

Waldemar PASZKOWSKI  
Politechnika Śląska  
Wydział Organizacji i Zarządzania,  
waldemar.paszkowski@polsl.pl

## WYKORZYSTANIE OCENY JAKOŚCI AKUSTYCZNEJ W ZARZĄDZANIU PROJEKTEM REDUKCJI HAŁASU DROGOWEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono nowe podejście do zadań oceny i redukcji hałasu w środowisku zurbanizowanym zagrożonym źródłami hałasu drogowego. Zaproponowano włączenie do stosowanej obecnie ilościowej oceny zagrożenia hałasem w środowisku zurbanizowanym model jakości akustycznej. W szczególności, model ten uwzględnia subiektywne miary jakości dźwięku tj.: głośność, ostrość, chropowatość i siłę fluktuacji oraz ocenę dokuczliwości hałasu uzyskaną w warunkach laboratoryjnych. Zaproponowany sposób może być zastosowany w oszacowaniu inwestycyjnym ekranu akustycznego, na etapie jego projektowania.

**Słowa kluczowe:** zarządzanie hałasem, redukcja hałasu, jakość akustyczna, ekran akustyczny, tereny zurbanizowane

## THE USE OF ACOUSTIC QUALITY ASSESSMENT IN THE MANAGEMENT OF THE ROAD NOISE REDUCTION PROJECT

**Abstract.** The article presents a new approach to the tasks of noise assessment and reduction in the urbanized environment of endangered road noise sources. It has been proposed to include the acoustic quality model into the quantitative noise assessment currently applied in the urbanized environment. In particular, this model takes into account subjective measures of sound quality, ie: loudness, sharpness, roughness and fluctuation strength and noise annoyance assessment obtained in laboratory conditions. The proposed way can be used in the investment evaluation of the acoustic barrier at the design stage.

**Keywords:** noise management, noise reduction, acoustic quality, acoustic barrier, urban areas

## 1. Wprowadzenie

W obszarze zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym mamy do czynienia z zadaniami kształtowania klimatu akustycznego. Efekt realizacji tych zadań sprowadza się często do wdrożenia rozwiązań ograniczających lub minimalizujących hałas, na podstawie jego oceny ilościowej. W zależności od potrzeb, zadania te ukierunkowane mogą być bezpośrednio na redukcję hałasu tj. emisji hałasu źródeł, transmisji energii akustycznej na drodze jej przenoszenia, immisji na określone obszary środowiska. Uwzględniając powyższe, podstawą wyboru rozwiązania redukującego hałas dla potrzeb kształtowania klimatu akustycznego jest ocena stanu jego zagrożenia. Zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi [12] powszechnie stosuje się ilościową ocenę stanu zagrożenia wywołaną oddziaływaniem źródeł hałasu.

