

WYKORZYSTANIE TRANSFORMACJI HOUGH'A W PROJEKTOWANIU MODUŁU DECYZYJNEGO SYSTEMU PROAKTYWNEJ EKSPLOATACJI

Stanisław RADKOWSKI, Robert GUMIŃSKI

Institute of Vehicles, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland
 Narbutta 84, 02-524 Warsaw, Poland, fax. 022 234 81 21, ras@simr.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule zostało podjęte zagadnienie proaktywnej strategii eksploatacji. Zwrócono uwagę na fakt, że w wyborze sposobu zbierania informacji diagnostycznej należy uwzględnić niezawodnościowe wskaźniki ważności elementów. W planowaniu czynności obsługowych ważne jest posługiwanie się modelami rozwoju uszkodzenia umożliwiającymi aktualizację na podstawie aktualnego stanu technicznego. Zaproponowano wykorzystanie transformaty Hough'a w celu wyznaczenia kluczowych punktów rozwoju uszkodzenia na przykładzie funkcji logistycznej, która może być wykorzystana do modelowania zmian energii sygnału drganiowego w trakcie rozwoju uszkodzenia.

Słowa kluczowe: funkcja logistyczna, transformacja Hough'a.

USE OF HOUGH'S TRANSFORM FOR DESIGNING THE DECISION-MAKING MODULE OF A PROACTIVE OPERATIONS SYSTEM

Summary

The article takes up the issue of a proactive operations strategy. Attention is drawn to the fact that while selecting the method of collecting the diagnostic information one should account for the respective elements' reliability indicators from the point of view of their importance. While planning maintenance activities, it is important to use the defect development models which offer the possibility of information updating based on the current technical condition of an object. A proposal has been made to use the Hough's transform in order to determine the key points of defect development on the example of a logistic function which can be used for the purpose of modeling the energy changes in a vibration signal during defect development.

Keywords: Logistic curve, Hough transform.

1. WSTĘP

Ważnym zagadnieniem w procesie eksploatacji obiektu [8] jest problem wyboru strategii utrzymania ruchu umożliwiającej maksymalizację funkcji niezawodności systemu. Dla zapewnienia poprawności rozwiązania tego zadania niezbędnym jest uwzględnienie wpływu zarówno struktury układu na niezawodność systemu, jak i poszczególnych jego elementów. W literaturze wskazuje się w tym miejscu na możliwość wprowadzenia wskaźnika wpływu elementu na zachowanie niezawodności systemu w postaci miary ważności elementu. Najczęściej istotność elementów jest określana za pomocą wskaźników oceny strukturalnej (*SRF*), które uwzględniają ryzyko uszkodzenia zmęczeniowego (*FT*), degenerujący wpływ środowiska (*ED*) oraz ryzyko przypadkowego uszkodzenia (*AD*). Zatem wybór określonego sposobu zbierania informacji, w szczególności określenie zakresu i głębokości prowadzenia diagnozy będzie zależny od wymaganego średniego okresu do wystąpienia



Rys. 1. Schemat niezawodnościowo zorientowanej analizy sytemu stosowanej w lotnictwie [8]

uszkodzenia (*MTTF*), przewidywanych kosztów napraw i przestoju oraz związanej z tym oceny efektywności czynności obsługowo-naprawczych. Z drugiej strony niezbędnym jest ustalenie akceptowalnego ryzyka pojedynczego uszkodzenia, określenie okresu kumulacyjnego wzrostu warunkowego prawdopodobieństwa rozwoju uszkodzenia oraz oszacowania prawdopodobieństwa uszkodzeń wielokrotnych. Jednym z istotnych czynników proponowanego systemu niezawodności jest ustalenie krytycznych elementów maszyny.

Ustalenie rankingu elementów pozwala określić właściwą sekwencję inspekcji diagnostycznych dla dominujących uszkodzeń. Szczególne znaczenie w określaniu zadań diagnostycznych ma miara Vessely – Fussella, przedstawiona obok wielu miar w pracy [5].

Wykorzystanie niezawodnościowych miar ważności elementów pozwala w procesach diagnozowania uwzględniać wpływ struktury układu i możliwą sekwencję zdarzeń, jaka może towarzyszyć wystąpieniu odpowiedniego zdarzenia szczytowego. Podobnie dobór testu diagnostycznego, którego zadaniem byłoby zmniejszenie poziomu ryzyka powinien uwzględniać wpływ struktury diagnozowanego obiektu.

