

Dr inż. Waldemar Paszkowski

Faculty Organization and Management
Silesian University of Technology
Roosevelta 26 str., 41-800 Zabrze, Poland
E-mail: wpaszkowski@polsl.pl

Modelowanie zjawisk wibroakustycznych z zastosowaniem metody parametryzacji sygnału fonicznego

Słowa kluczowe: *zjawiska wibroakustyczne, parametryzacja sygnału, percepcja hałasu, modelowanie*

Streszczenie: W artykule zaproponowano oryginalny sposób modelowania zjawisk wibroakustycznych eksploatowanych maszyn/urządzeń z zastosowaniem metody parametryzacji sygnału fonicznego. Sposób ten rozszerza dotychczasowe podejście do tego rodzaju badań i polega na uwzględnianiu efektów psychoakustycznych towarzyszących emisji energii wibroakustycznej. Proponowane rozwiązanie opiera się na wyznaczeniu współczynników mel-cepstralnych badanego sygnału i jego klasyfikacji, ze względu na oddziaływanie hałasu. Przedstawiono weryfikację zastosowania metody na przykładzie badań oddziaływania źródeł hałasu drogowego.

1. Wprowadzenie

Źródłem zjawisk zachodzących podczas eksploatacji maszyn i urządzeń są złożone procesy wibroakustyczne. Składają się na nie zróżnicowane oddziaływania drgań, hałasu, dźwięków powietrznych i materiałowych, czy też pulsacji medium w przestrzeniach elementów maszyn. Oddziaływania te w postaci energii wibroakustycznej emitowane są do otoczenia. Efekty zjawisk wibroakustycznych stanowią odpowiedź działania maszyn/urządzeń w stosunku do ich elementów lub otoczenia. Niezależnie od postawionego celu badawczego nośnikiem informacji o zjawiskach wibroakustycznych jest sygnał wibroakustyczny, który podlegać może różnym przekształceniom. Analiza sygnału wibroakustycznego jako procesu przetwarzania danych na informacje użyteczne wykorzystywana jest nie tylko w zadaniach utrzymania ruchu [3, 10], diagnozowania [13], niezawodności [9], oceny stanu eksploatacji obiektów technicznych [14], ale także w zadaniach oddziaływania maszyn/urządzeń na otoczenie. Oddziaływanie to analizowane może być w przestrzeniach otwartych, pomieszczeniach oraz w odniesieniu do organizmu człowieka. Za zjawiska wibroakustyczne uznaje się wszelkie przebiegi drganiowe i akustyczne, które powiązane są ze sobą przyczynowo. Stwierdzono, że w badaniach tych zjawisk uwzględniać się powinno następujące zagadnienia [5]:

- czasowy i przestrzenny rozkład charakterystyki opisującej energię pochodzącą ze źródła,
- odpowiedź układu, wibroakustyczna funkcja przejścia,
- współzależność między źródłami.

Zjawiska wibroakustyczne opisywane są za pomocą podstawowych wielkości fizycznych, takich jak: ciśnienie akustyczne, prędkość, przyspieszenie, przemieszczenie, siła [5]. Z kolei sygnał wibroakustyczny reprezentowany może być za pomocą funkcji jednoargumentowej lub wektora [1].

Stosowane metody analiz sygnałów wibroakustycznych wykorzystują m.in. różne przekształcenia Fouriera dzięki czemu uzyskać można widma amplitudowe, fazowe, bądź energetyczne. Transformata Fouriera poprzez zmianę sygnału z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości pozwala pozyskać cenne informacje, szczególnie gdy występuje duża dynamika zmian parametrów sygnału w czasie. W badaniach wibroakustycznych wymaga się nie tylko przeprowadzenia pomiarów parametrów drgań i hałasu, lecz pozyskania także informacji o badanym zjawisku. Przyjęty cel badań w odniesieniu do obiektu technicznego lub jego otoczenia determinuje ustalenie metodyki pomiarów [5].

2. Modelowanie zjawisk wibroakustycznych oraz percepcji dźwięku - przegląd obecnych rozwiązań

Modelowaniu sygnału wibroakustycznego podlegają zjawiska drganiowe i akustyczne powstające podczas eksploatacji maszyn/urządzeń, które analizowane są łącznie. Do analizy procesów wibroakustycznych w otoczeniu wykorzystuje się modelowanie akustyczne maszyn i urządzeń [5]. Stosuje się w tym celu metody modelowania pola akustycznego maszyn/urządzeń dla identyfikacji źródeł dźwięku. Cechy źródeł dźwięku ocenić można poprzez [5]:

- pole akustyczne wytwarzane przez źródło,
- samo źródło jako emitora energii wibroakustycznej.

Metody modelowania zjawisk wibroakustycznych znajdują szerokie zastosowanie w zadaniach m.in. identyfikacji oraz redukcji źródeł drgań i hałasu, analizy procesów wibroakustycznych [11], oceny stanu technicznego maszyn/urządzeń i ich niezawodności, analizy uszkodzeń elementów maszyn/urządzeń, czy też oceny oddziaływania energii wibroakustycznej na organizm człowieka. Przykładowo, metody modelowania diagnostycznego wykorzystują sygnał wibroakustyczny do badania zużycia lub uszkodzenia elementów obiektu technicznego [5]. Wśród znanych metod modelowania tych zjawisk wyróżnić można m.in. metody: ciśnieniowe, natężeniowe, wzajemnościowe, elementów skończonych, inwersyjne, transformaty Fouriera, krótkoczasowej transformacji Fouriera, transformacji falkowej [1, 5].

