

## ZDALNA DIAGNOSTYKA TAFLI SZKLANEJ Z ZASTOSOWANIEM ELEMENTÓW ANALIZY SYGNAŁÓW HILBERTA

Jerzy TLAGA, Waldemar TLAGA

Politechnika Gdańska, Katedra Metrologii i Systemów Elektronicznych,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, e-mail: [tlaga@pg.gda.pl](mailto:tlaga@pg.gda.pl)

### Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań nad konstrukcją detektora wykrywającego moment pęknięcia tafli szklanej drogą analizy sygnału dźwięku. W pierwszym podejściu zastosowano metodę JTFA (ang. *Joint Time-Frequency Fourier Analysis*) do analizy procesu dezintegracji szkła. Opracowano uproszczony model pęknięcia szkła i pierwsze algorytmy diagnostyczne. W kolejnym kroku opracowano metodę diagnostyczną wykorzystującą transformację Hilberta do wydobywania elementów sygnałów przenoszących informację o zjawisku pęknięcia szkła. Prace te zakończyły się opracowaniem metody diagnostycznej opartej na systemie eksperckim, możliwej do implementacji w mikrokontrolerach średniej klasy.

Słowa kluczowe: diagnostyka szkła, transformacja Hilberta, detektor akustyczny

### REMOTE DIAGNOSTICS OF GLASS PANE WITH APPLICATION OF HILBERT SIGNAL ANALYSIS

#### Summary

The paper presents research results on design of detector for detection of glass pane brake, based on analysis of acoustic signal. Joint Time-Frequency Analysis (JTFA) has been applied in first attempt to analyze glass decomposition process. Simplified glass break model and first diagnostic algorithms has been evaluated. Further research led to development of diagnostic method applying Hilbert transformation to extract signal components characterizing glass break phenomena. The research has been finalized with evaluation of diagnostic method based on expert system, possible to be implemented in mid-class microcontroller.

Keywords: glass diagnostics, Hilbert transform, acoustic detector

## 1. WSTĘP

Jak podają statystyki, ponad 35% włamań do obiektów następuje poprzez elementy elewacji wykonane ze szkła. Dotychczasowe techniki detekcji pęknięcia szkła bazowały głównie na analizie sygnałów zbieranych bezpośrednio z powierzchni poszczególnych tafli. Używano do tego celu najczęściej przetworników piezoelektrycznych dokonujących konwersji fal powierzchniowych powstających w momencie pęknięcia szkła na sygnały elektryczne.

Dostępność mikrosterowników, pozwalających na bardziej zaawansowaną obróbkę sygnałów, pozwala na opracowanie zdalnych metod detekcyjnych analizujących dźwięk pękającej szyby. Rozwiązania takie umożliwiają objęcie nadzorem diagnostycznym wielu tafli szklanych przez jeden detektor.

## 2. CEL I WARUNKI PROCESU DETEKcji

Celem opracowanego algorytmu detekcyjnego było zastosowanie go w akustycznym detektorze

pęknięcia szyby. Detektor tego typu pracuje w pomieszczeniu, w którym znajdują się chronione obiekty i dokonuje analizy sygnałów akustycznych odebranych przez mikrofon pod kątem wykrycia składowych charakterystycznych dla dźwięku pękającej szyby. Podstawowym problemem jest tu sama nieokreśloność i naturalna niestabilność analizowanego obiektu – szkła. Szkło jest ciałem amorficznym o właściwościach mechanicznych zbliżonych do ciała stałego. Brak uporządkowania struktury w przestrzeni zbliża szkło do cieczy, sztywność postaci i kruchość – do ciał stałych; stan, w którym występuje szkło (stan szklisty), jest stanem termodynamicznie nietrwałym. Tafle szklane stosowane w budownictwie zawierają różne gatunki szkła w zależności od potrzeb, same tafle – szyby różnią się też znacznie konstrukcją.

Sygnały odebrane przez mikrofon zawierają informację o pęknięciu tafli szklanej, jednakże charakteryzuje je bardzo wysoki stopień uwikłania. Sygnał odebrany zawiera też z reguły sygnały zakłócające, pochodzące ze źródeł zewnętrznych i wewnętrznych i w ogólnym przypadku jest sumą sygnału docierającego bezpośrednio z obiektu i

sygnałów odbitych. Reasumując, należy wymienić podane niżej podstawowe warunki procesu detekcji.

