

Vibroacoustic diagnosis of the internal combustion diesel engine at the end of assembly line

Abstract: Method for quality evaluation of internal combustion diesel engine based on the wavelet transformation of the cold test vibroacoustic data and artificial intelligence methodology has been presented. Based on the presented investigations conclusion has been made that application of wavelet transformation and artificial neural network enables efficient classification of the different engine states. Because false engine states classification is still possible this method should not be used for purpose of binary classification (good-bad) but can be used as part of the diagnostic expert system.

Keywords: cold test, wavelet transformation, neural network, engine fault diagnosis

Diagnostyka wibroakustyczna silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym na końcu linii montażowej

Streszczenie: W referacie przedstawiono wibroakustyczną metodę oceny jakości silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym opartą o wykorzystanie informacji zebranych podczas realizacji testu zimnego, zastosowanie transformacji falkowej oraz metod sztucznej inteligencji. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że połączenie metody transformacji oraz sztucznych sieci neuronowych pozwala na uzyskanie wysokiej skuteczności klasyfikacji stanów wibroakustycznych silnika. Natomiast z uwagi na możliwość wystąpienia błędnej klasyfikacji stanów uważa się, że metoda ta może stanowić wyłącznie element diagnostycznego systemu doradczego.

Słowa kluczowe: test zimny, transformacja falkowa, sieci neuronowe, diagnostyka silnika spalinowego

1. Wstęp

Jednymi z ważniejszych środków technicznych w procesie kontroli jakości silnika spalinowego są testy końcowe. Z jednej strony mają na celu zidentyfikowanie wadliwych produktów, z drugiej strony służą do precyzyjnej lokalizacji wadliwych zespołów (części) silnika spalinowego. Obecnie dominującą rolę, spośród stosowanych testów końcowych ma test zimny. Wprowadzenie testu zimnego pozwoliło na istotne zmniejszenie liczby wadliwych silników opuszczających fabrykę. Metodyka dotycząca testów zimnych jest przedmiotem zainteresowania wszystkich producentów silników samochodowych. Pomimo ich skuteczności w rozpoznawaniu szerokiej gamy wad związanych bezpośrednio z procesami wytwórczymi, można nadal znaleźć szereg nierozwiązanych problemów. Mianowicie bardzo często informacja o uszkodzeniu i jego przyczynie jest na tyle niejednoznaczna, ukryta pomiędzy różnorodnymi relacjami sygnałów mierzonych tak, że dokładną diagnozę wadliwego silnika można postawić jedynie po kompleksowych badaniach uzupełniających. W takich wypadkach wymiana informacji pomiędzy końcem linii montażowej (gdzie przeprowadza się test zimny), a linią produkcyjno-montażową (miejszem wystąpienia uszkodzenia) jest na ogół znacznie opóźniona, co w dużym stopniu utrudnia wprowadzenie odpowiednich działań korygujących.

Uszkodzenia o symptomach wibroakustycznych są jednymi z najbardziej skomplikowanych rodzajów uszkodzeń. W ramach badań występują trudności z obiektywnym, jednoznacznym wyróżnieniem stanu uszkodzonego oraz trudności z identyfikacją przyczyn.

Przy obecnie stosowanych metodach analizy wibroakustycznej: reprezentacji sygnału mierzonego dla całego cyklu roboczego silnika (720 stopni obrotu wału korbowego), analizie harmonicznej, metodach statystycznej oceny sygnałów, test zimny dostarcza bardzo często szybkiej odpowiedzi na istotne pytanie: czy występuje uszkodzenie. Niestety w wielu przypadkach przyczyna wystąpienia uszkodzenia nie może być poznana bez wiedzy specjalistycznej oraz doświadczenia personelu. Odpowiedź na pytanie o przyczyny uszkodzeń zostanie na ogół udzielona po demontażu silnika oraz po specjalnych badaniach lub w ostateczności pozostaje bez odpowiedzi, aż do momentu poznania nowych faktów (np. następnego podobnego przypadku).

Obecne stanowiska do realizacji testów końcowych nie mają wbudowanych systemów doradczych pomagających w szybkiej identyfikacji pojawiających się uszkodzeń i ich przyczyn. Dlatego też w wielu przypadkach czas analizy uszkodzenia jest bardzo długi. Informacje dotyczące występowania różnorodnych uszkodzeń na końcu linii montażowej nie są automatycznie przekazywane do linii

produkcyjno-montażowej. Aby zrealizować ten pomysł należałoby spełnić kilka podstawowych warunków. Powinno się stosować adekwatne metody analizy sygnałów. Uszkodzenia o symptomach wibroakustycznych ujawniają się zarówno w przypadku stałych prędkości obrotowych silnika, jak również w przypadku zmiennych prędkości obrotowych (np. podczas przyspieszania). W związku z tym mamy do czynienia zarówno ze stacjonarnymi jak i niestacjonarnymi warunkami pracy, a w konsekwencji mogą wystąpić stacjonarne i niestacjonarne składowe sygnałów wibroakustycznych. W ramach testów zimnych, wykorzystuje się metody oceny sygnałów wibroakustycznych, dające najlepsze rezultaty w przypadku analizy sygnałów stacjonarnych: reprezentacje czasowe, transformacje Fouriera, analizę harmoniczną. W ramach stosowanych procedur sprawdza się czy cechy, uzyskane dla aktualnie mierzonego silnika nie przekraczają statystycznie wyznaczonych wcześniej tolerancji.

