

ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI FALKOWEJ DO BEZKONTAKTOWEJ DETEKЦИИ PĘKNIĘCIA SZYBY

Ireneusz BEMKE, Romuald ZIELONKO

Katedra Metrologii i Systemów Elektronicznych, Wydział Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. +48 58 3472197, fax. +48 58 3472257 bemke@mercury.perfect.net.pl; zielonko@eti.pg.gda.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad zastosowaniem transformacji falkowej do bezkontaktowej detekcji pęknięć tafli szklanej, drogą analizy odebranego sygnału akustycznego. Przeprowadzono je w celu opracowania algorytmu detekcji, a następnie układu detektora spełniającego normy obowiązujące dla systemów alarmowych. Przedstawiono podstawy teoretyczne transformacji falkowej, z podkreśleniem jej cech korzystnych dla zastosowań do analizy sygnałów towarzyszących pękaniu szkła. Opisano metodykę badań oraz system pomiarowy wraz z oprogramowaniem sterującym. Przedstawione wyniki uzyskano na podstawie analizy wybranych 72 rekordów z niszczących i nieniszczących narażeń różnych tafli szklanych.

Słowa kluczowe: transformacja falkowa, algorytm diagnostyczny, pękanie szyby

APPLICATION OF WAVELET TRANSFORMATION IN CONSTRUCTION OF GLASS PANE BRAKE DETECTOR.

Summary

The paper presents results of research on application of wavelet transformation for remote detection of glass pane break by analysis of received acoustic signal. Research was made for design of algorithm and detector circuit, which meet standards required for alarm equipment. In article a theoretical basis of wavelet transformation is given, especially W.T. features favorable for analysis of acoustic signals of glass breaks. Methodology of research and measurement system with control software are presented. The results of research was made by analysis of selected 72 records of destructive and nondestructive experiments on various glass panes.

Keywords: wavelet transformation, diagnostic algorithm, glass pane breaking

1. WSTĘP

W związku z tym, iż znaczna część włamań do budynków (ponad 1/3) następuje przez oszkłone fragmenty ścian, istnieje silne zainteresowanie badaniami nad wykrywaniem momentu pęknięcia szyby dla zastosowań alarmowych. Rozpowszechnione dotąd kontaktowe metody detekcji (paski przewodzące, czujniki wibracji) są zastępowane metodami bezkontaktowymi i bezprzewodowymi. Wśród nich największe zainteresowanie budzą metody akustyczne bazujące na analizie sygnałów dźwiękowych przez centralnie umieszczony detektor. Wadą dotychczasowych rozwiązań detektorów tego typu była niska odporność na sygnały fałszywe. Obowiązujące normy stawiają ostre wymagania odnośnie fałszywych alarmów (samoistnych i prowokowanych), żądając niemal stu procentowego zabezpieczenia przed nimi.

Następstwem tego jest podejmowanie badań nad jednoznacznością detekcją momentu dezintegracji szyby, do której zalicza się nie tylko jej stłuczenie, lecz nawet pęknięcie. Jest to zagadnienie trudne ze względu na amorficzność szkła, dużą różnorodność

grubości i wymiarów tafli oraz różne rodzaje szyb (zwykle, hartowane, laminowane, zbrojone). Dodatkowe trudności sprawia też różnorodność sygnałów zakłócających (zjawiska atmosferyczne, ruch uliczny, celowe zakłócenia, dźwięki wewnętrzne budynku). Specyficznym wymaganiem jest niska cena detektora, która implikuje zastosowanie procesorów o skromnej mocy obliczeniowej.

Jedno z nielicznych rozwiązań spełniające wspomniane wymagania jest przedstawione w pracy [8] referowanej na tej konferencji. Zastosowano w niej analizę czasowo-częstotliwościową sygnału akustycznego oraz przekształcenie Hilberta. Nowe możliwości postępu w tej dziedzinie (zmniejszenie złożoności obliczeniowej, obniżenie kosztów) rokuje transformacja falkowa. Wstępne wyniki badań nad zastosowaniem transformacji falkowej do detekcji momentu pęknięcia szyby są treścią tej pracy.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE W.T.

