

ВИДАЛЕННЯ ШУМОВОЇ СКЛАДОВОЇ З ВІБРОСИГНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

В статті досліджено сучасні засоби контролю і діагностики вузлів машин і устаткування, які базуються на принципах вимірювання і аналізу вібраційних сигналів. Доведено, що контроль вібрації в механічних системах дає найбільший обсяг діагностичної інформації в порівнянні з іншими методами та може забезпечити виявлення практично всіх видів дефектів у вузлах машин і обладнання без залучення для діагностики інших видів фізичних процесів. Визначено, що вейвлети добре пристосовані для аналізу сигналів, для яких важливий принцип причинності: вейвлети зберігають напрям часу і не створюють паразитної інтерференції між минулим і майбутнім. Розроблено критерії вибору аналізуючого вейвлета, в залежності від того, яку інформацію слід витягти з сигналу та необхідності повніше виявити і підкреслити ті чи інші властивості аналізованого сигналу. Запропоновано для обробки даних вібраційного сигналу пропонується використовувати вейвлети "Mexican hat" (MNAT). Доведено, що MNAT-вейвлет має вузький енергетичний спектр і два рівних нулю моменти, що сприяє ефективності його використання для аналізу складних сигналів та ізотропних полів. Проведено моделювання фільтрації вібраційного сигналу від шуму з нормальним законом розподілу в пакеті MATCAD. Доведено, що метод вейвлет-перетворення дозволяє вирішити завдання фільтрації вібраційного сигналу від шуму при обробці вібраційних сигналів, отриманих автономними реєструючими пристроями в умовах підвищених заводів зі сторони середовища. Отримані результати свідчать про перспективність розробленого методу і його переваги в порівнянні з апаратним вирішенням проблеми фільтрації.

Ключові слова: вібраційні сигнали, вейвлет-перетворення, MNAT-вейвлет, порогові методи обробки сигналу.

PEREDERKO A., KATAIEVA M.

National Aviation University

REMOVAL OF THE NOISE COMPONENT FROM THE VIBSIGNAL WITH THE USE OF THE WAVELET CONVERTER

The article investigates modern means of control and diagnostics of machines and equipment units based on the principles of vibration signal measurement and analysis. It is proved that vibration control in mechanical systems gives the largest amount of diagnostic information in comparison with their methods and can provide detection of practically all kinds of defects in units of machines and equipment without involvement for diagnostics of other types of physical processes. Wavelets have been found to be well suited for analyzing signals for which the principle of causality is important: wavelets retain the direction of time and do not create parasitic interference between past and future. The criteria for choosing an analytic wavelet have been elaborated, depending on what information is to be extracted from the signal and the need to more fully identify and emphasize certain properties of the analyzed signal. Proposed waveform "Mexican hat" (MNAT) waveforms are proposed for the processing of vibration signal data. It is proved that the MNAT wavelet has a narrow energy spectrum and two zero moments, which contributes to the efficiency of its use for the analysis of complex signals and isotropic fields. The simulation of vibration signal filtration from noise with normal distribution law in the MATCAD package is performed. It is proved that the wavelet transform method allows to solve the problem of filtering the vibration signal from noise during the processing of vibrational signals obtained by autonomous recording devices in conditions of high noise from the environment. The theoretical basis of the computational methodology is the use of threshold functions of various shapes, on the basis of which the level of detail coefficients is limited. By setting a certain threshold for their level and "cutting off" the coefficients below this threshold, you can significantly reduce the noise level and compress the signal. The results obtained indicate the prospect of the developed method and its advantages in comparison with the hardware solution of the filtering problem.

Keywords: vibration signals, wavelet transform, MNAT wavelet, threshold signal processing methods.

Вступ. Сучасні засоби контролю і діагностики вузлів машин і устаткування в більшості своїй базуються на принципах вимірювання і аналізу вібраційних сигналів. Це обумовлене тим, що контроль вібрації в механічних системах дає найбільший обсяг діагностичної інформації в порівнянні з такими методами, як контроль температури, аналіз мастила і іншими. З цього випливає, що за сигналом вібрації можуть бути виявлені практично всі види дефектів у вузлах машин і обладнання без залучення для діагностики інших видів фізичних процесів.

Відомо, що проведення вимірювань при вібродіагностиці обладнання проводиться по місцю його експлуатації. Це приводить до впливу на вимірюваний сигнал різного роду індустриальних заводів, які створюють в каналі вимірювання шуми складної амплітудно-часової реалізації в широкому спектрі частот. Вказані шуми спотворюють інформацію вібраційного сигналу та викликають суттєві похибки вимірювання. Тому забезпечення точності та достовірності вимірювання вібраційних сигналів має велике значення.