Celem pracy było opracowanie i doświadczalne zweryfikowanie wibroakustycznej metody identyfikacji uszkodzeń silników spalinowych o zapłonie samoczynnym, opartej o transformację falkową oraz metody sztucznej inteligencji.

Praca swoim zakresem objęła uszkodzenia o symptomach wibroakustycznych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym. Głównymi analizowanymi parametrami były sygnały wibroakustyczne mierzone przetwornikami zamontowanymi na wybranych elementach silnika oraz w jego otoczeniu.

2. Wibroakustyczna kontrola końcowa silników spalinowych na końcu linii montażowej

Obecnie do pomiarów wibroakustycznych silników spalinowych w ramach procesu kontroli jakości wykorzystywane są systemy, które można traktować jako modyfikacje bardzo efektywnych systemów diagnostycznych wykorzystywanych w kontroli jakości przekładni zębatych.

Do analizy silnika podczas testu zimnego wykorzystuje się techniki oparte na reprezentacji zmierzonego sygnału w odniesieniu do pozycji kątowej wału korbowego oraz analizie harmoniczej. Sygnały wibroakustyczne mierzy się wraz z sygnałem prędkości obrotowej i położenia wału korbowego (ewentualnie także wałka rozrządu). Ocena jest zazwyczaj prowadzona dla zdefiniowanej stałej prędkości obrotowej. Sygnały wibroakustyczne uzyskane dla stałej prędkości obrotowej są reprezentowane dla pojedynczego cyklu pracy silnika (w funkcji położenia wału korbowego lub czasu). Uzyskana grupa wykresów (dla 1 cyklu silnika) jest uśredniana, aby zminimalizować wpływ zdarzeń przypadkowych. Wykorzystywane są również me-

tody częstotliwościowe oraz metody analizy harmoniczej (ang. *order analysis*, niem. *Ordnungsanalyse*). Podstawą do analizy jest założenie, że drgania (hałas) są sumą składowych komponentów mechanicznych wibracji (hałasu). Dla znanych przełożeń, częstotliwości rezonansowych itd. analizowanego obiektu jest często możliwe rozpoznanie oraz ocena stanu jego komponentów mechanicznych. W praktyce analiza częstotliwościowa oraz analiza harmoniczna są wyznaczane z sygnałów wibroakustycznych uzyskanych dla wyodrębnionych cykli pracy silnika spalinowego. Końcowe wykresy dzieli się arbitralnie (rozważając kinematykę silnika) na poszczególne okna analizy. Następnie, generuje się tolerancje w oparciu o cechy statystyczne sygnału. Jeśli aktualna wartość cechy analizowanego sygnału przekracza wartość określonych tolerancji, w jednym lub w większej liczbie okien, można powiedzieć, że wystąpiło uszkodzenie.

3. Metoda transformacji falkowej

Transformacja falkowa (WT) jest znana od około 100 lat, a szeroko badana od około 20. Istotnym elementem, który przyczynił się do szybkiego rozwoju WT było odkrycie przez Mallata związku pomiędzy transformacją falkową, a bankami filtrów. Odkąd banki filtrów zostały wykorzystane do wykonywania WT, można było w znaczny sposób skrócić obliczenia, a w konsekwencji skrócenia czasu obliczeń można było wykorzystać zalety WT do szerokiego spektrum zastosowań. Unikalność WT można pokazać porównując ją z krótkoczasową transformacją Fouriera (STFT). W przypadku STFT okno analizy, które jest wykorzystywane do analizy sygnału ma taki sam kształt i rozmiar. W konsekwencji istnieje możliwość, że różnorodne składowe sygnały będą analizowane z niewłaściwą rozdzielczością. W ten sposób otrzymane współczynniki będą mniej przydatne do oceny stanu obiektu. W porównaniu do STFT, WT pozwala na rozwiązanie problemu rozdzielczości czasowo-częstotliwościowej. Wysokoczęstotliwościowe składniki sygnału będą analizowane z większą rozdzielczością czasową, natomiast składniki niskoczęstotliwościowe będą analizowane z większą rozdzielczością częstotliwościową. Wiadomo, że najlepszą reprezentację sygnałów można uzyskać, kiedy kształt funkcji analizującej (funkcji bazowej) jest podobny do kształtu sygnału analizowanego. Z tego powodu sygnały o kształcie impulsów powinny być analizowane przy pomocy funkcji bazowych o kształcie impulsu. WT w porównaniu do STFT wykorzystuje bardzo krótkie funkcje bazowe o kształcie impulsu nazywane falkami i dlatego potrafią bardzo precyzyjnie odwzorowywać charakterystyki krótkoczasowe sygnałów. Te dwie istotne właściwości WT (elastyczna rozdzielczość oraz

funkcje bazowe o kształcie impulsu) są przyczyną tego, że WT jest tak przydatna w analizie wielu problemów natury technicznej.