1. Naturalna niestabilność i nieokreśloność szkła.
2. Typ szkła. W artykule przedstawiono wyniki badań oraz algorytm diagnostyczny opracowany dla szkła zwykłego.
3. Grubość szkła. Badania prowadzono dla szkła o grubości od 2 do 6 mm.
4. Wielkość tafli szklanej. W badaniach uwzględniono tafle o powierzchni od 0.09 m<sup>2</sup> do 0.5 m<sup>2</sup>.
5. Odległość tafli – detektor. Badania prowadzono dla odległości od 1 do 10 m.
6. Parametry akustyczne pomieszczenia. Badania prowadzone były w różnych pomieszczeniach (również bezechowych), o różnej powierzchni, kubaturze i współczynniku odbicia ścian.
7. Inne parametry. W czasie badań stwierdzono, że parametry takie jak m.in. temperatura, historia tafli, sposób osadzenia szyby mają wpływ na jej reakcję w czasie zbitcia.

### 2.1. Wymagania certyfikacyjne

Podstawowym założeniem, przyjętym dla opracowywanego detektora, było poddanie go certyfikacji przez niemiecki instytut „VdS – Verband der Schadenverhütung”<sup>1</sup>. W związku z powyższym powinien on spełniać kryteria określone przez odpowiednie normy [4]. Wymagają one wysokiego współczynnika poprawnych decyzji diagnostycznych (min. 90%) oraz całkowitej odporności na sygnały zakłócające (0% fałszywych alarmów). Definicja sygnałów zakłócających jest kluczowa dla opracowywanego algorytmu. Podkreślić należy pewną nieokreśloność sposobu generowania sygnałów zakłócających [4]. Ta nieokreśloność oraz fakt, że widma częstotliwościowe niektórych z powyższych sygnałów są bardzo bliskie widmu sygnału pęknięcia szyby, sprawiają, że problem diagnostyczny staje się bardzo złożony.

### 3. ANALIZA CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA JTFA

W pierwszym podejściu dokonano rejestracji oraz analizy czasowo-częstotliwościowej JTFA sygnałów rejestrowanych przy pomocy mikrofonu. Celem badań było poznanie zależności pomiędzy poszczególnymi fazami destrukcji tafli szklanej a składowymi sygnału akustycznego odbieranego przez mikrofon detektora. Wstępną analizę sygnałów przeprowadzono przy pomocy wykonanego przez autorów analizatora składającego się z następujących bloków:

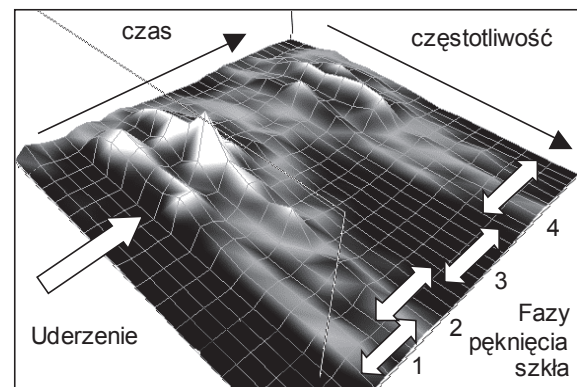
- rejestracji i odtwarzania sygnałów,
- analizy czasowo-częstotliwościowej JTFA,
- filtracji cyfrowej i symulatora logicznego.

Moduł JTFA pozwala przeanalizować wybrany fragment sygnału i dokonać wizualizacji zmienności widma w czasie. Blok filtracji cyfrowej i symulator pozwalają na cyfrową obróbkę sygnału i symulację fragmentów lub całości algorytmu diagnostycznego.

#### 3.1. Model pęknięcia szkła

Analiza JTFA pozwoliła na szczegółową analizę sygnałów oraz opracowanie uproszczonego modelu pęknięcia szkła. Określono rejony sygnału, w których należy szukać komponentów przenoszących informację o pęknięciu tafli. W ogólnym przypadku podzielono proces pęknięcia tafli szklanej na 4 fazy.

1. Faza pobudzenia. Sygnał odbierany w tej fazie zawiera informację o uderzeniu tafli.
2. Faza absorpcji i wstępnego kruszenia. W tej fazie następuje absorpcja energii uderzenia przez tafle i pojawiają się pierwsze składowe mówiące o rozpoczęciu procesu kruszenia szkła. Narzędzie użyte do ataku powoduje skruszenie tafli w miejscu uderzenia.
3. Faza eksplozji (kruszenia lawinowego). W tej fazie proces kruszenia ulega rozszerzeniu. Na szybie pojawiają się długie rysy, fragmenty szyby odpadają.
4. Faza upadku odłamków. Poszczególne odłamki tafli spadają na podłoże.



