

SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF INCLINED CONVEYOR SCRAPERS FOR CLEANING MANURE FROM LIVESTOCK BUILDINGS

G. A. Golub, V. S. Khmielewski, R. L. Shvets, N. I. Ikalchic

Abstract. *To ensure proper microclimate and veterinary and sanitary conditions of livestock areas, you must carefully clean the manure in recreation areas and aisles. The purpose of research – to achieve improved quality performance of the inclined conveyor due to changes in the construction of scrapers.*

One of the drawbacks of the inclined conveyor is that it does not fully pick up the liquid manure fraction from the bottom of the manure pit. It comprises inclined conveyor chain and scrapers which have a corner shape. Thus scraper moving along the inclined surface of the metal trough captures thick manure fraction and transports it to the top of the inclined conveyor and the rolls in the vehicle, the liquid fraction of manure scrapers are not interested in, and remains in the sump.

The study is tasked to develop this design scrapers so that they removed most of the manure pit inclined conveyor and reduced the time the conveyor.

To solve this problem is proposed in the form of produce scrapers scoop. On the farm training, research and production unit IS NULES of Ukraine "Nizhyn Agrotechnical Institute" experimental studies have been conducted. From which it was found that the power consumption of the motor is changed from 1.1 to 2 kW. In operation, when the inclined conveyor works and placed in one corner, compared to the scraper-corners, an increase of the specific power consumption by 27%. In this scheme semiliquid manure pumping time is reduced by 50%.

Technical and economic advantages of the inclined conveyor developed over the prior art are to improve manure from the pit, and reducing the total cost of cleaning manure from livestock buildings.

Implementation was carried out on the farm of "Krok-Agro" in willage Galitsa Nizhyn district of Chernihiv region.

Keywords: *animal farming, livestock buildings, manure, inclined conveyor, scraper, quality, energy consumption*

УДК 621.436: 534.833.004

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕЙВЛЕТ АНАЛІЗУ ВІБРОСИГНАЛІВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ

Л. Л. Тімова, О. В. Надточій, кандидати технічних наук
e-mail: lyginu@mail.ru

Анотація. *Розглянуто використання вейвлет аналізу віброакустичного сигналу дизельного двигуна СМД-31А, як*

© Л. Л. Тімова, О. В. Надточій, 2016

елементу адаптивної моделі обробітку вібросигналу з метою постановки точного і однозначного діагнозу. Приведена очистка віброакустичного сигналу від шуму використанням вейвлет перетворення вейвлетом Добеші db4 та доведена ефективність даного алгоритму для розробки програмного комплексу віброакустичного діагностування ДВЗ. Для моделювання використовувалися математичні пакети Mathcad 15.

Проведений аналіз підходів до віброакустичного діагностування ДВЗ показав перспективність використання віконного перетворення Фур'є та вейвлет перетворення. Використання вейвлет перетворення для аналізу віброакустичного сигналу ДВЗ, цього «мікроскопу» для сигналів дає можливість розпізнавати точніше не тільки зміни в стані механізмів ДВЗ, пов'язані із зношенням, а також і локалізацію джерела зміни. Даний механізм обробітку вібросигналів варто покласти в основу розробки автоматизованої системи діагностики, роботи над якою уже ведуться на нашій кафедрі НУБіП України.

Ключові слова: вібросигнал, спектр, спектральний аналіз, перетворення Фур'є, вейвлет, декомпозиція

Постановка проблеми. Перетворення Фур'є найбільш широко використовується у вібродіагностиці дизелів для спектрального аналізу. Воно розкладає сигнал на ортогональні базисні функції (синуси і косинуси), визначаючи його частотні складові. Даний метод строго математично найкраще підходить до стаціонарних сигналів (підшипники, турбіни) і погано підходить для нестационарних сигналів (перекладка поршня, газорозподільчий механізм, форсунки, тощо). Зокрема Фур'є перетворення не дозволяє, наприклад, визначити чи була присутня певна частота в сигналі завжди чи вона з'явилася в сигналі в певний момент (поява дефекту) [1].

Аналіз останніх досліджень. В реальній практиці, всі віброакустичні сигнали навіть нестационарні з певним наближенням, розглядають як стаціонарні, розділяючи їх на блоки умовно стаціонарних сегментів, статистика яких лишається незмінною на протязі їх протікання за певний час. В практиці вібродіагностики більше всього в наявності розповсюджені нестационарні сигнали, статистичні властивості яких змінюються з часом. Часто вони складаються із короткотривалих високочастотних елементів, які супроводжуються низькочастотними складовими, що накладаються на перші. Для аналізу таких сигналів має використовуватися такий метод, який має показувати хороший розподіл по частоті поряд з відмінним розподілом по часу [2, 3, 4, 5]. Перше, щоб локалізувати низькочастотні компоненти і друге, щоб дозволити високочастотні

складові. Такий метод зустрічається в літературі для аналізу нестационарних сигналів і носить назву віконного перетворення Фур'є (*Short-time Fourier transform (STFT)*) рис. 1.