Transformacja falkowa należy do grupy narzędzi JTFA (Join Time – Frequency Analysis). Pozwala na analizę sygnałów z uwzględnieniem ich dynamiki

jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości. W istocie polega na rozłożeniu analizowanego sygnału na współczynniki reprezentujące zawartość w nim odpowiednio przesuniętych i przeskalowanych wersji funkcji bazowej $\gamma(t)$ (falki podstawowej), czyli jest rzutowaniem sygnału na przestrzeń rozpinaną przez funkcje bazowe $\gamma[(\tau-t)/a]$. Falkami bazowymi mogą być funkcje spełniające kilka warunków opisanych w pracach [4], [9] i [10]. Podstawową wersję transformacji, określaną mianem ciągłej transformacji falkowej w dziedzinie czasu opisuje wyrażenie

$$CWT_x(t, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \gamma^* \left(\frac{\tau-t}{a} \right) d\tau \quad (1)$$

W wyrażeniu tym $a \in \mathcal{R}^+$ i jest współczynnikiem skali, który powoduje ściskanie (dla $a < 1$) lub rozciąganie (dla $a > 1$) funkcji bazowej $\gamma(t)$, co odpowiada poruszaniu się po osi częstotliwości, współczynnik $|a|^{(1/2)}$ umieszczony przed całką zapewnia zachowanie energii sygnału i energii jego transformaty, $\tau \in \mathcal{R}$ reprezentuje przesunięcie funkcji bazowej $\gamma(t)$ po osi czasu i umożliwia analizę zmienności sygnału w dziedzinie czasu. Odwrotna Ciągła Transformacja Falkowa określona jest równaniem (2) i równoważna jest odtworzeniu przebiegu.

$$x(t) = \frac{2}{a^2 C_\gamma} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CWT_x^T(\tau, a) g \left(\frac{t-\tau}{a} \right) d\tau da, \quad (2)$$

przy czym:

$$C_\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Gamma(f)|}{|f|} df < \infty, \quad \Gamma(0) = 0, \quad (3)$$

stanowi energię zawartą w pojedynczej funkcji bazowej - która musi być ograniczona, $\Gamma(f)$ to widmo fourierowskie funkcji bazowej (falki). We wzorze (2) całkowanie po osi skal ("da") odpowiada całkowaniu po osi częstotliwości. Równanie (3) natomiast jest jednym z fundamentalnych warunków jakie musi spełniać falka podstawowa (a więc i każda otrzymana z niej falka). Dyskretyzacja osi prowadzi do powstania dyskretnoczasowej wersji transformacji falkowej. Przyjmując najczęściej stosowany - diadyiczny sposób skalowania

$$t = n2^{-m} \quad \text{oraz} \quad a = 2^{-m}, \quad (4)$$

otrzymujemy zależność:

$$DWT_x(m, n) = 2^{\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \gamma^* (2^m \tau - n) d\tau. \quad (5)$$

Transformata odwrotna zaś określona jest równaniem:

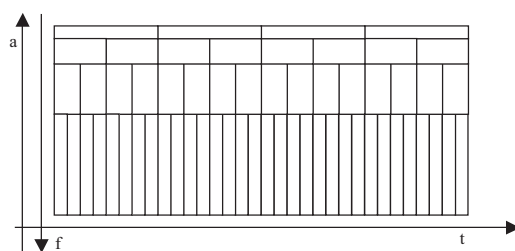
$$x(t) = 2^{\frac{m}{2}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} DWT_x(n, m) g(2^m t - n). \quad (6)$$

Wyniki transformaty falkowej przedstawiane są na płaszczyźnie (t, a) lub (n, m) odpowiednio jako współczynniki określone zależnościami:

$$A_x(t, a) = |CWT_x(t, a)|^2, \quad (7)$$

$$A_x(n, m) = |DWT_x(n, m)|^2 \quad (8)$$

Rozdzielczość w obu osiach jest zmienna i zależna od współczynnika skali. Przy założeniach (4) oczka siatki rozdzielczości mają stałą powierzchnię, a sposób ich rozmieszczenia przedstawia rys 1.



