

**Dr inż. Waldemar Paszkowski**

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

## **OCENA EFEKTÓW AKUSTYCZNYCH EKSPLOATOWANYCH POJAZDÓW DROGOWYCH Z WYKORZYSTANIEM SUBIEKTYWNYCH CECH DŹWIĘKU**

**Słowa kluczowe:** *efekt akustyczny, cechy dźwięku, pojazdy drogowe, modelowanie, wibroakustyka*

**Streszczenie:** W artykule zaproponowano oryginalny sposób oceny efektów akustycznych pojazdów drogowych w środowisku, z zastosowaniem wybranych metod modelowania i symulacji dźwięku. Podejmowane rozwiązanie przedstawia sposób oszacowania emisji akustycznej do środowiska od eksploatowanych pojazdów drogowych przy wykorzystaniu subiektywnych cech dźwięku. W realizowanych badaniach zakłada się analizę i ocenę cech dźwięku w układzie: źródło-droga propagacji-odbiornik. Rozkład tych cech w dziedzinie czasu i częstotliwości uzależniony jest od generowania, propagacji i immisji energii akustycznej przez źródła cząstkowe pojazdu. Otrzymana informacja w postaci sygnału akustycznego reprezentowana może być cechami fizycznymi i cechami subiektywnymi dźwięku. Podejmowane badania obejmują sposób wykorzystania subiektywnych cech dźwięku w ocenie efektów akustycznych eksploatowanych pojazdów drogowych w środowisku. Opracowany sposób zweryfikowany został za pomocą metod modelowania i symulacji na podstawie zarejestrowanych sygnałów akustycznych w środowisku zurbanizowanym.

### **1. Wprowadzenie**

Procesy wibroakustyczne należą do destrukcyjnych procesów resztkowych eksploatowanych obiektów technicznych [1]. W wielu przypadkach, zjawiska emisji/propagacji drgań i hałasu maszyn oraz urządzeń analizowane są łącznie. W zależności od postawionego celu badawczego i niezależnie od występującego rodzaju zjawisk sygnały wibroakustyczne wykorzystywane są szeroko w zadaniach diagnozowania, niezawodności i oceny stanu eksploatowanych obiektów technicznych. Stanowią one także istotną informację w ocenie oddziaływania obiektu technicznego na otoczenie. Skutkiem rozpoznania i oceny generowania energii wibroakustycznej do otoczenia jest często redukcja źródeł tej energii. W realizowanych zadaniach oddziaływania eksploatowanego obiektu technicznego na środowisko bazuje się na cechach fizycznych sygnału. Stosuje się w tym celu metody identyfikacji źródeł procesów wibroakustycznych, oceny stanu technicznego, analizy uszkodzeń poszczególnych elementów, bądź całego obiektu technicznego, np. metody natężeniowe, metody wzajemnościowe, transformacja falkowa [1, 3]. Jednakże, w metodach tych nie uwzględnia się subiektywnej oceny oddziaływania wibroakustycznego obiektu technicznego na otoczenie.

Procesy wibroakustyczne występujące podczas eksploatacji pojazdów drogowych stanowią wieloźródłowe oddziaływanie obiektu na środowisko. Efekty tego oddziaływania rozpatrywane mogą być w odniesieniu do źródeł oraz skutków wywołujących pewien stan

zagrożenia hałasem. Prowadzone w tym zakresie badania koncentrują się przede wszystkim na stosowaniu cech fizycznych. W ramach realizowanych w tym zakresie zadań stosuje się pomiary akustyczne, a także metody modelowania i symulacji dźwięku. Uzyskany w tym podejściu wynik oceny akustycznej reprezentowany jest za pomocą wskaźnika energetycznego w danym punkcie, bądź przestrzennego jego rozkładu w modelowanym środowisku [4, 20]. Wyniki podejmowanych badań w zakresie opracowania oceny hałasu drogowego w środowisku zewnętrznym wskazują wyraźnie, że wyrażenie tej oceny wskaźnikami hałasu jest ograniczone i niewystarczające. Stwierdza się, że istotny wpływ na subiektywną ocenę hałasu, ma m.in. struktura sygnału w czasie, czy też rozkład cech subiektywnych w dziedzinie czasu i częstotliwości [6, 19].

W artykule zaproponowany został sposób oceny efektów akustycznych pojazdów drogowych polegający na pozyskiwaniu informacji z fizycznej i subiektywnej reprezentacji dźwięku w środowisku.

## **2. Źródła emisji energii wibroakustycznej w eksploatacji pojazdów drogowych**

Prowadzone powszechnie badania procesów eksploatacyjnych obiektów technicznych ukierunkowane są najczęściej na ocenę samego obiektu, bądź związanego z nim otoczenia. Wykorzystuje się w tym celu zaawansowane metody, np. [7, 9, 12, 13, 14].

Eksploatowane środki transportu jako obiekty techniczne należą do złożonych źródeł emisji drgań i hałasu do środowiska. W podejmowanym problemie badawczym analiza i ocena cech sygnału dotyczy dalekiego pola akustycznego, w którym występuje z reguły znaczna odległość źródła energii wibroakustycznej od odbiorcy. Przy takim założeniu, do odbiorcy dociera energia akustyczna w postaci sygnału jako skutek emisji źródeł wibroakustycznych pojazdu oraz elementów przenoszących drgania pojazdu.

Główne źródła hałasu w pojazdach, które mają wpływ na jego emisję do środowiska, zostały zidentyfikowane na podstawie badań literaturowych [10]. Emisja tych źródeł w różnej liczbie i natężeniu wpływa istotnie na kształtowanie się klimatu akustycznego środowiska. Występujące procesy generacji i propagacji efektów akustycznych pojazdów drogowych należą do bardzo złożonych. Generacja efektów akustycznych zależy od wielu czynników, m.in.:

- natężenia ruchu drogowego,
- prędkości ruchu pojazdów,
- struktury ruchu drogowego (ilość pojazdów lekkich i ciężkich),
- rodzaju nawierzchni jezdni,
- temperatury jezdni,
- stanu jezdni (sucha lub mokra).

Z kolei, na propagację efektów akustycznych pojazdów drogowych wpływają czynniki:

- rodzaj powierzchni ziemi pomiędzy źródłem i punktem obserwacji,
- temperatura i wilgotność powietrza,
- rozkład temperatury nad powierzchnią ziemi
- występowanie przeszkód na drodze propagacji,
- geometria źródło-punkt obserwacji.