W analizie zjawisk wibroakustycznych przetwarzaniu podlegają najczęściej dane i informacje związane bezpośrednio ze źródłem dźwięku, człowiekiem lub środowiskiem, z uwzględnieniem zachodzących interakcji pomiędzy: źródłem dźwięku - człowiekiem - środowiskiem. Jednym z celów poszukiwania związków charakteryzujących maszynę/urządzenie w środowisku tj. źródło hałasu, a parametrami pola akustycznego w jego otoczeniu jest formułowanie modeli emisji dźwięku dla potrzeb oceny jego oddziaływania [23]. W tym zakresie, wyznacza się z sygnału wibroakustycznego odpowiednie cechy fizyczne mierzonych wielkości energetycznych. Na tej podstawie określa się stopień szkodliwości drgań lub hałasu, negatywny wpływ zjawisk wibroakustycznych na organizm człowieka, bądź na elementy maszyn/urządzeń lub otoczenie. Danymi wejściowymi do modelowania zjawisk wibroakustycznych są pozyskiwane informacje akustyczne z ustalonych punktów przestrzeni otoczenia maszyn/urządzeń. Dla potrzeb określenia stopnia narażenia w określonym punkcie przestrzeni powinny wykonane być pomiary wielkości charakteryzujących zagrożenie hałasem [6]. W wyniku pomiarów akustycznych otrzymuje się w danym punkcie odpowiednie wartości wskaźników energetycznych [4, 21]. Prowadzone badania nad słuchowymi skutkami hałasu człowieka potwierdzają, że identyfikacja zagrożenia hałasem jedynie za pomocą wskaźników energetycznych jest ograniczona i niewystarczająca [24, 20]. Pomija się w stosowanym podejściu subiektywne znaczenie wrażeń oddziaływania hałasu. Nie jest uwzględniana interakcja wysokości dźwięku i

głośności dynamicznie zmieniających się dźwięków. Stosowane w tym zakresie filtry A-, B , C- oraz D- przybliżają odwrócony kształt krzywych o równej głośności, przy różnych poziomach ciśnienia akustycznego. Wazenie filtrem A stało się najczęściej stosowanym współczynnikiem częstotliwości, chociaż nie jest on rozwiązaniem optymalnym dla wszystkich poziomów ciśnienia akustycznego. Z badań nad percepcją dźwięku wynika, że składowe harmoniczne dźwięku o częstotliwościach zawartych w przedziale 1÷5[kHz] są lepiej słyszalne, niż pozostałe [16]. Ma to znaczenie w interpretacji występowania zjawisk elementarnych i złożonych w niskich oraz wysokich zakresach częstotliwości [15]. W badaniach nad wyznaczeniem subiektywnego odczuwania przez człowieka głośności dla dźwięków ciągłych stosuje się model polegający na wyznaczeniu całkowitego (równoważnego) poziomu dźwięku skorygowanego filtrem korekcyjnym słyszenia (A). Zaznaczyć należy, że charakterystyka częstotliwościowa filtra (A) stanowi pewne przybliżenie odbioru wrażeń akustycznych o niskich poziomach dźwięku. Z analizy charakterystyki progów słyszalności wynika, że czułość słuchu jest największa w zakresie częstotliwości średnich 1000÷4000[Hz] i istotnie spada ona w paśmie niskich i wysokich częstotliwości. Zaznaczyć należy, że charakterystyki progów słyszalności, dyskomfortu oraz bólu istotnie różnią się między sobą w funkcji częstotliwości [12]. Analizując mechanizm powstawania wrażeń akustycznych w stosunku do cech dźwięku to stwierdzić należy, że pomiędzy fizycznymi i subiektywnymi cechami dźwięku nie występuje prosta oraz jednoznaczna relacja. Prowadzone badania nad subiektywnymi cechami dźwięku odnoszą się między innymi do opisu i interpretacji wrażeń słuchowych. Otrzymane wyniki badań nad zjawiskiem hałasu potwierdzają, że istotny wpływ na percepcję hałasu mają m.in. psychoakustyczne aspekty dźwięku, struktura czasowa sygnału, kształtowanie się subiektywnych cech dźwięku w dziedzinie: czasu, częstotliwości, czasowo-częstotliwościowej [8, 17, 18, 19]. Podejmowane badania nad oceną jakości sygnałów fonicznych opierają się na stosowaniu dwóch kategorii metod, [26], tj.:

- metod subiektywnych - polegających na dokonywaniu oceny wrażeń słuchowych przez człowieka,
- metod obiektywnych - polegających na stosowaniu przybliżonych modeli matematycznych w celu uwzględnienia mechanizmów percepcji.

W subiektywnych metodach oceny jakości dźwięku wykorzystuje się odsłuchy sygnału ocenianego dla potrzeb określenia odczuwalnego przez słuchacza stopnia podobieństwa obu sygnałów, stopnia ich różnicy, bądź też poziomu dyskomfortu wywołanego obecnością zakłóceń lub zniekształceń. Metody te z jednej strony pozwalają na wartościowanie otrzymania bezpośredniej odpowiedzi od odbiorcy, z drugiej strony indywidualne czynniki subiektywne wpływają istotnie na pojedynczą ocenę. Wśród metod obiektywnych wyróżnić można badania, tj.:

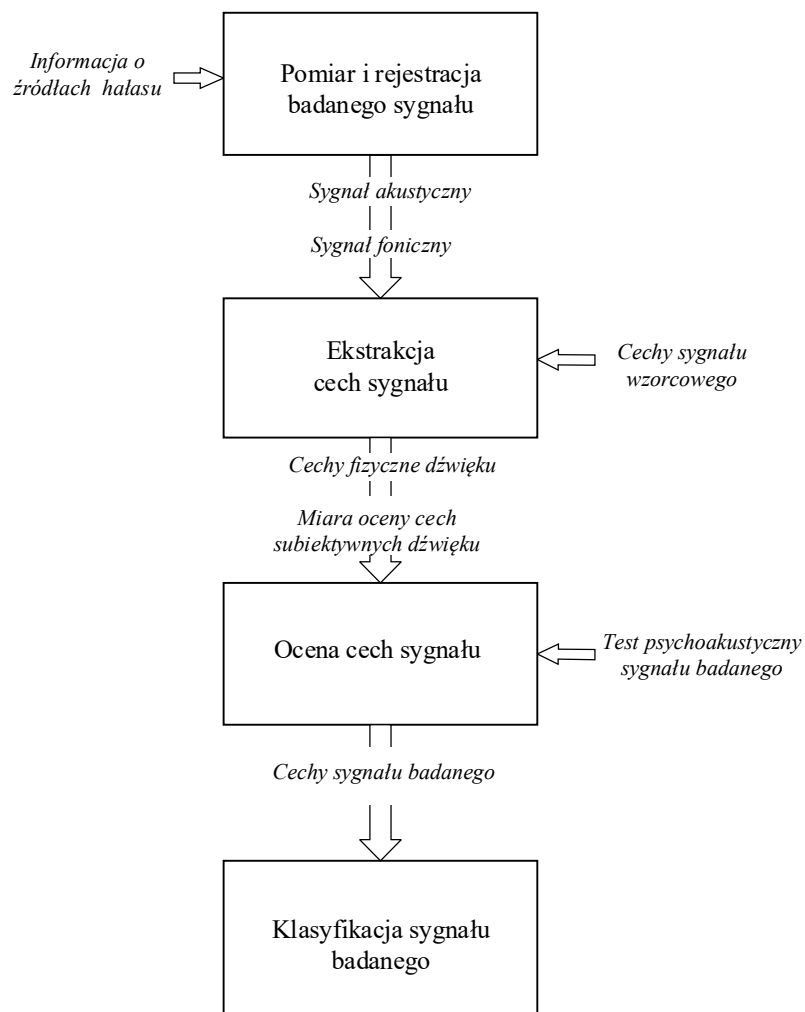
- sygnałowe - najczęściej sygnał oceniany porównywany jest z sygnałem oryginalnym, bez zniekształceń (sygnałem odniesienia). Wykorzystuje się także sposoby, w których nie uwzględnia się sygnału odniesienia.
- parametryczne - ocenie podlega jakość dźwięku na podstawie wiedzy o zastosowanej technice przetwarzania i znajomości jej parametrów, które są argumentami wejściowymi algorytmu oceny.

Z przedstawionej analizy metod i modeli nad stosowanymi rozwiązaniami w zakresie analizy zjawisk wibroakustycznych oraz oceny jakości dźwięku wynika, że cechy zawarte w sygnale fonicznym stanowią cenne źródło informacyjne w badaniu percepcji hałasu. Za ważne w tym obszarze uznać należy uwzględnienie efektów psychoakustycznych oddziaływania energii wibroakustycznej na organizm człowieka zarówno podczas realizacji przez niego prac obsługowo-użytkowych, utrzymania ruchu, jak i przebywania w otoczeniu źródeł emisji drgań i hałasu.

Podjętym problemem jest uwzględnienie w zadaniach modelowania zjawisk wibroakustycznych efektów psychoakustycznych będących skutkiem eksploatacji maszyn/urządzeń.

3. Sposób modelowania zjawisk wibroakustycznych z zastosowaniem metody parametryzacji sygnału

Występujące słuchowe wrażenia dźwiękowe będące skutkiem procesów akustycznych zależne są silnie od częstotliwości, ze względu na uwarunkowania fizyczne propagacji fali akustycznej i percepcję. Za istotne uznać należy nieliniowość i zakres percepcji zjawisk dźwiękowych człowieka, w odniesieniu do amplitudy ciśnienia akustycznego i częstotliwości [2]. Autor zaproponował nowe podejście do modelowania zjawisk wibroakustycznych występujących w otoczeniu eksploatowanych maszyn/urządzeń. Podejście to polega na zastosowaniu ekstrakcji wybranych cech z sygnału akustycznego i sygnału fonicznego. Reprezentację sygnału akustycznego stanowią fizyczne cechy dźwięku. W sygnale fonicznym zawarte są informacje reprezentujące subiektywne cechy dźwięku. W proponowanym sposobie punktem wyjścia do modelowania zjawisk wibroakustycznych są cechy sygnału akustycznego i sygnału fonicznego. Na rys. 1 przedstawiono sposób modelowania zjawisk wibroakustycznych występujących podczas eksploatacji maszyn/urządzeń, który uwzględnia psychoakustyczne efekty hałasu.



Rys. 1 Sposób przetwarzania cech sygnału akustycznego i sygnału fonicznego

Zgodnie z rys. 1 autor zaproponował realizację następujących działań dla potrzeb klasyfikacji sygnału badanego, tj.:

- pomiar i rejestracja badanego sygnału: stanowi źródło informacyjne dla pozyskiwania oraz przetwarzania cech sygnału akustycznego i fonicznego,
- ekstrakcja cech sygnału: polega na zastosowaniu metody/modelu oceny fizycznych i subiektywnych cech sygnału akustycznego oraz fonicznego,
- ocena cech sygnału badanego: podstawą oceny cech sygnału fonicznego jest stopień zgodności jego cech z cechami sygnału wzorcowego,
- klasyfikacja sygnału badanego: przyporządkowanie sygnału fonicznego do danej klasy sygnału wzorcowego na podstawie przeprowadzonej oceny cech.

