

## OCENA POPRAWNOŚCI METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W BADANIACH HAŁASU KOLEJOWEGO

### 14.1 WPROWADZENIE

Hałas kolejowy jest jednym z czynników, który we współczesnym świecie stanowi zagrożenie dla zdrowia fizycznego i psychicznego człowieka. Nie jest on tak wszechobecny jak hałas drogowy, natomiast w pewnych ograniczonych rejonach obszarów zabudowanych stanowi dominujące i najbardziej uciążliwe źródło hałasu. Problem analizy wpływu hałasu komunikacyjnego, a co za tym idzie również kolejowego, wiąże się ściśle z zagadnieniem tworzenia i eksploatacji strategicznych map akustycznych. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z roku 2002 [3] obliguje Państwa członkowskie UE do sporządzania strategicznych map hałasu a następnie do ich aktualizacji, co 5 lat. Rekomendacja Unii Europejskiej dotyczy również metod obliczeniowych, jakie należy stosować w procesie tworzenia strategicznej mapy hałasu. W przypadku hałasu komunikacyjnego (szynowego) Dyrektywa zaleca stosowanie holenderskiej krajowej metody obliczania poziomów dźwięku pochodzących od pojazdów szynowych, opublikowanej w „Rekenen Meetvoorschrift Railverkeerslawaai “96. Ministerie Volkshuisvesting. Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 listopad 1996” [7] umownie nazywaną metodą RMR/SRM2. W metodzie o wielkości emisji hałasu przez pojazdy szynowe decyduje szereg czynników:

- charakteryzujących strukturę ruchu (ilość pojazdów przejeżdżających danym odcinkiem torów, rodzaje i długość pociągów lub tramwajów, prędkości pojazdów);
- opisujących rodzaj torowiska i podbudowy torowiska.

Na podstawie powyższych czynników wyznaczany jest poziom mocy akustycznej linii kolejowej, która to wartość wykorzystywana jest w procesie symulacyjnej analizy propagacji dźwięku od źródła dźwięku do odbiornika. Szczegółowe informacje o metodzie MRM/SRM2 zawarto w [1].

Przedstawione badania są kontynuacją badań opisanych w [5], których celem była ocena zgodności wartości pomiarowych i symulacyjnych w przypadku hałasu drogowego i tramwajowego. Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule jest zestawienie ze sobą wyników pomiarów dokonanych metodą bezpośrednią z wynikami symulacji przeprowadzonych wybranymi metodami obliczeniowymi z wykorzystaniem programu CadnaA® firmy DataKustik w przypadku hałasu kolejowego.

## 14.2 HAŁAS KOLEJOWY

Pod pojęciem hałasu kolejowego rozumie się hałas powstający w wyniku eksploatacji linii kolejowych. Hałas ten jest niejednorodny. Lokalnie mogą wystąpić niekorzystne zmiany ze względu na stan infrastruktury (torowiska), prędkości przejazdu, rodzaju taboru kolejowego, stanu taboru kolejowego, położenia torowiska (nasyp, wąwóz, teren płaski).

Mimo postępującej reorganizacji kolejnictwa (zmniejszanie się liczby pociągów, wymiana taboru na nowszy) w pobliżu przelotowych tras torowych poziom hałasu osiąga w niektórych przypadkach wartości chwilowe powyżej 100 dB, a przewidywany wzrost prędkości ruchu pociągów może ten proces pogłębić.



**Rys. 14.1** Przyczyny powstawania dźwięków w trakcie ruchu pojazdu szynowego

Źródło: [2]

Pomiary wpływu hałasu kolejowego na środowisko, stanowią niewielką część badań hałasu drogowego i przemysłowego. Wielkość i zasięg oddziaływania hałasu kolejowego w zasadniczy sposób zależy od:

- częstotliwości kursowania pociągów (zarówno osobowych jak i towarowych),
- prędkości trakcyjnej,
- składu taboru kolejowego,
- technicznego przygotowania torowiska,
- topografii terenu wraz z lokalną strukturą zabudowy.