Основна частина. Обчислювальна методика вейвлет-перетворення дозволяє вирішити завдання фільтрації (пониження рівня шумів) стосовно до просторово-часових даних отриманих при вібраційному моніторингу (при використанні порогових функцій різної форми відбувається обмеження рівня деталізують

коефіцієнтів) [3]. Задавши певний поріг для їх рівня і «відсікаючи» коефіцієнти нижче цього порога, вдається отримати значне зниження рівня шуму.

Для обробки даних вібраційного сигналу пропонується використовувати вейвлети “Mexican hat” (МНАТ). Оскільки вейвлет-перетворення є скалярним перемноженням аналізуючого вейвлета на заданому масштабі і аналізованого сигналу, коефіцієнти масштабно-часового спектру $W(a,b)$ містять комбіновану інформацію про аналізуючий вейвлет і аналізуемий сигнал (як і коефіцієнти перетворення Фур'є, які містять інформацію про сигнал і про синусоїдальну хвилю). Вибір аналізуючого вейвлета, як правило, визначається тим яку інформацію необхідно витягти з сигналу. Кожен вейвлет має характерні особливості в часовому і в частотному просторі, тому іноді за допомогою різних вейвлетів можна повніше виявити і підкреслити ті чи інші властивості аналізованого сигналу.

МНАТ-вейвлет, що має вузький енергетичний спектр і два рівних нулю моменти (нульовий та перший), добре пристосований для аналізу складних сигналів. Узагальнений на двовимірний випадок МНАТ-вейвлет також часто використовується для аналізу ізотропних полів. Якщо ж похідна береться лише в одному напрямку, виходить неізотропний базис з хорошою кутовою вибірковістю [6]. Для побудови такого базису до масштабних перетворень і зрушень базисного вейвлета необхідно додати його обертання. Вейвлети добре пристосовані для аналізу сигналів, для яких важливий принцип причинності: вейвлети зберігають напрямок часу і не створюють паразитної інтерференції між минулим і майбутнім.

Необхідно відзначити, що при аналізі комплексного одновимірного сигналу або при використанні комплексного аналізуючого вейвлета в результаті вейвлет-перетворення виходять двовимірні масиви значень модуля коефіцієнтів і фази. Тобто вейвлетний масштабно-часовий спектр $W(a,b)$ на відміну від Фур'є-спектра є функцією двох аргументів: часового масштабу вейвлета - a (в одиницях, зворотних частоті), і часовому зміщенню вейвлета по сигналу - b (в одиницях часу), при цьому параметри a і b можуть приймати будь-які значення в межах областей їх визначення. На рис.1 наведено зображення неортогонально вейвлета МНАТ з різними значеннями коефіцієнта часового масштабу a .

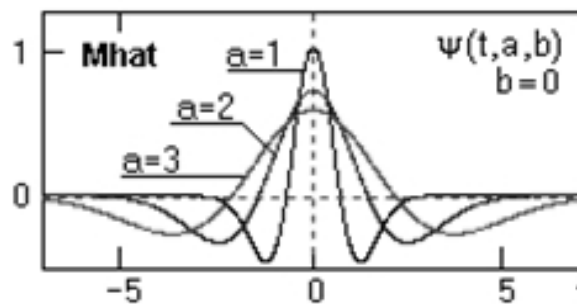


Рис.1. Вейвлет МНАТ при $a=1..3$

Теоретичну основу обчислювальної методики становлять використання порогових функцій різної форми, на основі яких відбувається обмеження рівня деталізуючих коефіцієнтів [2]. Задавши певний поріг для їх рівня і «відсікаючи» коефіцієнти нижче цього порога, можна значно знизити рівень шуму і стиснути сигнал. Відомий приклад порогових функцій представлений на рис.2. На рис.2(а) приведена жорстка порогова функція - *hard* (жорстка порогова оцінка), що описується наступним виразом (1):

$$y(x) = \begin{cases} x, & \text{якщо } |x| \geq T \\ 0, & \text{якщо } |x| < T \end{cases} \quad (1)$$

Тут в якості величини T виступає деяке порогове значення, про можливість визначення якого буде сказано нижче, в якості x і y виступають вхідний і вихідний значення коефіцієнтів перетворення. На рис.2(б) представлена м'яка порогова функція (м'яка порогова оцінка), що описується наступним виразом:

$$y(x) = \begin{cases} \text{sign}(x) \cdot (|x| - T) & \text{якщо } |x| \geq T \\ 0, & \text{якщо } |x| < T \end{cases} \quad (2)$$