W procesie generacji efektów akustycznych przemieszczającego się pojazdu wyróżnia się źródła cząstkowe. Do głównych źródeł emisji hałasu z pojazdu do środowiska zaliczyć można: jednostkę napędową, obszar styku kół z nawierzchnią jezdni oraz nieregularności

opływu powietrza wokół samochodu [8]. W szczególności, efekty akustyczne pochodzące z układu napędowego wynikają z pracy następujących układów i podzespołów:

- silnika,
- skrzyni biegów,
- układu wydechowego,
- układu klimatyzacji.

Źródła efektów akustycznych wywołane wzajemnym oddziaływaniem kół samochodu i nawierzchni drogi zależą od:

- rodzaju nawierzchni jezdni,
- typu opon,
- uderzeń opon o nawierzchnię jezdni, jako efekt nieregularności nawierzchni.

Zaznaczyć należy, że przy prędkościach pojazdów osobowych większych od 40-50 km/h oraz prędkościach pojazdów ciężarowych większych od 60-70 km/h, główną składową całkowitego hałasu pojazdu jest hałas powstający na styku opona-nawierzchnia [5]. Wraz ze wzrostem prędkości ruchu zaczyna dominować hałas toczenia.

Efekty wibroakustyczne, wzbudzone przez karoserię pojazdu, zależą głównie od jakości materiałów, łączenia elementów, luzów (związanych z klasą pojazdu) oraz od czasu eksploatacji. Efekty te nasilają się podczas jazdy po nierównej powierzchni oraz jazdy z wysokimi prędkościami obrotowymi silnika. W niektórych przypadkach mogą wystąpić efekty wibroakustyczne również podczas postoju pojazdu, gdy silnik pracuje na biegu jałowym (drgania rezonansowe elementów).

Generowanie energii wibroakustycznej z silnika, układu przeniesienia napędu oraz układu jezdni przenoszona jest również przez karoserię pojazdu. Generalnie, docierające do odbiorcy efekty akustyczne są superpozycją tła akustycznego oraz hałasu od ruchu pojazdów, który obejmuje zjawiska powstające na styku opona-nawierzchnia, jak i w obrębie zespołu napędowego pojazdu. Poziom hałasu emitowanego przez poruszające się pojazdy w ruchu drogowym jest wypadkową hałasu silnika i układu wydechowego, hałasu aerodynamicznego i hałasu interakcji powierzchni opony/drogi. Analizując w tym układzie źródła hałasu, to hałas silnika i układu wydechowego zależy od rodzaju pojazdu i prędkości silnika. Z kolei hałas opony/drogi zależy od rodzaju opon, rodzaju nawierzchni oraz rodzaju pojazdu i jego prędkości jazdy. Wraz ze wzrostem prędkości jazdy zwiększa się udział hałasu na styku opona/droga w całkowitym poziomie emisji hałasu pojazdu i przy wysokich prędkościach jazdy może stać się dominujący.

W ramach zrealizowanego projektu SVEN zastosowano pomiary hałasu drogowego z użyciem „sztucznej głowy”. Wirtualna pozycja słuchacza została ustalona w odniesieniu do pojazdu (tj. bez funkcji transferu zależnych od lokalizacji i bez efektu Dopplera). Otrzymane wyniki symulacji wykazały, że hałas opon, szczególnie dźwięki "przedniego koła" i "tylnego koła" były dominujące. Wpływ rury wydechowej i wlotu jest znaczny przy niskich częstotliwościach, udział silnika był nieznaczny [21].

### **3. Przegląd badań nad oceną hałasu pojazdów drogowych w środowisku**

Na efekty akustyczne pochodzące z hałasu drogowego składają się hałas od źródeł cząstkowych pojazdów, zjawiska towarzyszące propagacji fal akustycznych oraz wiele innych czynników m.in.: geometria i przekrój poprzeczny drogi, parametry i warunki ruchu drogowego, prędkość pojazdów, charakterystyka nawierzchni drogowej, rodzaj i ukształtowanie otoczenia, warunki atmosferyczne.

### 3.1. Ocena fizycznych cech dźwięku

Dyrektywa [4] odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku wskazuje m.in. na pojęcie hałasu w środowisku, rozumianego jako niepożądane lub szkodliwe dźwięki wywołane działalnością człowieka na wolnym powietrzu, w tym hałas emitowany przez środki transportu, ruch drogowy, ruch kolejowy, ruch samolotowy i hałas pochodzący z działalności przemysłowej.

W ocenie hałasu stosuje się odpowiednio wskaźniki hałasu mające zastosowanie do prowadzenia długookresowej polityki w zakresie ochrony środowiska przed hałasem ( $L_{DWN}$ ,  $L_N$ ) oraz do ustalania i kontroli warunków korzystania ze środowiska w odniesieniu do jednej doby ( $L_{Aeq}$ ,  $L_{AeqN}$ ) [20]. W stosowanej ocenie i zarządzaniu hałasem w środowisku realizowane jest podejście fizyczne, zgodnie z obowiązującymi krajowymi regulacjami prawnymi [22]. W zależności od potrzeb, w ocenie hałasu zewnętrznego stosuje się klasyczne wskaźniki energetyczne (deskryptory), takie jak  $L_{Aeq}$  lub  $L_{DWN}$ . Wskaźniki te informują o całkowitym poziomie dźwięku, dając uśrednioną wartość oceny zdarzeń akustycznych, niezależnie od czasowej struktury sygnału akustycznego. Dodatkowo zaznaczyć należy, że obowiązujące wymagania w tym zakresie odnoszą się do stosowania wskaźników energetycznych tylko w dziedzinie czasu i pomijają wiele ważnych informacji dźwięku w dziedzinie częstotliwościowej. Poziom równoważny, zwany też ekwiwalentem jest najbardziej rozpowszechnionym wskaźnikiem oceny hałasu o zmiennym poziomie w czasie. Idea tego wskaźnika polega na określeniu poziomu średniego ciśnienia akustycznego (w rozpatrywanym czasie).