Transformacja falkowa należy do grupy metod analizy wieloskalowej (ang. *multiresolution analysis*). W metodzie analizy wieloskalowej funkcje są aproksymowane na różnych skalach i poziomach precyzji (rozdzielczości). WT jest wykonywana w ramach dwóch operacji. W pierwszym kroku, funkcja jest aproksymowana dla pewnej wystarczająco wąskiej skali (wykorzystanie funkcji skalującej). W drugim kroku zdefiniowana funkcja aproksymacji jest przedstawiona przy pomocy bazowej funkcji falkowej. WT można zrealizować analogicznie do FFT dla ciągłych i dyskretnych reprezentacji sygnałów. Zrozumienie metodologii WT wymaga szerokiej wiedzy dotyczącej baz ortogonalnych, banków filtrów, metod transformacji sygnałów itd. Teoretyczne podstawy WT i informacje dotyczące metodologii WT można znaleźć w pozycjach [2, 5, 10, 12].

Podstawową postacią transformacji falkowej jest ciągła transformacja falkowa. Ciągła postać transformacji falkowej może być zaprezentowana za [10] w postaci wzorów:

$$WT_{\Psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt - CWT \quad (1)$$

gdzie:

$\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – jądro przekształcenia

Ψ – funkcja falkowa (tzw. *mother function*),

$x(t)$ – sygnał badany zależny od czasu,

$WT_{\Psi}(a,b)$ – współczynnik falkowy zależny od parametrów a i b ,

b – parametr przesunięcia pokazujący pozycję w dziedzinie czasu (ang. *translation*),

a – skala – parametr związany z lokalizacją w dziedzinie częstotliwości (ang. *dilatation, scale*),

Rezultatem transformacji falkowej są współczynniki falkowe, które są funkcją parametrów skali a oraz przesunięcia b . Parametr skali a jest używany w celu rozciągania i kompresji matki falki Ψ_{ab} natomiast b określa pozycję czasową zjawisk, które są badane. Obliczone współczynniki dla analizowanego sygnału będą opisywać, dla wąskich falek (małe a), zawartość składników wysokoczęstotliwościowych, natomiast dla szerokich falek (duże a), zawartość składników niskoczęstotliwościowych [13].

Transformacja falkowa jest wysoce adekwatnym narzędziem do analizy sygnałów niestacjonarnych. Można wyróżnić szereg efektów niestacjonarnych, które mogą wystąpić w pracującym silniku spalinowym (zarówno w warunkach występowania spalania jak i bez niego) [8]. Przyczyny niestacjonarnych komponentów sygnałów obejmują występowanie nieliniowych zjawisk spowodowanych między innymi przez luzy lub nieliniowe

charakterystyki komponentów elastycznych [43]. Wśród istotnych zagadnień można wyróżnić zmiany stanu w fazie startu silnika [12], niestacjonarności spowodowane procesem spalania [4], zjawiska drganiowe w układzie rozrządu [8], drgania pary cylinder – tłok [9], problemy drganiowe ząbów [1], nieszczelności w układzie dolotowym [7], uszkodzenia turbosprężarki [6].

W pracy do celów analizy sygnałów wibroakustycznych zmierzonych na stanowisku do realizacji testu zimnego wykorzystano pakietową transformację falkową. Na rysunku 1 przedstawiono przykład trzypoziomowego drzewa dekompozycji pakietowej transformacji falkowej (WPT).

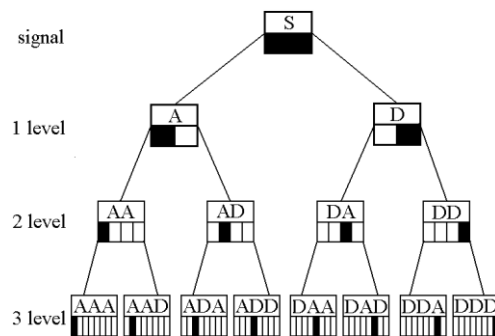


Fig. 1. Three level decomposition example based on wavelet packet transformation

Rys. 1. Trzypoziomowe drzewo dekompozycji pakietowej transformacji falkowej

4. Sieci neuronowe

Sieci neuronowe są dobrze znanym narzędziem wykorzystywanym w szczególności do rozpoznawania różnego rodzaju wzorców. Sieci te są zbudowane z elementów podstawowych zwanych neuronami. Pojedynczy neuron transformuje informację wejściową przy pomocy tzw. funkcji aktywacji do informacji wyjściowej. Dzięki połączeniu wielu neuronów w sieć, możliwe jest modelowanie kompleksowych modeli liniowych, jak również nieliniowych zależności zawartych w zadanych danych. Model jest tworzony dzięki dostosowaniu parametrów sieci neuronowej zwanych wagami do zaprezentowanych sieci danych treningowych.