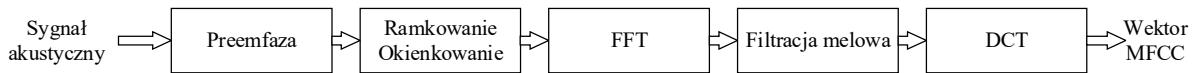
W przyjętym sposobie założono, że ocena i wybór sygnałów wzorcowych przeprowadzone zostaną na podstawie odtwarzania słuchaczom zarejestrowanych sygnałów fonicznych w ramach eksperymentu psychoakustycznego. Przyporządkowanie sygnałów wzorcowych do odpowiedniej klasy oceny hałasu realizowane jest w oparciu o uzyskane wyniki z prezentowanych sygnałów podczas eksperymentu.

3.1 Opis metody parametryzacji sygnału fonicznego

W rozpatrywanym problemie badawczym zaproponowana metoda parametryzacji sygnału fonicznego opiera się o model perceptualny wykorzystujący własności mechanizmu słyszenia ucha ludzkiego, charakteryzującego się nieliniową percepcją wysokości częstotliwości w skali melowej odbieranych sygnałów dźwiękowych. Zastosowanie przez autora metody parametryzacji sygnału fonicznego w modelowaniu zjawisk wibroakustycznych jest oryginalne i nie spotykane w literaturze przedmiotu. Do najpowszechniej stosowanych metod parametryzacji sygnału mowy należy metoda MFCC (*ang. Mel-Frequency Cepstral Coefficients*), która pozwala na wyznaczenie zbioru współczynników cepstralnych tj. cech sygnału z widma melowego [7]. Współczynniki mel cepstralne wzorowane są na przetwarzaniu sygnału akustycznego w ślimaku narządu słuchu człowieka. Zadaniem ich jest odzwierciedlenie naturalnej odpowiedzi układu słuchowego na pobudzenie dźwiękami. Zaproponowana metoda polega na modelowaniu parametrów ekstrahowanych z sygnału fonicznego, które silnie zależą od subiektywnych wrażeń słuchowych dźwięku. Przesłankami do realizacji badań zjawisk wibroakustycznych za pomocą współczynników mel cepstralnych było rozpoznanie możliwości zastosowania metody parametryzacji sygnału fonicznego, która pozwala na uwzględnienie m.in.:

- losowości sygnałów występujących powszechnie w eksploatowanych maszynach/urządzeniach,
- zmienności struktury częstotliwościowej w przebiegu sygnału,
- estymacji widma sygnału w subiektywnej skali perceptualnej,
- nieliniowości postrzegania częstotliwości dźwięku przez człowieka.

Wyznaczenie współczynników mel-cepstralnych daje możliwości skutecznej klasyfikacji i oceny badanych sygnałów fonicznych. Brak uniwersalności rozwiązań w zakresie rozpoznawania wzorców sygnałów akustycznych dla potrzeb ich oceny nie wynika z niedoskonałości metod, lecz ze złożoności źródłowych sygnałów. Z tego powodu stosuje się transformację analizowanych sygnałów w celu uzyskania odpowiedniej przestrzeni cech dźwięku. Dla potrzeb wyznaczenia wektora współczynników MFCC zastosowano algorytm umożliwiający ekstrakcję cech sygnału fonicznego (rys. 2).



Rys. 2 Procedura parametryzacji sygnału fonicznego z zastosowaniem współczynników MFCC [25]

Zgodnie przedstawioną na rys. 2 procedurą przyjęto etapową realizację przetwarzania cech sygnału [25] tj.:

Etap 1: Proces preemfazy polegający na filtracji formującej, w wyniku której następuje osłabienie składowych o małych częstotliwościach i wzmocnieniu składowych o wysokich częstotliwościach.

Etap 2: Ramkowanie sygnału, czyli podział sygnału na krótkie fragmenty zwane ramkami. Możliwe jest zastosowanie nakładania się kolejnych ramek czasowych. Następnie na tym etapie realizowane jest okienkowanie z zastosowaniem okna Hamminga:

$$Ham(N) = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \frac{n-1}{N-1}\right) \quad (1)$$

gdzie:

N - długość ramki,

$n=1,2,\dots,N$.

Etap 3: Wykonanie algorytmu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) na zokienkowanym sygnale w poszczególnych ramkach i wyznaczenie modułu estymaty widmowej gęstości mocy sygnału.

Etap 4: Przeprowadzenie filtracji melowej za pomocą zestawu środkowoprzepustowych filtrów trójkątnych o częstotliwościach wyznaczonych zgodnie z:

$$f_{mel} = 2595 \log_{10}\left(1 + \frac{f_{Hz}}{700}\right) \quad (2)$$

W obliczeniach używany jest logarytm energii, co pozwala na zredukowanie wrażliwości filtrów na bardzo głośne i bardzo ciche dźwięki oraz modelowanie nieliniowej amplitudowej wrażliwości ucha ludzkiego.

Etap 5: Ostatnim etapem procedury jest zastosowanie dyskretnej transformaty kosinusowej (DCT). Otrzymany wektor współczynników MFCC obliczony jest zgodnie z zależnością:

$$MFCC_n = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{i=1}^N \log(S_i) \cdot \cos\left[\frac{\pi n}{N}(i-0,5)\right] \quad (3)$$

$$S_i = \sum_{k=1}^N |X_r(k)|^2 H_i(k) \quad (4)$$

gdzie:

i - numer filtra,

X_r - widmo ramki,

H_i - zestaw filtrów

S_i - energia pasma

n - numer współczynnika,

N - ilość użytych filtrów.