W badaniach środowiskowych hałasu stosuje się równoważne ciągle poziomy dźwięku  $L_{Aeq}$  i statystyczne jego poziomy  $L_{10}$ ,  $L_{50}$  i  $L_{90}$  emitowane przez ruch drogowy. Podejmuje się jednocześnie próby nad zastosowaniem modeli matematycznych w estymacji poziomu hałasu drogowego. Badania nad zastosowaniem modeli matematycznych uwzględniają funkcje przepływu pojazdów wraz z oszacowaniem pojazdów ciężkich [2]. W ramach przeprowadzonych badań, w zakresie fizycznej oceny efektów akustycznych pojazdów drogowych przemieszczających się po autostradzie zaproponowano poza miarą  $L_{Aeq}$  dodatkowo statystyczne miary poziomów dźwięku (quasi-maksymalne), tj.  $L_{10}$ ,  $L_{90}$ . Wyniki otrzymane z zaproponowanych modeli w obliczaniu poziomów  $L_{Aeq}$  i  $L_{10}$  były bardziej dokładne, niż wyniki otrzymane z modeli dla obliczania  $L_{90}$ . Należy zaznaczyć, że podczas pomiarów przepływu pojazdów nie były ciągle, co oznaczało, że wpływ innych źródeł hałasu był wyższy na  $L_{90}$ , niż na  $L_{10}$  i  $L_{Aeq}$  [2].

W przypadku hałasu drogowego występuje często zmienność zdarzeń akustycznych w czasie. Oznacza to, że informacje o cechach sygnału poszukiwać można w amplitudowo-częstotliwościowym widmie sygnału akustycznego [11].

### 3.2. Ocena subiektywnych cech dźwięku

Uwzględnienie percepcji dźwięku w problematyce oceny efektów akustycznych źródeł hałasu rozszerza istotnie sposób oceny, stosowany obecnie, na rzecz wrażeń słuchowych. Percepcja dźwięku w dziedzinie częstotliwości obejmuje wrażenia słyszenia tj. wysokość i barwę dźwięku. Barwa dźwięku związana jest w złożony sposób z różnymi parametrami fizycznymi i obejmuje ona cechy subiektywne oddzielnie percypowane, tj. ostrość dźwięku, chropowatość dźwięku, siłę fluktuacji, tonalność [23]. Wspólną cechą dźwięku, która wpływa w różnym stopniu na wymienione wyżej jest głośność.

Potwierdzone wyniki badań nad oceną wrażeń słyszenia człowieka w zakresie odbieranych dźwięków dowodzą, że największa czułość w tym zakresie występuje dla częstotliwości średnich 500-5000Hz (krzywe słyszenia). Ponadto, wyniki te wskazują istotnie

na występowanie częstotliwościowej zmienności wrażenia słyszenia dźwięków w obszarze słyszalności, w odniesieniu do wartości poziomu dźwięku [15]. Dla potrzeb subiektywnej oceny hałasu wykorzystuje się nieliniową zależność zmienności poziomu głośności w dziedzinie częstotliwości.

W odniesieniu do powyższego, uwzględnia się głośność jako podstawową cechę subiektywną dźwięku opisującą wrażenia słuchowe. Jest ona funkcją zmiennych bodźca akustycznego (tj. poziomu ciśnienia akustycznego, częstotliwości, szerokości pasma, struktury widmowej bodźca, czasu jego trwania itp.) oraz także zmiennych odbiorcy. Należy zaznaczyć, że głośność ma największy wpływ na dokuczliwość hałasu, spośród wszystkich cech subiektywnych dźwięku.

Niekorzystny wpływ efektów akustycznych eksploatowanych pojazdów drogowych w środowisku traktować można również w kategorii dokuczliwości hałasowej. W szczególności, dyrektywa [4] wprowadziła wspólne wskaźniki hałasu, tj. wskaźnik  $L_{DWN}$  dla oceny ogólnej dokuczliwości i  $L_N$  dla oceny zakłócenia snu.

W publikacji [19] zbadano, w jaki sposób zmieniająca się w czasie struktura ruchu drogowego wpływa na ocenę dokuczliwości hałasu. Uzyskano różne oceny stopnia dokuczliwości dla tego samego  $L_{Aeq}$ , co spowodowane było zróżnicowaną średnią percentyla głośności w sonach ( $N_{10}$  lub  $N_5$ ). Stwierdzono, że średnia głośność  $N$  lepiej koreluje z oceną dokuczliwości, niż wartość percentyla głośności  $N_5$ . W podejściu tym przyjęto, że różna dokuczliwość spowodowana jest różną głośnością ( $N_{10}$  lub  $N_5$ ), przy tym samym  $L_{Aeq}$ . Badaniu poddano cztery struktury hałasu ruchu, dla których sygnały akustyczne pochodzące z nagrań oceniane były przez respondentów w warunkach laboratoryjnych.

W ramach przeprowadzonych badań własnych [16] zadanie polegało na znalezieniu zależności między wskaźnikami hałasu i cechami subiektywnymi dźwięku dla potrzeb oceny dokuczliwości hałasu drogowego. Uzyskane wyniki wykazały, że występuje silna korelacja między głośnością, a  $L_{Aeq}$ . Jednak korelacja ta nie uwzględniała głośności statystycznej, tj.  $N_5$ ,  $N_{10}$  - jak sugeruje Zwicker. Uzyskane ponadto wyniki rozkładu cech subiektywnych dźwięku, wyrażone w skali bark mogą być przydatne w zadaniach oceny wrażeń wywołanych rodzajem nawierzchni drogi, zwłaszcza jeśli powierzchnia ta różni się fakturą. Zaobserwowano zmiany tonu dźwiękowego, które zauważalne były w rozkładzie chropowatości i ostrości dźwięku.

W innym ujęciu badań własnych, zaproponowano modelowanie oceny stanu zagrożenia hałasem drogowym przy wykorzystaniu informacji pochodzących z: rozkładów przestrzennych cech obiektów w środowisku, wskaźników hałasu oraz testów psychoakustycznych mieszkańców. Na podstawie uzyskanych wyników rozkładów przestrzennych cech obiektów,  $L_{Aeq}$  oraz uzyskanych informacji z testów psychoakustycznych, zastosowano metodę sieci neuronowej w modelowaniu oceny stanu zagrożenia hałasem [18].