Rys. 1. Fragment okna JTFA z wynikiem analizy sygnału rozbicia szyby

Poszczególne fazy zachodzą na siebie, ich czasy trwania są różne i zależą od siły uderzenia i parametrów tafli. W przypadku sygnałów zakłócających mamy do czynienia jedynie z 1 fazą, jednakże może być ona powtarzana. Widma niektórych sygnałów zakłócających są zbliżone charakterem do poszczególnych faz sygnału zbitcia szyby. Komponenty sygnału, przenoszące informację o kruszeniu szkła, są w zawarte w wyższych partiach spektrum i ich amplituda jest mała. Rodzi to trudności w jednoznacznej detekcji momentu pęknięcia szyby. Próby skonstruowania algorytmu diagnostycznego, spełniającego wymagania VdS w oparciu o analizę JTFA, wykazały, że do procesu diagnostyki będzie niezbędny procesor sygnałowy o dużych możliwościach obliczeniowych ze względu na złożoność obliczeniową algorytmu. Koszt tego typu procesora wykluczał zastosowanie go w docelowym detektorze.

<sup>1</sup> <http://www.vds.de>

Proces pęknięcia szyby jest procesem nieliniowym, sygnał odbierany ulega przekształceniu przechodząc przez nieznanne i zmienne środowisko, a samo zadanie sprowadza się w zasadzie do rozpoznania charakterystycznego dźwięku pęknięcia szyby. W związku z tym postanowiono przeanalizować techniki przetwarzania sygnałów stosowane w diagnostyce układów mechanicznych (w tym nieliniowych), badaniach geologicznych oraz rozpoznawaniu dźwięków.

#### 4. ZASTOSOWANIA TRANSFORMACJI HILBERTA

W diagnostyce układów mechanicznych, szczególnie przy analizie drgań swobodnych i wymuszonych [1] używa się często funkcji w postaci:

$$y(t) = A(t)\cos\psi(t), \quad A(t) = \sqrt{y^2(t) + \tilde{y}^2(t)} \quad (1)$$

gdzie  $y(t)$  jest funkcją wibracji,  $\tilde{y}(t)$  jej transformata Hilberta,  $Y(t)$  jest funkcją wibracji w formie analitycznej (zespolonej),  $A(t)$  jest obwiednią sygnału, a  $\psi(t)$  fazą chwilową. Funkcja  $\tilde{y}(t)$  jest definiowana jako transformata Hilberta funkcji  $y(t)$

Transformata iloczynu funkcji o pokrywających się pasmach może być ogólnie zapisana jako [2]:

$$H\{l(t) \cdot h(t)\} = \tilde{l}(t) \cdot \tilde{h}(t) + \tilde{l}_h(t) \cdot h(t) \quad (2)$$

gdzie  $l_h(t)$  jest komponentem  $l(t)$  o widmie pokrywającym się z widmem  $h(t)$ . Właściwości powyższe są powodem częstego stosowania transformaty Hilberta w analizie mechanicznych układów nieliniowych [3]. Łatwość wyliczenia chwilowej energii sygnału jako  $A^2(t)$  pozwala też na szybkie wyliczanie parametrów energetycznych sygnałów. Techniki te są często stosowane w systemach komunikacyjnych

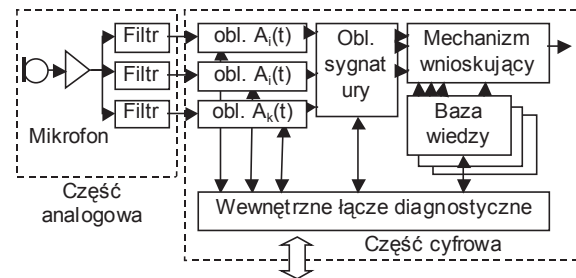
Innym obszarem zastosowania transformaty Hilberta jest przetwarzanie sygnałów uzyskiwanych w badaniach geologicznych prowadzonych w celu poszukiwania ropy i gazu oraz przy przewidywaniu trzęsień ziemi. Szczególnie dużo informacji uzyskuje się w wyniku wyliczania tzw. atrybutów RSA (ang. *Rock Solid Attributes*). Jest to zestaw ok. 40 parametrów sygnałowych bazujących na transformacie Hilberta i transformacie falkowej. W wielu publikacjach, dotyczących rozpoznania mowy, autorzy podnoszą fakt wysokiej wartości informacji zawartej w obwiedni sygnału dla procesu identyfikacji. Ciekawy jest też fakt wykrycia w pniu mózgu ssaków neuronów dokonujących analogicznego do transformacji Hilberta przetwarzania sygnałów [5].

