

Modeling of the sound propagation for a railway vehicle moving on the track

Modelowanie propagacji hałasu podczas przejazdu pojazdu kolejowego na nasypie

The article presents the process of modeling the phenomenon of noise propagation generated during the passage of a railway vehicle as a function of distance from the sound source and of octave frequencies. The conducted experimental studies served as the basis for the development of sound propagation models. Acoustic measurements were carried out in the area of the railway line whose track was elevated on a track foundation. Then a model was developed that most faithfully reproduces the analyzed phenomenon in real conditions.

W artykule przedstawiono proces modelowania zjawiska propagacji hałasu generowanego podczas przejazdu pojazdu kolejowego w funkcji odległości od źródła dźwięku oraz częstotliwości oktaowych. Podstawą do opracowania modeli propagacji dźwięku były zrealizowane badania eksperymentalne. Pomiary akustyczne przeprowadzono w obszarze linii kolejowej, którego tor był zlokalizowany na nasypie. Następnie opracowano model, który najwierniej odwzorowuje analizowane zjawisko w warunkach rzeczywistych.

1. INTRODUCTION

Technological progress brings with it a number of conveniences, however, with dynamic development of cities, communication networks and industry, its negative aspects cannot be easily avoided. One of those aspects is the continuous increase in the level of noise emission and propagation in the environment. Lack of awareness about the harmful effects of noise on the human body has an increasing impact on the progressing problems related to health disorders, as well as the effectiveness of work and the quality of human rest.

There is therefore a growing need to study noise propagation mechanisms. Forecasting sound levels in the environment allows to develop effective methods to prevent or reduce noise. Noise modeling based on empirical data provides valuable information about the behavior of acoustic waves in real systems [1]. The main benefit of the performed research is the chance to utilize this research results from specific measurement situations, reflecting the situations in which the experiment was conducted. It is possible to use the developed models as a commercial tool: for testing the quality of life of urban areas, forecasting sound levels in areas intended for the construction of communication infrastructure or testing the possibilities of new rolling stock before releasing it on the market [2].

1. WPROWADZENIE

Postęp cywilizacyjny niesie za sobą szereg udogodnień, jednak przy dynamicznym rozwoju miast, sieci komunikacyjnych i przemysłu nie można uniknąć negatywnych zjawisk. Jednym z nich jest ciągły wzrost poziomu emisji i propagacji hałasu w środowisku. Brak świadomości o szkodliwym działaniu hałasu na organizm człowieka ma coraz większy wpływ na postępujące problemy związane z zaburzeniami zdrowia, a także efektywnością pracy i jakością odpoczynku człowieka.

Istnieje zatem coraz większa potrzeba badania mechanizmów propagacji hałasu. Prognozowanie poziomów dźwięku w środowisku pozwala opracowywać skuteczne metody zapobiegania lub ograniczania hałasu. Modelowanie hałasu na podstawie danych empirycznych niesie za sobą cenne informacje o zachowaniach fali akustycznej w rzeczywistych układach [1]. Atutem zrealizowanych badań jest szansa wykorzystania ich w konkretnych sytuacjach pomiarowych odzwierciedlających sytuacje, w których przeprowadzono eksperyment. Istnieje możliwość zastosowania opracowanych modeli jako narzędzi komercyjnych do badania jakości życia w obszarach zurbanizowanych, prognozowania poziomów dźwięku na terenach przeznaczonych do budowy infrastruktury komunikacyjnej oraz testowania możliwości nowego taboru przeznaczonego do wprowadzenia na rynek [2].

2. RESEARCH METHOD

2.1. Main research assumptions

The basis of the research is a passive experiment, which consists of testing objects with unknown state features in "in situ" conditions, i.e. in their normal working conditions. The empirical approach, based only on the results of measurements, makes it difficult to choose the right analysis method and construct the model. The main advantage is that it makes it possible to most faithfully reproduce reality, which is the main goal of this research [3].