Zaproponowana w [23] formuła jako psychoakustyczna dokuczliwość (PA) stanowi kombinację głośności ( $N_5$ ), siły fluktuacji (F) oraz chropowatości, w odniesieniu do ostrości (S).

$$PA = N_5(1 + \sqrt{w_s^2 + w_{FR}^2}) \quad (1)$$

dla  $S > 1.75$

$$w_s = (S - 1.75) \cdot 0.25 \lg(N_5 + 10) \quad (2)$$

$S \leq$  dla 1.75

$$w_s = (S - 1.75) \cdot 0.25 \lg(N_5 + 10) \quad (3)$$

$$w_{FR} = \frac{2.18}{N_5^{0.4}} (0.4F + 0.6R) \quad (4)$$

Zastosowanie modelu psychoakustycznej dokuczliwości (1), w ramach badań własnych, nie potwierdziło uzyskanych wyników z ocen dokuczliwości hałasu mieszkańców w warunkach laboratoryjnych. Wystąpiły rozbieżności pomiędzy wynikami zastosowania ww. modelu i otrzymanymi ocenami, w zróżnicowanych klasach wartości  $L_{eqA}$  odtwarzanych sygnałów akustycznych źródeł hałasu drogowego. Uzyskane wyniki oceny dokuczliwości hałasu posiadają poziom zadawalający, w wyniku zastosowania do tego zadania modelu sieci neuronowej [17].

#### 4. Sposób oceny efektów akustycznych pojazdów drogowych z wykorzystaniem subiektywnych cech dźwięku

Dynamiczny charakter oddziaływania źródeł hałasu pojazdu drogowego, subiektywny aspekt miejsca postrzegania dźwięków, jak i wielość czynników towarzyszących temu procesowi powodują, że mimo podejmowanych wielu prób w tym zakresie nie opracowano uniwersalnego modelu oceny uwzględniającego szerokie spektrum generowania efektów akustycznych. Stosowane, w tym zakresie, modele oceny nie uwzględniają współistnienia występowania wielu zmiennych (czynników) o charakterze fizycznym i subiektywnym oraz interakcji zachodzących pomiędzy nimi. W szczególności, złożoność procesów związanych z emisją i propagacją efektów akustycznych źródeł, aspekty psychofizyczne towarzyszące postrzeganiu dźwięku oraz występowanie czynników nieakustycznych istotnie komplikują opracowanie standaryzowanego modelu oceny.

Rozwijane od wielu lat badania nad holistycznym podejściem do oceny środowiska akustycznego dotyczą możliwości mapowania krajobrazów dźwiękowych (*ang. soundscape mapping*). Opierają się one na równoczesnym uwzględnieniu fizycznych i percepcyjnych aspektów źródeł dźwięku w środowisku. Rozszerzają one dotychczasowe podejście do mapowania hałasu, pozwalają na uwzględnienie kontekstu percepcji dźwięków terenów o różnym przeznaczeniu, np. rekreacyjne, mieszkalne, centra komercyjne. Dla potrzeb pozyskiwania od mieszkańców informacji na temat postrzegania różnych rodzajów dźwięków wykorzystywane są kwestionariusze ankiet w zakresie oceny dźwięków m.in. hałasu drogowego. W podejmowanych w tym zakresie próbach występuje brak standardowego sposobu oceny dokuczliwości hałasowej w mapach akustycznych, która uwzględniałaby bezpośredni związek parametrów cech fizycznych i psychoakustycznych dźwięku.

Wyniki podejmowanych badań nad oceną rozkładu cech subiektywnych dźwięku w dziedzinie częstotliwości w warunkach środowiska zewnętrznego wykazują zróżnicowaną i nieliniową zmienność, w funkcji odległości od źródła [6]. Ponadto, występuje brak znanej formuły matematycznej modelu opisującego kształtowanie się rozkładu zmienności tych cech w przestrzeni środowiska zewnętrznego.

W opracowanym przez autora sposobie oceny efektów akustycznych zakłada się łączne zastosowanie metod oceny dźwięku, tj.:

- fizycznej,
- subiektywnej.

Przyjęto, że fizyczna ocena efektów akustycznych przeprowadzona zostanie z zastosowaniem metod modelowania i symulacji dźwięku, w ramach stosowanych map akustycznych. W ramach subiektywnej oceny tych efektów, zaproponowano wyznaczenie

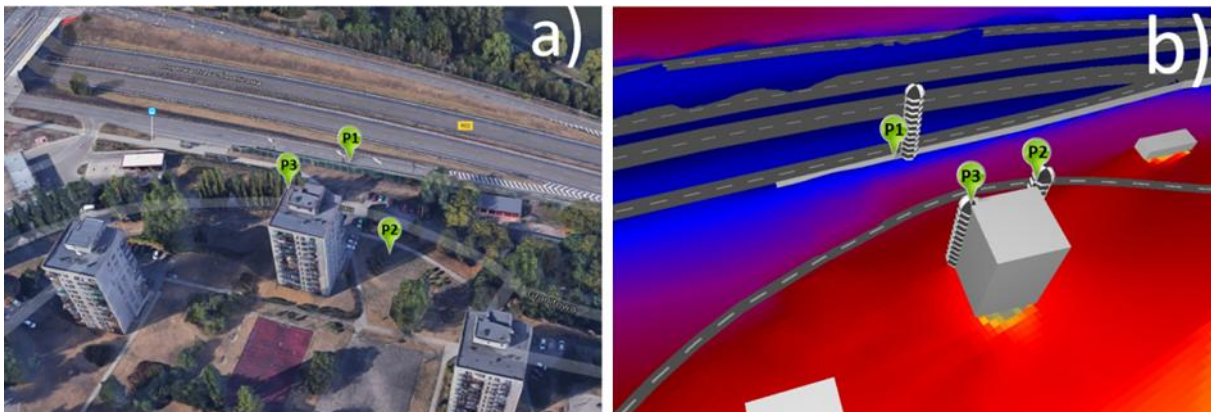
cech subiektywnych dźwięku dla rozdzielczości 1/2 barków z sygnału akustycznego za pomocą oprogramowania *Pulse Reflex 21.0.0.567*. Zaznaczyć należy, że cechy te odnoszą się do pasm krytycznych i uwzględniają występowanie zjawiska maskowania dźwięku. Opracowany sposób oceny zweryfikowany został badaniami akustycznymi w środowisku zagrożonym hałasem pojazdów drogowych.