Podstawowym problemem w tym ujęciu pozostaje określenie prawdopodobieństwa zdarzenia inicjującego, bowiem dla innych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia inicjującego za optymalną może zostać uznana inna sekwencja inspekcji diagnostycznych. W przypadku układu mechanicznego, w którym dominują procesy zużycia można oczekiwać istotnych zmian wartości wspomnianych prawdopodobieństw.

Wymaga to prowadzenia analizy wpływu sposobu i warunków użytkowania na przebieg obciążeń oraz związanych z tym uszkodzeń. Po uwzględnieniu wpływu warunków środowiskowych powstaje możliwość określenia zakresu diagnostyki i prawdopodobnego zakresu oraz harmonogramu napraw.

Kolejnym działaniem pozwalającym na lepsze zrozumienie zachodzących procesów i jednocześnie bardziej świadome podejmowanie decyzji eksploatacyjnych jest zbudowanie modelu uwzględniającego fazę rozwoju uszkodzenia. Model taki powinien dawać możliwość uwzględnienia w prowadzonej analizie dodatkowej nowo-zdobytej informacji. Dlatego tak ważne jest budowanie modelu rozwoju uszkodzenia, który to model powinien być uaktualniany wiedzą o stanie obiektu uzyskaną w drodze diagnostyki. W tak rozumianym systemie eksploatacyjnym szczególnie ważny jest dobór odpowiednich symptomów stanu i metod diagnostycznych.

Najczęstsza przestrzeń cech jest to przestrzeń Euklidesowa jedno, dwu lub wielowymiarowa, a rozkład wartości cech względem poszczególnych współrzędnych założonej przestrzeni jest przedstawiany przy pomocy funkcji. Wybór cech zależy od zadań wyznaczonych dla systemu

diagnostycznego i przyjętych strategii eksploatacji [2]. Przyjęcie proaktywnej strategii eksploatacji wiąże się z koniecznością ekstrakowania z sygnału diagnostycznego symptomów nukleacji uszkodzenia bądź niskoenergetycznych faz rozwoju [4, 6, 10].

Transformacja z jednej przestrzeni do innej określa się jako operacja przekształcenia z uwzględnieniem zmiany współrzędnych. Właściwe transformowanie jest szczególnie ważne w projektowaniu diagnostyczno – prognostycznego interfejsu: system – operator i w opracowaniu sposobu przesyłania informacji pomiędzy operatorem a decydem. Kryterium doboru transformacji może być z jednej strony redukcja nadmiaru informacji, możliwość przyłożenia odpowiedniej wagi i nadanie niezbędnego priorytetu, z drugiej możliwość rekonstrukcji sygnału na podstawie dostępnej projekcji. Stosowane sygnały umożliwią otrzymanie informacji o wewnętrznych rozkładach szeregu parametrów, charakteryzujących zmiany zachodzące w nadzorowanych obiektach.

2. WYKRYWANIE CECH Z WYKORZYSTANIEM TRANSFORMATY HOUGH'A

Szczególnie interesującym jest możliwość diagnozowania i prognozowania wartości cech sygnału w efekcie zmian jednej współrzędnej. Taką własnością charakteryzuje się transformata Radona [3] za pomocą której jednowymiarowa transformata ouriera, może przekształcać wielowymiarową przestrzeń do postaci przekroju wielowymiarowej transformaty Fouriera, określonej względem tej samej współrzędnej.

Własność ta stała się podstawą wykorzystania transformaty Radona w tomografii komputerowej. Podobnie jest szeroko wykorzystywana w rozpoznawaniu obrazów. Jeśli w tym ostatnim przypadku podstawowym problemem jest detekcja linii prostych to odwołuje się do transformaty Hough'a (*TH*) [7], która jest szczególnym przypadkiem transformaty Radona. Przyjęło się, że obraz poddany jest preprocessingowi przy pomocy innych detektorów krawędzi [11], a następnie mapowany z wykorzystaniem *TH*.