The subject of the study is the measurement of sound signals generated during the travel of trains on a railway line located on an elevated foundation. The scheme of the track cross-section is shown in Fig. 1.

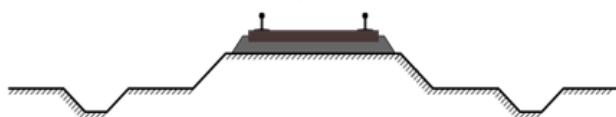


Fig. 1. Rail track schematic with the foundation

Rys. 1. Schemat przekroju toru usytuowanego na nasypie

Measurements of acoustic signals were made during passenger train travel. Express trains category was included in the analysis of the experiment. It is important to note that the locomotives that were part of the passenger train sets were all of the same type. In addition, the number of wagons in the cases examined was similar. This type of information is important concerning the repeatability of the acoustic measurements carried out and the validity of the research method used.

The nature of the acoustic signals is largely determined by the type of track structure on which the vehicle moves. Due to the fact that the track structure was the same at all considered locations, it was decided to omit the analysis of track components as well as the impact of train speed on sound emission and propagation.

Due to the fact that the measurements were carried out in real conditions, special attention was paid during the measurements to the assumptions regarding the conditions of the acoustic environment and track specificity. An important assumption is the free propagation of sound and the lack of obstacles that could absorb or reflect the sound. Due to the lack of interference of the recorded signals, a lack of rail-road intersections near the measuring points is also an important issue. In order to eliminate the possibility of changes in vehicle speed, straight track sections were selected for testing.

2.2. Selection of measurement points location

Sound measurement results, which were recorded around the railway line area, were used to

2. METODYKA BADAŃ

2.1. Główne założenia badawcze

Podstawą badań jest eksperyment bierny, który polega na badaniu obiektów o nieznanymi cechach stanu w warunkach „in situ”, czyli w ich naturalnych warunkach pracy. Podejście empiryczne, którego bazą są jedynie wyniki pomiarów, utrudnia dobranie odpowiedniej metody analizy i skonstruowanie modelu. Głównym atutem jest możliwość najwierniejszego odwzorowania rzeczywistości, co jest celem nadrzędnym niniejszych badań [3].

Przedmiotem badań jest pomiar sygnałów dźwięku generowanych podczas przejazdu pociągów po linii kolejowej usytuowanej na nasypie. Schemat przekroju torowiska przedstawiono na rys. 1.

Pomiary sygnałów akustycznych zrealizowano podczas przejazdów pociągów pasażerskich. W eksperymencie analizą objęto kategorię pociągów pośpiesznych. Ważnym aspektem jest fakt, iż lokomotywy, które wchodziły w skład pociągów osobowych były jednakowego typu. Ponadto liczba wagonów w zbadanych przypadkach była podobna. Tego typu informacje są istotne z punktu widzenia powtarzalności zrealizowanych pomiarów akustycznych oraz zasadności opracowanej metodyki badawczej.

Charakter sygnałów akustycznych w dużej mierze uwarunkowany jest przez typ konstrukcji toru, po którym porusza się pojazd. Z uwagi na fakt, że we wszystkich rozpatrywanych lokalizacjach budowa toru była jednakowa, zdecydowano pominąć analizę części składowych toru, jak i wpływ prędkości pociągów na emisję i propagację dźwięku.

Z racji tego, że pomiary odbywały się w rzeczywistych warunkach, podczas wykonywania pomiarów zwrócono szczególną uwagę na założenia dotyczące warunków środowiska akustycznego oraz specyfiki toru. Istotnym założeniem jest swobodna propagacja dźwięku oraz brak przeszkód, które mogłyby pochłaniać lub odbijać dźwięk. Z uwagi na brak zakłóceń rejestrowanych sygnałów ważną kwestią jest też brak skrzyżowań kolejowo-drogowych w pobliżu punktów pomiarowych. W celu wyeliminowania możliwości występowania zmian prędkości pojazdu, wybrano do badań proste odcinki toru.