#### 5. ALGORYTM DIAGNOSTYCZNY

Jak wykazała analiza JTFA, sygnał pobierany z mikrofonu zawiera bardzo dużo informacji, w tym informację o zbitciu tafli szklanej – jednakże jest ona w sposób wysoce uwikłany ukryta w sygnale wśród innych danych niezwiązanych z badanym procesem. W celu zmniejszenia stopnia uwikłania danych postanowiono poddać je rozszczepieniu (ang. *data*

*fission*) na strumieniu o większej jednorodności. Tak wydzielone dane mogą być poddane obróbce w celu obliczenia odpowiednich parametrów. W kolejnym etapie, poszczególne parametry poddawane są procesowi fuzji danych (ang. *data fusion*) celem wytworzenia sygnatury diagnostycznej. Porównanie bieżącej wartości sygnatury z bazą wiedzy prowadzi do podjęcia finalnej decyzji diagnostycznej o wysokim stopniu wiarygodności [6]. Zaproponowany algorytm diagnostyczny bazuje na następujących założeniach:

1. Sygnał wejściowy podlega kilkupasmowej filtracji w celu wydzielenia składowych o postaci (1).
2. Sygnały z filtrów po próbkowaniu poddane są cyfrowej transformacie Hilberta w celu wyliczenia obwiedni sygnałów  $A_i(t)$ .
3. Cyfrowa sygnatura sygnału tworzona jest z parametrów sygnałów obliczanych z  $A_i(t)$ .
4. Finalna decyzja diagnostyczna podejmowana jest przez wewnętrzny system ekspercki na podstawie porównania sygnatury z wewnętrzną bazą wiedzy detektora.



Rys. 2. Schemat blokowy detektora

#### 6. SYSTEM EKSPERCKI WSPOMAGANIA DIAGNOSTYKI

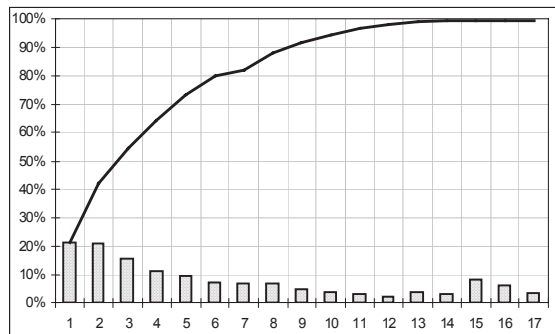
Do zbudowania bazy wiedzy oraz bazy metod diagnostycznych, używanych przez mechanizm wnioskujący, niezbędne było zgromadzenie odpowiednio dużej ilości danych eksperymentalnych. Zbudowano w tym celu mobilny system akwizycji danych z detektorów umożliwiający pobieranie próbek sygnałów z kilkunastu detektorów jednocześnie w czasie rzeczywistym. Każdy detektor wyposażony został w dodatkowy moduł USB transmitujący dane do przenośnego komputera poprzez wielowejściowy koncentrator. Do budowy bazy danych używano 10 jednocześnie pracujących detektorów umieszczonych w różnych punktach pomieszczenia. Każdy rekord, stworzonej w ten sposób bazy, został sklasyfikowany jako:

- T – sygnał zbitcia szyby,
- F – sygnał zakłócający, fałszywy,
- TF – sygnał zbitcia szyby możliwy też do zaklasyfikowania jako fałszywy (np. sygnał zarejestrowany w wyniku zbitcia szyby, ale parametry pęknięcia tafli nie spełniają warunków określonych przez normę VdS),
- FT – sygnał fałszywy możliwy też do zaklasyfikowania jako sygnał zbitcia szyby (np. sygnał generowany jako zakłócający, w wyniku którego



nastąpiło częściowe pęknięcie szyby)

Baza danych eksperymentalnych zawiera ponad 3.000 rekordów (w tym 1000 sygnałów zbitcia szkła) wybranych z łącznie wykonanych 10.000. W celu opracowania mechanizmu wnioskującego i jego optymalizacji stworzono zewnętrzny system ekspercki wykorzystujący zebrane dane eksperymentalne do weryfikacji poszczególnych składowych sygnatury tworzonej z energetycznych parametrów sygnałów. Dla tak stworzonej sygnatury i założonej strategii decyzyjnej (np. 0% fałszywych alarmów, min. 90% detekcyjności) wyliczono następnie parametry wewnętrznej bazy wiedzy pozwalającej na podejmowanie poprawnych decyzji diagnostycznych. Liczbę i rodzaj elementów składowych sygnatury optymalizowano pod kątem uzyskania największej liczby poprawnych decyzji diagnostycznych.