Наведені в виразі (2) позначення ті ж, що і описані вище в (1). В якості опції $\text{sign}(x)$, яка визначає знак коефіцієнта x , виступає функція виду:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > 0, \\ 0, & \text{якщо } x = 0, \\ -1, & \text{якщо } x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Відомо, що основна відмінність м'якою порогової функції від *hard* полягає в тому, що перша з них не містить розриву в точці, яка визначається граничним значенням T [1]. Іншими словами, м'яка порогова

функція, на відміну від hard, є безперервною. Остання обставина, в разі м'якої порогової обробки, дозволяє найкращим чином обробляти зашумлений вібраційний сигнал в околиці точки його розриву. Виникає питання: яка порогова функція краще для здійснення фільтрації шумів.

Додатково проведений обчислювальний експеримент дозволяє відзначити такі особливості порогових функцій hard і soft:

функція hard прийнятно працює при низькому рівні шуму, коли всі шумові коефіцієнти розкладання по модулю менше порога T і вони відповідно зануляються, а всі інформативні перевершують по модулю поріг T і тому вони зберігаються;

відсутність у функції soft розриву в околиці точки a (див. рис.2) певною мірою запобігає появі осциляцій (ефекту Гіббса) в особливих точках сигналу. Цей ефект може проявитися при використанні порогової функції hard.

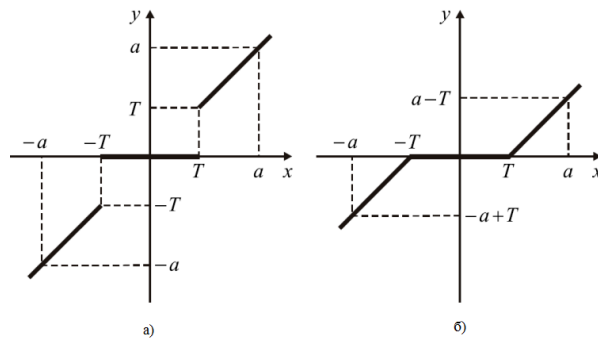


Рис.2. Граничні функції обробки коефіцієнтів перетворення:
 а) hard - жорстка порогова функція ; б) soft - м'яка порогова функція

Зниження значення коефіцієнтів розкладання на величину порогового значення, в разі м'якої порогової обробки, в цілому для великої кількості сигналів справляє негативний вплив на підсумкову оцінку якості відновленого сигналу. Як показують експерименти, більш кращою, з точки зору чисельної оцінки якості відновленого сигналу, є жорстка порогова оцінка. Згідно з дослідженнями в роботі [4], для того, щоб в разі м'якої порогової обробки чисельна оцінка якості відновленого сигналу наближалася до останньої в разі жорсткої порогової обробки, необхідно вибирати значення порога T таким, що дорівнює половині значення порога жорсткої обробки сигналу. Відомо, що основною проблематикою використання порогових методів обробки є вибір порогового значення. Як правило, вибір порога здійснювався з використанням наступного виразу:

$$T = \sigma \sqrt{2 \ln(N)}. \quad (4)$$

Формула (4) записана для випадку одновимірного сигналу (в нашому випадку вібраційний сигнал з одноосового акселерометра). В формулі використані наступні позначення: N - загальна кількість відліків оброблюваного сигналу, σ - середньоквадратичне відхилення шуму:

$$\sigma = \frac{M_x}{0,6745}, \quad (5)$$

де M_x - медіана абсолютного значення безлічі коефіцієнтів $\{X\}$. Оскільки вейвлети широко застосовуються для вирішення завдання подавлення шумів, то їх доцільно використати для обробки вібраційного сигналу при моніторингу технічного стану обладнання. Результати рішення задачі фільтрації шуму сигналу при вимірюванні вібрації наведені на рис.3 (на основі вейвлета Mexican hat). Результати отримані шляхом моделювання фільтрації в пакеті MATCAD вібраційного сигналу з шумовою складовою (Гаусовський шум).