W większości systemów rozpoznawania n przyjmuje wartości od 1, a współczynnik $MFCC_0$ jest pomijany. Wygenerowany wektor współczynników $MFCC_n$ przyjmuje postać:

$$MFCC_n = \langle MFCC_1, MFCC_2, MFCC_3, \dots, MFCC_{13} \rangle \quad (5)$$

W przedstawionym sposobie badań założono, że rozpoznane w ramach eksperymentu psychoakustycznego sygnały wzorcowe poddane zostaną parametryzacji celem wyznaczenia współczynników mel-cepstralnych. Zgodnie z procedurą (rys. 2) dla każdego badanego

sygnału fonicznego wyznaczone są współczynniki mel-cepstralne, które podlegać będą następnie ocenie przy wykorzystaniu sygnałów wzorcowych. Na podstawie wyznaczonych współczynników MFCC klasyfikacja badanego sygnału polega na ocenie stopnia zgodności jego cech z cechami sygnałów wzorcowych. W celu przeprowadzenia klasyfikacji badanych sygnałów fonicznych (na podstawie zbioru sygnałów wzorcowych) autor zaproponował jako miarę oceny najmniejszą odległość pomiędzy dwoma ciągami wektorów cech, tj. współczynników MFCC z zastosowaniem metody DTW (*ang. Dynamic Time Warping*). Sygnały emitowane przez źródła wibroakustyczne charakteryzuje dynamiczna zmienność w czasie, co powoduje, że cechy tych sygnałów podlegają także zmienności. Dynamiczne dopasowanie czasowe (DTW) należy do metod stosowanych w rozpoznawaniu mowy, w szczególności metoda ta znalazła przede wszystkim zastosowanie w rozpoznawaniu izolowanych słów oraz wyszukiwaniu haseł. Metodę tą wykorzystuje się w rozpoznawaniu i klasyfikacji macierzy cech współczynników MFCC jako nieliniową transformację czasową. Polega ona na transformacji osi czasu, w celu lepszego dopasowania dwóch sekwencji czasowych. Wyznaczenie odległości metodą dynamicznego dopasowania czasowego (DTW) polega na, tj.:

- obliczeniu tzw. macierzy odległości lokalnych $d(m,n)$, która powstaje poprzez obliczenie odległości euklidesowych pomiędzy każdym wektorem badanego sygnału i sygnału wzorca,
- wyznaczeniu sumy odległości lokalnych (euklidesowych), która stanowi odległość zakumulowaną wzdłuż ścieżki optymalnej przebiegającej w macierzy odległości lokalnych, od lewego dolnego rogu macierzy do jej prawego górnego rogu.

Poszczególne odległości DTW pomiędzy sygnałami wzorcowymi i sygnałem badanym wyznaczyć można zgodnie z następującą formułą:

$$d_{mn}(X,Y) = \sqrt{\sum_{k=1}^K (x_{k,m} - y_{k,n}) \cdot (x_{k,m} - y_{k,n})} \quad (6)$$

gdzie:

K - wymiar sygnałów,

m, n - ciągi wektorów cech X i Y .

Odległość zakumulowana obliczona wzdłuż ścieżki optymalnej jest najmniejszą z możliwych odległości zakumulowanych poszczególnych wektorów współczynników MFCC badanego sygnału i sygnału wzorca. Przyjęto, że kryterium klasyfikacji badanego sygnału w zakresie oceny dokuczliwości hałasowej stanowić będzie najmniejsza odległość DTW pomiędzy współczynnikami mel-cepstralnymi badanego sygnału i danym sygnałem wzorcowym o jednakowej długości czasowej.

3.2 Przykład zastosowania metody i klasyfikacja badanego sygnału fonicznego

Wybrany do badań sygnałem fonicznym była próbka dźwiękowa o nazwie DW13a_9_56 charakteryzująca się równoważnym poziomem dźwięku $L_{Aeq}=56$ [dB(A)]. Sygnał zarejestrowany został w punkcie przestrzeni zlokalizowanym na wysokości pasa drogowego i obejmował pomiar emisji źródeł hałasu drogowego przemieszczających się pojazdów po nawierzchni z kostki brukowej. Z uwagi na postawiony cel badań pomiar nie został przeprowadzony zgodnie z obowiązującą metodyką realizacji pomiarów środowiskowych [22]. Do nagrań i pomiarów wykorzystano następujący zestaw urządzeń oraz pomocy pomiarowych:

- miernik poziomu dźwięku Brüel & Kjær 2238 Mediator,
- mikrofon pomiarowy Brüel & Kjær 4188 do pomiarów pola swobodnego,

- rejestrator dźwięku ZOOM Handy Recorder H4n,
- statyw mikrofonowy.