#### 4.1. Modelowanie fizycznych cech dźwięku

W celu oceny efektów akustycznych pochodzących od źródeł drogowych dla wybranego obszaru zurbanizowanego przeprowadzona została symulacyjna analiza rozkładu wskaźnika oceny  $L_{Aeq}$ , z zastosowaniem map akustycznych. Na podstawie pozyskanych informacji ze środowiska odwzorowany został model terenu wraz z modelami obiektów. Dane wejściowe do symulacji stanowiły wartości zmierzonego natężenia pojazdów wraz z udziałem pojazdów ciężarowych, dla każdego pasa ruchu w czasie 1 godziny w porze dziennej. Pomiary akustyczne realizowane były równocześnie we wszystkich punktach pomiarowych m.in. w celu zapewnienia takich samych warunków struktury i natężenia ruchu pojazdów.

W symulacji poziomu dźwięku hałasu drogowego zastosowano metodę obliczeniową zalecaną w dyrektywie hałasowej [4] wg. standardu normy francuskiej XPS 31-133.

Równocześnie, dla potrzeb kalibracji modelu przeprowadzone zostały pomiary akustyczne  $L_{Aeq}$  miernikiem SVAN 971 w trzech reprezentatywnych punktach referencyjnych P1, P2, P3, odpowiadających miejscom pomiaru natężenia ruchu (rys. 1.).



Rys. 1. Ilustracje badanego obszaru: a) fotografia z punktami pomiarowymi, b) fragment mapy akustycznej rozkładu  $L_{Aeq}$  z punktami pomiarowymi

Punktem lokalizacji pomiarów odpowiadały pewne zmienne akustyczne, związane m.in. z:

- odległościami pomiędzy źródłem i punktami pomiarowymi,
- występowaniem w pobliżu punktów pomiarowych obiektów naturalnych i obiektów infrastruktury środowiska (tj. ekran akustyczny (P1), budynek mieszkalny (P3), zadrzewienia (P2), które stanowiły potencjalne powierzchnie generowania zjawisk falowych. Zaznaczyć należy, że punkt P2 był istotnie niżej położony, tj. ok. 1,5 [m] w stosunku do punktu P1, ze względu na naturalne ukształtowanie terenu.

Stosowane metody modelowania oraz symulacji rozkładu dźwięku w środowisku zewnętrznym pozwalają m.in. na ocenę hałasu pochodzącą z fal bezpośrednich i odbitych. W tym celu opracowano rozwiązania wariantowe, dla których przyjęto następujące założenia modelowania obiektów, tj.:

- Wariant 1 –modelom obiektów przypisano rzeczywiste wartości współczynników pochłaniania dźwięku,
- Wariant 2 – przypisano jednakową wartość współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha=1$  modelowanym obiektom,
- Wariant 3 - przypisano jednakową wartość współczynnika pochłaniania dźwięku  $\alpha=0$  modelowanym obiektom.

W (tab. 1) przedstawiono informacje dotyczące wyznaczonych punktów pomiarowych, w odniesieniu do przyjętych wariantów.

Tabela 1: Zestawienie informacji dotyczących punktów pomiarowych

Nr punktu	Wysokość położenia punktu nad podłożem/zmierzona wartość $L_{Aeq}$	Wariant 1 ( $L_{Aeq}$ )	Wariant 2 ( $L_{Aeq}$ )	Wariant 3 ( $L_{Aeq}$ )
P1	1,7 [m]	78,4[dB(A)]	78,2[dB(A)]	79,2[dB(A)]
	77,1[dB(A)]			
P2	1,7 [m]	61,7[dB(A)]	59,5[dB(A)]	68,5[dB(A)]
	58,4[dB(A)]			
P3	27 [m]	71,5[dB(A)]	71,4[dB(A)]	72,2[dB(A)]
	71,2[dB(A)]			

Na podstawie utworzonych wariantów uzyskano informacje w modelowanych punktach referencyjnych o rozdziale energii akustycznej na dźwięki bezpośrednie i podlegające odbiciom. Informacja o energii akustycznej dźwięków bezpośrednich daje możliwość oszacowania generowanych efektów akustycznych pochodzących od emisji źródeł drogowych. Z wartości przedstawionych w tab. 1 wynika, że:

- w przyjętych punktach referencyjnych wystąpiły nieznaczne różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi i symulowanymi,
- dla poszczególnych wariantów wystąpiły nieznaczne różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi i symulowanymi w punktach referencyjnych (P1) oraz (P3),
- dla wariantu 3, w punkcie referencyjnym (P2) wystąpiła istotna różnica wartości zmierzonych i symulowanych (tj. dla przyjęcia „idealnego” odbicia fal dźwiękowych od modelowanych powierzchni obiektów). Różnica ta może wynikać ze wzmocnienia odbić pochodzących od zamodelowanych powierzchni budynku.

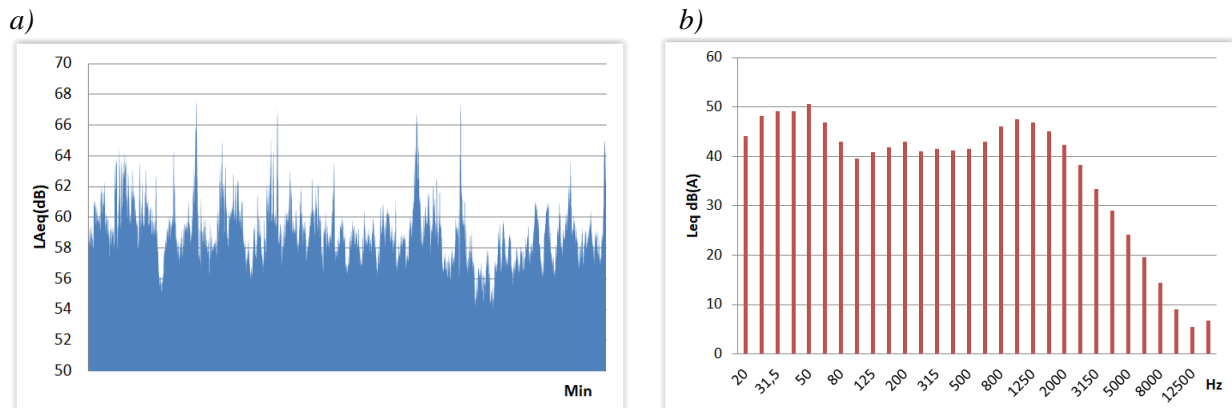
Zdaniem autora, duże zróżnicowanie pomiędzy zmierzonymi i symulowanymi (dla wariantu 3) wartościami  $L_{Aeq}$  w punkcie (P2) wynika przede wszystkim z lokalizacji tego punktu względem źródeł hałasu. Występujące w tym punkcie dla wariantu 1 nieznaczne przekroczenie wartości symulowanych w stosunku do zmierzonych mieści się w przedziale błędu dopuszczalnego, jaki może wystąpić w modelowaniu podobnych układów źródło-odbiornik.