Rys. 1. Siatka rozdzielczości czasowo-częstotliwościowej analizy falkowej

Niestety ciągła i dyskretnoczasowa transformata falkowa dają w wyniku reprezentację o dużej redundancji. Taka postać sygnału jest mało efektywna. W praktycznych zastosowaniach stosowana jest analiza z wykorzystaniem skojarzonych z falkami filtrów falkowych, których współczynniki wyznaczone są na drodze przekształceń teorii analizy wielorozdzielczej. Co więcej, w praktyce stosuje się często podejście odwrotne - to znaczy metodami adaptacyjnymi dobiera się współczynniki filtrów do konkretnych zastosowań (lub o założonych cechach określonych przez układy równań), a następnie na ich podstawie odtwarza wygląd skonstruowanej falki. Zależności dotyczące analizy wielorozdzielczej wyjaśniają pozycje [4] i [9]. Najważniejszym elementem jest określenie układu równań warunków koniecznych do konstrukcji filtrów falkowych (9) i zależności pomiędzy filtrami (10).

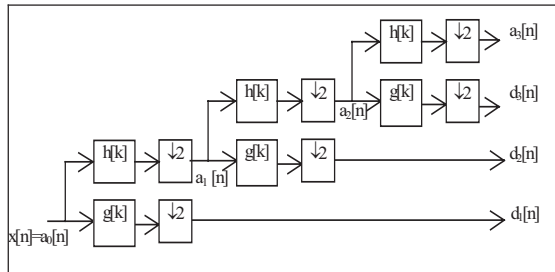
$$\begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} h(n) = \sqrt{2} \\ \sum_{n=0}^{N-1} h(n)h(n-2k) = \delta(k) \quad k = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$g(n) = \pm(-1)^n h(N-1-n). \quad (10)$$

Przy czym $h(n)$ i $g(n)$ reprezentują odpowiednio dolno- i górnoprzepustowy analityczny filtr falkowy. Układ równań (9) określa $N/2+1$ warunków dla każdego N niewiadomych. Otrzymany podokreślony układ równań posiada $N/2-1$ stopni swobody, które pozwalają na dobieranie własnych warunków dodatkowych jakie spełniać mają konstruowane falki.

Analizę wieloskalową sygnału przeprowadza się zgodnie z algorytmem zaproponowanym przez

Mallata (rys. 2). Ciągi uzyskane w wyniku filtrowania filtrem dolnoprzepustowym $h(k)$ nazywane są aproksymacjami na poziomie „j” i stanowią zgrubną reprezentację sygnału. Ciągi uzyskane za pomocą filtrowania filtrem górnoprzepustowym $g(k)$ reprezentują szczegóły zawarte w sygnale i nazywane są detalami na poziomie „j”.



Rys. 2. Algorytm Mallata

Algorytm ten nie określa z góry ilości powtórzeń (poziomów aproksymacji). Wartości te przyjmowane są dla konkretnych klas sygnałów lub ustalone dynamicznie podczas wykonywania analizy. Operacje splatania i decymacji realizuje się z reguły jednocześnie, co przedstawia zapis analityczny

$$a_{j+1}[n] = \downarrow_2 [a_j[n] * h[k]] = \sum_k a_j[2n-k]h[k]$$

$$d_{j+1}[n] = \downarrow_2 [a_j[n] * g[k]] = \sum_k a_j[2n-k]g[k]$$
(11)

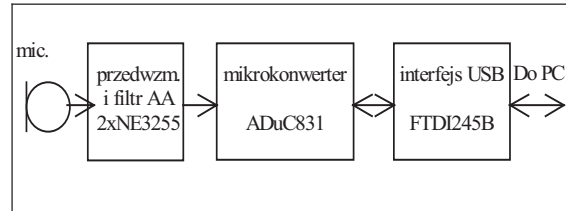
przy czym \downarrow_2 oznacza decymację przez 2. Równania te nazywane są równaniami szybkiej transformacji falkowej (z angielskiego FWT – fast wavelet transformation) i stanowią podstawę działania wydajnych algorytmów analizy sygnałów, w szczególności nadają się do analizy sygnałów niestacjonarnych. Właściwości DWT i spłotu pozwalają na opracowanie bardzo wydajnego algorytmu FWT co dokładniej opisano w [1] i [2]. Złożoność obliczeniowa FWT jest proporcjonalna do długości sygnału (N) i znacznie mniejsza niż złożoność obliczeniowa FFT - $N \log_2 N$. Obok mniejszej złożoności obliczeniowej walorem predysponującym zastosowanie FWT do detekcji pęknięcia szyby jest duża różnorodność falek, możliwość ich doboru do modelowania badanego zjawiska i optymalizacji algorytmu detekcji.

