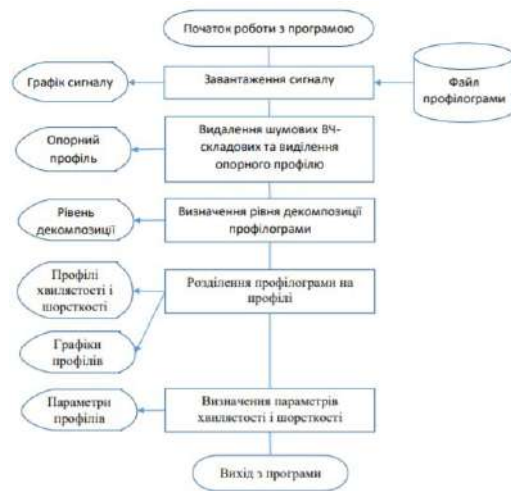


Рис. 5. Схема роботи програми

У програмі були використані наступні функції (табл. 1).

Таблиця 1 – Використані функції

Назва функції	Призначення
appcoef	Коефіцієнти апроксимації
cmddenoise	Інтервально-залежне очищення від шумів
detcoef	Коефіцієнти деталізації
detrend	Усунення лінійної тенденції
exportgraphics	Збереження графіки в файл
readmatrix	Читання матриці з файлу
uigetfile	Відкриття діалогового вікна вибору файлу
uioutfile	Відкриття діалогового вікна збереження файлу
wavedec	Багаторівнева вейвлет-декомпозиція
wentropy	Вейвлет-ентропія сигналу

На головному вікні програми користувач повинен обрати елемент меню «Файл» та «Завантажити дані» у форматі .dat.

Після цього сигнал буде попередньо оброблений. Вхідний та даний сигнали будуть відображені у вигляді графіків.

Попередня обробка сигналу полягає у видаленні шумів. Шумами прийнято вважати високочастотні компоненти сигналу.

Далі необхідно натиснути в меню «Аналіз» → «Поділ профілю».

Розроблена програма використовує алгоритм розкладання за мінімальною ентропією Шеннона.

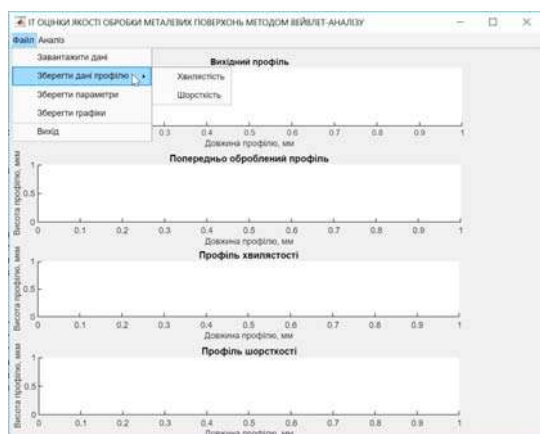


Рис. 6. Головне вікно програми

Після цього буде проведено декомпозицію профілю, обчислено на кожному рівні вейвлет-ентропію для профілів хвилястості та шорсткості. Для обраних даних мінімальна ентропія спостерігалася на шостому рівні розкладу (рис. 3).

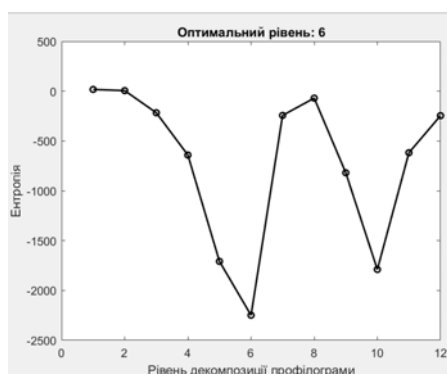


Рис. 7. Ентропія на кожному рівні декомпозиції профілограми

Степінь нерівності поверхні визначається за допомогою основних числових параметрів:

- 1) L – довжина ділянки поверхні (базової лінії);
- 2) Rz ($R10$) – висота нерівностей профілю за 10-ма точками:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |H_{imax}| + |H_{imin}|}{5}, \quad (3)$$

де H_{imax} – висота i -го найбільшого виступу профілю;

H_{imin} – висота i -тої найбільшої западини профілю [8];

- 3) Ra – середньоквадратичне відхилення

профілю, характеризує ступінь шорсткості поверхні;

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^m |y_i|}{n}, \quad (4)$$

де n – кількість кроків нерівностей за вершинами в межах базової довжини [9];

- 4) Rt – відносна довжина профілю.

Результат завантаження даних та аналізу (поділу сигналу на профілі хвилястості і шорсткості), а також розраховані параметри наведені на рис. 8.