2.2. Lokalizacja punktów pomiarowych

Wyniki pomiarów dźwięku, które zarejestrowano wokół obszaru linii kolejowej, wykorzystano do opracowania modeli. Badania miały na celu porównanie rozchodzenia się fal akustycznych i wybór modelu, który najlepiej odzwierciedla rzeczywiste zjawiska w konkretnych warunkach terenowych. W celu identyfikacji modelu opisującego zależność poziomu hałasu w funkcji odległości od źródła dla różnych częstotliwości oktaowych, punkty pomiarowe usytuowano w linii prostej, prostopadle do osi toru, co przedstawiono na rys. 2. Punkty 1 (70 m od osi toru), 2 (60 m), 3 (50

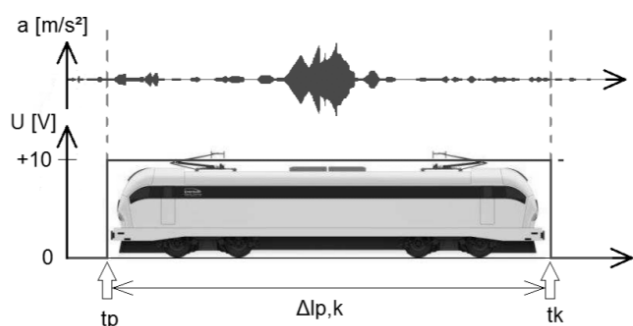
develop models. The study aimed to compare the propagation of acoustic waves and choosing the model that best reflects real phenomena in the given specific field conditions. In order to identify the model describing the dependence of the noise level as a function of distance from the source for various octave frequencies, the measuring points were located in a straight line, perpendicular to the rail line center axis, as shown in Fig. 2. Points 1 (70 m from the rail line), 2 (60 m), 3 (50 m), 4 (40 m), 5 (30 m), 6 (20 m) were used to develop the model. Additionally, the developed model was validated based on the measurements at points 7 (25 m) and 8 (45 m). All points were located at a height of about 1.5 m from the ground (in accordance with the assumptions described in the ISO 3095:2013 standard, referring to such measurements).

In addition, the tests were carried out under constant atmospheric conditions: air temperature around 20°C, atmospheric pressure 1017 hPa, no precipitation, wind speed below 5 m/s, and air humidity at 64%.

2.3. Measuring apparatus and signal acquisition

The measuring apparatus used for the research includes: 8 Brüel & Kjær type 4189-L-001 microphones, a photocell, 2 units of PULSE Access Type 3060-C signal acquisition devices by Brüel & Kjær, a laptop computer (used to control measurements and signal acquisition).

Data acquisition was carried out continuously, in a measuring band of 25.6 kHz, with a sampling frequency of 65536 samples per second. Signals were measured synchronously at all measuring points. In addition, the voltage signal from the transmitter-receiver photocell was used to determine the beginning and end of the vehicle's passage. The recording and processing of signals was based on a time window. Fig. 3. schematically shows the method of signal time selection.



m), 4 (40 m), 5 (30 m), 6 (20 m) wykorzystano do opracowania modelu. Natomiast na podstawie pomiarów w punktach 7 (25 m) i 8 (45 m) dokonano walidacji opracowanego modelu. Wszystkie punkty zlokalizowane były na wysokości około 1,5 m od powierzchni gruntu (zgodnie z założeniami opisanymi w standardzie ISO 3095:2013, odnoszącym się do wykonywania tego typu pomiarów).