Zjawisko generowania hałasu przez ruch pojazdów szynowych jest zagadnieniem niezwykle złożonym, ponieważ hałas ten jest emitowany przez wiele jednostkowych źródeł. Ruch pociągu jest przyczyną drgań zarówno szyny i całego toru, jak i wagonów, a w szczególności powierzchni bocznych kół. Drgania te są źródłem hałasu, który nosi nazwę hałasu toczenia. Jest on tym większy im większe zużycie faliste toru. Przy ruchu

pociągów z prędkością mniejszą niż 200 km/h ten rodzaj hałasu jest dominujący. Przy wyższych prędkościach (powyżej 200 km/h) dominującym staje się hałas aerodynamiczny. Jego emisja jest związana z nieregularnym opływem powietrza podczas ruchu pociągu. Strumień powietrza ulega zaburzeniu, co prowadzi do generowania hałasu (rys. 14.1).

Kolejnym rodzajem hałasu generowanego poprzez poruszające się pociągi jest hałas powstający w skutek ruszania i zatrzymywania się pociągów. Ma on jednak mniejszy wpływ na klimat akustyczny w sąsiedztwie linii kolejowych od dwóch pierwszych przypadków. Dodatkowo w szczególnych przypadkach (np. w czasie postoju pociągu) źródłem hałasu mogą być również silniki napędowe elektryczne lub spalinowe. Na poziom hałasu generowanego przez pojazdy szynowe ma również wpływ stan techniczny taboru i torowisk. Samo zastosowanie połączeń bezстыkowych szyn kolejowych również może znacznie ograniczyć emisję hałasu.

Metody pomiaru równoważnego poziomu dźwięku pochodzącego od ruchu pojazdów szynowych zostały określone w rozporządzeniu [6] Ministra Środowiska z 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów w środowisku substancji lub energii przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem, portem. Rozporządzenie to określa wymagania w zakresie wykonywania pomiarów w środowisku, do których są obowiązani m.in. zarządzający liniami kolejowymi. Okresowe pomiary hałasu w środowisku można wykonywać za pomocą czterech metod referencyjnych:

- metoda ciągłej rejestracji hałasu wprowadzanego do środowiska w związku z eksploatacją dróg publicznych w czasie odniesienia  $t$ ;
- metoda pomiarów poziomów ekspozycyjnych dźwięku w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń akustycznych;
- metoda pomiaru poziomów hałasu wprowadzanego do środowiska w związku z eksploatacją dróg publicznych z wykorzystaniem próbkowania,
- metody oparte o modele rozprzestrzeniania się dźwięku w środowisku.

Do pomiarów hałasu w sąsiedztwie linii kolejowych można, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska [6], stosować metodę pomiarów poziomów ekspozycyjnych dźwięku w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń akustycznych. Zastosowanie procedury obliczeniowej wymaga weryfikacji modelu obliczeniowego za pomocą pomiarów, wraz z jej udokumentowaniem. Weryfikacja pomiarowa polega na porównaniu wyników obliczeń poziomów dźwięku z wynikami pomiarów wykonanych w tych samych warunkach dotyczących parametrów źródła i rozprzestrzeniania się dźwięku. Warunkiem koniecznym równoważności metod pomiarowych i obliczeniowych jest zgodność ze wzorem:

$$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_{zm,i} - L_{obl,i})^2} \leq 2,5 \text{ [dB]} \quad (14.1)$$

gdzie:  $L_{zm,i}$  — zmierzona wartość wskaźnika hałasu, w decybelach [dB];  
 $L_{obl,i}$  — obliczona wartość wskaźnika hałasu, w decybelach [dB];  
 $n$  — liczba pomiarów porównawczych.

### 14.3 OCENA POPRAWNOŚCI METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W BADANIACH HAŁASU KOLEJOWEGO

Celem przedstawionych badań było określenie poprawności wyników uzyskanych w wyniku badań symulacyjnych pola akustycznego generowanego przez źródła kolejowe. W tym celu przeprowadzono bezpośrednie pomiary akustyczne w punktach pomiarowych w pobliżu wybranej linii kolejowej a następnie przeprowadzono symulację komputerową rozchodzenia się dźwięku od badanej linii kolejowej z wykorzystaniem programu komputerowego CadnaA. Ostatnim etapem badań było porównanie wyników pomiarów i symulacji komputerowej.

#### 14.3.1 Miejsce realizacji badań

Na miejsce pomiarów wybrano odcinek trasy kolejowej Chałupki – Katowice, na terenie gminy i miasta Czerwionka – Leszczyny w województwie Śląskim (rys. 14.2). Wybrany odcinek torowiska otoczony jest polami oraz łąkami, co powoduje, że przeprowadzone pomiary nie były zakłócone czynnikami zewnętrznymi.