Czas nagrań i pomiarów ustalony został na 5[min]. Podczas nagrywania i pomiarów mikrofon umieszczony był na statywie i w połowie szerokości chodnika, na wysokości 1,7[m], co odpowiadało przybliżonej wysokości położenia głowy potencjalnego przechodnia. Przyjęto, że w ocenie subiektywnej próbek dźwiękowych (w eksperymencie psychoakustycznym) udział będą brać osoby ze słuchem prawidłowym. Dla każdego 5-minutowego pliku wyselekcjonowano dziesięć plików 10-sekundowych. W przeprowadzonym eksperymencie wzięło udział 80 osób w wieku pomiędzy 22-50 lat spełniających ww. założenie. W realizowanych badaniach psychoakustycznych zaproponowano skalę punktową w zakresie od 1 do 5 dla oceny dokuczliwości hałasu drogowego prezentowanych 30 sygnałów fonicznych. Przynależąco odpowiednio etykiety ocenianym sygnałom, tj:

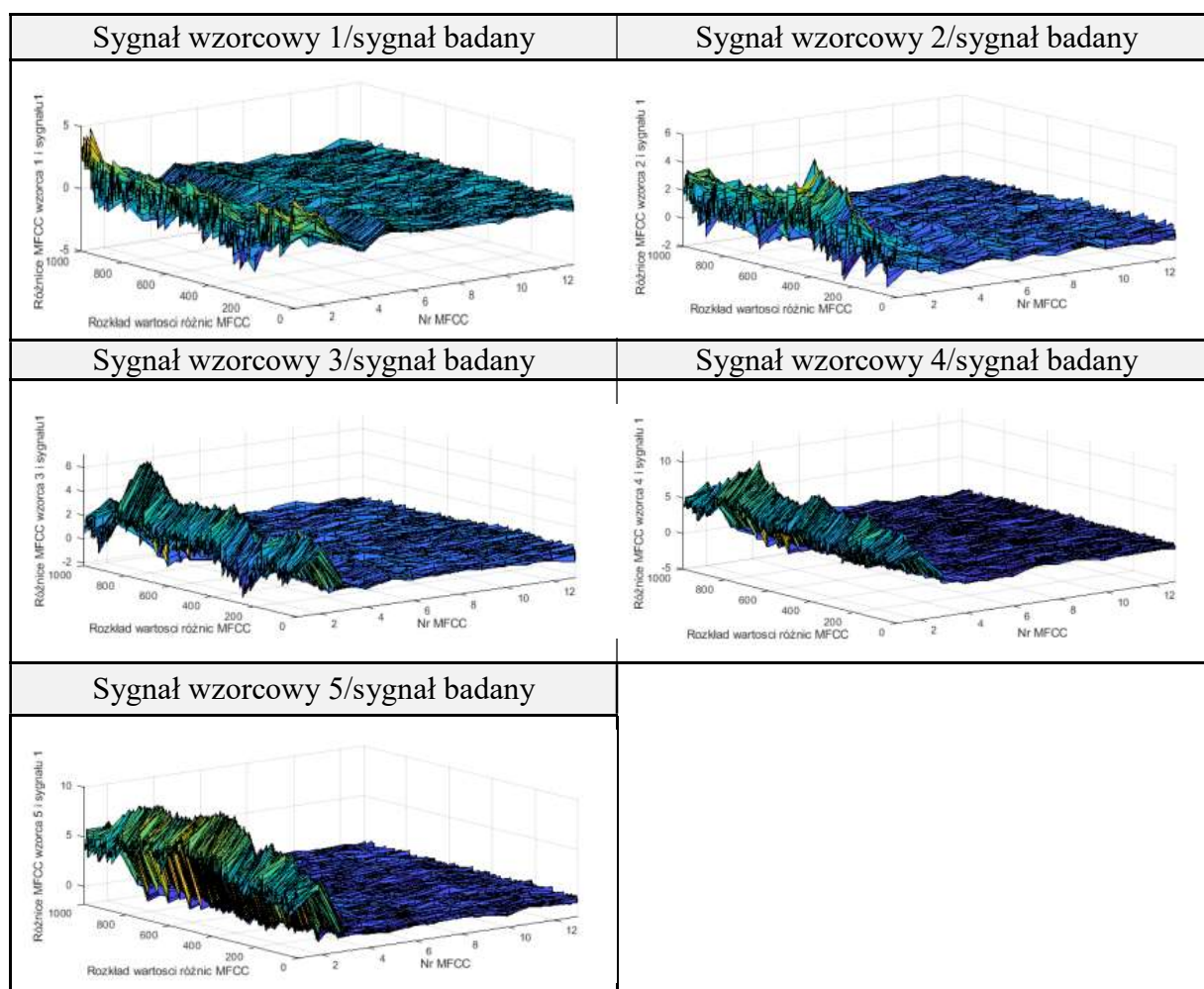
- wcale - ocena 1,
- mało - ocena 2,
- średnio - ocena 3,
- bardzo - ocena 4,
- nie do zniesienia ocena 5.

Biorąc pod uwagę rozpiętość uzyskanych wartości poziomu dźwięku odpowiadającym różnym lokalizacjom pomiarowych (charakteryzującym się zmienną zabudową, zmiennym układem infrastruktury drogowej) oraz różnym nawierzchniom jezdni (tj. bruk, asfalt) zdecydowano, że wyselekcjonowane próbki sygnałów przygotowane zostaną w taki sposób, aby ich poziom równoważny odpowiadał jednej z pięciu następujących wartości, tzn.: 56, 62, 68, 74, 80[dB(A)]. Danymi wejściowymi dla wyznaczenia wektora MFCC_n stanowiły foniczne sygnały wzorcowe w dziedzinie czasu, wybrane na podstawie eksperymentu psychoakustycznego i reprezentujące odpowiednie klasy dokuczliwości hałasowej. W wyniku realizacji procedury (rys. 2) obliczonych zostało 13 współczynników mel-cepstralnych dla każdego ze wzorcowych sygnałów i sygnału badanego. Obliczenia przeprowadzono w środowisku Matlab R2018a przy zastosowaniu funkcji (mfcc). Wartości odchylenia standardowego (σ) oraz średniej arytmetycznej (\bar{x}) wyznaczone zostały dla każdego ze współczynników dla 1000 danych (wartości obliczone zostały z krokiem 0,01[s]), (tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie wartości σ oraz \bar{x} współczynników mel-cepstralnych MFCC_n dla sygnałów wzorcowych

