

JERZY KWAŚNIEWSKI *

APPLICATIONS OF WAVELET ANALYSIS TO DETECTING WIRE ROPE CRACKS AND ABRASION

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ANALIZY FALKOWEJ DO WYKRYWANIA PĘKNIĘĆ I STARĆ W LINACH STALOWYCH

The paper presents the results of research work into the applications of wavelet analysis to decomposition of signals from induction sensors. Wavelet analysis was found very useful in magnetic inspection of wire ropes. Appropriate levels of signal decomposition, carrying the information about the rope wear-off forms, were duly determined. Various twisted and lay ropes were examined. Thus obtained results show clearly that the wavelet analysis of non-stationary signals is a useful tool for wire rope inspection. Power spectra picked up from the selected levels of signal decomposition [details] allow to quantify the degree of rope wear. Determining the selected levels of decomposition may be further used in design of new-generation flaw detectors.

Key word: diagnosis, magnetic inspection, signal analysis, measurements.

Wraz z rozwojem elektronicznej techniki obliczeniowej nastąpił szybki rozwój teorii związanej z nieparametryczną czasowo-częstotliwościową analizą sygnałów (Zieliński, 1994). Pojawienie się nowych narzędzi obliczeniowych, opierających się na nowoczesnych metodach numerycznego opracowania danych, umożliwiło wydobywanie z niestacjonarnych sygnałów informacji w dziedzinie czasu i częstotliwości. Niestacjonarność sygnałów uzyskiwanych w defektoskopii magnetycznej jest immanentną właściwością diagnozowanych obiektów technicznych oraz generowanych przez nie sygnałów. Również w wielu metodach diagnostycznych stosowanych w defektoskopii materiałowej indukowane są niestacjonarne sygnały.

Ta niestacjonarność sygnału stwarza trudności przy jego analizie i określaniu wpływu poszczególnych form zużycia na stopień osłabienia.

Analiza widmowa sygnałów niestacjonarnych może być realizowana poprzez analizę długoczasową (Tytko, 1998) i krótkoczasową (Daubechies, 1993; Matlab, 1997; Meyer, 1993).

Analizą długoczasową wyznacza się tylko jedno widmo gęstości widmowej mocy (rys. 1) dla danego sygnału niestacjonarnego. W przypadku widma sygnału pochodzącego od diagnozowanej liny zawiera ono ogólną informację o jego stacjonarnym i niestacjonarnym charakterze. Część informacji czasowych lub częstotliwościowych jest z pewnością tracona. Zjawiska niestacjonarne przy takim podejściu są trudne do interpretacji.

Zadaniem analizy widmowej jest wyznaczenie widma mocy szeregu czasowego (Oziemek, 1985; Otnes et al., 1978) sygnału diagnozowanej liny w funkcji częstotliwości. Wartości tego widma dla określonych częstotliwości są proporcjonalne do odpowiadających im kwadratów amplitud.

W analizie krótkoczasowej estymuje się widma sygnału na podstawie jego kolejnych fragmentów, wyznaczonych przez czasowe okno obserwacji przemieszczające się wzdłuż sygnału.

Z analizowanym sygnałem związany jest ciąg krótkoczasowych widm lokalnych. W wyniku analizy krótkoczasowej uzyskujemy częstotliwościową dekompozycję analizowanego sygnału, co pozwala obserwować zmiany jego widma w czasie. Takie podejście pozwala na prawidłową interpretację sygnału niestacjonarnego (Daubechies, 1993; Rioul et al., 1992).

W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z zastosowaniem analizy falkowej do dekompozycji sygnału otrzymanego z czujnika indukcyjnego. Wykazano celowość stosowania tej analizy w defektoskopii magnetycznej lin stalowych. Wyznaczono odpowiednie poziomy dekompozycji sygnału, niosące informację o różnych formach zużycia lin (rys. 4). Przebadano jednosplotkowe (rys. 3) i wielkosplotkowe (rys. 5) liny różnej konstrukcji. Uzyskane wyniki wykazują celowość stosowania falkowej metody analizy sygnałów niestacjonarnych w diagnostyce lin stalowych. Wykonane widma mocy z wybranych poziomów dekompozycji sygnału (detali) (rys. 6) dają możliwości ilościowej oceny stopnia zużycia. Wybrane poziomy dekompozycji sygnału mogą być wykorzystane przy budowie defektografu nowej generacji.