3. METODYKA BADAŃ

Specyficzną cechą badanego zjawiska jest brak modelu matematycznego opisującego proces pęknięcia szkła pod wpływem różnego rodzaju narażeń (mechanicznych, termicznych). W związku z tym wykluczone są badania symulacyjne, a konieczne kosztowne badania fizyczne na obiektach rzeczywistych.

W pierwszym etapie badań opracowany został system pozyskiwania danych umożliwiający rejestrację cyfrowych rekordów sygnałów akustycznych, które mogą być wielokrotnie wykorzystywane do analizy z zastosowaniem różnych typów falek.

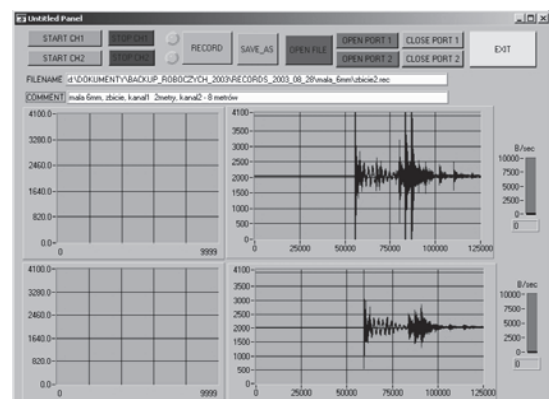
System (rys. 3) składa się z mikrofonu o paśmie przenoszenia od 10Hz do 30kHz, przedwzmacniacza o regulowanym wzmacnieniu (1-8 razy), mikrokonwertera ADuC831 zawierającego obok procesora przetwornik A/C o rozdzielczości 12 bitów i szybkości próbkowania do 247kS/s., oraz bloku interfejsu USB zbudowanego na układzie FTDI245B, łączącego system z komputerem PC.



Rys. 3. Schemat blokowy układu akwizycji sygnałów akustycznych

W środowisku LabWindows/CVI opracowano program nadzorujący pracę dwu równoległych torów akwizycji danych i zapisujący rekordy na dysku twardym. Na rysunku 4 pokazano widok panelu głównego oprogramowania z widocznymi przyciskami sterującymi (u góry). Poniżej znajduje się wiersz ścieżki dostępu i nazwy pliku oraz wiersz komentarza opisującego warunki eksperymentu (rodzaj i rozmiary szyby, rodzaj zbijaka, odległość mikrofonu od szyby itp.). W części centralnej znajdują się okna z widocznymi przebiegami rejestrowanych sygnałów.

Za pomocą zrealizowanego systemu dokonano rejestracji sygnałów z kilkudziesięciu eksperymentów, w tym 15 niszczących tafle szklane. Do analizy wykorzystano również kilkadziesiąt rekordów uzyskanych przez autorów publikacji [8] prowadzących badania omawianego zjawiska z wykorzystaniem transformacji Hilberta do detekcji pęknięcia szyby.

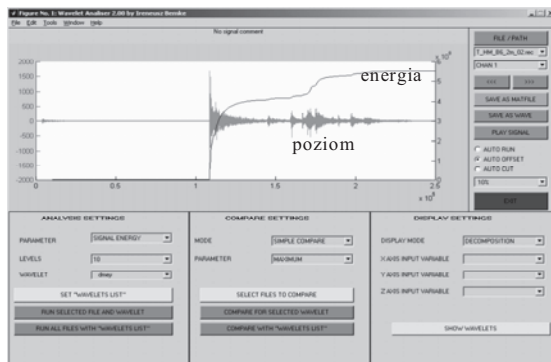


Rys. 4. Widok panelu głównego programu sterującego pracą systemu akwizycji

Ze względu na potrzebę zapewnienia możliwości porównywania wyników badań obu zespołów, zastosowano obniżoną w stosunku do możliwości przedstawionego systemu pomiarowego, szybkość próbkowania sygnału 50kS/s. Do analizy wybrano w

sumie 72 rekordy wyselekcjonowane z eksperymentów obu zespołów.