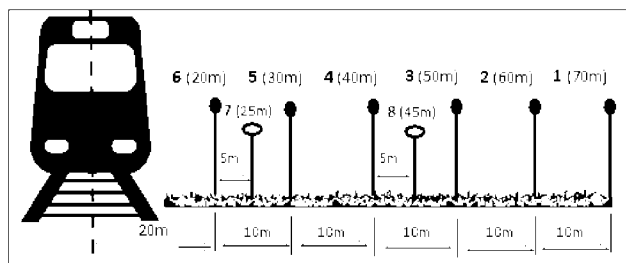


Fig. 2. Location of measurement points and their distance from the track

Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych w obszarze toru umieszczonego na nasypie

Ponadto badania przeprowadzono w stałych warunkach atmosferycznych: temperatura powietrza około 20 °C, ciśnienie atmosferyczne 1017 hPa, brak opadów, prędkość wiatru poniżej 5 m/s, wilgotność powietrza 64%.

2.3. Aparatura pomiarowa i akwizycja sygnałów

W skład aparatury pomiarowej wykorzystanej do badań wchodzi: 8 mikrofonów Brüel & Kjær typu 4189-L-001, fotokomórka, 2 jednostki akwizycji sygnałów PULSE Access Type 3060-C firmy Brüel & Kjær, mobilny komputer (służący do sterowania pomiarami i akwizycji sygnałów).

Akwizycję danych realizowano w sposób ciągły, w paśmie pomiarowym wynoszącym 25,6 kHz, przy częstotliwości próbkowania 65536 próbek na sekundę. Sygnały mierzono synchronicznie we wszystkich punktach pomiarowych. Ponadto sygnał napięciowy, pochodzący z fotokomórki typu nadajnik-odbiorca, wykorzystano do określenia początku i końca przejazdu pojazdu. Rejestrację i przetwarzanie sygnałów przeprowadzono na bazie okna czasowego. Na rys. 3. schematycznie przedstawiono sposób selekcji czasowej sygnału.

Ze zmierzonego sygnału wydzielono pożądany fragment, wykorzystany do dalszego modelowania. Symbolem t_p oznaczono chwilę czasową dla początku pomiaru, symbolem t_k oznaczono chwilę czasową końca pomiaru, natomiast $\Delta t_{p,k}$ jest czasem przejazdu pociągu przez przekrój pomiarowy [3]. Tak przygotowane sygnały akustyczne wykorzystano do opracowania modeli propagacji.

The desired fragment was separated from the measured signal and used for further modeling. The symbol t_p denotes the time point for the beginning of the measurement, while t_k denotes the time of the end of the measurement, and $\Delta t_{p,k}$ is the time it takes the train to travel through the measuring section [3]. The acoustic signals prepared in this way were used to develop sound propagation models.

3. PROPOSED MODELING FEATURES

Based on the literature analysis, it was found that linear models are the most adequate in the study of sound propagation phenomenon. The studied phenomenon of sound propagation is based on functional dependence, therefore the model construction is based on changing the value of the sound pressure level, depending on the variable value of distance from the sound source in the i -th frequency band. The use of linear models in modeling this type of phenomenon is the simplest way to determine the relationship of the influence of key variables on the sound level, especially when the specific function description of this relationship is unknown [4, 5]. An additional argument is that almost all functions can be linearized to some extent. Statistical tools were used to look for relationships between changes in sound pressure level and distance from the sound source. When developing a statistical model, it is important to be able to find a compromise between excessive simplification and excessive accumulation of details. Therefore, when choosing the model and describing it as a function, one should focus on the simplest mathematical formulas [7, 8].

Considering the above, five models were proposed to calculate the relationship under consideration:

Power model:

$$L_i = a_i r^{b_i} \quad (1)$$

where:

L_i – sound pressure level in the i -th frequency band,
 a_i, b_i – model coefficients for the i -th frequency band,
 r – distance from the sound source.

Power model with a constant term:

$$L_i = a_i r^{b_i} + c_i, \quad (2)$$

where:

L_i – sound pressure level in the i -th frequency band,
 a_i, b_i, c_i – model coefficients for the i -th frequency band,
 r – distance from the sound source.

Quadratic function model:

$$L_i = a_i e^{r b_i}, \quad (3)$$

where:

L_i – sound pressure level in the i -th frequency band,
 a_i, b_i, c_i – model coefficients for the i -th frequency band,
 r – distance from the sound source.