Przedstawione wyniki prac są jedynie fragmentem szerszego problemu związanego z analizą sygnałów niestacjonarnych, z jakimi mamy do czynienia w defektoskopii magnetycznej lin stalowych. Analiza falkowa wykonana dla wyżej wymienionych konstrukcji lin daje wiele informacji o ich stanie, informacji, które w tradycyjnej metodzie magnetycznej z zastosowaniem czujnika indukcyjnego nie były osiągalne.

Słowa kluczowe: diagnostyka, badania magnetyczne, analiza sygnałów, pomiary.

1. Introduction

The advancement of electronic computation techniques paved the way for the theory related to non-parametric time and frequency-based analysis of signals. New tools based on advanced numerical data processing techniques allow to detect the vital information in the time and frequency domain.

Non-stationary characteristic of signals obtained during magnetic inspection is a distinctive feature of inspected structures as well as of signals they generate. Non-stationary signals are also indicated in other flaw detection techniques. That these signals are non-stationary is a serious drawback in signal analysis and in studies how the given wear-off forms impact on structure weakening.

2. Frequency analysis of diagnostic signals

Spectral analysis of non-stationary signals uses either fast Fourier transform [FFT] (Tytko,1998) or short time Fourier transform [STFT] (Daubechies, 1993, Matlab, 1997, Meyer, 1993). FFT provides only one SPD spectrum for the given non-stationary signal. In the case of spectra of signals from the inspected rope, it provides general information about the signal's stationary and non-stationary characteristics. However, some portion of time or frequency information is always lost. This approach makes it rather difficult to tackle non-stationary phenomena. FFT analysis of the twisted rope section is presented in Fig. 1.

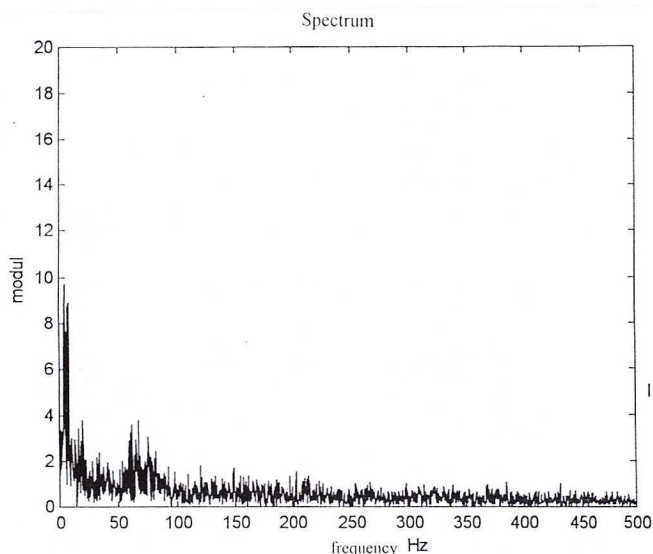


Fig. 1. FFT analysis of the twisted rope section

Spectral analysis is used to obtain the power spectra of time series (Ozimek, 1985, Otnes et al., 1978) of the signal from the inspected rope in the function of frequency. Magnitudes of the spectra for the given frequency are proportional to corresponding amplitudes raised to the second power. STFT affords the estimates of the signal spectra based on the analysis of time-windowed signal sections. The analyzed signal involves a series of short-time local spectra. STFT affords the frequency-based decomposition of the analyzed signal enabling the observations of time variations of its spectrum. Such approach ensures the correct interpretation of non-stationary signals (Daubechies, 1993, Rioul et al., 1992).

3. Wavelet analysis of non-stationary signals

The conventional scale diagram can be defined as follows (Rioul et al., 1992, Zieliński, 1994):

$$S_x^{SCAL} = |CWT_x(b,a)|^2 \quad (1)$$

where CWT is the continuous wavelet transform for the scale a and the shift b , defined as:

$$CWT_x(b, a) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*((t-b)/a) dt \quad (2)$$

This relations represents filtering of the analyzed signal $x(t)$ through the wavelet $\psi(t)$ [i.e. the analyzing signal] time-scaled with the scale factor a .