Obliczenia przeprowadzono z użyciem, oprogramowania, opracowanego w środowisku MATLAB z pakietem Wavelet Toolbox, realizującego transformację falkową z możliwością zastosowania 40 różnych falek i zaawansowanymi trybami prezentacji wyników (skalogramy CWT 2D, 3D, rekonstrukcja pasm częstotliwościowych sygnału, dekompozycja DWT 2D i 3D). Na rys. 5 przedstawiono widok panelu głównego wykorzystywanego oprogramowania wraz z uwidocznionym w części centralnej przebiegiem czasowym poziomu sygnału zbitcia szyby, oraz jego reprezentację energetyczną.

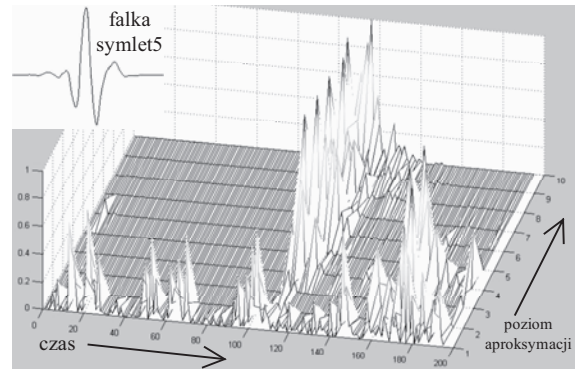


Rys. 5. Widok panelu głównego programu do analizy falkowej sygnałów; widoczny przebieg czasowy sygnału zbitcia szyby

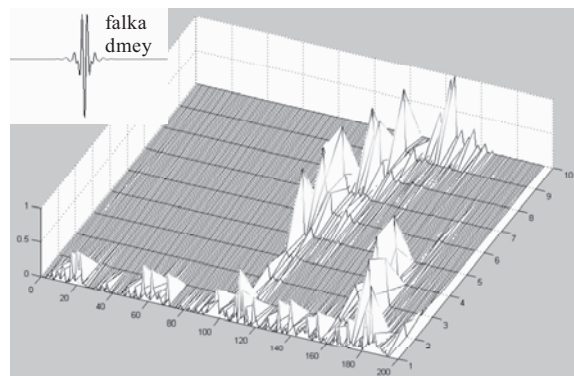
4. ANALIZA ZEBRANYCH DANYCH

Analizie poddano różne reprezentacje zarejestrowanych sygnałów (poziom, moc i energia). Stosowano różne rodzaje ich obróbki: dekompozycję CWT, dekompozycję DWT, rekonstrukcję pasm. Przystudowano wyniki analizy z wykorzystaniem w sumie 37 różnych falek i określono reprezentacje sygnałów oraz odpowiadające im rodzaje falek najbardziej przydatne z punktu widzenia detekcji pęknięcia szyby. W początkowym etapie badań autorzy stosowali prezentowany w publikacji [8] czteroetapowy opis procesu zbitcia szyby: uderzenie – absorpcja - kruszenie - spadanie odłamków.

Rysunki 6 i 7 przedstawiają reprezentację sygnału prawdziwego (zbitcia), po przetworzeniu DWT algorytmem Mallata z użyciem falek symlet5 i dmey i odpowiednio. Widać, że obróbka WT na kolejnych poziomach aproksymacji począwszy od 2 wwyż pozwala wyraźnie wydobyc częstotliwościowe cechy sygnału odpowiadające fazom uderzenia i pęknięcia w odróżnieniu od przebiegu na poziomie 1. Z porównania rys. 6 i 7 wynika, iż falka symlet5 lepiej wydobywa dystyngtywne cechy sygnału niż falka dmey. Wadą falki dmey jest także postępujące przesunięcie sygnału na wyższych poziomach aproksymacji. Zgodnie z oczekiwaniami i doniesieniami literatury [6] potwierdza się silna zależność efektywności reprezentacji sygnału od rodzaju falki zastosowanej w analizie WT.