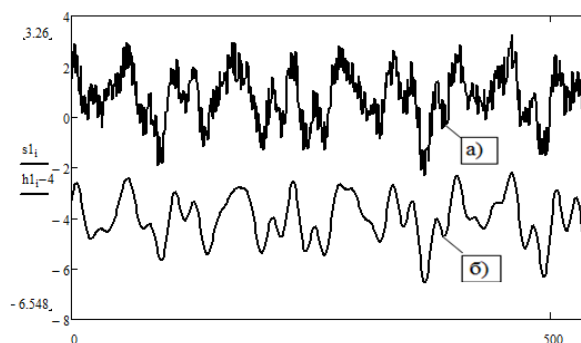


Рис.3. Результати фільтрації шуму вібраційного сигналу (на основі вейвлета MHAT) в пакеті MATCAD

На рис.3 наведений вібраційний сигнал з шумовою складовою а), та відфільтрований сигнал б).

При проведенні в середовищі MATCAD вище викладеного моделювання, для імітації вібраційного сигналу, був використаний сигнал складної частотної реалізації. Для імітації шумової складової на вказаний сигнал накладено псевдо випадковий сигнал з нормальним законом розподілу.

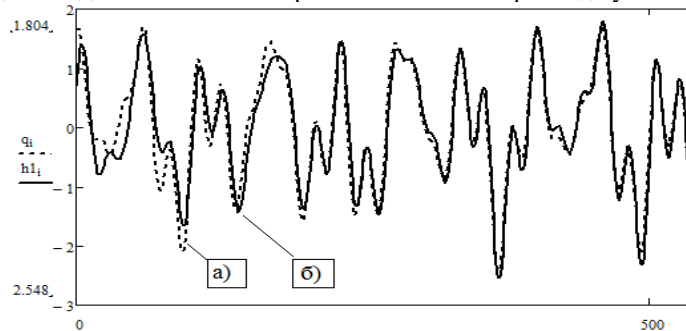


Рис.4. Початковий вібраційний сигнал а) та відновлений після фільтрації від шуму б)

На рис.4 наведено порівняння точності відтворення відносно початкового сигналу імітації вібраційного сигналу а) та відновленого після фільтрації від шуму сигналу б). Як видно з рисунку, в загалі, відновлений сигнал, з невеликими розбіжностями, повністю відтворює корисний сигнал як по амплітудних та і по частотних реалізаціях.

Висновки. В даній роботі проведено моделювання фільтрації вібраційного сигналу від шуму з нормальним законом розподілу в пакеті MATCAD. Отримані результати показують, що метод вейвлет-перетворення дозволяє вирішити завдання фільтрації вібраційного сигналу від шуму. Отримані результати свідчать про перспективність розробленого методу і його переваги в порівнянні з апаратним вирішенням проблеми фільтрації. Можна зробити висновок, що в багатьох випадках даний метод може бути застосований при обробці вібраційних сигналів, отриманих автономними реєструючими пристроями в умовах підвищених завад зі сторони середовища.

Література

1. Воскобойников Ю. Е. Построение алгоритмов вейвлет-фильтрации с двухпараметрическими пороговыми функциями / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков // Автометрия. –2012. – Т. 48, № 1. – С. 17–29.
2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. / Э.Айфичер, Б. Джервис //М.: Вильямс, 2004.
3. Митрахович М. М. Использование вейвлет-преобразования в задачах диагностирования технического состояния газотурбинных двигателей / М. М. Митрахович // Технологические системы. – 2014. – № 3 (68). – С. 22-26.
4. Farge M Ann. Rev. Fluid Mech. 24 395 (1992)
5. Кавчук С.В. Сборник примеров и задач по теории сигналов: Руководство для практических занятий на базе Mathcad 6.0 Plus/ С.В. Кавчук// Таганрог,Изд-во ТРТУ, 2001.
6. Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad-15/ Е.Макаров // СПб.: Питер, 2011.

References

1. Voskoboynikov, Y.E., Construction of wavelet filtration algorithms with two-parameter threshold functions / Yu. –2012. - Т. 48, No. 1. - P. 17–29.
2. Eificher E. Digital Signal Processing: A Practical Approach. 2nd ed. / E. Ayficher, B. Jervis // M.: Williams, 2004.
3. M.M Mitrakhovich, The use of wavelet transform in problems of diagnosing the technical state of gas turbine engines / M.M. Mitrakhovich // Technological systems. - 2014. - No. 3 (68). - P. 22-26.
4. Farge M Ann. Rev. Fluid Mech. 24,395 (1992)
5. Kavchuk SV A collection of examples and problems in signal theory: A guide to practical lessons based on Mathcad 6.0 Plus / S.V. Rubber // Taganrog, TRTU Publishing House, 2001.
6. E. Makarov, Engineering Calculations in Mathcad-15 / E. Makarov, St. Petersburg: Peter, 2011.

Рецензія/Peer review : 27.11.2019

Надрукована/Printed : 03.01.2020