Numerical calculation of value of the functional Z for integer scale factors, being the subsequent multiples/powers of 2, may involve decimated [dyadic] or non-decimated versions of wavelet transform. The values $a = 2^j$ and $b = k2^j$ were assumed for decimated algorithms. Thus the equation defining the continuous transform (2) yields the discrete transform:

$$DWT_s(j, k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} s(n) \psi_j^*(n - 2^j k) \quad (3)$$

where $\Psi_j^*(n - 2^j k)$ is the discrete counterpart of the continuous analyzing function, and * indicates the discrete convolution.

$$\Psi_{ab}(t) = a^{-1/2} \Psi((t-b)/a) \equiv \Psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}n - k) \quad (4)$$

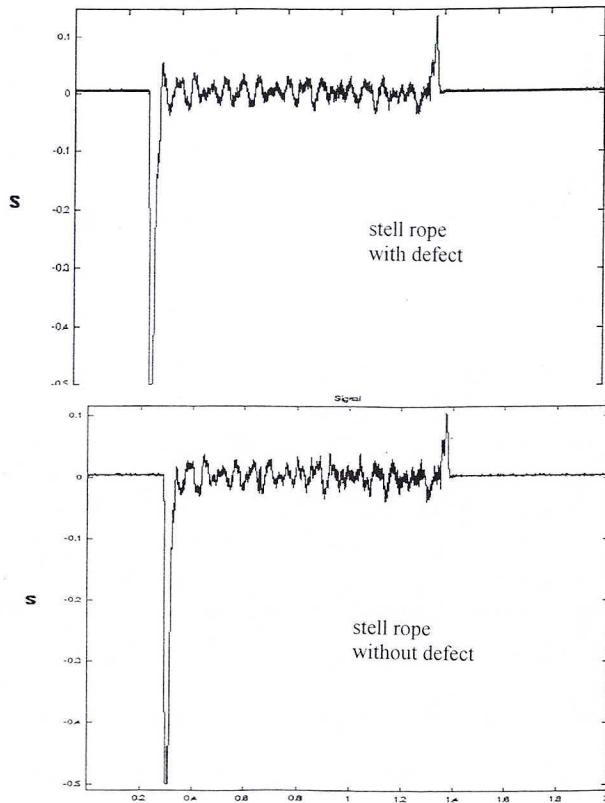


Fig. 2. Comparison of signals from new and worn off ropes

The dependence $\Psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2}\Psi(2^{-j}n - k)$ defines the family of analyzing functions for the dyadic version. The inverse transform required for signal synthesis is given by the formula:

$$s(n) = \sum_{j \in \mathbb{N}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} DWT_s(j, k) \Psi_{j,k}(n) \quad (5)$$

The paper presents the results of studies of modeled modes of ordinary lay ropes and twisted ropes wear, using the discrete transform. A crack was modeled on the twisted rope 40 mm in diameter, that crack generated a signal comparable with the rope noise. Such failures could not be detected using traditional magnetic inspection techniques. On the selected rope section were also signs of abrasion. Traditional methods of visualization of signals from the modeled rope and evaluation of wearing degree proved inadequate in that case. Fig. 2 presents a signal from the brand new rope and the one with modeled wear off symptoms.

The problem was solved using MATLAB [2] software. Wavelet analysis afforded signal decomposition. The biorthogonal wavelet ("bior 3.7") and eight levels of decomposition were applied in the analysis of signals from twisted ropes. Fig. 3. presents selected details (levels of decomposition) of the signal. On the 6th level we get the view where we can easily detected the signal from the modeled defect of abrupt nature. The 3rd level is responsible for abrasive wear.