Podstawą transformaty Hough'a jest spostrzeżenie, że linia prosta, która w układzie współrzędnych kartezjańskich (x, y) może być opisana równaniem (1):

$$y=b+ax \quad (1)$$

to w przestrzeni Hough'a o współrzędnych (r, θ) ta sama prosta może być zapisana w postaci równania parametrycznego (2):

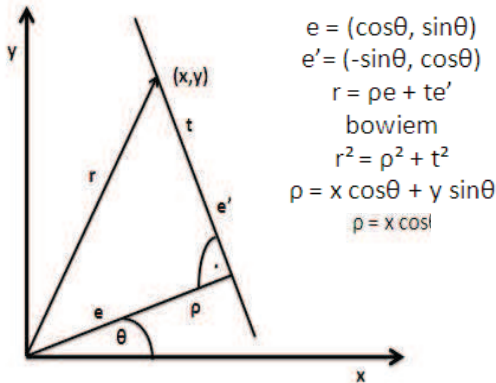
$$r = x\cos\theta + y\sin\theta. \quad (2)$$

To ostatnie równanie otrzymuje się z równania ogólnego prostej (3):

$$Ax + By + C = 0 \quad (3)$$

przez normalizację, pamiętając że wektor $[-B, A]$ jest wektorem kierunkowym prostej, natomiast odpowiednio ρ jest promieniem wodzącym, a θ jest kątem pomiędzy promieniem ρ , a współrzędną x .

Obecnie jest wiele odmian transformaty Hough'a, a zakres zastosowań w cyfrowej analizie obrazu obejmuje nie tylko detekcje prostych, ale również innych krzywych analitycznych.



Rys. 2. Ilustracja wykorzystania podstawowych zależności analitycznych w transformacji Radona i Hough'a

W efekcie zastosowania transformaty Hough'a linia prosta w układach (x, y) jest przekształcana do punktu w układzie (ρ, θ) . Inaczej, zakładając że na ekranie monitora przedstawiona jest przestrzeń Hough'a, obrazem obrotu prostej wokół punktu (x_0, y_0) będzie krzywa Hough'a, obrazy punktów leżących na jednej prostej przecinają się w punkcie (w przestrzeni Hough'a) odpowiadającym współczynnikiem prostej, do której należą punkty w przestrzeni cech sygnału, natomiast np. równoległemu przesunięciu prostej, będzie odpowiadać przesunięcie punktu na ekranie obrazującym przestrzeń Hough'a.

Ta ostatnia własność transformaty może być wykorzystana w detekcji jakościowych zmian zachodzących w zachowaniu się nadzorowanego obiektu.

3. MODELOWANIE ZMIAN ENERGII SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM FUNKCJI LOGISTYCZNEJ

Z punktu widzenia proaktywnej eksploatacji podstawowym zadaniem jest diagnozowanie okresu nukleacji pęknięcia. Szerzej zagadnienie wykorzystania cech sygnału wykorzystywanego w diagnozowaniu zmęczeniowego pęknięcia u podstawy zęba w przekładniach zębatych, zostało przedstawione w [9].

Porównując względne zmiany energii występujące w przypadku propagacji pęknięcia [1], z jakościowymi zmianami energii wibroakustycznej

w artykule zaproponowano logistyczny model rozwoju pęknięcia:

$$\gamma(\varepsilon) = \frac{a}{1 + be^{-c\varepsilon}} \quad (4)$$

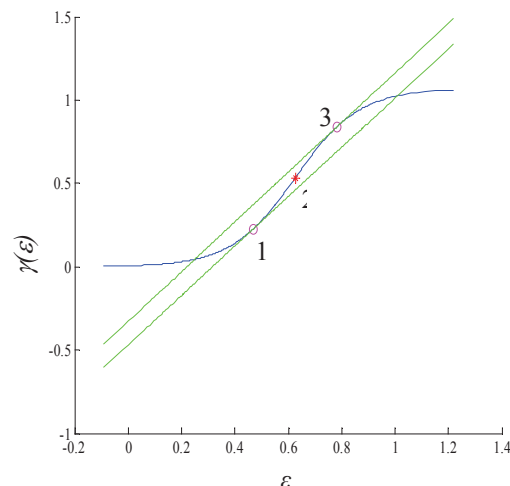
gdzie: a, b, c – parametry krzywej logistycznej,
 $\gamma(\varepsilon)$ – zmiana energii względnej sygnału drganiowego w funkcji rozmiaru szczeliny.