Результати досліджень. В основу методу покладено рух по сигналу віконної функції, яка має компактний носій. Часовий інтервал сигналу розділяється на сегменти і перетворення STFT виконується послідовно для кожного сегменту окремо. Тим самим здійснюється перехід до частотно-часового (частотно-координатного) відображення сигналів, при якому в межах кожного сегменту (вікна) сигнал рахують стаціонарним. Результатом віконного перетворення є сімейство спектрів який характеризує зміну спектру сигналу за інтервалами здвигу вікна перетворення.

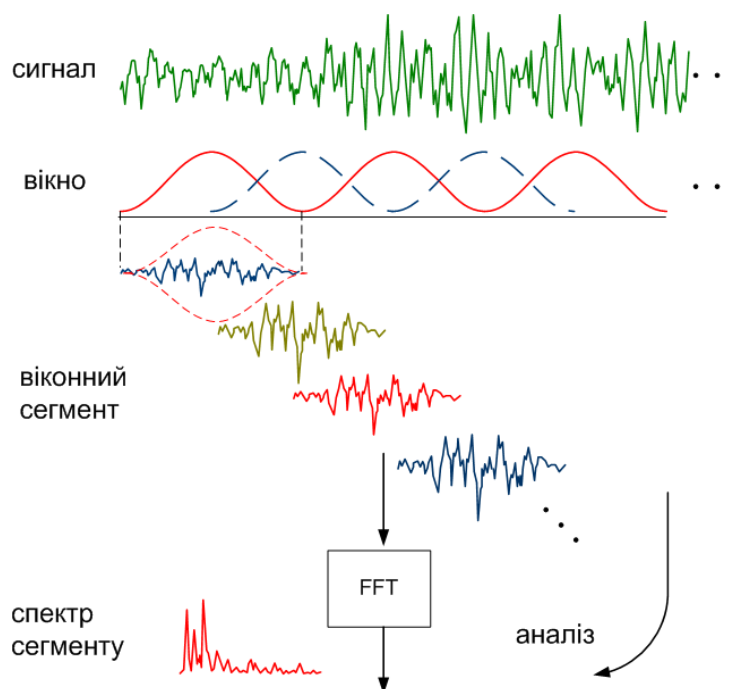


Рис. 1. Схематичний алгоритм STFT аналізу.

Коротко STFT можна охарактеризувати наступним алгоритмом:

- визначити вікно аналізу (наприклад, вузькосмугове 30 ms, 5 ms широкосмуговий);
- визначити величину перекриття між вікнами (наприклад, 30%);
- вибрати віконну функцію (наприклад, Ханна, Гауса, Блекмана);
- створити віконний сегмент (множення сигналу на віконну функцію);
- застосувати швидке перетворення Фур'є (ШПФ) до кожного віконного сегменту.

Отримані за таким алгоритмом спектри сегментів дозволяють виділити на координатній осі і аналізувати особливості

нестационарного сигналу. Розмір носія віконної функції $w(t)$ зазвичай варто встановлювати відповідно до інтервалу стаціонарності сигналу. Для прикладу проведемо таке перетворення для реального віброакустичного сигналу (рис. 2) отриманого з блоку циліндрів двигуна СМД-31А за допомогою акселерометра В&К Туре 4333 №272437, встановленого в зоні перекладки поршня 3-го циліндру.

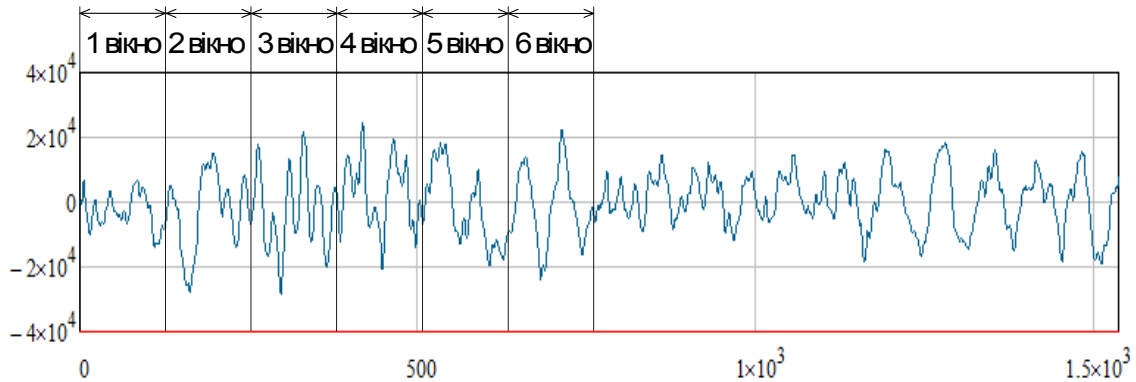


Рис. 2. Віброакустичний сигнал ДВЗ і розклад його на вікна перетворення.