3. PROPONOWANE FUNKCJE DO MODELOWANIA

Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że w badaniu zjawiska propagacji dźwięku najbardziej adekwatne są modele liniowe. Badane zjawisko propagacji hałasu bazuje na zależności funkcyjnej, zatem budowa modelu opiera się na zmianie wartości poziomu ciśnienia akustycznego, w zależności od zmiennej wartości odległości od źródła dźwięku w i -tym paśmie częstotliwości. Zastosowanie modeli liniowych w modelowaniu tego rodzaju zjawiska jest najprostszym sposobem określenia zależności wpływu zmiennych objaśniających na poziom dźwięku, zwłaszcza gdy nie jest znana konkretna postać funkcyjna tej zależności [4, 5]. Dodatkowym argumentem uzasadniającym jest fakt, że prawie wszystkie funkcje można w pewnym zakresie linearyzować. Szukając zależności między zmianami poziomu ciśnienia akustycznego i odległości od źródła dźwięku posłużono się narzędziami statystycznymi. Opracowując model statystyczny istotna jest umiejętność szukania kompromisu pomiędzy nadmiernym uproszczeniem, a przesadnym nagromadzeniem szczegółów. Wybierając zatem postać funkcyjną modelu, należy skupiać się na najprostszych formułach matematycznych [7, 8].

Uwzględniając powyższe, do obliczenia rozpatrywanej zależności zaproponowano pięć modeli:

Model potęgowy:

$$L_i = a_i r^{b_i} \quad (1)$$

gdzie:

L_i – poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 a_i, b_i – współczynniki modelu dla t -tego pasma częstotliwości,
 r – odległość od źródła dźwięku.

Model potęgowy z wyrazem wolnym:

$$L_i = a_i r^{b_i} + c_i, \quad (2)$$

gdzie:

L_i – poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 a_i, b_i, c_i – współczynniki modelu dla t -tego pasma częstotliwości,
 r – odległość od źródła dźwięku.

Model wielomianowy drugiego stopnia:

$$L_i = a_i e^{r b_i}, \quad (3)$$

gdzie:

L_i – poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 a_i, b_i, c_i – współczynniki modelu dla t -tego pasma częstotliwości,
 r – odległość od źródła dźwięku.

Model eksponencjalny:

$$L_i = a_i e^{r b_i}, \quad (4)$$

Exponential model:

$$L_i = a_i e^{rb_i}, \quad (4)$$

where:

L_i – sound pressure level in the i -th frequency band,
 a_i, b_i, c_i – model coefficients for the i -th frequency band,
 e – logarithm base,
 r – distance from the sound source.

Model based on superposition of two exponential functions:

$$L_i = a_i e^{rb_i} + c_i e^{rd_i} \quad (5)$$

gdzie:

L_i – sound pressure level in the i -th frequency band,
 a_i, b_i, c_i, d_i – model coefficients for the i -th frequency band,
 e – logarithm base,
 r – distance from the sound source.

In all of the above cases, the function value (i.e. sound pressure level) is associated with the independent variable (i.e. distance from the sound source). The obtained set of curves of the above models in each frequency band will be the basis for estimating signal spectra, thanks to the knowledge of regression coefficients [9, 11].

4. RESULTS

Acoustic tests were carried out in terms of qualitative signal analysis. The obtained signals were first analyzed in the frequency domain, as a result of which the octave spectra of the signal with components in the frequency range from 16÷16000 [Hz] were determined.

Signals from 17 passenger trains were recorded. The tested vehicles differed in terms of train categories, which was confirmed by the test results by significant differences in the sound level obtained in given frequency bands, which ranged from 3÷8 [dB].