Zgodnie z przyjętą zależnością na krzywej logistycznej (Rys. 3.) można wyróżnić trzy punkty:

- 1 – punkt oznaczający przyrost prędkości względnej zmiany energii,
- 2 – punkt, w którym występuje deakceleracja przyrostu prędkości względnej zmiany energii,
- 3 – punkt, w którym rozpoznany jest okres saturacji krzywej logistycznej.

4. PRZYKŁAD

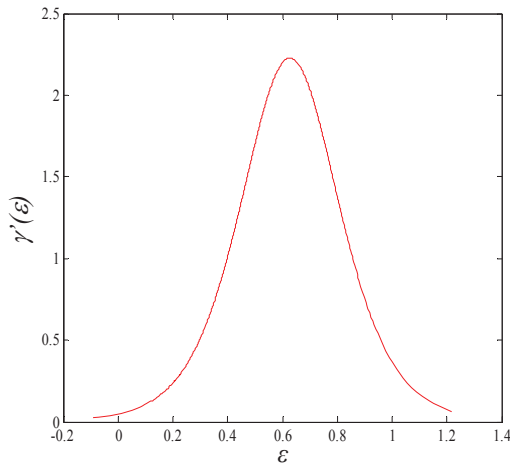
Szczególnie interesującym jest możliwość ustalenia osiągnięcia punktu 1 na podstawie obserwacji przyrostów krzywej logistycznej obserwowanej na ekranie operatora sygnału diagnostycznego. Za podstawę przyjęto wyniki analizy pochodnych krzywej logistycznej. Na rysunku 4 przedstawiono pierwszą pochodną (funkcję błędów). Drugą pochodną przedstawiono na rysunku 5. Osiąga ona swoje ekstremum w punktach 1 i 3 krzywej logistycznej. Zauważmy, że styczne do drugiej pochodnej w punktach 1 i 3 są poziome.



Rys. 3. Wykorzystanie krzywej logistycznej do ustalenia początku propagacji uszkodzenia (1) i końca fazy szybkiego rozwoju uszkodzenia (3)

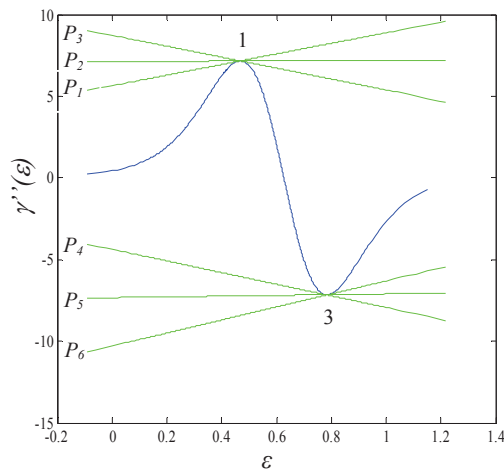
Na kolejnych wykresach (Rys. 6-8) przedstawiono wyniki transformaty Hough'a dla trzech wybranych punktów leżących na stycznych $P_1 - P_3$ do drugiej pochodnej krzywej logistycznej (każdy wykres – osobna prosta). Zgodnie z oczekiwaniem jedynie na rysunku 7 krzywe leżą

blisko siebie, a ich punkt przecięcia wypada dla kąta ok. 90° . Wyznaczenie prostych dla kąta najbliższego 90° (z wykorzystaniem płaszczyzny Hough'a) jednoznacznie definiuje punkt 1 na krzywej logistycznej. Punkt 3 krzywej logistycznej został wyznaczony analogicznie jak dla punkt 1.

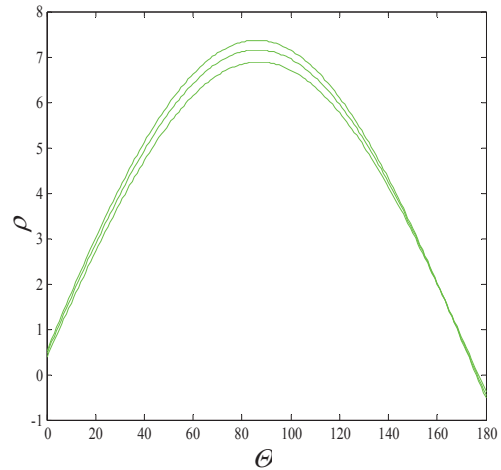


Rys. 4. Przebieg pierwszej pochodnej (funkcji błędów) funkcji logistycznej – maksimum odpowiada punktowi 2 krzywej logistycznej