Sieć neuronową można zapisać przy pomocy równania [3]:

$$y_k(x, w) = \sigma \left[\sum_{j=1}^M w_{kj}^{(2)} h \left(\sum_{i=1}^D w_{ji}^{(1)} x_i + w_{j0}^{(1)} \right) + w_{k0}^{(2)} \right] \quad (2)$$

gdzie:

x_i – wejścia sieci,

y_k – wyjścia sieci,

w_{ji}, w_{kj} – wagi sieci,

w_{j0}, w_{k0} – biasy sieci,

D – liczba elementów wejściowych sieci

M – liczba neuronów w warstwie ukrytej sieci

$\sigma(z)$ – funkcja logistyczna sigmoidalna (np.

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \text{ wyjścia z sieci,}$$

$h(z)$ – nieliniowa funkcja aktywacji (np. funkcja

$$\text{logistyczna sigmoidalna } h(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \text{ lub tan-}$$

$$\text{gens hiperboliczny } h(z) = \tanh(z).$$

$$z = \sum_{j=1}^M w_{kj}^{(2)} h\left(\sum_{i=1}^D w_{ji}^{(1)} x_i + w_{j0}^{(1)}\right) + w_{k0}^{(2)}, \quad (3)$$

Równanie to określa sposób w jaki informacja jest transportowana w sieci i jest nazywane równaniem propagacji w przód sieci. Sieć neuronową można rozumieć jako model, który wykonuje przekształcenie dowolnego, wielowymiarowego, nieliniowego zbioru informacji wejściowych w dowolne wyjście. Model zbudowany przy pomocy sieci neuronowej jest w stanie wykonać dowolne przekształcenie wartości wejściowych w wyjściowe (dowolną propagację w przód). Aby było to możliwe konieczny jest odpowiedni dobór struktury sieci oraz umiejętność dopasowanie wag sieci. To jak dobrze sieć neuronowa potrafi odwzorować właściwości danych zależy będzie od struktury sieci. Wyszczególnić tu należy takie parametry jak liczba neuronów, liczba warstw, rodzaj wybranej funkcji aktywacji.

5. Cel i metody badań

Badania były prowadzone według schematu postępowania zaprezentowanego na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu pomiarowego wraz z rozmieszczeniem czujników.

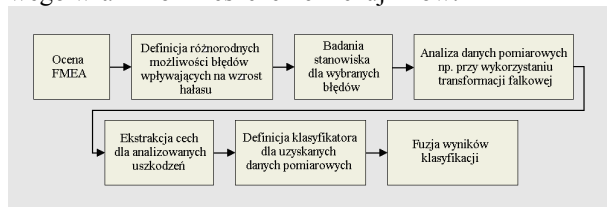


Fig. 2. Scheme of research plan

Rys. 2. Schemat planu badań

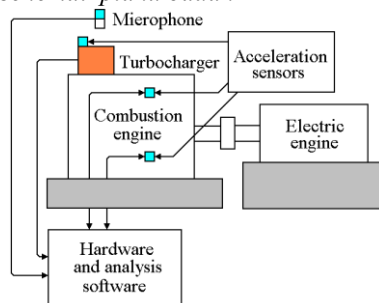


Fig. 3. Vibro – acoustic cold test set-up

Rys. 3. Schemat układu czujników wykorzystywanych do pomiarów wibroakustycznych wykonywanych w ramach testu zimnego

Klasyfikację stanów silnika wykonano wykorzystując w tym celu falkową sieć neuronową (rysunek 4) [11].

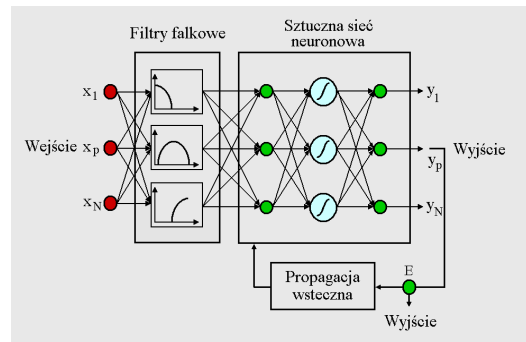


Fig. 4. Wavelet neural network schema [11]

Rys. 4. Schemat falkowej sieci neuronowej [11]

6. Badania

Do badań na stanowisku do realizacji testu zimnego wykorzystano dwa typy silników (z wałem oraz bez wału wyrównowazającego). W zaprezentowanym przypadku badano różnorodne możliwości uszkodzeń pojedynczego silnika (typ silnika 1). Uszkodzenia wału wyrównowazającego były badane w silniku typu 2. Powodem podjętych decyzji były względy finansowe. Dodatkowe stany uszkodzenia były pozyskane bezpośrednio z linii montażowej w ramach badań nowych silników.