Rys. 3. Detekcyjność algorytmu w funkcji liczby elementów sygnatury

Zarejestrowane w bazie danych pęknięcia tafli sklasyfikowane zostały w ponad 20 różnych modelach opisanych w bazie wiedzy detektora. Modele te są wykrywane przez elementarne algorytmy detekcyjne. Udział algorytmów elementarnych w detekcji zarejestrowanych 3000 sygnałów (czyli napotkanych w praktyce modeli pęknięcia szkła w ogólnym zbiorze danych eksperymentalnych) pokazany jest w formie pionowych słupków na rys. 3. Badania wykazały, że opracowana sygnatura pozwala na wykrycie 99.4% pęknięć przy całkowitej odporności na sygnały zakłócające. Granicą rozbudowy sygnatury jest jej złożoność obliczeniowa. Obciążenie wielowątkowego jądra systemu czasu rzeczywistego mikrosterownika, napędzającego mechanizm wnioskujący, sięga obecnie 95% czasu przy analizie najbardziej złożonych przypadków.

## 7. WYNIKI

Przedstawiony algorytm został zaimplementowany w detektorze AD-700 opracowanym dla firmy „Alarmtech”<sup>2</sup>. Zastosowanie transformaty Hilberta do obliczeń energetycznych parametrów sygnałów pozwoliło na stworzenie prostego i niezawodnego algorytmu. Detektor przeszedł pomyślnie fazę testów wstępnych w laboratoriach VdS i znajduje się obecnie w produkcji.

Akustyczne detektory pęknięcia szyby dostępne na rynku można podzielić na 3 podstawowe grupy:

1. Detektory dokonujące jedynie amplitudowej klasyfikacji sygnału z ewentualną filtracją. Cechują się prostotą konstrukcji algorytmu i niewielką odpornością na sygnały zakłócające.
2. Detektory dokonujące jedynie czasowej analizy sygnałów. Cechują się większą pewnością działania, ale są czułe na sygnały fałszywe o przebiegu czasowym zbliżonym do pęknięcia szyby.
3. Detektory dokonujące zarówno częstotliwościowej, jak i czasowej analizy sygnałów. Detektory tego typu zapewniają największe prawdopodobieństwo poprawnych decyzji.

Opracowany detektor należy do trzeciej, najbardziej zaawansowanej grupy; uzyskane parametry lokują go w czołówce tego typu urządzeń.

## 8. LITERATURA

- [1] Feldman M.: Non-Linear System Vibration Analysis Using Hilbert Transform. *Mechanical Systems and Signal Proc.*, 1994, nr 8, str. 119-127.
- [2] Hahn S. L.: The Hilbert Transform of the Product  $a(t) \cdot \cos(\omega_0 t + \phi_0)$ . *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 1996, nr. 44(1), str. 75-80.
- [3] Feldman M.: Non-Linear Free Vibration Identification Via The Hilbert Transform. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, nr 208, str. 473-489.
- [4] VdS *Richtlinien für Einbruchmeldeanlagen: Glasbruchmelde*. VdS, Köln, 2002.
- [5] Smith Z. M., Delgutte B., Oxenham A. J.: Chimaeric sounds reveal dichotomies in auditory perception. *Nature*, 2002, nr. 416, str. 87-89.
- [6] Tlaga J., Tlaga W.: Synteza algorytmu detekcji pęknięcia szyby metodą „data fission – data fusion”. *Zabezpieczenia*, 2004, nr 1/2, str. 31-36.



Mgr. inż. Jerzy TLAGA jest absolwentem wydziału Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Specjalizuje się w badaniach i projektowaniu rozproszonych systemów diagnostycznych i sterujących opartych na mikrosterownikach wbudowanych Dr inż. Waldemar TLAGA jest pracownikiem Politechniki Gdańskiej. Specjalizuje się w badaniach i projektowaniu systemów elektronicznych do zastosowań pomiarowych, diagnostycznych i sterujących. Jest autorem kilkudziesięciu publikacji z tej dziedziny i szeregu wdrożeń.



<sup>2</sup> <http://www.alarmtech.pl>