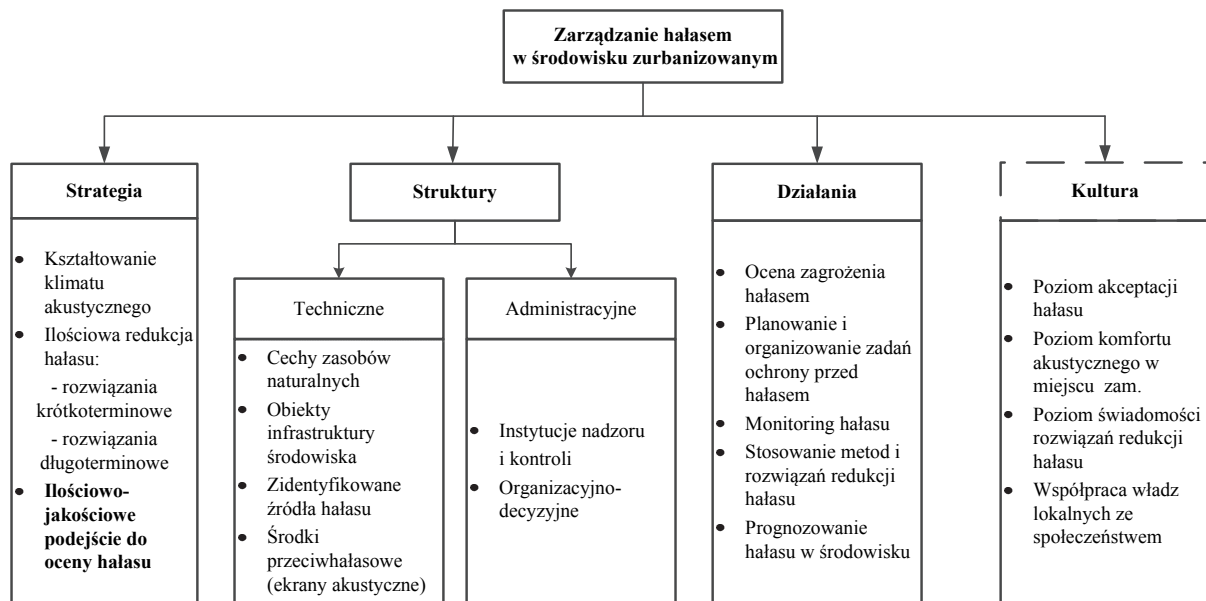
Specyfika procesu postrzegania hałasu ma charakter subiektywny co powoduje, że ocena dokuczliwości hałasu jest inna dla każdego odbiorcy. Uwzględniając powyższe, zdaniem autora referatu ilościowa ocena zagrożenia hałasem w środowisku jest niewystarczająca i pomija aspekty oceny subiektywnej.

Celem podjętych badań jest przedstawienie ilościowo-jakościowego podejścia do oceny zagrożenia hałasem w środowisku zurbanizowanym ze szczególnym uwzględnieniem włączenia aspektów jakości akustycznej w proces projektowania ekranu akustycznego.

Artykuł jest wynikiem badań realizowanych w Instytucie Inżynierii Produkcji na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej w ramach pracy statutowej pt. „Środki i sposoby doskonalenia produktów i usług na wybranych przykładach” oznaczonej symbolem 13/030/BK\_17/0027.

## 2. Elementy zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym

W problematyce zarządzania hałasem, poza technicznym obszarem tego procesu, uwzględnić należy wiele „nietechnicznych” aspektów mieszczących się w obszarach: strategii, struktur, działań, jak i kultury (rys. 1). W ogólnym podejściu zarządzania hałasem środowiskowym istotne znaczenie mają zasoby w obszarze struktur. W zależności od przyjętej strategii wykorzystuje się właściwe zasoby dla podejmowania decyzji. Przedstawiony model (rys.1) zakłada zaangażowanie poszczególnych składników struktur technicznych i administracyjnych w realizację określonego zadania. W szczególności, dla przedstawionych składników struktur obejmujących zadanie zarządzania hałasem wyróżnić można podsystemy: organizacyjne, informacyjne, decyzyjne [9].



Rys. 1. Model obszarów i elementów zarządzania hałasem w środowisku  
Źródło: own study based on [7].

Za kluczowy obszar w zadaniach zarządzania hałasem w środowisku uznać należy strategię, polegającą na zdefiniowaniu zbioru wytycznych, ograniczeń i kryteriów. W stosowanym dotychczas podejściu rozróżnia się strategię zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym bazującą na ilościowej ocenie hałasu, poprzez:

- stosowanie rozwiązań o charakterze prawnym oraz planistycznym związanych z ograniczeniami sposobu zagospodarowania i przeznaczenia terenów,
- wdrażanie rozwiązań redukcji hałasu o charakterze organizacyjnym, technicznym, bądź organizacyjno-technicznym.