#### 4.2. Analiza cech subiektywnych dźwięku

W badanych punktach (P1)-(P3) zarejestrowane zostały sygnały akustyczne audio (jednokanałowo) o czasie trwania 20 minut, poza pomiarem  $L_{Aeq}$ . Dla zarejestrowanych próbek przeprowadzono analizę czasową i częstotliwościową rozkładu wartości  $L_{Aeq}$ .



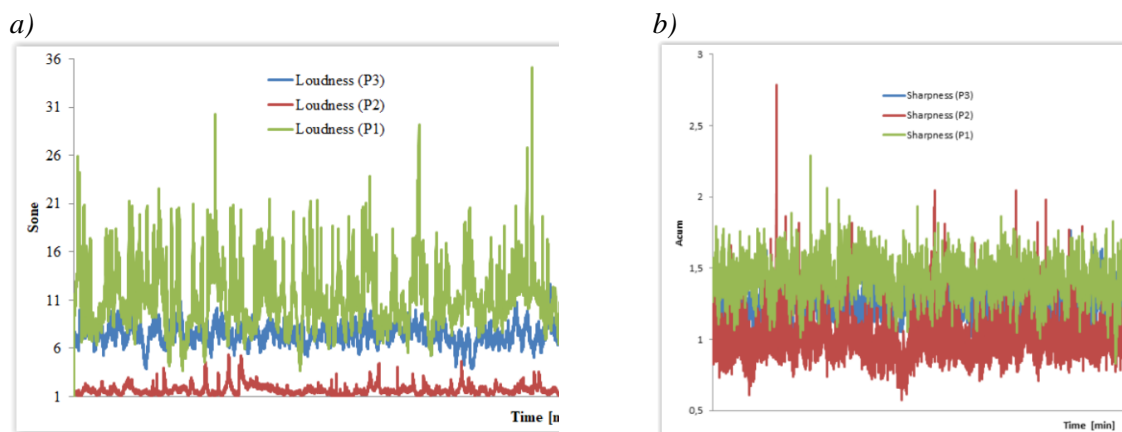
Przykładowy rozkład  $L_{Aeq}$  w punkcie (P3) przedstawiono na (rys. 2), odpowiednio dla dziedziny czasu i częstotliwości.



Rys. 2. Rozkład  $L_{Aeq}$  w punkcie P3: a) dziedzina czasu, b) dziedzina częstotliwości.

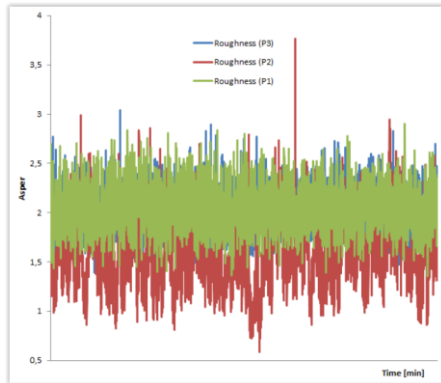
Analiza zarejestrowanych sygnałów akustycznych umożliwia ocenę przebiegu i rozkładu subiektywnych cech dźwięku w dziedzinach czasu oraz częstotliwości. Stosowanie filtru korekcyjnego (A) w rozkładzie widma  $L_{Aeq}$  pozwala ocenić fizyczne cechy sygnału akustycznego, z uwzględnieniem krzywych słyszenia. Zgodnie z tym, fizyczna ocena efektów akustycznych źródeł dźwięku uwzględnia wpływ zmienności częstotliwości związanych z aspektem percepcji dźwięków. Informacja o samym rozkładzie widma  $L_{Aeq}$  jest jednak niewystarczająca w takiej ocenie, nie uwzględnia ona cech wrażeń słuchowych.

Zakłada się, że zastosowanie subiektywnych cech dźwięku pozwoli, w przybliżony sposób, uwzględnić złożoność występowania efektów akustycznych. W ramach prowadzonych badań, wyznaczono cechy subiektywne dźwięku w badanych punktach w dziedzinie czasu i częstotliwości. Przykłady kształtowania się subiektywnych cech dźwięku w punktach (P1)-(P3) w dziedzinie czasu przedstawiono odpowiednio na rys. 3, rys.4.

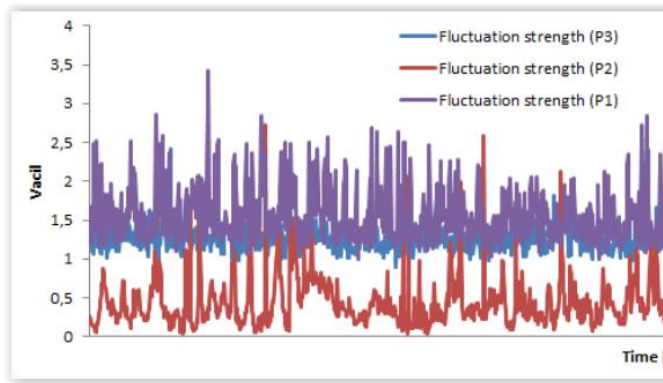


Rys. 3 Przebiegi głośności (a) oraz ostrości dźwięku (b) w czasie w badanych punktach

a)



b)

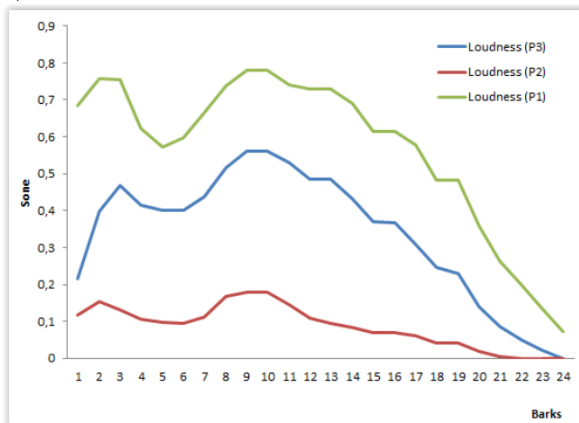


Rys. 4 Przebiegi chropowatości (a) oraz siły fluktuacji dźwięku (b) w czasie w badanych punktach