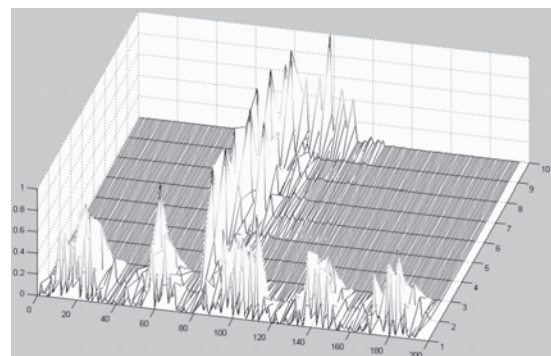


Rys. 6. Unormowana reprezentacja DWT sygnału zbitcia szyby ; falka symlet5; szyba o wymiarach 50 x100cm, 6mm grubości, zbitcie młotkiem stalowym



Rys. 7. Unormowana reprezentacja DWT sygnału zbitcia szyby ; falka dmey; szyba jak poprzednio

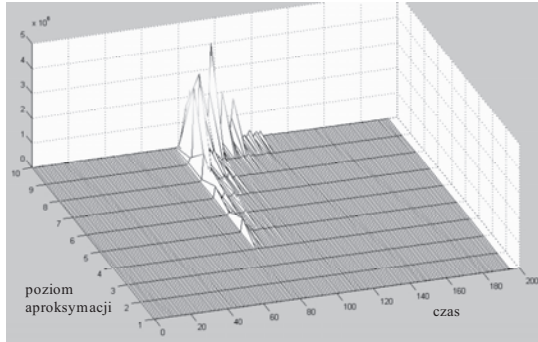
Dla porównania rysunek 8 przedstawia unormowaną reprezentację falkową sygnału fałszywego (nie powodującego pęknięcia). Widoczne w niej są tylko składowe związane z uderzeniem i absorpcją energii, a brak jest reprezentacji faz kruszenia i spadania odłamków.



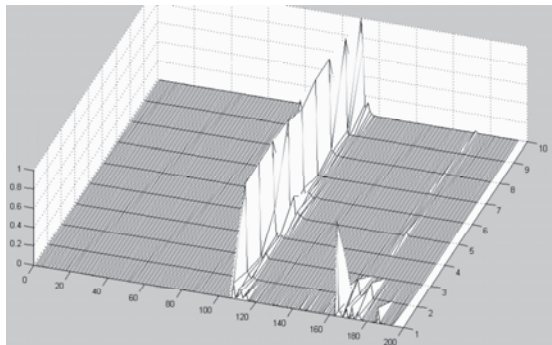
Rys. 8. Unormowana reprezentacja DWT sygnału fałszywego; falka symlet5; szyba jak poprzednio.

Rysunek 9 przedstawia reprezentację falkową tego samego sygnału, co rys. 6 i 7, bez normalizacji. Jak widać różnice amplitud na poszczególnych po-

ziomach są znaczne (ponad 10 razy), co może prowadzić nawet do „ukrycia” elementów składowych sygnału (niewidoczna jest faza spadania odłamków). Wynika stąd, iż w analizie (dla umożliwienia porównywania falek) jak też w algorytmie detekcji konieczne jest normowanie sygnałów na poszczególnych poziomach aproksymacji (do maksimum lub średniej).



Rys. 9. Nieunormowana reprezentacja DWT sygnału zbitcia szyby ; falka symlet 5; szyba jak poprzednio



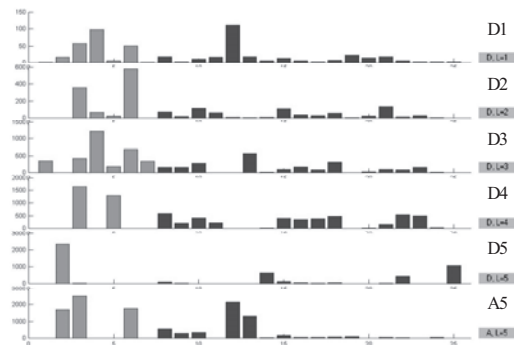
Rys. 10. Unormowana reprezentacja DWT energii sygnału prawdziwego; falka symlet5; szyba jak poprzednio

Ważnym aspektem analizy WT jest rodzaj reprezentacji wejściowej sygnału. Dla porównania rysunek 10 przedstawia unormowaną reprezentację DWT energii zawartej w sygnale prawdziwym. Zauważalny jest zanik składowych związanych z szumem w sygnale na poziomie 1, a wyraźnie widoczne stały się elementy sygnału odpowiadające fazom uderzenia i spadania odłamków. Przy braku normalizacji pogłębiają się różnice w amplitudach na poszczególnych poziomach aproksymacji.