Віконне перетворення виконується у відповідності з виразом:

$$S(w, b_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \cdot w \cdot (t - b_k) \exp(-j\omega t) dt. \quad (1)$$

Функція $w \cdot (t - b_k)$ являє собою функцію вікна здвигу перетворення по координаті t , де параметром b задаються фіксовані значення здвигу. При здвигу вікон з рівномірним кроком значення b_k приймаються рівними $k\Delta b$. В якості вікна перетворення може використовуватися як найпростіше прямокутне вікно, так і спеціальні вагові вікна (Блекмана, Бартлетта, Гаусса тощо), які забезпечують малі спотворення спектру при вирізанні віконних відрізків сигналів.

Лістинг прикладу віконного перетворення для нестационарного вібросигналу та результат приведені відповідно на рис. 2 і рис. 4.

За спектром сигналу S можна судити про наявність у його складі гармонійних коливань на більш ніж 6 ярко виражених частотах, визначати співвідношення між амплітудами цих коливань і визначити локальність коливань по інтервалу сигналу. Координатна роздільна здатність віконного перетворення визначається шириною віконної функції і обернено пропорційна частотній роздільній здатності.

Функціональні можливості короткотермінового перетворення Фур'є обмежує здатність аналізувати спектральний склад сигналів на інтервалі, однакового для всіх частот, тобто роздільна здатність по частоті однакова для всього діапазону частот. Тобто, стосовно обробітку складних сигналів. До яких безумовно відносяться і

вібросигнали ДВЗ, проблема віконного короткотермінового перетворення полягає у тому, що приходиться вибирати розмір вікна «раз і назавжди», тобто для аналізу всього сигналу. При цьому різні частини записаного сигналу можуть вимагати використання різних за тривалістю вікон. Наприклад, якщо сигнал складається із далеко віддалених один від одного частотних компонент, то можна пожертвувати частотним дозволом на користь тимчасового, і навпаки. Таким чином, у зв'язку з використанням фіксованої ширини вікна STFT не завжди підходить для аналізу сигналів з дуже низькою і високою частотою одночасно (сигнал перекладки поршня, форсунка, газорозподільчий механізм). Такий аналіз стає можливим при використанні гнучкого вікна яке стає вузьким при проходженні через високочастотну складову сигналу і стає широким при проходженні низькочастотної області сигналу. Таку можливість дає вейвлет-аналіз сигналів на основі вейвлетного перетворення (Wavelet Transform) [2, 3, 4, 5, 6].

$$wb(k, n) := \begin{cases} 0.42 - 0.5 \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{k-1}{n-1}\right) + 0.08 \cdot \cos\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{k-1}{n-1}\right) & \text{if } k \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N = 1.638 \times 10^4 \quad \Delta b := 128 \quad w := 127 \quad n := 0..N$$

$$S := \text{cfft}(M^{(0)}) \quad SQ := (M^{(0)}) \quad \Delta \omega S := \frac{2\pi}{\text{Discr} + 1}$$

$$\Delta \omega S_w := \frac{2\pi}{w + 1} \quad \Delta \omega S = 3.835 \times 10^{-4}$$

$$S_w := N^{-1} \cdot \Delta b \cdot \text{sw}(SQ, N, \Delta b, w)$$

$$sw(s, N, \Delta b, w) := \begin{cases} k \leftarrow 0 \\ \text{for } b \in 0, \Delta b..N-w \\ \quad k \leftarrow k + 1 \\ \quad \text{for } n \in b..b+w \\ \quad \quad y_{n-b} \leftarrow s_n \cdot wb(n+1, w+1) \\ \quad S_w \leftarrow \text{CFFT}(y) \\ \quad \text{for } n \in 0..w \\ \quad \quad S_{k,n} \leftarrow S_{wn} \end{cases}$$

Рис. 3. Лістинг віконного перетворення Фур'є та програма вікна Блекмана.

Вейвлетне перетворення сигналів – це розкладання сигналів на складові за допомогою спеціальної функції, яка дістала назву вейвлета (Wavelet).

Вейвлети стали необхідним математичним інструментом в багатьох дослідженнях. Їх використовують у випадках, коли результат аналізу певного сигналу має містити не тільки простий перелік його характерних частот, масштабів (спектральний аналіз), але і відомості про певні локальні координати, при яких ці частоти проявляють себе. Саме ця задача і полягає. Коли потрібно визначити моменти коли зароджуються дефекти в зеднаннях ДВЗ. Загальний принцип побудови базису вейвлет-перетворення полягає

у використанні масштабного перетворення і зміщення. Базисом вейвлету є функція типу $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, де b – зсув, a – масштаб.