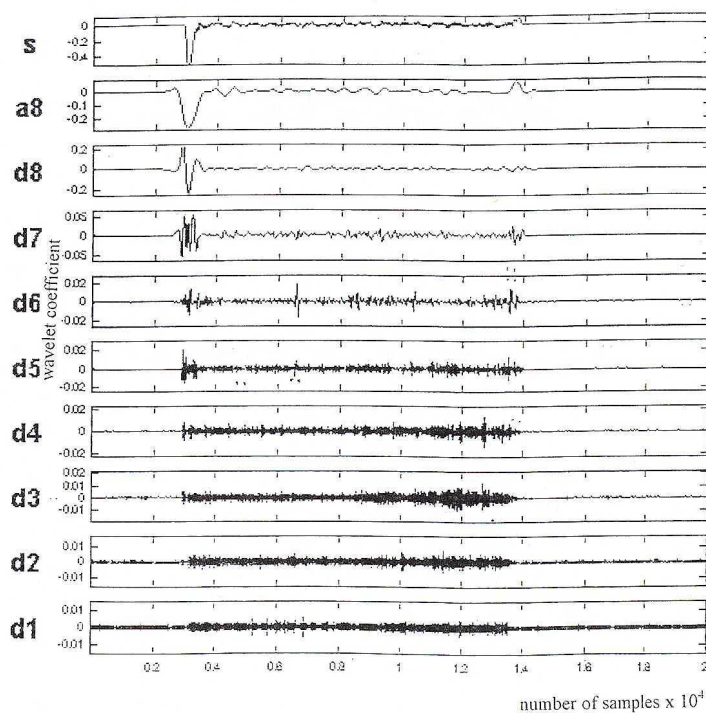


Fig. 3. Decomposition of signals from the inspected twisted rope

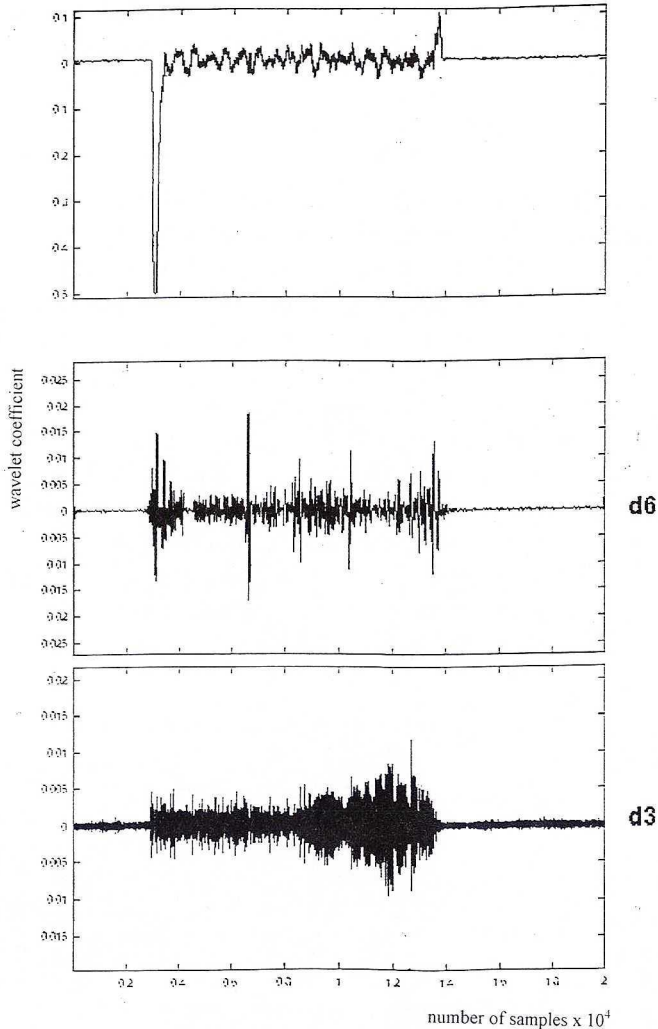


Fig. 4. Selected details of signal decomposition

Selected details are enlarged and presented in Fig. 4 and afford a better view of the impacts of individual wear off forms on the signal's shape. Observation of the 6th level makes it possible to precisely locate the wire breaks (cracks) while the signs of abrasion are found on the level 3.

Abrupt cracks and abrasions were also modeled for ordinary lay ropes. Signal decomposition is presented in Fig. 5.

To analyze the rope of such construction we used the wavelet symlets ("sym8"). The 6th level represents abrasive wear while the cracks are best seen on the 8th level.

Further analysis of thus obtained details using FFT gives us the answer to the question how to spot the frequency at which rope abrasion is produced.