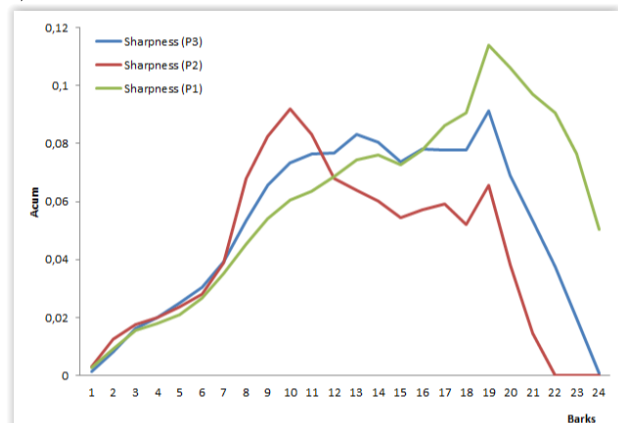
Z zestawienia wyników kształtowania się cech subiektywnych dźwięku w czasie wynika, że decydujący wpływ na rozkład głośności ma  $L_{Aeq}$ . Z rys. 3 oraz rys. 4 można wywnioskować, że kształtowanie się wartości subiektywnych cech dźwięku w punkcie (P1) było dominujące, w odniesieniu do pozostałych punktów pomiarowych. Wynika to przede wszystkim z najbliższego położenia tego punktu względem źródeł hałasu. Ponadto stwierdzić można, że dla krótkotrwałych odcinków czasowych otrzymane wartości niektórych cech subiektywnych dźwięku największe były w punkcie (P2).

Przeprowadzona analiza dla wyznaczonych cech subiektywnych dźwięku w dziedzinie częstotliwości odniesiona została do skali bark. Według Zwickera [23], szerokość pasma krytycznego może być określana za pomocą skali wyrażonej w barkach. Traktowana ona jest jako filtr słuchowy o takiej szerokości pasma częstotliwości, po przekroczeniu którego zmieniają się wyraźnie pewne cechy percepcyjne dźwięku [15].

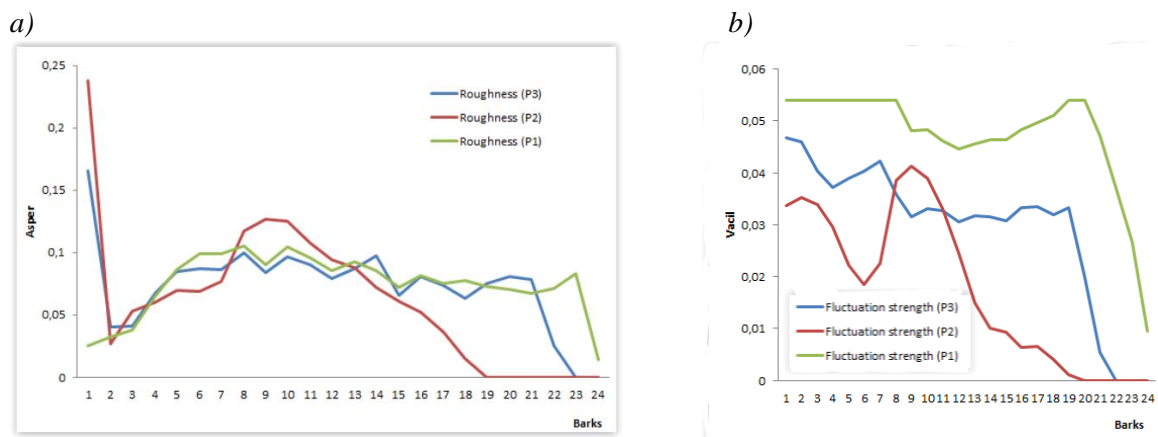
a)



b)



Rys. 5 Przebiegi głośności (a) oraz ostrości dźwięku (b) w częstotliwości w badanych punktach



Rys. 6 Przebiegi chropowatości oraz siły fluktuacji dźwięku w częstotliwości w badanych punktach

Otrzymane rozkłady cech subiektywnych dźwięku w dziedzinie częstotliwości (rys. 5, rys. 6) wskazują istotnie na występowanie zmienności w krytycznych pasmach częstotliwości. Jest to ważna informacja w ocenie efektów akustycznych dla percypowanego sygnału akustycznego. W przypadku analizy cech, tj.: ostrości, chropowatości i siły fluktuacji, zaobserwować można wzrost ich wartości w punkcie (P2), szczególnie dla percypowanego zakresu (8÷12 Bark), co odpowiada pasmom częstotliwości środkowych 840÷1600 Hz. Wzrosty wartości ww. cech w punkcie (P2) uzasadnić można prawdopodobnym wystąpieniem miejscowych zjawisk falowych.

## 5. Dyskusja wyników i wnioski

Podjęmowana w artykule tematyka badawcza stanowi istotne i oryginalne podejście do zadań oceny efektów akustycznych eksploatowanych pojazdów drogowych, rozumianej jako łączne fizyczne oraz subiektywne oddziaływanie źródeł hałasu w środowisku.

W artykule opisano i przedstawiono sposób oceny w środowisku zewnętrznym eksploatowanych pojazdów drogowych, tj. źródeł hałasu drogowego, ze szczególnym uwzględnieniem subiektywnych cech dźwięku. Stosowane w tym zakresie rozwiązania w postaci modeli ocen mają charakter cząstkowy, wieloaspektowa złożoność procesu percepcji sygnałów akustycznych oraz brak opracowanych standardów stanowią istotną trudność i ograniczenie badawcze.

Zgodnie z przyjętymi wytycznymi normowo-prawnymi i procedurami stosowana ocena hałasu w środowisku odnosi się wyłącznie do wskaźników energetycznych hałasu. Pomijane są w tej ocenie cechy subiektywne dźwięku i aspekty psychofizyczne towarzyszące procesom percepcji dźwięku.

W ramach podjętych badań przeprowadzono analizę pod kątem wykorzystania subiektywnych cech dźwięku do zaproponowanego sposobu oceny. Przeprowadzono w tym celu weryfikacyjne badania akustyczne w środowisku. Przygotowana została ocena efektów akustycznych w środowisku za pomocą cech dźwięku. W szczególności, ocena ta reprezentowana jest:

- fizycznie – wskaźnikami hałasu jako wartości skumulowanych odniesionych do dziedziny czasu, przy zastosowaniu technologii map akustycznych,
- subiektywnie – cechami subiektywnymi dźwięku w dziedzinie czasu oraz częstotliwości.