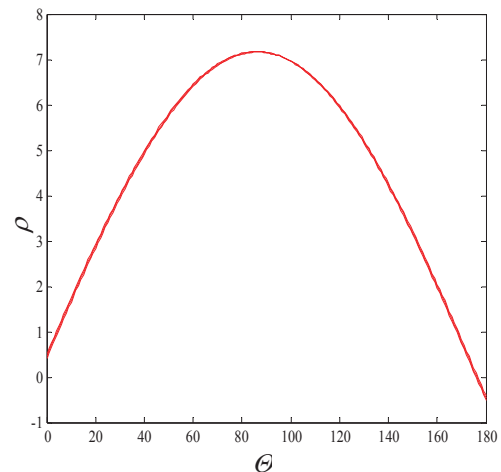
Korzystając z zależności analitycznych pomiędzy współzrzednymi w przestrzeni parametrów diagnostycznych oraz przestrzeni Hough'a [7, 11], można ustalić punkt, w którym występuje nukleacja uszkodzenia.



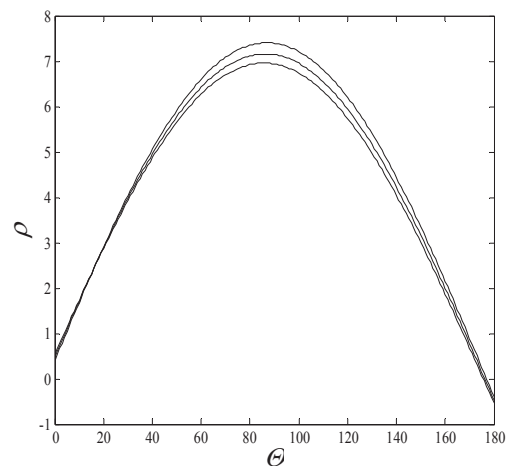
Rys. 5. Druga pochodna funkcji logistycznej – ekstrema odpowiadają punktom krzywej logistycznej: 1- (początek propagacji uszkodzenia) i 3-(koniec fazy szybkiego rozwoju uszkodzenia)



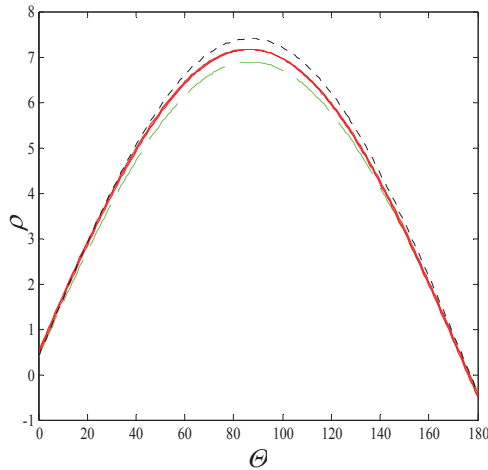
Rys. 6. Obraz trzech punktów (znajdujących się na prostej P_1 – Rys. 5) w przestrzeni Hough'a



Rys. 7. Obraz trzech punktów (znajdujących się na prostej P_2 – Rys. 5) w przestrzeni Hough'a



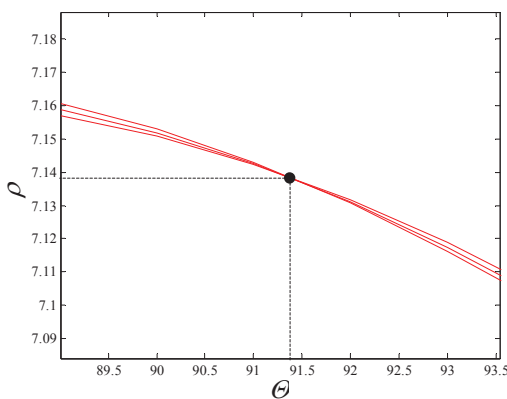
Rys. 8. Obraz trzech punktów (znajdujących się na prostej P_3 – Rys. 5) w przestrzeni Hough'a



Rys. 9. Obraz trzech punktów (znajdujących się na prostej P_2 – Rys. 5) w przestrzeni Hough'a linia ciągła i dwóch punktów nieleżących na prostej P_2

Rysunek 9 przedstawia obraz trzech punktów leżących na jednej prostej, linie przecinają się w jednym punkcie (Rys. 10). Linie: punktowa i kreskowa wyznaczają kolejne punkty przecięcia na podstawie których możemy wyznaczyć kolejne proste. Nakładając odpowiednie warunki tzn.