W pierwszym przypadku strategia ma wymiar kompleksowy i stanowi jeden z czterech obszarów zarządzania hałasem, które uzupełniają się wzajemnie. Drugie podejście, w odniesieniu do pierwszego związane jest z pewnymi ograniczeniami, m.in. funkcjonalnymi, przestrzennymi, ekonomicznymi i ma bardziej wymiar lokalny. Możliwe rozwiązania w zastosowaniu redukcji hałasu, poza wymienionymi wyżej ograniczeniami, stanowią najczęściej redukcję hałasu na drodze jego propagacji w układzie: źródło-droga propagacji-odbiornik. Prowadzone badania nad subiektywnym znaczeniem oceny hałasu wskazują na uwzględnienie jakościowych miar dźwięku [5,10]. Uzyskane wyniki badań własnych w tym obszarze [8] uzasadniają potrzebę opracowania modelu ilościowo-jakościowego oceny hałasu. Istotnym problemem do rozwiązania pozostaje znalezienie relacji pomiędzy ilościową i jakościową oceną hałasu. Uwzględniając powyższe, model taki stanowić może nowe podejście do strategii zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym. Podejście to obejmuje wrażenia akustyczne występujące w postrzeganiu hałasu. Założyć można, że ilościowo-jakościowa ocena hałasu skutkować będzie w konsekwencji przyjęciem innych niż dotychczas rozwiązań w zarządzaniu hałasem środowiskowym. Mogą być to w niektórych

przypadkach rozwiązania ograniczające się tylko do kształtowania środowiskowych wrażeń akustycznych na drodze propagacji (np. maskowanie źródeł hałasu), w innych przypadkach, proponowany sposób uwzględniać może rozwiązania redukcji bezpośrednio w miejscach emisji dźwięku.

### 3. Wybrane aspekty postrzegania dźwięku w środowisku

Badania podejmowane w zakresie jakościowego podejścia do oceny środowiska zagrożonego hałasem wskazują na m.in. na znaczenie miar jakości dźwięku wyrażające subiektywne wrażenia odbioru sygnałów akustycznych [5]. Analizę zjawisk dźwiękowych rozpatrywać można w trzech wymiarach, jako [1]:

- sygnał fizyczny (mierzalny ilościowo),
- rzeczywisty dźwięk (słuchany i interpretowany przez percepcję),
- reprezentowany dźwięk (w odniesieniu do kontekstów kulturowych i zbiorowych).

Zgodnie z Hellstromem [6] słuchanie dźwięków opisać można poprzez:

- „słuchanie środowiska” - dotyczące jakości akustycznej danej przestrzeni. Kryteria jakości dotyczą analitycznego opisu zawartości dźwięku środowiska. W tym ujęciu uwzględnia się relacje dotyczące zarówno emisji, jak i odbioru dźwięku,
- „słuchanie miejsca” - dotyczące komfortu akustycznego. Dźwięki pochodzenia naturalnego powiązane są ze strukturą danego miejsca oraz interakcją aktywności osób,
- „słuchanie krajobrazu” - dotyczące postrzegania jakości dźwięku. Dźwięk wywołuje estetyczną i emocjonalną odpowiedź.

Na podstawie powyższego, podejmowanie decyzji w środowisku następować może poprzez [13]:

- diagnozę środowiska mającą przede wszystkim na celu wdrożenie rozwiązań lub środków ochrony przed hałasem dla zmierzonych parametrów dźwiękowych w środowisku,
- zarządzanie środowiskiem, charakteryzujące się działaniami ofensywnymi i mające na celu konsolidację miejsca z dźwiękiem dla danego obszaru miejskiego. Do działania tego zaliczyć można też zadania informowania mieszkańców o komforcie akustycznym i zarządzanie miejscami konfliktów akustycznych,
- projektowanie krajobrazu dźwiękowego jako nowa perspektywa mająca charakter kulturowy i estetyczny, polegająca na zastosowaniu niezbędnych działań ukierunkowanych na stymulowanie świadomości przestrzeni akustycznej i jej rozwijanie nagranyymi dźwiękami miejskimi, co niewątpliwie wzbogaca jakość dźwięku.