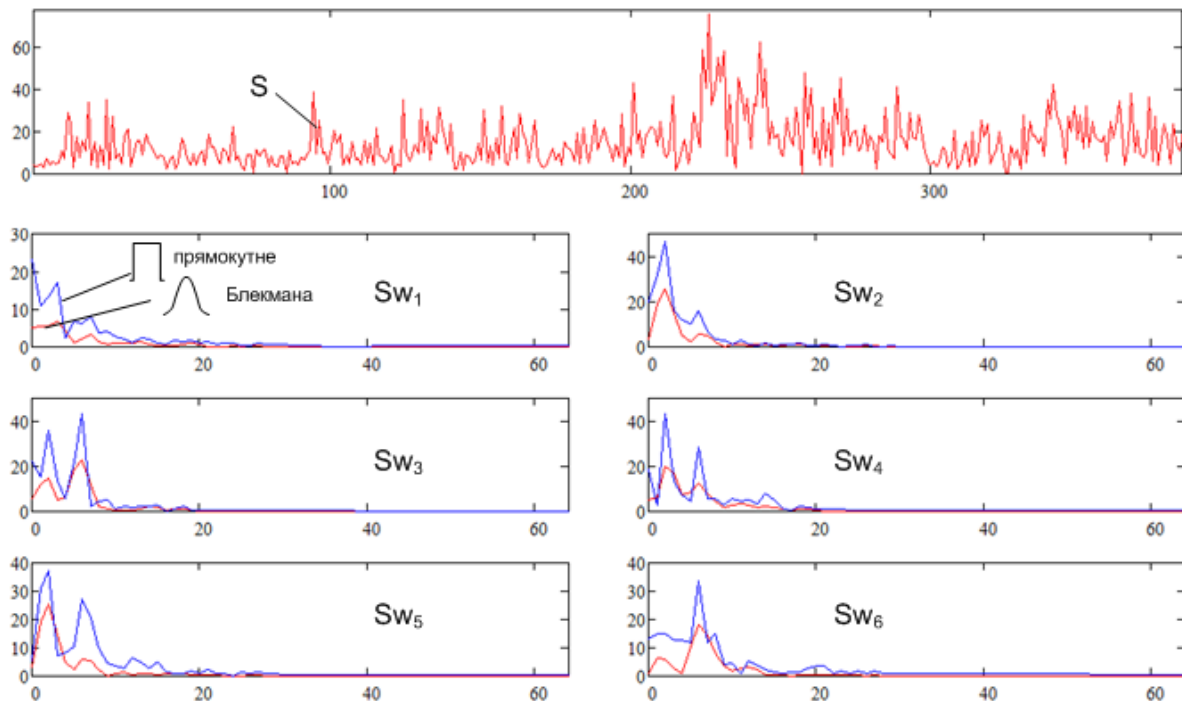


Рис. 4. Реалізація віконного перетворення з використанням двох типів вікон.

Крім того щоб виступати вейвлетом функція $\Psi(t)$ повинна мати нульову площу і ще краще нульовий перший.

Другий і інші моменти. Фур'є перетворення таких функцій рівне нулю при $\omega=0$ і має вигляд полосового фільтру. При різних значеннях a це буде набір (блок) полосових фільтрів. При розрахунку вейвлетних спектрів віброцигнала в дискретній формі суттєве значення для наглядності і виразності спектру має частота дискретизації (крок) параметрів b і a . Крок дискретизації Δb , як правило. Приймається рівним Δt сигналів які аналізують, тобто рівний 1, при цьому часовий масштаб вейвлетного спектра відповідає часовому масштабу сигналу і зручний для локалізації особливостей сигналу. Для забезпечення можливості зміни базового розміру вейвлету у його формулу вводиться постійний масштабний коефіцієнт d (рис. 5).

Для прикладу спробуємо здійснити вейвлет перетворення в системі Mathcad використовуючи вейвлет Добеші четвертого порядку db4 використовуючи функції прямого $S:= \text{wave}(s)$ і оберненого $s:= \text{iwave}(S)$ перетворення. Для візуалізації картини коефіцієнтів субматриця переводиться в двовимірний масив з

приведенням до єдиної числової вісі вхідного сигналу (рис. 6) (розтягування коефіцієнтів по вісі зсувів без зміни їх значення).

$$\Psi(t, a, b, d) := \frac{1.0316}{\sqrt{a \cdot d}} \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{t - b}{a \cdot d} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{t - b}{a \cdot d} \right)^2 \right]$$

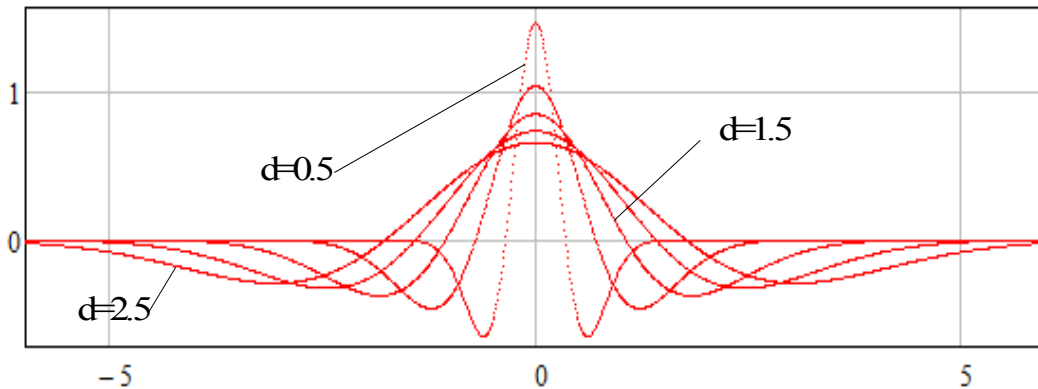


Рис. 5. Зміна базового розміру вейвлета МХАТ.