1. szukana prosta ma być styczna do drugiej pochodnej,
 2. szukana prosta ma być pozioma, czyli kąt Θ jest równy 90^0 (lub najbliższy 90^0),
- wyznaczamy użyteczną w postawionym zadaniu prostą, a w konsekwencji punkty na krzywej logistycznej.



Rys. 10. Punkt przecięcia krzywych w przestrzeni Hough'a określający parametry poszukiwanej prostej

Na rysunku 7 przecięcie krzywych Hough'a wypada dla kąta bliskiego 90^0 . Różnica wynika z dokładności prowadzonych obliczeń, a w szczególności rozdzielczości z jaką jest wyznaczana krzywa logistyczna. Taki wynik prowadzi do wniosku, że w przypadku analizy prowadzonej na podstawie danych pomiarowych, należy on-line obrabiać wyniki i w czasie zbliżania

się do kluczowych punktów rozwoju uszkodzenia zageścić pomiary celem uzyskania dokładniejszych rezultatów.

5. WNIOSKI

Możliwość wykorzystania transformaty Hough'a stwarza szanse redukcji redundancji informacji diagnostycznych oraz odpowiedniej wizualizacji umożliwiającej przekazanie operatorowi tylko informacji o dużym priorytecie z punktu widzenia przyjętej strategii. Użycie transformaty Hough'a pozwala określić krytyczne punkty na krzywej logistycznej opisującej propagację pęknięcia zmęczeniowego przekładni zębatej.

Dostępność procedur w popularnym środowisku jakim jest MATLAB, ułatwia proces implementacji tego typu modułu decyzyjnego w autonomicznych układach diagnostyczno – prognostycznych.

LITERATURA

- [1] Arutyunyan R. A.: *The Problem of Deformation Aging and Prolonged Fracture in Material Science*, S.-Petersburg University Press, Sankt-Petersburg, 2004.
- [2] Dybała J.: *Wykrywanie wczesnych faz uszkodzeń metodami sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa-Radom, ISBN 978-83-7204-757-1, 2008.
- [3] Helgason S.: *Radon Transform*, MIT Cambridge, 1999.
- [4] Jasiński M., Radkowski S.: *Zastosowanie składowych głównych w diagnozowaniu maszyn*, Diagnostyka, Vol. 30; tom 1, 2004, str. 207-210.
- [5] Kovalenko J. N., Kuznestov N. Y., Pegg P. A., *Mathematical Theory of Reliability of Time Dependent Systems with Practical Applications*, John Willey & Sons, Nowy Jork, 1997.
- [6] Mączak J.: *Local meshing plane as a source of diagnostic information for monitoring the evolution of gear faults*, in: D. Kiritsis, C. Emmanouilidis, A. Koronios, J. Mathew (Eds.), *Engineering Asset Lifecycle Management*, Springer London, 2010. pp. 661-670.
- [7] Pawłowski M.: *Zastosowanie transformacji Hough'a do analizy dwuwymiarowych widm pits*, Materiały Elektroniczne, T-34, N3/4, 2006, str. 19-39.
- [8] Radkowski S.: *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, ITE Warszawa – Radom, 2002.
- [9] Radkowski S., Gumiński R.: *Spectrum Width Factor as a Diagnostic Parameter Determining the Degree of Damage of Tooth Surface*, Diagnostyka 1(53)/2010, pp 55-60.
- [10] Radkowski S., Szczurowski K.: *Use of vibroacoustic signals for diagnosis of*

prestressed structures. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, Vol. 14, No. 1, 2012, pp. 84-91.

- [11] Żorski W., (2000): *Metody segmentacji obrazów oparte na transformacie Hougha*. Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki, WAT, Warszawa.



Prof. **Stanisław RADKOWSKI**, profesor Instytutu Pojazdów PW, kierownik zespołu Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką wibroakustyczną i analizą ryzyka technicznego



Dr inż. **Robert GUMIŃSKI**, zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Pojazdów Politechniki Warszawskiej. Zainteresowania naukowe – bezpieczeństwo systemów technicznych, ryzyko techniczne.