Istotnym z punktu widzenia zrozumienia pracy jest rozróżnienie pomiędzy dwoma stanami, mianowicie pomiędzy silnikiem dobrym „nowym” (badanym 1-2 krotnie podczas testu zimnego) oraz silnikiem dobrym wielokrotnie mierzonym na stanowisku do realizacji testu zimnego (niepoddawanym testom w stanie gorącym). W ramach pracy badano czy rezultaty pomiarów dla silników wykorzystywanych wielokrotnie w różnych badaniach mogą być wykorzystywane do bezpośrednich porównań z silnikami badanymi jedno- lub dwukrotnie na stanowisku do realizacji testu zimnego. Sygnały wibroakustyczne mierzone dla silnika badanego po raz pierwszy oraz drugi mają zazwyczaj większą amplitudę od sygnałów zmierzonych dla silników badanych wielokrotnie. Powodem tego mogą być warunki w jakich pracuje testowany nowo zmontowany silnik. Do momentu, gdy silnik ma odpowiednie ciśnienie w układzie smarowania, co następuje po kilku sekundach, silnik pracuje w warunkach pracy suchej.

Badania wibroakustyczne wykonano na dwóch, jednakowo wyposażonych stacjach testów zimnych, w sposób automatyczny zgodnie z zadaną krzywą prędkości obrotowej wału korbowego. Ten przebieg dla silnika typu 2 zaprezentowano na rysunku 5.

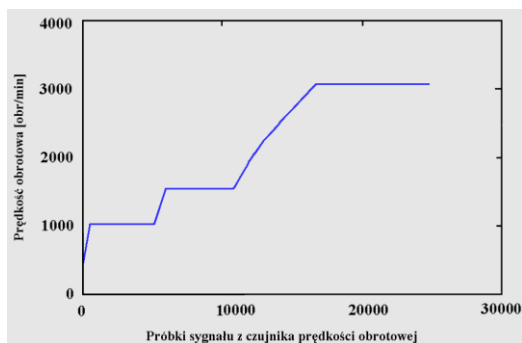


Fig. 5. Crankshaft rotation velocity during cold test measurements of engine type 2

Rys. 5. Wykres zastosowanego przebiegu wartości wielkości nastawczej, prędkości obrotowej wału korbowego dla silnika typu 2

Dla porównania pomiary wibroakustyczne dla silnika typu 1 prowadzono dla krzywej prędkości obrotowej składającej się z 2 fragmentów: przyspieszenia (1000 – 3000 obr/min) oraz fragmentu stałej prędkości obrotowej (dla 3000 obr/min). To istotne zmniejszenie informacji wibroakustycznej jest podyktowane względami organizacyjno – ekonomicznymi (oszczędności dotyczące pamięci dyskowej).

W oparciu o wyniki analizy raportów FMEA (analiza przyczyn i skutków uszkodzeń) podczas testu zimnego badano różne stany uszkodzeń. Do przykładów należą różnorodne uszkodzenia turbosprężarek, uszkodzenia wału wyrównowazającego, uszkodzenia mechanizmu rozrządu, uszkodzenia powierzchni cylindrów. Do badań wykorzystano trzy czujniki drgań (o maksymalnym paśmie częstotliwościowym 10 kHz, tabela 1). Mierzyły one dotykowo drgania bloku silnika, głowicy cylindra oraz turbosprężarki. Dodatkowo wykorzystano mikrofon (o maksymalnym paśmie częstotliwościowym 20 kHz, tabela 2), którego celem jest pomiar poziomu ciśnienia akustycznego w odległości 30 cm od korpusu turbosprężarki, na wysokości osi zespołu doładowywującego. Czujniki są pozycjonowane w sposób automatyczny na głowicy cylindra, bloku silnika i turbosprężarce. Pozycja czujników jest stała i stabilna. Czujniki drgań są poddane naprężeniu wstępnemu, aby umożliwić wykonanie porównywalnych pomiarów.

Każdorazowo równolegle do pomiarów wibroakustycznych pobierane były informacje z czujników prędkości obrotowej zamontowanych na stałe przy wału rozrządu i wale korbowym. Pozyskany sygnał wibroakustyczny jest badany w pierwszej kolejności, dla stałej prędkości obrotowej silnika. Pakietową transformację falkową (WPT) wykorzystywano do analizy danych pomiarowych (silników referencyjnych i uszkodzonych). Sygnał wibroakustyczny przekształcony do postaci odpowiadającej pełnemu cyklowi pracy silnika analizowa-

wano przy wykorzystaniu transformacji falkowej i dalej metod statystycznych.