Rys. 14.2 Widok na miejsce przeprowadzania pomiarów

Źródło: [4]

#### 14.3.2 Realizacja pomiarów

Pomiary wykonywane były w ciągu trzech kolejnych bezwietrznych i słonecznych dni, po osiem godzin:

- 1 dzień – od godz. 6:00 – 14:00,
- 2 dzień – od godz. 14:00 – 22:00,
- 3 dzień – od godz. 22:00 – 6:00.

Przy wyborze miejsca kierowano się również jego oddaleniem od stacji kolejowych, przez co przejeżdżające pociągi poruszały się ze stałą prędkością. W miejscu pomiaru szyny kolejowe ułożono na betonowych podkładach i podsypce kamiennej (rys. 14.3).



Rys. 14.3 Widok torowiska

Źródło: opracowanie własne

W ciągu trzech dni pomiarowych, po wybranym odcinku trasy Chałupki – Katowice przejechały trzydzieści dwa pociągi osobowe oraz siedem pociągów towarowych o różnych porach doby. Pomiaru dokonano zgodnie z metodą bezpośrednią ciągłych pomiarów w ograniczonym czasie. Do pomiarów wykorzystano dwa mierniki SVAN 945A firmy Svantek, ustawionych na statywach na wysokości 1,5 m od w odległościach (rys. 14.4):

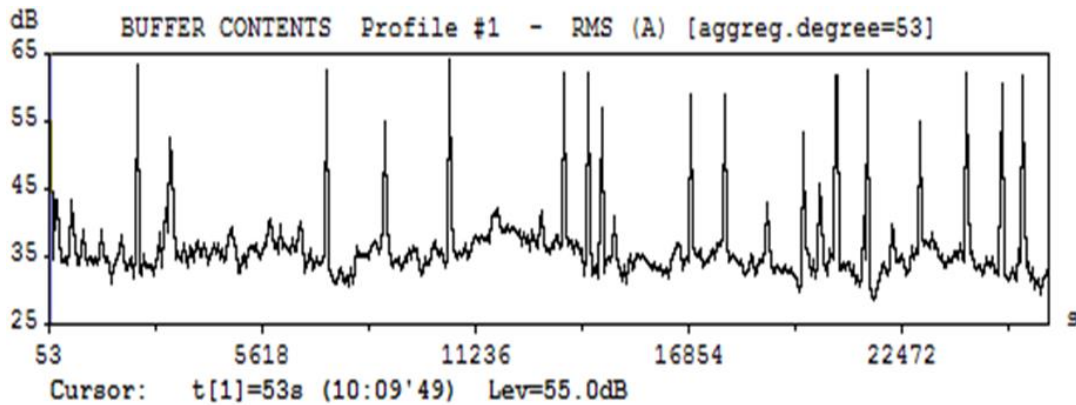
- miernik 1 – 20 m od linii torowiska,
- miernik 2 – 100 m od linii torowiska.



Rys. 14.4 Położenie miernika 1 i 2

Źródło: opracowanie własne

W czasie realizacji pomiaru pola akustycznego z wykorzystaniem miernika Svan dokonywano zapisu bufora, w którym rejestrowane były wartości jednosekundowe wartości skutecznej poziomu ciśnienia akustycznego (RMS) wyrażonej w decybelach (rys. 14.5.) Wartości uzyskane z bufora po połączeniu w jeden plik przeniesiono do programu Excel, w celu dalszych obliczeń. W wyniku przekształceń dokonanych w programie Excel uzyskano wartości  $L_d$ ,  $L_w$ ,  $L_n$ ,  $L_{dwn}$ . Otrzymane wyniki przedstawia tab. 14.1.



Rys. 14.5 Wydruk wartości zapisanych w buforze miernika

Źródło: opracowanie własne

Tab. 14.1 Wyniki pomiarów akustycznych uzyskanych metodą ciągłej rejestracji hałasu

	Miernik 1	Miernik 2
<b>L<sub>d</sub> (dBA)</b>	47,7	40,6
<b>L<sub>w</sub> (dBA)</b>	48,5	43,2
<b>L<sub>n</sub> (dBA)</b>	45,7	43,7
<b>L<sub>dwn</sub> (dBA)</b>	52,8	49,8