Metody symulacji fizycznych cech dźwięku z wykorzystaniem map akustycznych pozwalają ocenę efektów akustycznych źródeł hałasu drogowego w środowisku zewnętrznym za pomocą wskaźników energetycznych, przy uwzględnieniu możliwości modelowania parametrów związanych z cechami obiektów (np. współczynników pochłaniania dźwięku). W ramach przeprowadzonej oceny fizycznej przeprowadzono symulację uśrednionych wartości wskaźnika  $L_{Aeq}$  dla zamodelowanego obszaru z uwzględnieniem rozdziału energii fal akustycznych na dźwięki bezpośrednie i podlegające odbiciom. Analiza energetyczna rozdziału symulowanych fal akustycznych pozwoliła oszacować udział dźwięków bezpośrednich emisji źródeł z uwzględnieniem obiektów środowiska. Wykorzystanie subiektywnych cech dźwięku rozszerza istotnie stosowane dotychczasowe podejście do problemu oceny efektów akustycznych eksploatowanych pojazdów drogowych w środowisku.

Powiązanie przestrzennego rozkładu fizycznych oraz subiektywnych cech dźwięku w dziedzinie czasu i częstotliwości, z zastosowaniem technologii map akustycznych uważa się uzasadnionym kierunkiem dalszych badań nad oceną oddziaływania pojazdów drogowych w środowisku. W tym celu niezbędne będzie w pierwszej kolejności opracowanie matematycznego modelu reprezentacji rozkładu przestrzennego cech subiektywnych dźwięku. Szczegółowa analiza i ocena rozkładu cech dźwięku sygnału akustycznego pozwala na wnioskowanie o przyczynie generowania efektów akustycznych, np. wpływu stanu/rodzaju nawierzchni, czy też dominującego źródła hałasu pojazdu, przy uwzględnieniu występowania obiektów środowiska.

W dalszych badaniach zakłada się zastosowanie zaawansowanych metod przetwarzania sygnału akustycznego (np. spektrogramu, analizy falkowej) dla potrzeb oceny zmienności rozkładu poszczególnych cech dźwięku w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Docelowo, opracowanie matematycznego modelu reprezentacji przestrzennej dźwięku w środowisku z wykorzystaniem technologii map akustycznych uzasadnia kontynuację badań nad problemem oceny dokuczliwości hałasu.

### **Acknowledgement:**

Artykuł jest wynikiem badań prowadzonych w Instytucie Inżynierii Produkcji Wydziału Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej, w ramach pracy statutowej zatytułowanej: „Kształtowanie inteligentnych metod produkcji, środowisk pracy oraz życia w kontekście wyzwań inżynierii produkcji (symbol 13 / 030BK\_18 / 0039)

### **Bibliografia**

1. Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S. Nowoczesne badania procesów wibroakustycznych. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2005.
2. Calixto A., Pulsides A., Zannin P.H.T. Evaluation of transportation noise in urbanised areas a case study. Archives of Acoustics 33, 2, 185-199 (2008).
3. Dąbrowski Z. Jednoczesna analiza hałasu i drgań maszyn w zadaniu cichobieżności i diagnostyce wibroakustycznej. Monografia: Aktualności inżynierii akustycznej i biomedycznej pod red. D. Mleczko i A. Ozga, Kraków 2016.
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. Gardziejczyk W. Wpływ technologii wykonania i tekstury nawierzchni drogowych na hałas pojazdów samochodowych. Politechnika Białostocka. Rozprawy naukowe Nr 121. Białystok, 2005.
6. Genuit K, Fiebig A. Psychoacoustics and its Benefit for the Soundscape Approach, *Acta Acustica*, 2006; Vol. 92 p. 1-7.
7. Gola A. Reliability analysis of reconfigurable manufacturing system structures using computer simulation methods, *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 21(1), 2019, pp. 90-102, doi: <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2019.1.11>.
8. Gołębiowski R. Prognozowanie hałasu samochodowego. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im A. Mickiewicza w Poznaniu. Seria akustyka nr 18. Poznań 2014.
9. Jasiulewicz-Kaczmarek M., Żywica 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
10. Kaczmarska-Kozłowska A., Mikulski W., Pleban D., Kozłowski E., Radosz J. Zagrożenie hałasem niskoczęstotliwościowym kierowców środków transportu drogowego, CIOP, Warszawa 2010.
11. Kłaczyński M., Wszolek T., Batko W. Rozpoznawanie wybranych źródeł hałasu komunikacyjnego w monitoringu klimatu akustycznego. 58 Otwarte Seminarium z Akustyki, Gdańsk-Jurata 2011; str. 347-352.
12. 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, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.4.17>.
13. Loska A. Scenario modeling exploitation decision-making process in technical network systems. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19 (2): 268–278, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.2.15>.
14. Loska A., Paszkowski W. SmartMaintenance - The Concept of Supporting the Exploitation Decision-Making Process in the Selected Technical Network System. In: Burduk A., Mazurkiewicz D. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance – ISPEM 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, vol 637, pp. 64-73. Springer, Cham, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3_7)
15. Ozimek E. Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychoakustyczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Poznań 2002.
16. 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; vol.25, no 3, 517-531. DOI: 10.24425/123901.
17. Paszkowski W., Loska A. The Use of Neural Network Model in the Assessment of Annoyance of the Industrial Noise Sources. In: Burduk A., Mazurkiewicz D. (eds) *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance – ISPEM. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017; vol 637, pp. 428-439. Springer, Cham, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64465-3_41).
18. Paszkowski, W. Sobiech. The modeling of the acoustic condition of urban environment using noise annoyance assessment. *Environmental Modeling & Assessment*, 2018; pp. 1-12 <https://doi.org/10.1007/s10666-018-9643-1>
19. Preis A., Kaczmarek T. Annoyance of time-varying Road-traffic noise. *Archives of acoustics*, 2010; 35, 3, 383-393.

20. 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)
21. Sottek R., Krebber W. and Genuit K.: Simulation of vehicle exterior noise. Inter-noise 2001 (CD
22. Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001r. Prawo Ochrony Środowiska, Dz.U.2017 poz. 519.
23. Zwicker E., Fastl H., Psychoacoustics: Facts and Models, Springer Berlin Heidelberg; Auflage, 2007; 3rd ed.