Brown [3] określa krajobraz dźwiękowy jako sposób postrzegania środowiska akustycznego i rozumianego przez jednostkę, grupę lub społeczeństwo. Określa on ogólnie zbiór postrzeganych dźwięków pochodzenia naturalnego i antropogenicznego, związanych

zawsze z kontekstem czasu, miejsca i aktywności. Badania nad krajobrazem dźwiękowym często odnoszą się do środowiska akustycznego, w którym efekt oddziaływania dźwięków pozytywnie wpływa na samopoczucie, zdrowie lub podejmowaną aktywność.

Podejmowane prace w tym zakresie skupiają się przede wszystkim na występowaniu preferowanych dźwięków [2]. Przedstawiona w niniejszym artykule tematyka dotyczy zagadnienia jakości akustycznej terenów zurbanizowanych zagrożonych źródłami hałasu. Proponowane pojęcie jakości akustycznej rozumiane jest jako postrzegane zakłócenie środowiska wywołane działaniem źródeł hałasu pochodzenia antropogenicznego. Przyjmuje się, że ocena jakości akustycznej powiązana będzie z czasem, miejscem przebywania i podejmowanym rodzajem aktywności osób zagrożonych ww. źródłami hałasu. W takim rozumieniu, ocena jakości akustycznej terenów zurbanizowanych wyrażona może być miarą/stopniem jej obniżenia. Pojęcie to jest odmienne do znaczenia krajobrazu dźwiękowego i stanowić może nowe podejście w strategii zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym.

#### **4. Modelowanie jakości akustycznej terenów zurbanizowanych**

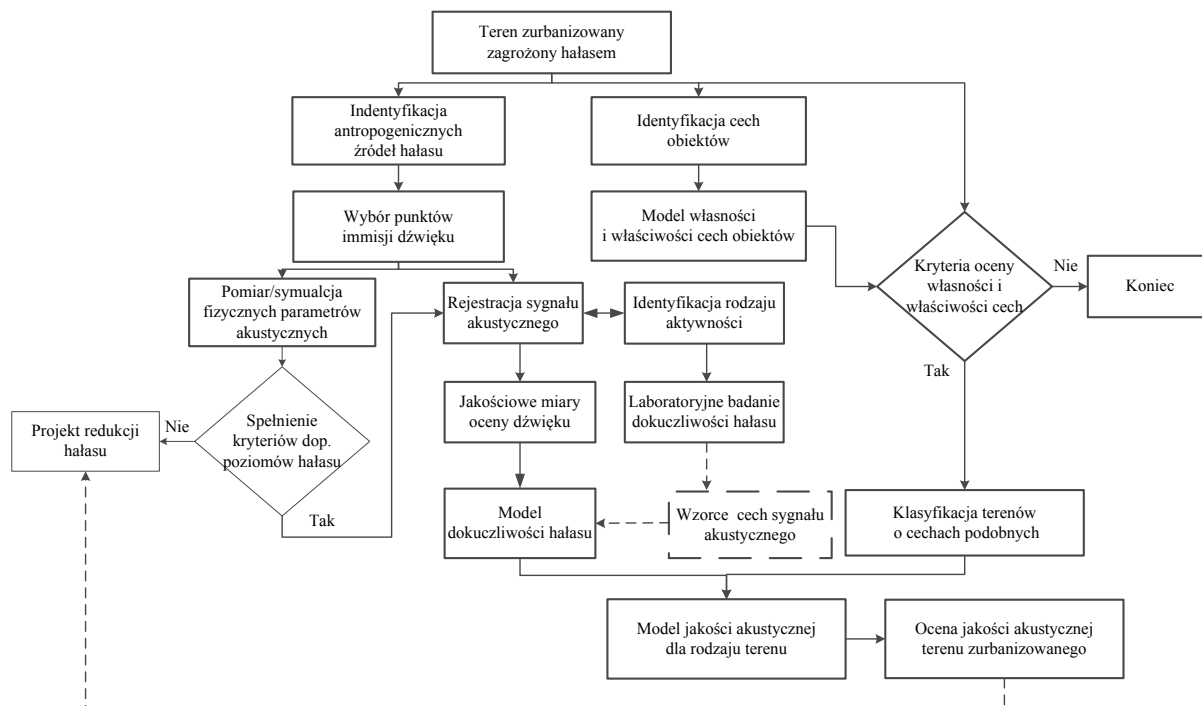
W podjętych badaniach własnych założono, że ocena jakości akustycznej terenów zurbanizowanych zagrożonych hałasem wyznaczona zostanie za pomocą opracowanego modelu (rys. 2). Przyjęto, że informacjami wejściowymi do modelu będą:

- punkty immisji dźwięku,
- zidentyfikowane cechy obiektów: odwzorowania terenu, budynków i infrastruktury,
- zapis sygnałów akustycznych w ustalonych punktach immisji dźwięku.

Założono, że model jakości akustycznej badanego terenu złożony będzie z:

- modelu własności i właściwości cech obiektów,
- modelu dokuczliwości hałasu wykorzystującego psychofizyczne miary dźwięku oraz wyniki badań dokuczliwości hałasu uzyskane w warunkach laboratoryjnych.

W modelowaniu własności i właściwości cech obiektów oraz klasyfikacji terenów o cechach podobnych wykorzystana będzie technologia GIS tworzenia map akustycznych.



Rys. 2. Schemat modelowania jakości akustycznej terenu zurbanizowanego  
 Źródło: Opracowanie własne.

Ostateczna postać modelu jakości akustycznej terenu wymagać będzie powiązania dokuczliwości hałasu wraz z oceną cech obiektów podobnych.

## 5. Propozycja zastosowania jakości akustycznej w projektowaniu ekranów akustycznych

Zgodnie z obowiązującą dyrektywą [4] w stosowanej strategii redukcji hałasu środowiskowego wykorzystuje się ilościowe podejście w ocenie zagrożenia hałasem. Działania w tym zakresie sprowadzają się najczęściej do obniżenia ponadnormatywnego hałasu do wartości dopuszczalnej, w zależności od rodzaju źródła, pory doby i rodzaju terenu. W tym celu, do prowadzenia długookresowej polityki w zakresie ochrony przed hałasem stosuje się dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku wyrażone wskaźnikami  $L_{DWN}$ ,  $L_N$ , odpowiednio dla pory dzień-wieczorowo-nocnej i nocnej [12]. Obecnie, dobór właściwego rozwiązania redukcji hałasu dla dłuższej perspektywy czasu uzależnia się od określenia poziomu przekroczenia dopuszczalnych długookresowych poziomów hałasu na podstawie pomiarów akustycznych, bądź symulacji poziomu dźwięku.

Zaproponowane ilościowo-jakościowe podejście do oceny hałasu w środowisku zurbanizowanym w strategii zarządzania hałasem (rys. 1) oraz w modelowaniu jakości akustycznej (rys. 2) wprowadza nowe ujęcie problemu redukcji hałasu. Ujęcie to zmienia dotychczasowy sposób postępowania i wprowadza ocenę jakości akustycznej. Włączenie do

oceny jakości akustycznej psychofizycznych aspektów dźwięku prowadzi do zorientowania zdań redukcji hałasu na ocenę wrażeń percepcji dźwięku przy oszacowaniu poziomu dźwięku.

Typowym i dość powszechnie stosowanym środkiem redukcji hałasu drogowego jest ekran akustyczny. Ekran akustyczny (obiekty nienaturalne) stanowią najczęściej ciąg obiektów sztucznych usytuowanych wzdłuż tras komunikacyjnych i z tego powodu traktowane są jako inwestycje wpisane w krajobraz środowiska. Zadania projektowania ekranów akustycznych realizowane są na podstawie wymagań i oceny w obszarach:

- akustycznych: ocena geometrii układu (źródło-ekran-obszernator), efektywność akustyczna, izolacyjność akustyczna, wskaźnik pochłaniania;
- technicznych: cechy konstrukcyjne (geometryczne, materiałowe), przezroczystość ekranu, estetyka;
- ekonomicznych: koszty inwestycyjne (m.in.: ekspertyza i dokumentacja, zakup materiału i produkcja, montaż), koszty eksploatacyjne (m.in.: uzupełnianie ubytków materiałowych, usuwanie skutków wandalizmu, odśnieżanie);
- eksploatacyjnych: odporność na warunki atmosferyczne (korozja, promieniowanie UV), czyszczenie i konserwacja, odporność na łatwopalność.