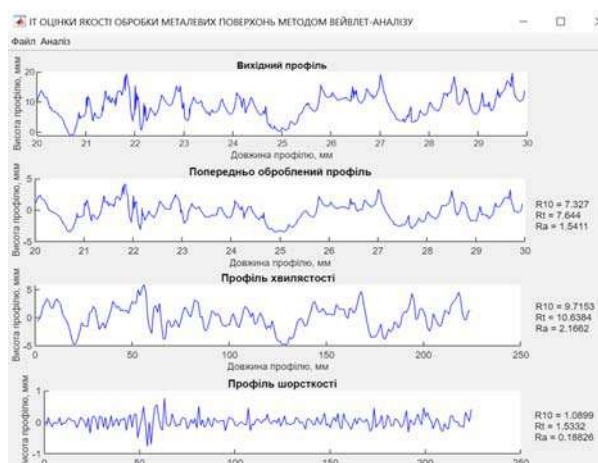


Рис. 8. Профілі хвилястості, шорсткості та розраховані параметри

Окрім ентропії, на кожному рівні декомпозиції профілю користувач може переглянути коефіцієнти апроксимації та коефіцієнти деталізації (рис. 6).

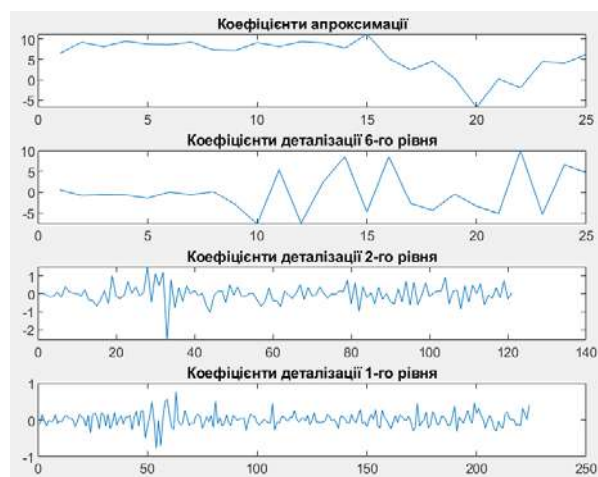


Рис. 9. Коефіцієнти декомпозиції сигналу

У меню елемента «Файл» також можна зберегти графіки профілів шорсткості та хвилястості у форматі .png («Зберегти графіки»), їхні дані у форматі .dat («Зберегти дані») та параметри у форматі .txt («Зберегти параметри»).

Програма має інформативні повідомлення після успішного збереження вище описаних елементів (рис. 10) та повідомлення про помилку після некоректної

роботи користувача: збереження розрахованих параметрів, даних профілей без завантаження вихідного профілю та його аналізу (рис. 11).

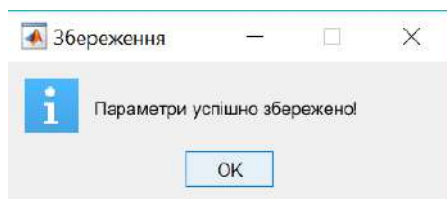


Рис. 10. Приклад інформативного повідомлення

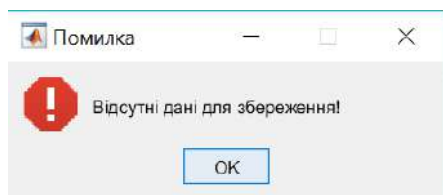


Рис. 11. Приклад повідомлення про помилку

Висновки

В результаті даного дослідження було розглянуто проблему оцінки якості обробки металевих поверхонь, застосування вейвлет-аналізу для отримання точніших параметрів, принципи декомпозиції сигналу за рівнем на основі мінімальної ентропії, та функції розробленого програмного продукту, в якій їх реалізовано.

Список літератури

1. Порошин В. В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
2. Добротворский С. С. Перспективы применения вейвлет-анализа для обеспечения качества обрабатываемых поверхностей / Добротворский С. С., Басова Е. В., Репета А. А. // Вестник национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия :

информатика и моделирование. – 2011. – № 13. – С. 75–82.

3. Твердохліб Ю. В. Методи та інформаційна технологія комплексного оцінювання параметрів вейвлет-перетворення нестационарних сигналів : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Твердохліб Юлія Володимирівна – Харків, 2018. – 178 с.

4. Оцінка якості обробки металевих поверхонь методом вейвлет-аналізу / Л. Ю. Дейнега, О. Ю. Бережний, В. В. Козлов, В. Р. Судаков. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2021. – № 1. – С. 58–65.