Uzyskane współczynniki falkowe zostały następnie poddane ekstrakcji cech w celu eliminacji informacji nieistotnych, nadmiarowych. Obliczone cechy (dla dobrych silników i silników wadliwych) zostały zaprezentowane jako wektor z odpowiadającymi im etykietami.

Tab. 1. Selected technical data of accelerometers used in the researches [14]

Tab. 1. Wybrane dane techniczne akcelerometrów stosowanych w badaniach [14]

Współczynnik przeniesienia	100 mV/g
Czułość napięciowa	10,2 mV/(m/s ²)
Zakres częstotliwości	0.4 do 10 kHz

Tab. 2. Selected technical data of microphones used in the researches [14]

Tab. 2. Wybrane dane techniczne mikrofonów stosowanych w badaniach [14]

Czułość	6,3 mV/Pa
Zakres dynamiki	30-140 dB
Zakres częstotliwości	10 Hz - 20kHz
Zakres wilgotności pracy	0-90 % bez kondensacji.

W celu analizy wybranych stanów silnika spaliniowego (dobrych silników, silników uszkodzonych) zastosowano metodę opartą o transformację falkową. W niniejszej publikacji zaprezentowano metodę analizy sygnałów zmierzonych w warunkach stałej prędkości obrotowej. Mianowicie sygnały zmierzone przy stałej prędkości obrotowej były dzielone na mniejsze odcinki długości odpowiadającej pełnemu cyklowi pracy silnika. Współczynniki transformacji falkowej obliczano dla każdego z tych fragmentów sygnału. Następnie dla uzyskanych współczynników obliczono parametry statystyczne takie jak: średnia wartość współczynników dla wszystkich węzłów w drzewie dekompozycji, odchylenie standardowe, kurtoza, momenty wyższych rzędów, współczynnik szczytu itd. Parametry statystyczne współczynników falkowych obliczonych dla wielu pojedynczych cykli silnika zostały poddane normalizacji (normalizacja min – max, przedział $(-1,1)$) i przedstawione ostatecznie na rysunku 6. Do skonstruowania tego rodzaju reprezentacji wykorzystano piątą poziom drzewa dekompozycji transformacji falkowej. Wykorzystano tylko pierwsze dwanaście pasm częstotliwościowych (z 32 możliwych). Pozostałe pasma były obarczone błędem wynikającym z ograniczonego zakresu pomiarowego czujnika pomiarowego (do 10 kHz dla zastosowanego czujnika drgań) i dlatego zostały pominięte.

Na rysunku 7 zaprezentowano cechy statystyczne otrzymane po wykonaniu pakietowej transformacji falkowej sygnału drganiowego silnika

referencyjnego (rysunek 7a) i uszkodzonego (rysunek 7b). Wykresy te wskazują na wystąpienie uszkodzenia. Można zauważyć wyraźną różnicę w momentach czwartego, szóstego oraz ósmego rzędu obliczonych dla wyników pakietowej transformacji falkowej.

Wykorzystując wyodrębnione z pomocą pakietowej transformacji falkowej, cechy sygnału wibroakustycznego postanowiono wykonać próbę klasyfikacji wybranych stanów silnika. Do celów klasyfikacji wykorzystano metodę opartą o sieć neuronową. Wybrany został problem 8 klasowej klasyfikacji stanów silnika (tabela 3). Klasyfikacje zrealizowano przy wykorzystaniu falkowej sieci neuronowej o 2 warstwach i 20 neuronach w każdej z warstw (podział danych: trening: walidacja: testowanie (50:25:25); algorytm treningowy: Levenberg Marquardt). W treningu wykorzystano cechy falkowe uzyskane dla falki db1 i 5 - tego poziomu dekompozycji. Ekstrakcję cech wykonano przy pomocy analizy komponentów głównych (wybrano 5 komponentów głównych).

Tab. 3. Eight engine states (classes) tested for purpose of classification.

Tab. 3. Osiem stanów (klas) silnika wykorzystanych do klasyfikacji przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji.

Klasa 1	Nowy silnik typ 1 (tabela 6)
Klasa 2	Silniki wielokrotnie mierzony typ 1
Klasa 3	Błąd obróbkowy wałka rozrządu silnika typ 1
Klasa 4	Błędne czasy sterowania silnika typ 1
Klasa 5	Silniki z poprawnie obrobioną po-

	wierzchnia cylindra silnika
Klasa 6	Silniki z niepoprawnie obrobioną powierzchnią cylindra silnika
Klasa 7	Poprawnie zamontowany zespół wału wyrównowazającego
Klasa 8	Błędnie zamontowany zespół wału wyrównowazającego

W tabeli 4 przedstawiono rezultaty klasyfikacji stanów dla cech stworzonych przy pomocy transformacji falkowej dla pojedynczego czujnika, dla wybranej matki falki. Rezultaty zostały przedstawione w postaci macierzy konfuzji. Żółte pola, umieszczone na przekątnej odnoszą się do poprawnych wyników klasyfikacji. Na pomarańczowo zaprezentowano pola dotyczące procentowej liczby błędnych klasyfikacji.