Вектор даних вейвлет-спектра - $TP := \text{wave}(M^{(0)})$ $G := 12$ $r := 0..G$
 $A_{r,j} := TP_{\text{floor}\left(\frac{j \cdot 2^{G-r}}{2^G + 1}\right)}$

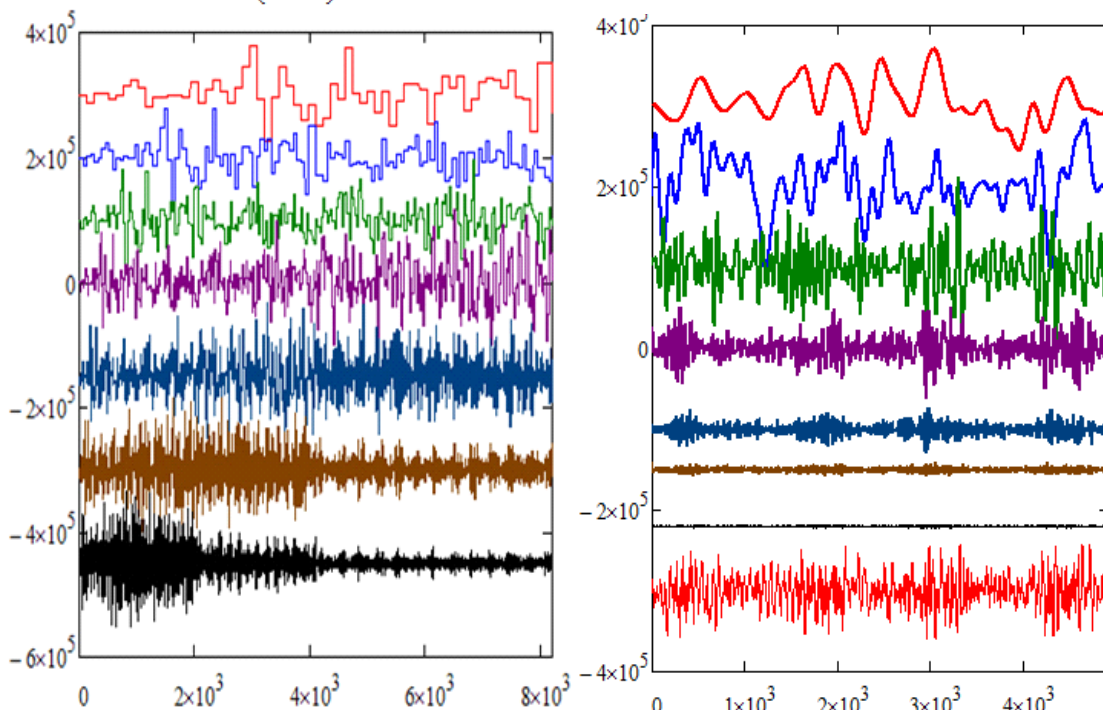


Рис. 6. Вейвлет спектр Добеші віброакустичного сигналу (справа – інтерпольована форма).

В силу діадності вейвлет-перетворення виразність вейвлетного спектру зберігає всі частотні часові особливості сигналів і що

найсуттєвіше дозволяє провести зміну (певний обробіток) сигналу на різних рівнях декомпозиції, а після обробітку виконувати обернене вейвлет перетворення без втрати інформації.

Результати розрахунку вейвлет спектру Добеші модельного сигналу (рис. 6) показані у вигляді 7-ми сімейств його коефіцієнтів.

Ці сім є самими інформативними, хоча загальна кількість може бути більшою. Ще є можливість вивести вейвлетний спектр в 2D и в 3D формі (рис. 7). Головною метою даної статті є показати можливість використання вейвлетів для очистки віброакустичного сигналу від шумів, до яких зазвичай відносять сигнали від інших джерел коливання.