Źródło: opracowanie własne

Dodatkowo wartości uzyskane z wyniku pomiaru posłużyły do uzyskania wartości  $L_d$ ,  $L_w$ ,  $L_n$ ,  $L_{dwn}$  z wykorzystaniem pomiarów poziomów ekspozycyjnych dźwięku w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń akustycznych. Z uzyskanego przebiegu wybrano fragmenty odpowiadające przejazdom poszczególnych pociągów a następnie na podstawie tych zdarzeń akustycznych wyliczono wartość poziomu ekspozycyjnego każdego przejazdu. Z uwagi na stosunkowo niewielką ilość przejeżdżających pociągów wartości te nie zostały uśrednione w odpowiednich klasach. Uzyskane wartości ekspozycyjne posłużyły do uzyskania odpowiednich wartości równoważnych poziomu hałasu a następnie wartości wskaźników  $L_d$ ,  $L_w$ ,  $L_n$  i  $L_{dwn}$ . Wyliczone wartości przedstawia tab. 14.2.

Tab. 14.2 Wyniki pomiarów akustycznych uzyskanych metodą pomiarów poziomów ekspozycyjnych dźwięku w odniesieniu do pojedynczych zdarzeń akustycznych

	Miernik 1	Miernik 2
<b>L<sub>d</sub> (dBA)</b>	51,6	47,2
<b>L<sub>w</sub> (dBA)</b>	51,1	48
<b>L<sub>n</sub> (dBA)</b>	39,7	32,9
<b>L<sub>dwn</sub> (dBA)</b>	52,3	48,2

Źródło: opracowanie własne

Porównując wyniki pomiarów uzyskanych dwoma metodami zauważyć można rozbieżności w uzyskanych wynikach. W porze dnia i wieczoru metoda pomiarów poziomów ekspozycyjnych daje wartości większe niż te uzyskane metodą ciągłej rejestracji hałasu.

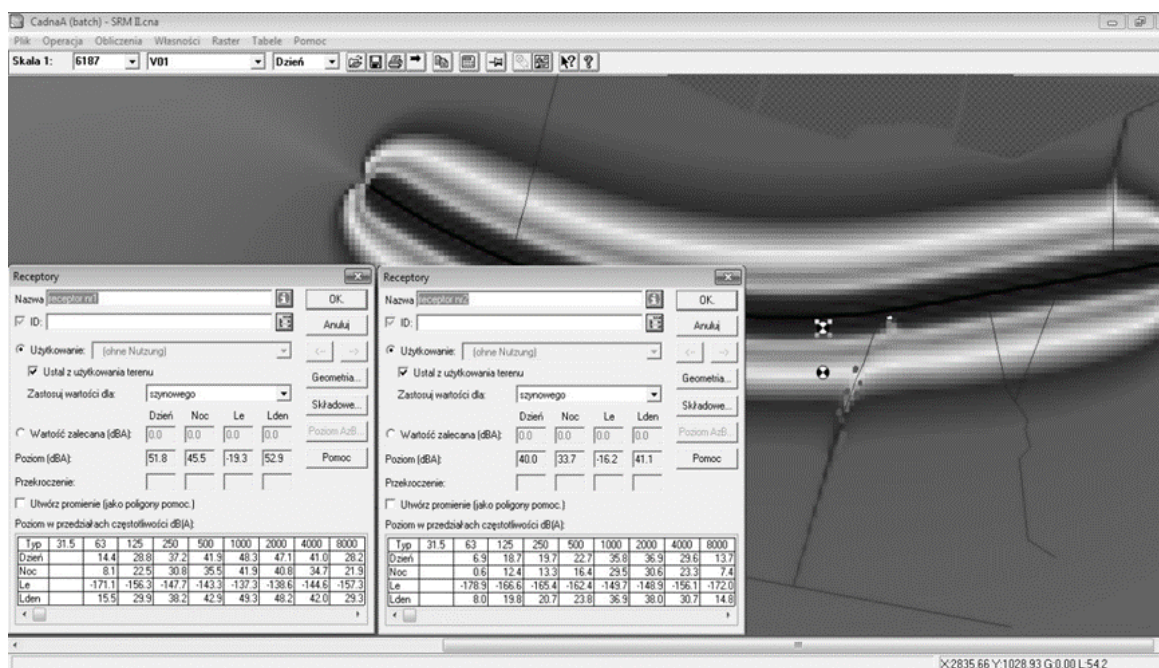
W porze nocnej sytuacja jest odwrotna. Wynika to faktu, iż w porze nocnej ruch pociągów był niewielki i decydujące znaczenie w wartościach uzyskanych metodą pomiarów bezpośrednich uzyskały zakłócenia akustyczne pochodzące od innych źródeł hałasu. Szczególnie jest to widoczne w punkcie oddalonym o 100 metrów od torowiska, gdzie bardziej słyszalny był hałas przejeżdżających po pobliskiej drodze samochodów oraz hałas pochodzący od okolicznych zabudowań np. szczekanie psów.