7. Podsumowanie

Aby spełnić cele dotyczące klasyfikacji analizowano różnorodne procedury klasyfikacji. Zastosowano nowoczesne algorytmy treningu do klasyfikacji danych realnych w celu poprawy skuteczności klasyfikacji. Dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu transformacji falkowej zaobserwowano różnice pomiędzy typami silników, sytuacjami pomiarowymi, typami uszkodzeń itd. Dla silników o podobnej budowie konstrukcyjnej możliwe było odnalezienie uogólnionego wzoru uszkodzenia, co powinno pomóc w identyfikacji typów uszkodzeń bez konieczności prowadzenia kosztownych, czasochłonnych badań stanowiskowych.

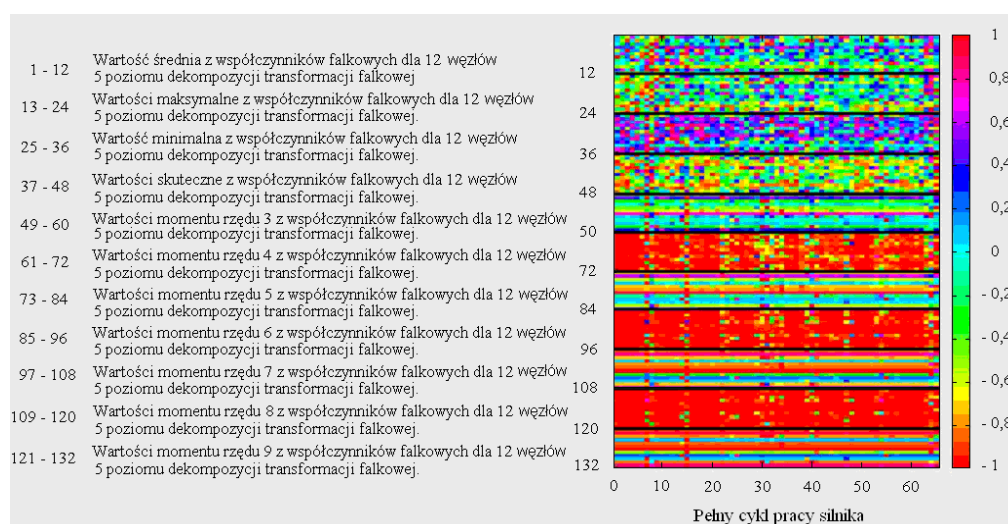


Fig. 6. Different statistical features calculated for wavelet packet transformation of diesel engine vibroacoustic signal for single engine cycle

Rys. 6. Wybrane cechy statystyczne uzyskane po przeprowadzeniu analizy falkowej sygnału wibroakustycznego silnika spalinowego przedstawione dla pełnego cyklu pracy silnika

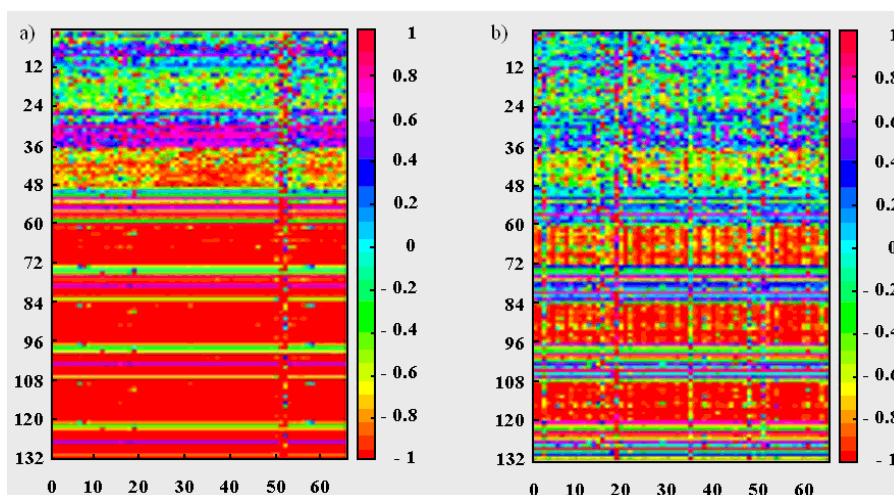


Fig. 7. Different statistical features calculated for wavelet transformation results (decomposition depth 5, db1 mother wavelet) for correctly (figure 7a) and incorrectly (figure 7b) assembled balance shaft module
 Rys. 7. Cechy zbudowane w oparciu o transformację falkową (głębokość dekompozycji 5, falka matka db1) uzyskane dla silnika z poprawnie (rysunek 7a) i niepoprawnie (rysunek 7b) zamontowanym wałem wyrównowazającym

Tab. 4. Eight engine states classification results. Yellow colour: correct classification results.