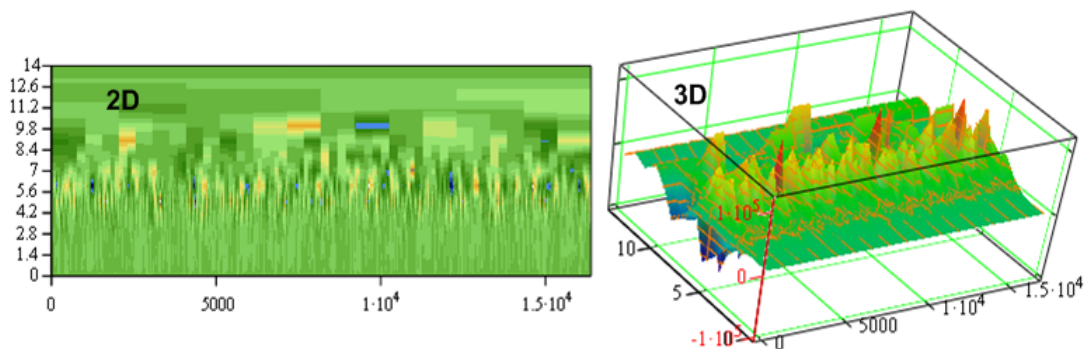


Рис. 7. 2D і 3D вигляд вейвлетного спектру Добеші вібросигналу ДВЗ.

При діагностуванні ЦПГ шумом можуть слугувати сигнали від паливної апаратури, газорозподільного механізму, тощо. Для очистки можна використовувати класичну фільтрацію, однак кращим варіантом є вейвлет очистка. Для початку такої очистки варто провести певні обчислення. Для підготовки вейвлет-перетворення визначається кількість рівнів повної декомпозиції сигналу M і масив доповнюється нулями до потрібної величини 2^M .

$$Ur := \text{ceil}\left(\frac{\ln(j)}{\ln(2)}\right) = \text{ceil}\left(\frac{\ln(16380)}{\ln(2)}\right) = 14, \quad (2)$$

де: j – кількість відліків (точок) записаного віброакустичного сигналу.

При діадному поділу спектра на кожному рівні декомпозиції, перший рівень деталізуючі коефіцієнтів буде сформований із високочастотної частини спектру сигналу від $\pi/2$ до π (в односторонній фізичній шкалі частот). Друга частина спектру від 0 до $\pi/2$ конвертується в апроксимуючі коефіцієнти. На другому рівні апроксимуючі коефіцієнти знову розділяються пополам із перетворенням діапазону $\pi/4$ - $\pi/2$ в деталізуючі, а діапазону 0 - $\pi/4$ в апроксимуючі коефіцієнти другого рівня декомпозиції і таким чином далі до повного розкладу (в нашому випадку 14 раз). Це дозволяє безпосередньо за частотним спектром сигналу встановити

орієнтовну межу шумів і відповідно рівні декомпозиції в яких потужність шумів близька і вище потужності сигналу.

При формуванні нової строчки рівня, коефіцієнти які перевищують встановлені пороги $ub := -3\sigma$ і $ut := +3\sigma$ шумового розподілу, доцільно зберігати повністю із невеликим пониженням значень. Після формування нової строчки декомпозиції (рис. 8) можна замінити нею відповідний рівень розкладу в повному масиві коефіцієнтів і візуально оцінити результат аналізуючи вхідний і вихідний певного рівня декомпозиції сигнали. Після оберненого вейвлет перетворення отриманий сигнал містить як значення власні так і значення вейвлет коефіцієнтів. Іншими словами отримує синтез (змішаний сигнал). Провівши швидке перетворення Фурє можна порівняти спектри чистого (вхідного-зелений) і синтезованого очищеного від шумів (вихідного-червоний) спектрів (рис. 9).

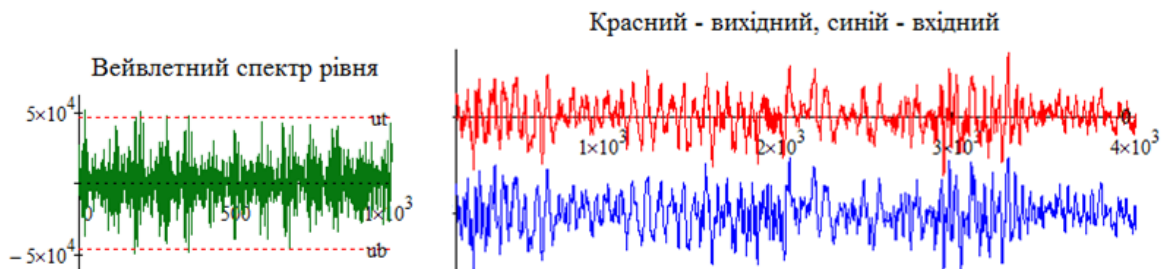


Рис. 8. Четвертий рівень декомпозиції вейвлетного перетворення.

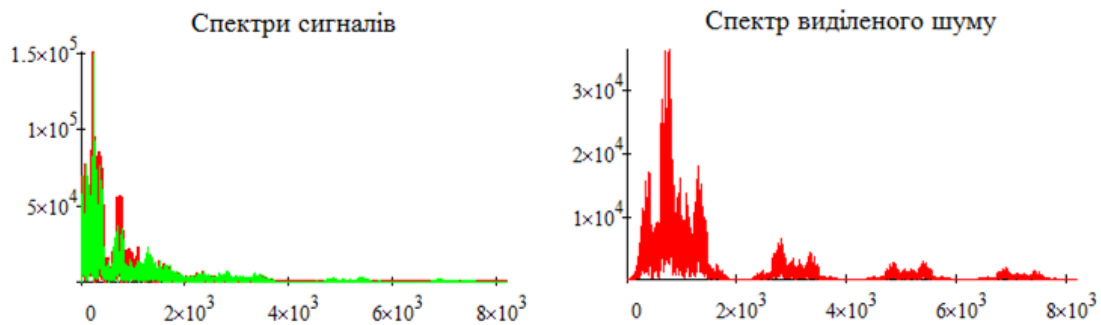


Рис. 9. Спектри до і після вейвлет перетворення та спектр шуму.