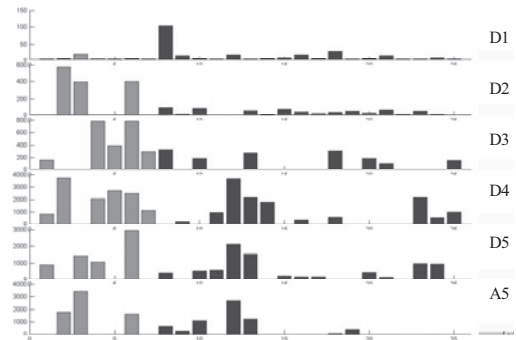
Przedstawione tu cechy zadecydowały o syntezy algorytmu detekcji pęknięcia na podstawie modelu uwzględniającego 4 fazy procesu dezintegracji szyby. Badania wykazały jednak, że algorytm taki nie spełnia wymagań norm VdS (90% detekcyjności i 100% odporności na sygnały fałszywe).

Poszukując bardziej efektywnych parametrów identyfikacyjnych sygnałów podjęto badania nad wykorzystaniem wartości średnich, skutecznych i maksymalnych współczynników falkowych oraz ich

pochodnych na poszczególnych poziomach aproksymacji algorytmem Mallata. Podobnie jak przedtem użyto różnych postaci sygnału (poziom, moc, energia) oraz uwzględniono duży zbiór falek.

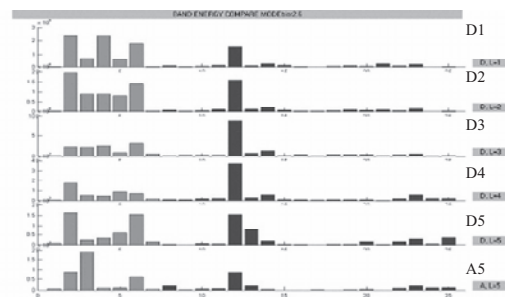


Rys. 11. Analiza porównawcza; maksima współczynników na poszczególnych poziomach; falka symlet5



Rys. 12. Analiza porównawcza; maksima współczynników na poszczególnych poziomach; falka dmey

Rysunki 11 i 12 przedstawiają na kolejnych poziomach aproksymacji wyniki porównania wartości maksymalnych współczynników DWT sygnałów przetworzonych za pomocą falek symlet5 i dmey. Uwidoczniono na nich maksymalne wartości współczynników detali dla poziomów 1-5 oraz współczynników aproksymacji na poziomie 5. Słupki jaśniejsze odpowiadają sygnałom prawdziwym, ciemniejsze natomiast fałszywym. Jak widać nie ma tutaj wyraźnych różnic pomiędzy sygnałami prawdziwymi i fałszywymi.



Rys. 13. Analiza porównawcza; maksima współczynników energetycznych na poszczególnych poziomach; falka bior2.6

Badania wykazały, iż najsukuteczniejszą reprezentacją sygnału jest postać energetyczna, co potwierdza poprzednie wyniki. Rodziną falek która te różnice wydobywa najlepiej, jest zbiór falek biortogonalnych. Rysunek 13 przedstawia porównanie maksimów sygnałów, przy przetwarzaniu postaci energetycznej falką bior2.6. Na poziomach 1 i 2 dobrze widoczne są różnice pomiędzy sygnałami prawdziwymi i fałszywymi. Wykorzystanie tych cech otwiera nowe możliwości doskonalenia algorytmu detekcji pęknięć.