Tab. 4. Klasyfikacja ośmiu stanów silnika. Kolorem żółtym oznaczono poprawne wyniki klasyfikacji dla poszczególnych klas.

		Rzeczywistość								
		Falka db1	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5	Klasa 6	Klasa 7	Klasa 8
Odpowiedź systemu	Klasa 1		91,39	36,54	0	0	0	0	0	0
	Klasa 2		8,81	38,46	15,15	3,33	0	0	0	0
	Klasa 3		0	25,00	69,70	13,33	0	0	0	0
	Klasa 4		0	0	15,15	83,33	8,33	0	0	0
	Klasa 5		0	0	0	0	66,67	7,89	0	0
	Klasa 6		0	0	0	0	25,00	96,92	1,10	0
	Klasa 7		0	0	0	0	0	3,08	93,92	2,74
	Klasa 8		0	0	0	0	0	0	4,97	97,26

Macierz konfuzji – macierz MxM (gdzie M oznacza liczbę klas) wykorzystywana do reprezentacji skuteczności klasyfikacji testowanego klasyfikatora. Wyniki (w procentach) na przekątnej głównej macierzy reprezentują poprawną klasyfikację próbek testowych przez klasyfikator natomiast wyniki poza przekątną główną oznaczają błędną klasyfikację oraz dodatkowo możliwe jest rozpoznanie klasy, do której klasyfikator sklasyfikował określone zestawy cech należące do klasy zadanej.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

FFT Fast Fourier Transformate/ Szybka Transformacja Fouriera
 FMEA Failure Mode and Effect Analysis/ Analiza Przyczyn i Skutków Uszkodzeń
 STFT Short Time Fourier Transformate/ Krótkoczasowa Transformacja Fouriera

WT Wavelet Transformation /Transformacja falkowa
 WPT Wavelet Packet Transformation/ Pakietowa Transformacja Falkowa

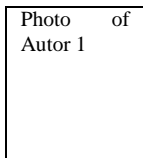
Bibliography/Literatura

- [1] Bader D.: Eine flexible akustische Messmethode zur Detektierung von verzahnungstechnischen Problemen. Rozprawa doktorska, TU Ilmenau, Ilmenau, 2006.
- [2] Bergh J., Lindberg M., Ekstedt F.: Wavelets mit Anwendungen in Signal- und Bildbearbeitung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] Bishop C.M.: Pattern Recognition and Machine Learning. Springer Verlag, 2006.
- [4] Carstens-Behrens S., Bohme J.F.: Applying time – frequency methods to pressure and structure - borne sound for combustion diagnosis. Sixth International Symposium on Signal Processing and its Applications vol. 1, pp. 256 – 259, 2001.
- [5] Hlawatsch F., Auger F.: Time - Frequency Analysis. Concepts and Methods. ISTE and Wiley, London, 2008.
- [6] Janczewski Ł.: Vibro – acoustic failure recognition on combustion engines at the end of assembly lines. PTNSS Congress, Radom, 2011. PTNSS–2011–SC–130
- [7] Madej H.: Wykorzystanie metod wibroakustycznych w diagnostyce silników spalinowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 65, 45-50, 2009.
- [8] Madej H., Łazarz B., Perun G.: Zastosowanie analizy falkowej w diagnozowaniu uszkodzeń zaworów silnika spalinowego ZI. Diagnostyka vol. 48, No. 4, pp. 97-102, 2008.
- [9] Madej H., Czech P.: Diagnozowanie luzu w układzie tłok – cylinder z wykorzystaniem współczynników Hoeldera. Diagnostyka vol. 49, No. 1, pp. 73-78, 2009.
- [10] Mertins A.: Signal Analysis. Wavelets, Filter Banks, Time – Frequency Transforms and Applications. John Wiley and Sons, Chichester, 1999.
- [11] Rying E. A.: A Novel Focused Local Learning Wavelet Network with Application to In Situ Monitoring During Selective Silicon Epitaxy., Rozprawa doktorska, North Carolina State University, Raleigh, 2001.
- [12] Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007.
- [13] Zimroz R.: Zastosowanie analizy falkowej w diagnostyce uszkodzeń lokalnych układów napędowych maszyn górniczych. Diagnostyka vol 49, No. 1, pp. 113-122, 2009.
- [14] Materiały informacyjne firmy Medav GmbH, Lösungen zur End of line Prüfung, Schadensfrüherkennung, Applikationen.

Mr Łukasz Janczewski, master eng. – worker in Institute of Advanced Manufacturing Technology in Cracow.

mgr inż. Łukasz Janczewski – pracownik Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie.

Photo of
Autor 1



Mr Jacek Nowakowski – Professor in the Department of Combustion Engines and Vehicles at Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at University of Bielsko-Biala.

Dr hab. inż. Jacek Nowakowski, prof. ATH – profesor w Katedrze Silników Spalinowych i Pojazdów na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno – Humanistycznej w Bielsku Bialej.

Photo of
Autor 1