Nr współcz.	Sygnał wzorcowy 1		Sygnał wzorcowy 2		Sygnał wzorcowy 3		Sygnał wzorcowy 4		Sygnał wzorcowy 5	
	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}
MFCC ₁	1,25	-2,07	1,40	-2,08	1,16	-1,99	1,38	0,61	1,40	1,43
MFCC ₂	1,27	-18,01	1,81	-16,32	1,62	-14,21	2,01	-11,14	2,00	-10,60
MFCC ₃	0,35	3,26	0,31	3,20	0,35	3,11	0,43	3,27	0,43	2,79
MFCC ₄	0,25	-0,51	0,25	-0,65	0,24	-0,99	0,33	-0,75	0,61	0,13
MFCC ₅	0,23	0,38	0,23	0,30	0,20	-0,09	0,28	-0,30	0,36	0,03
MFCC ₆	0,20	0,06	0,22	0,03	0,20	-0,03	0,31	-0,07	0,32	0,03
MFCC ₇	0,18	0,28	0,18	0,29	0,18	0,16	0,24	0,24	0,29	0,26
MFCC ₈	0,20	0,11	0,19	0,08	0,18	-0,09	0,21	0,24	0,32	0,19
MFCC ₉	0,18	0,13	0,20	0,16	0,18	0,13	0,21	0,47	0,34	0,18
MFCC ₁₀	0,17	0,02	0,18	0,03	0,17	0,10	0,20	0,02	0,37	0,14
MFCC ₁₁	0,16	0,06	0,17	-0,03	0,18	0,06	0,20	0,18	0,39	0,04
MFCC ₁₂	0,17	0,02	0,18	-0,02	0,17	-0,01	0,27	-0,22	0,42	-0,02
MFCC ₁₃	0,16	0,03	0,17	-0,03	0,18	0,02	0,18	0,20	0,44	-0,01

Przeprowadzona analiza porównawcza wartości współczynników MFCC badanego sygnału z sygnałami wzorcowymi wykazała, że największe (lokalne) różnice względne pomiędzy współczynnikami MFCC wystąpiły dla przypadku zestawienia sygnału badanego z sygnałem wzorcowym 4 (rys. 3).



Rys. 3 Analiza porównawcza współczynników MFCC badanego sygnału z sygnałami wzorcowymi

Poszczególne odległości DTW pomiędzy sygnałami wzorcowymi i sygnałem badanym wyznaczone zostały za pomocą funkcji (dtw) w środowisku Matlab R2018a. Po podstawieniu do (6) wyznaczone zostały odległości DTW pomiędzy współczynnikami MFCC dla poszczególnych sygnałów wzorcowych i badanego sygnału fonicznego DW13a_9_56.

Tabela 2. Zestawienie odległości zakumulowanych DTW sygnału badanego z sygnałami wzorcowymi

Lp.	Rodzaj wariantu	Odległość zakumulowana DTW
1.	Sygnał wzorcowy 1 / sygnał badany	197,829
2.	Sygnał wzorcowy 2 / sygnał badany	249,447
3.	Sygnał wzorcowy 3 / sygnał badany	304,864
4.	Sygnał wzorcowy 4 / sygnał badany	496,279
5.	Sygnał wzorcowy 5 / sygnał badany	537,361

Z tabeli 2 wynika, że najmniejszą zakumulowaną odległość DTW uzyskano dla wariantu oceny badanego sygnału DW13a_9_56 z wzorcem 1, co oznacza, że sygnał badany zakwalifikowany został do klasy dokuczliwości hałasu: wcale.

4. Dyskusja wyników i wnioski

Otrzymane wyniki klasyfikacji badanego sygnału fonicznego na podstawie oceny jego cech tj. współczynników MFCC uzasadniają zastosowanie metody parametryzacji sygnału fonicznego w modelowaniu zjawisk wibroakustycznych maszyn/urządzeń, która pozwala uwzględnić efekty psychoakustyczne hałasu. Przedstawiony sposób może mieć bezpośrednie zastosowanie w zadaniach m.in. oceny źródeł dźwięku, kształtowania zdrowia pracowników, czy też opracowywania rozwiązań projektowo-konstrukcyjnych ochrony przed hałasem. Zaproponowana metoda parametryzacji sygnału fonicznego rozszerza i uzupełnia stosowane energetyczne podejście do modelowania zjawisk wibroakustycznych maszyn/urządzeń. Możliwości analizy cepstralnej opartej na charakterystyce ludzkiego słyszenia (skali Melowej) stanowiły dla autora ważny argument dla poszukiwania nowego sposobu badań modelowania zjawisk wibroakustycznych. Przedstawiony sposób pozwala na dokonanie klasyfikacji dowolnego sygnału fonicznego pod względem oceny hałasu w oparciu o Melową skalę słyszenia, dla zidentyfikowanego rodzaju źródła energii wibroakustycznej. Ważną zaletą stosowania metody parametryzacji sygnału fonicznego jest możliwość modelowania cepstrum, co pozwala na uwzględnienie percepcji hałasu i interpretację zawartych informacji w widmie sygnału fonicznego. Parametry wyznaczane w skali perceptualnej odzwierciedlają naturalne wrażenia słuchowe, co ma znaczenie dla psychoakustycznej oceny zjawisk wibroakustycznych. Opracowany sposób modelowania zjawisk wibroakustycznych opiera się na zastosowaniu oceny sygnału akustycznego/fonicznego przy wykorzystaniu metod tj.:

- metody skalowania sygnału fonicznego (subiektywna ocena wrażeń akustycznych w ramach eksperymentu psychoakustycznego),
- metody parametryzacji sygnału fonicznego (ocena cech sygnału w skali Melowej) stanowiącej obiektywny opis percypowanego hałasu.