### 14.3.3 Wykonanie symulacji komputerowej

W kolejnym kroku badań wykonano badania symulacyjne rozchodzenia się dźwięku z wykorzystaniem programu CadnaA. Symulacji dokonano z zastosowaniem siedmiu zaimplementowanych metod obliczeniowych hałasu kolejowego:

- metoda CRN,
- metoda DIN,
- metoda Nordic Prediction (NP),
- metoda ONR 305011,
- metoda SEMIBEL,
- metoda SCHALL 03,
- metoda SRM II.

W wyniku przeprowadzonych symulacji uzyskano mapy pola akustycznego oraz wartości w punktach (receptorach) reprezentujących punkty pomiarowe. Przykładową mapę akustyczną oraz wartości w punktach pomiarowych przedstawia rys. 14.6.



Rys. 14.6 Przykładowe wyniki symulacji

Źródło: opracowanie własne

Tab. 14.3 i 14.4 przedstawiają zbiorcze wyniki symulacji komputerowych uzyskane oraz dla porównania wartości uzyskane metodami pomiarowymi.

**Tab. 14.3 Porównanie wyników metod symulacyjnych, pomiaru bezpośredniego i ekspozycyjnej dla receptora 1 (miernika 1)**

Rodzaj metody	CRN	DIN	NP	ONR 305011	Semibel	Schall 03	SRM II	Pomiar bezpośredni	Ekspozycja
Hałas dzień (dBA)	51,2	63,8	56,9	60,5	53,4	52,7	51,8	47,7	51,6
Hałas noc (dBA)	46,7	55,5	47,8	52,2	39,6	45,3	45,5	45,7	39,7
Lden (dBA)	53,5	65,8	56,5	62,5	52,4	53,1	52,9	52,8	52,3

Źródło: opracowanie własne

**Tab. 14.4 Porównanie wyników metod symulacyjnych, pomiaru bezpośredniego i ekspozycyjnej dla receptora 2 (miernika 2)**

Rodzaj metody	CRN	DIN	NP	ONR 305011	Semibel	Schall 03	SRM II	Pomiar bezpośredni	Ekspozycja
Hałas dzień (dBA)	41,6	54	47,2	51,5	41,7	43,3	40	40,6	47,2
Hałas noc (dBA)	37,1	45,7	38,1	43,2	27,9	35,9	33,7	43,7	32,9
Lden (dBA)	43,8	56	46,8	53,5	40,7	43,7	41,1	49,8	48,2

Źródło: opracowanie własne

#### 14.3.4 Podsumowanie badań

Porównując uzyskane wyniki można zauważyć pewne odchylenia wartości otrzymanych metodami symulacyjnymi od wyników, jakie zostały uzyskane bezpośrednio w wyniku pomiarów. W odniesieniu do punktu pomiarowego oddalonego od torowiska o 20 m, różnice te wynosiły od 0,1 do ponad 13 dB, natomiast w przypadku punktu pomiarowego oddalonego o 100 m od torowiska mieściły się w przedziale od 3 do prawie 9 dB w przypadku niemieckiej metody obliczeniowej.

Ciekawą zależność zauważyć można porównując wyniki badań i symulacji w przypadku bardziej odległego punktu pomiarowego i pory nocnej. Różnice uzyskanych wyników są w tej sytuacji są największe. Dla metody zalecanej jest to dokładnie 10 dB. Wynikać może to z faktu, iż punkt oddalony o 100 metrów narażony był na większy wpływ zakłóceń akustycznych w szczególności w porze nocnej, kiedy badaną trasą przejeżdżała mała ilość pociągów.