Zastosowanie oceny jakości akustycznej w projektowaniu ekranu akustycznego skutkuje pozyskaniem dodatkowych informacji związanych z percepcją oraz wrażeniami immisji dźwięku, które *de facto* poszerzają dotychczasowy sposób postępowania. Wybór właściwego rozwiązania projektowego poprzedzone powinno być analizą wariantów, z uwzględnieniem wielkości kształtowania się miar jakości dźwięku.

Jedną z możliwości przeprowadzenia analizy wariantowej oszacowania inwestycji ekranu akustycznego może być wykorzystanie wskaźnika DGC (ang. *Dynamic Generation Cost*), tj. dynamicznego kosztu jednostkowego. Wskaźnik ten pozwala ocenić techniczny koszt uzyskania pożądanego efektu i jest równy cenie, która pozwala na otrzymanie zdyskontowanych przychodów równych zdyskontowanym kosztom, przez co przedsięwzięcie staje się rentowne. Ocena kosztu technicznego uzyskania jednostki miary rezultatu w tym przypadku odniesiona może być do uzyskanego efektu ekologicznego. W proponowanym podejściu jakościowy efekt ekologiczny odnieść można do osoby lub grupy osób i wyrażony może być m.in. poprzez miary jakości dźwięku, bądź ocenę dokuczliwości hałasu, w relacji do kosztu jednostkowego [11]:

$$DGC = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{KI_t + KE_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{EE_t}{(1+i)^t}} \quad (1)$$

gdzie:

$KI_t$  – koszty inwestycyjne poniesione w danym roku,

$KE_t$  – koszty eksploatacyjne poniesione w danym roku,

$i$  – stopa dyskontowa,

$t$  – rok ponoszonych kosztów w latach działania instalacji,

$EE_t$  – miara efektu ekologicznego uzyskiwanego w poszczególnych latach (efekt ekologiczny) przy założeniu, że cena jest stała w całym okresie analizy.

Kluczowe dla wskaźnika  $DGC$  jest wyznaczenie miary  $EE_t$ . Zgodnie z proponowanym podejściem projektowania ekranu akustycznego zakłada się, że elementami miary  $EE_t$  będą:

- wskaźniki długookresowe poziomu dźwięku  $L_{DWN}$ ,  $L_N$  wyznaczone w badanych punktach przed oraz po zastosowaniu ekranu akustycznego,
- miary jakości dźwięku: głośność, chropowatość, ostrość, siła fluktuacji odniesione do  $L_{Aeq}$ , tj. równoważnego poziomu dźwięku przed zastosowaniem ekranu,
- ocena dokuczliwości hałasu wyznaczona w badaniach laboratoryjnych dla poziomów dźwięku przed zastosowaniem ekranu.

Wyznaczenie miary  $EE_t$  wymaga opracowania dodatkowej formuły uwzględniającej wymienione wyżej elementy wraz z przyporządkowaniem udziału ceny każdemu elementowi. W celu wykorzystania różnych miar rezultatu do wyboru projektu ekranu akustycznego autor proponuje zastosowanie wielokryterialnej analizy syntetycznej ceny różnych rezultatów  $DGC$ , tj.:

$$DGC = \sum_{i=0}^n DGC_{Si} \cdot w_i \quad (2)$$

gdzie:

$DGC$  – syntetyczna cena każdego z rezultatów wariantu projektu,

$DGC_{Si}$  – re-skalowana cena  $i$ -tego rezultatu,

$w_i$  – waga  $i$ -tego rezultatu.