На спектрі сигналів можна бачити. Що вейвлетна очистка зберегла по всьому частотному діапазону характерні піки, які формують періодичні скачки значень сигналу, що не може виконати практично ніякий лінійний частотний фільтр. Однак використання після вейвлет очистки сигналу від шуму лінійних фільтрів є досить перспективним з точки зору розділення сигналів (рис. 10).

Використання лінійного полосового фільтру Баттерворда 6 порядку (рис. 10) дозволяє навіть візуально оцінити результат вейвлет очистки сигналу. Сигнал після фільтрації добре розділений і легко може бути використаний для автоматизованої системи

діагностики. Основна проблема такого програмного комплексу полягає в підборі форми вейвлету, вибору рівнів декомпозиції, що після певних досліджень може лягти в основу розробки відповідного автоматизованого програмного комплексу віброакустичного діагностування ДВЗ.

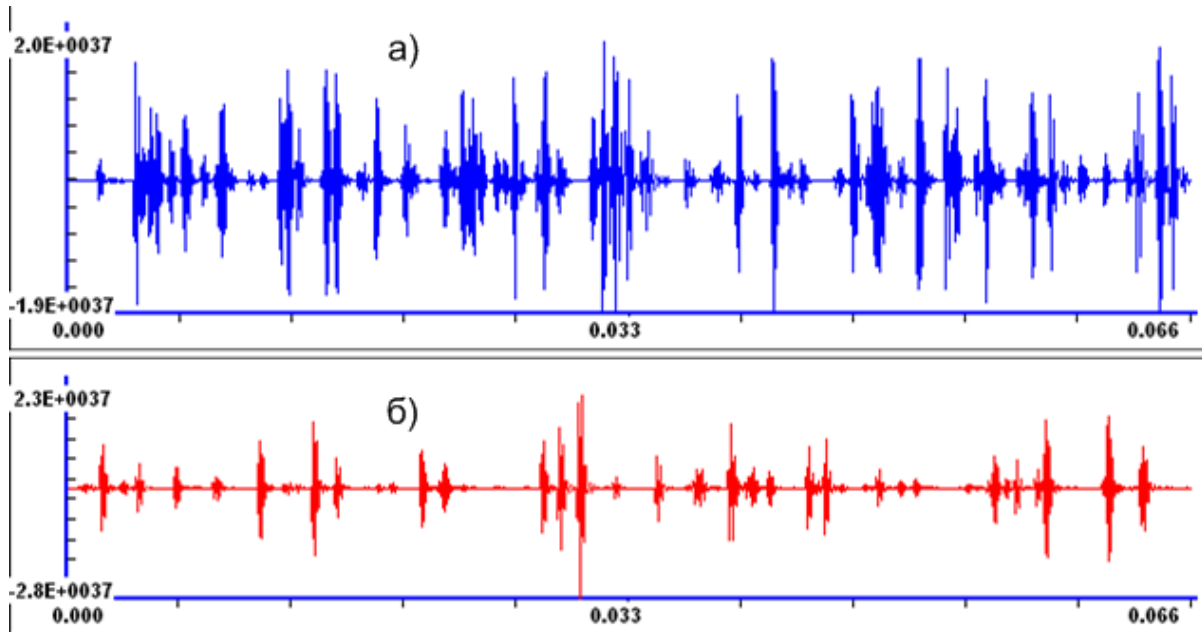


Рис. 10. Фільтрація вихідного а) і очищеного б) від шуму вібросигналу.

Висновок. Проведений аналіз підходів до віброакустичного діагностування ДВЗ показав перспективність використання віконного перетворення Фур'є та вейвлет перетворення. Використання вейвлет перетворення для аналізу віброакустичного сигналу ДВЗ, цього «мікроскопу» для сигналів дає можливість розпізнавати точніше не тільки зміни в стані механізмів ДВЗ, пов'язані із зношенням, а також і локалізацію джерела зміни. Даний механізм обробки вібросигналів варто покласти в основу розробки автоматизованої системи діагностики, роботи над якою уже ведуться на нашій кафедрі НУБіП України.

Список літератури

1. Александров А. А. Вибрация и вибродиагностика судового электрооборудования / А. А. Александров, А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. А. Шафранский. – Изд. “Судостроение”, Ленинград, 1986. – 260 с.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер. – М.: Техносфера, 2006. – 280 с.
3. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла ; пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил. – ISBN 5-03-003691-1.
4. Блаттер К. Вэйвлет-анализ. Основы теории / К. Блаттер. – Москва, 2004. – 280 с. – ISBN 5-94836-033-4.
5. Чуи Ч. Введение в вэйвлеты / Ч. Чуи ; пер. с англ. – М.: Мир, 2001. – 412 с., ил. – ISBN 5-03-003397-1.

6. Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, №5. – С. 465–501.

References

1. Aleksandrov, A. A., Barkov, A. V., Barkova, N. A., Shafransky, V. A. (1986). Vybratsyya y vybrodyahnostyka sudovoho elektrooborudovanyya [Vibration and vibration diagnostics of marine electrical equipment]. Yzd. "Sudostroenye", Leningrad, 260.
2. Blatter, K. (2006). Veyvlet-analyz. Osnovi teoryy [Wavelet analysis. Fundamentals of the theory]. M.: Tekhnosfera, 280.
3. Malla, S. (2005). Veyvleti v obrabotke syhnalov [Wavelets in signal processing]. per. s anhl, M.: Myr, 671, yl. ISBN 5-03-003691-1.
4. Blatter, K. (2004). Veyvlet-analyz. Osnovi teoryy [Wavelet analysis. Fundamentals of the theory]. Moskva, 280, ISBN 5-94836-033-4.
5. Chu, Ch. (2001). Vvedeniye v veyvleti [Introduction to wavelets]. per. s anhl, M.: Myr, 412, ISBN 5-03-003397-1.
6. Dremyn, Y. M., Yvanov, O. V., Nechyaylo, V. A. (2001). Veyvleti y ykh yspol'zovaniye [Wavelets and their use]. Successes of physical Sciences, T. 171, 5, 465–501.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА ВИБРОСИГНАЛОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Л. Л. Тумова, А. В. Надточий

Аннотация. Рассмотрено использование вейвлет анализа виброакустического сигнала дизельного двигателя СМД-31А, как элемента адаптивной модели обработки вибросигнала с целью постановки точного и однозначного диагноза. Приведена очистка виброакустического сигнала от шума с использованием вейвлет преобразования вейвлетом Добеши db4 и доказана эффективность данного алгоритма для разработки программного комплекса виброакустического диагностирования ДВС. Для моделирования использовались математические пакеты Mathcad 15.

Проведенный анализ подходов к виброакустического диагностирования ДВС показал перспективность использования оконного преобразования Фурье и вейвлет преобразования. Использование вейвлет преобразования для анализа виброакустического сигнала ДВС, этого «микроскопа» для сигналов дает возможность распознавать точнее не только изменения в состоянии механизмов ДВС, связанные с износом, а также и локализацию источника изменения. Данный механизм обработки вибросигналов стоит положить в основу розробитку автоматизированной системы диагностики, работы над которой уже ведутся на нашей кафедре НУБиП Украины.

Ключевые слова: вибросигнал, спектр, спектральный анализ, преобразование Фурье, вейвлет, декомпозиция

MODELING OF WAVELET ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS OF DIESEL ENGINE TO DETECT EFFECTIVENESS

L. L. Titova, O. V. Nadtochiy

Abstract. *Considered the use of wavelet analysis of vibro-acoustic signal for diesel engine SMD-31A, as an element of the adaptive processing model of the vibration signal for the purpose of setting an accurate and definitive diagnosis. The cleaning of vibro-acoustic signal from the noise using wavelet transform the Daubechies wavelet db4 and proven effectiveness of this algorithm for the development of a program complex vibro-acoustic diagnostics of internal combustion engines. For modelling we used the mathematical package Mathcad 15.*

The analysis of approaches to vibroacoustic diagnostics of internal combustion engines has shown the prospects of using windowed Fourier transform and wavelet transform. The use of wavelet transform for the analysis of vibro-acoustic signal of the internal combustion engine, this "microscope" for signals enables to identify more precisely not only to changes in the condition of internal combustion engine mechanisms related to wear and tear, and also the localization of the source of the change. This mechanism of processing of vibration signals should be based on a rose robco automated system diagnostics, which are already underway in our Department NULES of Ukraine.

Keywords: *vibration spectrum, spectral analysis, Fourier transformation, wavelet, decomposition*

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ ЗНАРЯДЬ ЗІ СТАЛІ 65Г

Ю. О. Ковальчук, кандидат технічних наук
Уманський національний університет садівництва
e-mail: temp1405@mail.ru

Анотація. *Встановлено залежність впливу різних режимів лазерної обробки на мікротвердість сталі 65Г. Показано розподіл мікротвердості по глибині ґартування зразків із даної сталі при обробці лазером безперервної дії. Визначено швидкість переміщення лазерного променя по поверхні зразка, при якій з'являється зона плавлення. Встановлено вплив режимів лазерної обробки на глибину ґартування зразків сталі 65Г. Виявлено значне підвищення якості зміцнених лазером шарів даної сталі шляхом використання високочастотного сканування лазерного променя.*

© Ю. О. Ковальчук, 2016