Z analizy wyników obu etapów przeprowadzonych badań wynika, iż należy skoncentrować uwagę na pierwszych dwóch etapach sygnału akustycznego odpowiadających uderzeniu i absorpcji energii. Fazy 3 i 4 są silnie zależne od warunków otoczenia, mogą zatem obniżać efektywność algorytmu detekcji zarówno w sensie odporności na sygnały fałszywe, jak też detekcyjności sygnałów prawdziwych. Badania potwierdziły dużą użyteczność aparatu analizy W.T. (wynikającą głównie z możliwości wyboru falki i poziomów aproksymacji) w rozwiązywaniu trudnego problemu niezawodnej detekcji pęknięcia szkła.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody WT i wyniki wstępnych badań dotyczących zastosowania transformacji falkowej do detekcji pęknięcia szyby nie doprowadziły na razie do opracowania efektywnego algorytmu detekcji, spełniającego normy VdS. Wskazały jednak drogę postępowania do osiągnięcia tego celu w sposób bardziej analityczny, a mniej heurystyczny od metod dotychczas stosowanych. Podstawowe wnioski przeprowadzonych badań:

- Wydobywanie dystynktywnych cech sygnałów niszczących i nieniszczących narażeń szyby w istotny sposób zależą od rodzaju falki. Możliwość wyboru falki z licznego ich zbioru jest silną stroną aparatu analizy WT rokującą syntezę efektywnych algorytmów detekcji pęknięcia szyby.
- Z pośród trzech rodzajów reprezentacji wejściowej sygnału (poziom, moc, energia) najbardziej korzystna z punktu widzenia dystynktywnych cech pęknięcia jest reprezentacja energetyczna, a dobrymi parametrami porównawczymi są wartości maksymalne współczynników
- Fazy 3 i 4 (kruszenia i spadania odłamków) nie występują lub są silnie zależne od warunków pomieszczenia (np. rodzaj wykładziny podłogowej), w związku z tym w dalszych badaniach należy skoncentrować uwagę na fazach 1 i 2 (uderzenie i absorpcja) występujących w sygnałach wszystkich narażeń mechanicznych, i posiadających największe amplitudy.

LITERATURA

- [1] Bemke I.: „Algorytm dyskretnej transformacji falkowej zoptymalizowany dla implementacji w mikrokontrolerze“, Elektronika, nr 7–8, 2002.
- [2] Bemke I.: „Implementacja algorytmu szybkiej transformacji falkowej w mikrosystemie pomiarowym dla celów badawczo – dydaktycznych”, PTETIS, Gdańsk 2002.
- [3] Bemke I. Tłaga W.: „Zdalna diagnostyka tafli szklanej z zastosowaniem transformaty falkowej”, Konferencja Napędy i Sterowanie, Gdańsk, 18–19 lutego 2004.
- [4] Białasiewicz J.T.: „Falki i aproksymacje”, WNT Warszawa 2000.
- [5] Brzyski M. „Czujki stłuczenia szyby” cz. 1 Zabezpieczenia, nr 6/2002 str. 47-49, oraz cz. 2 Zabezpieczenia, nr 1/2003, str. 32-34.
- [6] Horodko L.: „Wpływ typu falki na własności czasowo – częstotliwościowej reprezentacji niestacjonarnego sygnału”, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Nr 886, Elektryka, z. 98. Rok 2001.
- [7] Tłaga J., Tłaga W.: „Synteza algorytmu detekcji pęknięcia szyby metodą *data fission – data fusion*.” Zabezpieczenia nr 2/2004,
- [8] Tłaga J., Tłaga W.: „Zdalna diagnostyka tafli szklanej z zastosowaniem elementów analizy sygnałów Hilberta” Międzynarodowy Kongres Diagnostyki Technicznej, Poznań 2004
- [9] Wojtaszczyk P.: „Teoria falek”, PWN, Warszawa 2000.
- [10] Zieliński T. P. „Wavelet Transform Applications in Instrumentation and Measurement: Tutorial & Literature Suvery”, Metrology and Measurement 1/2004



Ireneusz BEMKE, mgr inż. Specjalność naukowa: zastosowania mikrokontrolerów w kontroli, nadzorze i sterowaniu procesów przemysłowych; uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Pol. Gdańskie. Pracuje zawodowo w przemyśle elektronicznym.



Romuald ZIELONKO, prof. Zw. Pol. Gdańskiej; Specjalność naukowa: metrologia i diagnostyka elektroniczna, systemy pomiarowe. Kierownik Katedry Metrologii i Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki; Wiceprzewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN; Redaktor naczelny kwartalnika *Metrology and Measurement Systems*.