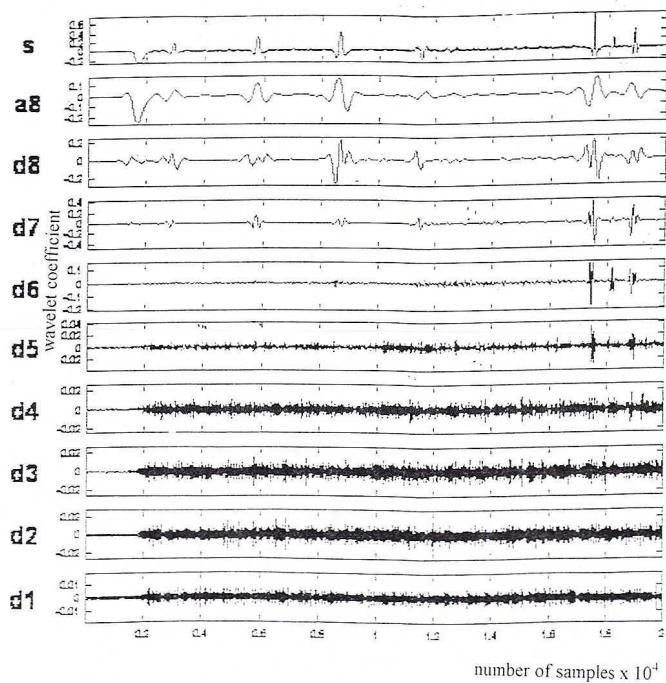


Fig. 5. Decomposition of a signal from an ordinary lay rope

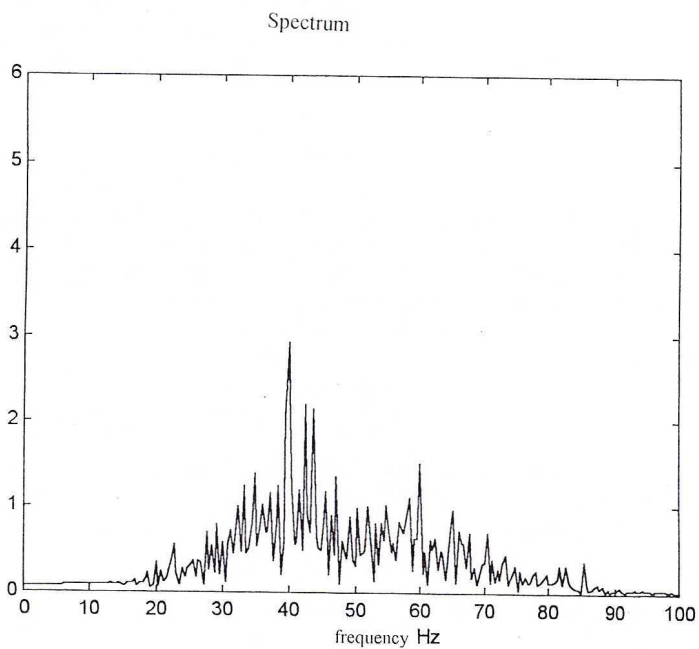


Fig. 6. FFT analysis 6th level decomposition of a signal

Studying the effects of the abrasive wear degree on the shape of the power spectrum in FFT analysis of selected signals decompositions, we are able to quantify the magnitude of the signal. Fig. 6 presents a selected FFT analysis the 6th level decomposition of a signal from the ordinary lay rope.

Enhancing the abrasion of the studied rope section results in an increased amplitude of frequency at which abrasive wear occurs.

The results presented here make only a small portion of much wider research field: the analysis of non-stationary signals encountered in magnetic inspection of wire ropes. Wavelet analysis performed for the ropes considered here offers some information about rope condition while traditional flaw detection techniques making use of induction sensors proved inadequate in that respect.

4. Conclusions

1. Decomposition of measuring signals through the wavelet transform makes it possible to detect various forms of rope wear, which often remained undetected when examined using traditional methods.

2. Selection of an appropriate wavelet is extremely important for detecting defects of abrupt nature as well as continuous ones.

3. Discrete wavelet analysis affording limited area coding proves very useful in these applications.

Artykuł został opracowany w ramach pracy statutowej Katedry Transportu Linowego nr 11. 130. 43 pt. „Jakość, niezawodność oraz bezpieczeństwo lin i urządzeń transportu linowego”.

REFERENCES

- Daubechies I., 1993. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia, SIAM.
- Matlab; 1997, Wavelet Toolbox, The Math Works Inc., Natick, Mass.
- Meyer Y. 1993, Wavelets Algorithms & Applications. Philadelphia, SIAM.
- Otnes R.K., Enochson L., 1978. Analiza numeryczna szeregów czasowych. Warszawa, WNT.
- Ozimek E., 1985. Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów. Warszawa—Poznań, PWN.
- Rioul O., Duhamel P., 1992. Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms. IEEE Trans. on Information Theory. Vol. 38, No. 7.
- Rioul O., Vetterli M., 1991. Wavelets and Signal Processing. IEEE Signal Processing Magazine, (s. 14—38).
- Tytko A., 1998. Modelowanie zużycia zmęczeniowego i diagnostyka lin stalowych. Rozprawy, Monografie Nr 65, Wyd. AGH, Kraków.
- Zieliński T.P., 1994. Reprezentacje sygnałów niestacjonarnych typu czas-częstotliwość i czas-skala. Kraków, Wydawnictwa AGH.

REVIEW BY: PROF. DR HAB. INŻ. WOJCIECH BATKO, KRAKÓW

Received: 17 May 1999.