Zakłada się, że podjęte w tym zakresie badania kontynuowane będą w obszarze stosowalności metod i modeli opisujących efekty psychoakustyczne hałasu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej oraz innej skali perceptualnej, np. skali Barkowej. Zaproponowany przez autora sposób modelowania zjawisk wibroakustycznych daje nowe możliwości w zakresie oceny maszyn/urządzeń na etapie:

- projektowania i konstruowania, jako dodatkowe kryterium w procesie optymalizacji cichobieżności pracy elementów,
- eksploatacji, w ramach badań diagnostycznych dla potrzeb weryfikacji stopnia zużycia poszczególnych elementów i podzespołów, a w efekcie oceny poziomu ich niezawodności.

Przetwarzane informacje w postaci pozyskanych cech z sygnału fonicznego stanowią wartość dodaną dla sygnału akustycznego i mogą być skutecznie wykorzystywane we wspomaganie podejmowania decyzji ww. zadań.

Acknowledgement: Artykuł jest wynikiem badań prowadzonych w Katedrze Inżynierii Produkcji Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej, które sfinansowane zostały ze środków Rektorskiego Grantu Habilitacyjnego o numerze 13/030/RGH19/0057.

Bibliografia

1. Batko W, Dąbrowski Z, Engel Z, Kiciński J, Weyna S. Nowoczesne badania procesów wibroakustycznych. Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji –PIB, 2005.
2. Cempel Cz. Wibroakustyka stosowana. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1989.
3. Danielewski K, Kosicka E, Mazurkiewicz D. Analysis of the correctness of determination of the effectiveness of maintenance service actions. *Management and production engineering review* 2018; 9(2): 20-25.
4. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities* – 18.07.2002.
5. Engel Z, Piechowicz J, Pleban D, Strychniewicz L. Minimalizacja przemysłowych zagrożeń wibroakustycznych. *Poradnik*. Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, 2005.
6. Engel Z, Zawieska Wiktor M. Hałas i drgania w procesach pracy. Źródła, ocena, zagrożenia. Warszawa: Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, 2010.
7. Gauchev T, Fakotakis N, Kokkinakis G. Comparative evaluation of various mfcc implementations on the speaker verification tasks. *Proc. of the SPECOM 2005*: 191-194.
8. Genuit K, Fiebig A. Psychoacoustics and its benefit for the soundscape approach. *Acta Acustica* 2006; 92: 1-7.
9. Gola A. Reliability analysis of reconfigurable manufacturing system structures using computer simulation methods. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2019; 21(1): 90-102.
10. Jasiulewicz-Kaczmarek M., Zywicka P.: The concept of maintenance sustainability performance assessment by integrating balanced scorecard with non-additive fuzzy integral. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*. 2018; 20(4): 650-661.
11. Kosicka E, Kozłowski E, Mazurkiewicz D. The use of stationary tests for analysis of monitored residual processes. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2015; 17(4): 604-609.
12. Licklider J.C.R. Correlates of the auditory stimulus. [w:] *Handbook of Experimental Psychology* (red. Stevens S.S.). New York: Wiley, 1966.
13. Loska A, Moczulski W, Wyczółkowski R, Dąbrowski A. Integrated system of control and management of exploitation of water supply system. *Diagnostyka* 2016; 17(1): 65-74.
14. Loska A. Methodology of variant assessment of exploitation policy using numerical taxonomy tools. *Management Systems in Production Engineering* 2015; 2(18): 98-104.
15. Makarewicz R. Dźwięk w środowisku. Poznań: Ośrodek Wydawnictw Naukowych, 1994.
16. Ozimek E, Kocinski J, Kutzner D. et al. Speech intelligibility for different spatial configurations target speech and competing noise source in a horizontal and median plane. *Speech communication*. 2013; (10): 1021-1032.
17. Paszkowski W. The assessment of acoustic effects of exploited road vehicles with the use of subjective features of sound. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2019; 21(3): 522–529.

18. Paszkowski W, Kotus J, Poremski T, Kostek B. Evaluation of sound quality features on environmental noise effects - a case study applied to road traffic noise. *Metrology and Measurement Systems* 2018; 25(3): 517-531.
19. Paszkowski W, Sobiech M. The modeling of the acoustic condition of urban environment using noise annoyance assessment. *Environmental Modeling & Assessment* 2019; 24: 319-330.
20. Raimbault M, Lavandier C, Berengier M. Ambient sound assessments in or urban environments: field studies in two French cities. *Applied Acoustics* 2003; 64: 1341–1256.
21. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, (Dz.U. z 8 października 2012, poz. 1109).
22. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, Dz.U.2014, poz. 1542.
23. Rudno-Rudzińska B. Modelowanie emisji i propagacji dźwięku do prognozowania klimatu akustycznego środowiska zurbanizowanego. *Prace naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Nr 75. Monografie nr 39. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1994.*
24. Schomer PD. Criteria for assessment of noise annoyance. *Noise Control Engineering Journal* 2005; 53(4): 132-144.
25. Zieliński T. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań.* Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2007.
26. Zieliński T.P, Korohoda P, Rumian R. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w telekomunikacji.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA, 2014.