Przy czym  $DGC_{Si}$ :

$$DGC_{Si} = \frac{DGC_i - \min(DGC_i)}{\max(DGC_i) - \min(DGC_i)} \quad (3)$$

$DGC_{Si}$  – wartość re-skalowanej ceny  $i$ -tego rezultatu,

$DGC_i$  – wartość początkowa re-skalowanej ceny  $i$ -tego rezultatu,

$\min(DGC_i)$  – wartość minimalna dla wszystkich  $i$ -tych cen rezultatu,

$\max(DGC_i)$  – wartość maksymalna dla wszystkich  $i$ -tych cen rezultatu.



Uwzględniając (2), (3) ostateczna postać wskaźnika *DGC* może być wyznaczona na podstawie (1).

## 6. Wnioski

Na podstawie przedstawionego modelu obszarów i elementów zarządzania hałasem w środowisku zaproponowano nowe - jakościowe podejście do strategii zarządzania hałasem w środowisku zurbanizowanym. Przedstawiony model jakości akustycznej terenów zurbanizowanych uwzględnia ocenę dokuczliwości hałasu oraz ocenę cech obiektów podobnych w środowisku. W oparciu o zaproponowany model przedstawiona została propozycja procesu projektowania ekranu akustycznego. Wskazano, że dla potrzeb oszacowania inwestycyjnego ekranu akustycznego zastosowany może być wskaźnik *DGC* uwzględniający model jakości akustycznej.

Zdaniem autora niniejszego opracowania, uwzględnienie prognozowanej miary efektu ekologicznego na etapie projektowania ekranu akustycznego służyć będzie podnoszeniu efektywności rozwiązań inwestycyjnych w zarządzaniu hałasem w środowisku zurbanizowanym.

Zaprezentowany w artykule systemowy sposób jakościowego podejścia do oceny hałasu i w konsekwencji efektywnego zarządzania hałasem w środowisku wymaga podejmowania zintegrowanych oraz skoordynowanych zadań w obszarach: akustycznym, technicznym, społecznym, organizacyjnym i ekonomicznym.

## Bibliografia

1. Augoyard J.F.: Les pratiques d'habiter a travers les phenomenes sonore – contribution a une critique de l'habitat. Ecole Speciale d'Architecture, Paris 1978.
2. Brown A.L.: Soundscapes and soundscape planning. Conference proceedings ICSV18, Rio de Janeiro 2011, p. 1-14.
3. Brown A.L., Jian Jang, Truis Gjestland: Towards standardization in soundscape preference assessment, [in:] Applied Acoustics, Volume 72, Issue 6, 2011, p.387-392.
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 L 189, 2002, p. 12-26.
5. Fastl H., Zwicker E.: Psychoacoustics, Facts and Models. Springer Verlag, Berlin 2007.

6. Hellstrom B.: Noise design – architectural modeling and the aesthetics of urban acoustic space. Doctoral Dissertation, School of Architecture, Royal Institute of Technology KTH, Goteborg 2003.
7. Kaźmierczak J.: Eksploatacja systemów technicznych. Politechnika Śląska, Gliwice 2000.
8. Paszkowski W.: Ocena zagrożenia źródłami hałasu na terenach specjalnych stref ekonomicznych i przemysłowych, [w:] Milewska E. (red.): Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji. Inżynieria Systemów Technicznych z. 2 (14), Gliwice 2016, s. 270-275.
9. Kaźmierczak J. (red.): Poradnik dla pracowników samorządowych uczestniczących w tworzeniu i użytkowaniu strategicznych map akustycznych. GIG, Katowice 2008.
10. Preis A., Kaczmarek T.: Annoyance of time-varying road-traffic noise. Archives of acoustics, 35, 3, 2010, p. 383-393.
11. Rączka J.: Analiza efektywności kosztowej w oparciu o wskaźnik dynamicznego kosztu jednostkowego. Transform Advice Program, Investment in environmental infrastructure in Poland, Warszawa 2002, s. 3-9.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2012 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku, Dz. U., poz. 1109, Warszawa 2012.
13. Vogiatzis K., Remy N.: From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe. Science of the Total Environment, vol. 482-483, 2014, p. 420-431.