#### PODSUMOWANIE

Zaprezentowane wyniki badań wykazują, że wartości uzyskane w wyniku symulacji komputerowej rozprzestrzeniania hałasu komunikacyjnego różnią się od wartości pomiarowych. Różnice zaobserwować można również pomiędzy wartościami uzyskanymi



różnymi metodami obliczeniowymi. Przyczyną tego stanu może być niedostosowanie metod obliczeniowych do warunków panujących na polskich liniach kolejowych. Istnieje również możliwość, iż na rozbieżności w uzyskanych wynikach ma wpływ charakter badanej linii kolejowej. Obszar badań oddalony był od innych źródeł hałasu w celu uniknięcia wpływu zakłóceń (co w czasie nocy jednak nie udało się całkowicie uzyskać), na badanym odcinku pociągi poruszały się ze stałą prędkością, natomiast badana linia kolejowa nie jest linią o dużym natężeniu ruchu. Stosunkowo mała ilość przejeżdżających pociągów (szczególnie w nocy) mogła mieć wpływ na uzyskane wyniki pomiarów i symulacji.

Porównując wartości uzyskane w wyniku symulacji i z pomiarów bezpośrednich należy pamiętać, że w przypadku realizacji mapy strategicznej dokonuje się tzw. kalibracji modelu. Po przeprowadzeniu pierwszej symulacji porównuje się wartości symulacyjne z pomiarowymi, a następnie dokonuje modyfikacji parametrów źródeł dźwięku lub środowiska, w którym symulowana jest propagacja dźwięku. Po dokonaniu koniecznych poprawek przeprowadza się ponowną procedurę obliczeniową, a następnie ponownie porównuje uzyskane wyniki z wartościami pomiarowymi. Procedurę tą można przeprowadzić wielokrotnie, do uzyskania wartości symulacyjnych na akceptowalnym poziomie.

## PODZIĘKOWANIA

Artykuł jest wynikiem badań realizowanych w Instytucie Inżynierii Produkcji na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej, i powstał w ramach pracy statutowej BK-214/ROZ3/2017 (13/030/BK\_17/0027) nt. Sposoby i środki doskonalenia produktów i usług na wybranych przykładach.

## LITERATURA

1. „Algorytmy obliczeń hałasu drogowego i kolejowego”. Warszawa: Instytut Ochrony Środowiska 2007. Pobrano z: [http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring\\_halasu/metody\\_oblicz\\_v\\_2010.pdf](http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_halasu/metody_oblicz_v_2010.pdf) [Dostęp 15.06.2017].
2. P. Czaja. „Ekran akustyczny a hałas komunikacyjny” Pobrano z: <http://www.techbud.com.pl/halas1A.htm> [Dostęp 15.06.2017].
3. Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady z dnia 25 czerwca 2002 w sprawie oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku (Dz.U. WE L 189 z dnia 18 lipca 2002 r).
4. Google Maps. Pobrano z: <http://maps.google.pl> [Dostęp 15.06.2017].
5. A Kuboszek. „Ocena poprawności metod symulacji komputerowej w badaniach hałasu komunikacyjnego.” *Syst. Wspomag. Inż. Prod.* 2017 vol. 6 iss. 1, s. 106-121.
6. Rozporządzenie ministra środowiska z dnia 16 czerwca 2011 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów poziomów substancji lub energii w środowisku przez zarządzającego drogą, linią kolejową, linią tramwajową, lotniskiem lub portem Pobrano z: <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20111400824> [Dostęp: 15.06.2017].

7. SRM II The Netherlands national computation method published in Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai 96, Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Publikatiereeks Verstoring, 14/1997, VROM, November 1996.

### OCENA POPRAWNOŚCI METOD SYMULACJI KOMPUTEROWEJ W BADANIACH HAŁASU KOLEJOWEGO

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przykłady zastosowania komputerowych metod symulacji zjawisk akustycznych w procesie tworzenia strategicznej mapy hałasu. Artykuł przedstawia porównanie wyników badań uzyskanych w symulacji komputerowej i wyników pomiarów środowisku.

**Słowa kluczowe:** hałas, metody symulacyjne, mapa hałasu

### VALIDATION OF COMPUTER SIMULATION METHODS IN THE STUDY OF RAILWAY NOISE

**Abstract:** The article presents examples of the use of computer simulation methods acoustic phenomena in the process of strategic noise maps. The article presents a comparison of test results obtained in computer simulations and measurements in the environment.

**Key words:** noise simulation methods, noise map

Dr inż. Artur KUBOSZEK  
Politechnika Śląska  
Wydział Organizacji i Zarządzania  
Instytut Inżynierii Produkcji  
ul. Roosevelta 26-28, 41-800 Zabrze  
e-mail: Artur.Kuboszek@polsl.pl

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.07.2017  
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 31.07.2017