5. Using Wavelet Packet Transform for Surface Roughness Evaluation and Texture Extraction. Xiao Wang, Tielin Shi, Guanglan Liao, Yichun Zhang, Yuan Hong, Kepeng Chen. State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, 2017. Available at:

https://www.researchgate.net/publication/316446776_Using_Wavelet_Packet_Transform_for_Surface_Roughness_Evaluation_and_Texture_Extraction (accessed 26 January 2022).

6. Wavelet Toolbox User's Guide. Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi Available at:

<https://www.mathworks.com/help/wavelet/gs/discrete-wavelet-transform.html> (accessed 23 January 2022).

7. Яковлев А. Н. Введение в вейвлет-преобразования : учеб. пособие / Яковлев А. Н. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

8. Маркова Т. В. Шероховатость поверхности : Метод. указания. СПб. / Маркова Т. В., Крыжановская И. М. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 32 с.

9. Джамай В. В. Прикладная механика: учебник для академического бакалавриата / В. В. Джамай, Е. А. Самойлов, Т. Ю. Чуркина ; ответственный редактор В. В. Джамай. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во Юрайт, 2015. – 360 с.

Одержано 06.12.2021

Дубровин В. И., Могильная М. В., Твердохліб Ю. В. Информационная технология оценки качества обработки металлических поверхностей методом вейвлет-анализа

Цель работы. Проанализировать эффективность использования вейвлет-анализа для оценки качества металлических поверхностей. Разработать информационную технологию программного продукта для автоматизации процесса оценки качества обработки металлических поверхностей методом вейвлет-анализа.

Методы исследования. Рассмотрены основные параметры оценки обработки металлических поверхностей. Произведена многоуровневая декомпозиция профилограммы с помощью вейвлет-функций.

Полученные результаты. Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитать параметры оценки обработки металлических поверхностей, чем поможет свести к минимуму число рутинных операций и сложных математических расчетов, а также подаёт наглядные графики волнистости и шероховатости.

Преимуществом рассматриваемого программного продукта является то, что он – узконаправленный, созданный конкретно для анализа сигналов-профилограмм металлических поверхностей и является бесплатным.

При дальнейшей разработке данный программный продукт может быть применён в машиностроительной (фрезеровании) отрасли и поможет снизить затраты на приобретение программного обеспечения.

Научная новизна. Рассмотрен метод оптимальной декомпозиции сигнала сложной формы, использующий критерий минимизации суммарной энтропии вейвлет-коэффициентов обоих его компонент при определении оптимального уровня декомпозиции, реконструкцию сигнала по аппроксимирующим вейвлет-коэффициентам оптимального уровня декомпозиции при определении составляющих компонент сигнала, характеризующих определенные свойства объекта исследования. Разработано соответствующее программное обеспечение.

Практическая ценность. Разработанная информационная технология программного продукта оценки параметров вейвлет-преобразования нестационарных сигналов может быть применена в анализе и диагностировании объектов разной природы, в частности в машиностроительной (фрезеровании) отрасли в следующих задачах: выделение профилей волнистости и шероховатости профилограмм металлических поверхностей.

Ключевые слова: вейвлет, дискретное вейвлет-преобразование, разложение сигнала, профилограмма, удаление шумов, энтропия, информационная технология, Matlab, Wavelet Toolbox.

Dubrovin V., Mogilnaya M., Tverdokhlebyu. Information technology for quality assesment of the processing of metal surfaces by the method of wavelet analysis

Purpose. Analyze the effectiveness of using wavelet analysis to assess the quality of metal surfaces. Develop information technology information technology to automate the process of assessing the quality of metal surfaces by wavelet analysis.

Methodology. The main parameters for assessing the processing of metal surfaces are considered. A multilevel decomposition of the profile using wavelets was performed.

Findings. The developed software allows to calculate parameters of an assesment of processing of metal surfaces that will help to minimize number of routine operations and difficult mathematical calculations, and also gives illustrative graphs of waviness and roughness.

The advantage of this software product is that it is focused and developed specifically for the analysis of signals-profilograms of metal surfaces and is free.

In further development, this software product can be used in the mechanical engineering industry (milling) and will help reduce the cost of software.

Originality. The method of optimal decomposition of a complex signal is considered, using the criterion of minimizing the total entropy of wavelet coefficients of both its components in determining the optimal level of decomposition, reconstruction of the signal by approximating wavelet coefficients of the optimal signal. Convenient software has been developed.

Practical value. The developed information technology of the software product for estimating the parameters of non-stationary signals can be used in the analysis and diagnosis of objects of different nature, in the mechanical engineering (milling) industry, in particular obtaining of waviness and roughness profiles.

Key words: wavelet, discrete wavelet transform, signal decomposition, profilogram, noise reducing, entropy, information technology, Matlab, Wavelet Toolbox.