The results of octave analysis are the input data for the development of noise propagation regression models. The point of modeling is to answer the question of which models will most accurately reflect the phenomenon of sound propagation. First, it was verified whether the above input data used for implementation in models (1-5) would meet the statistical conditions [10]. The first stage of modeling consisted of statistical verification of the developed five models for each octave band. The level of significance of individual coefficients of regression equations was checked, which allowed to eliminate models that poorly represented the studied phenomenon in a given frequency band. From the models whose parameters met the assumptions of the significance test, the model with the highest determination coefficient value R^2 was selected, which made it possible to choose the best model in terms of quality.

gdzie:

L_i – poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 a_i, b_i, c_i – współczynniki modelu dla t -tego pasma częstotliwości,
 e – podstawa logarytmu naturalnego,
 r – odległość od źródła dźwięku.

Model bazujący na superpozycji dwóch funkcji eksponencjalnych:

$$L_i = a_i e^{rb_i} + c_i e^{rd_i} \quad (5)$$

gdzie:

L_i – poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 a_i, b_i, c_i, d_i – współczynniki modelu dla t -tego pasma częstotliwości,
 e – podstawa logarytmu naturalnego,
 r – odległość od źródła dźwięku.

We wszystkich powyższych przypadkach zmienna zależna (tj. poziom ciśnienia akustycznego) związana jest ze zmienną niezależną (tj. odległością od źródła dźwięku). Otrzymany zbiór krzywych powyższych modeli w każdym paśmie częstotliwości będzie podstawą do oszacowania widm sygnałów, dzięki znajomości współczynników regresji [9, 11].

4. WYNIKI BADAŃ

Badania akustyczne przeprowadzono w ujęciu jakościowej analizy sygnałów. Uzyskane sygnały w pierwszej kolejności poddano analizie w dziedzinie częstotliwości, w wyniku czego wyznaczono widma oktawowo sygnału o składowych w zakresie częstotliwości od 16÷16000 [Hz].

Tab.1. The results of the octave analysis for the described research case

Tablica1. Wyniki analizy oktaowej dla opisywanego przypadku badawczego

Octave [Hz]	Sound pressure level relative to the distance from the source [dB]					
	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m	70 m
16	75.0	77.2	74.9	74.4	76.8	66.2
31.5	76.4	76.9	75.2	75.4	75.7	66.5
63	73.0	73.3	74.0	71.3	70.0	65.5
125	67.7	68.6	71.4	67.8	65.9	61.6
250	66.6	65.5	68.1	65.3	63.9	62.2
500	74.3	73.5	72.5	69.8	67.9	65.2
1000	79.3	78.8	80.0	78.4	76.8	73.6
2000	80.5	80.2	81.1	81.0	80.0	76.3
4000	69.8	68.8	69.4	69.0	68.7	65.7
8000	59.8	58.8	58.2	57.4	56.0	52.9
16000	44.1	43.3	41.4	39.2	35.4	41.3

$$L_{16\text{Hz}} = -5.31e - 15 \cdot r^{8.26} + 76.12 \quad (6)$$

$$L_{31,5\text{Hz}} = -5.88e - 15 \cdot r^{8.24} + 76.47 \quad (7)$$

$$L_{63\text{Hz}} = 77.77 \cdot e^{r \cdot (-0.002)} \quad (8)$$

$$L_{125\text{Hz}} = -1.17e - 11 \cdot r^{6.40} + 69.10 \quad (9)$$

$$L_{250\text{Hz}} = 69.20 \cdot e^{r \cdot (-0.001)} \quad (10)$$

$$L_{500\text{Hz}} = 79.25 \cdot e^{r \cdot (-0.003)} \quad (11)$$

$$L_{1000\text{Hz}} = -1.92e - 10 \cdot r^{5.68} + 79.40 \quad (12)$$

$$L_{2000\text{Hz}} = -2.90e - 15 \cdot r^{8.23} + 80.85 \quad (13)$$

$$L_{4000\text{Hz}} = -2.41e - 15 \cdot r^{8.23} + 69.41 \quad (14)$$

$$L_{8000\text{Hz}} = -2.76e - 08 \cdot r^{4.58} + 57.47 \quad (15)$$

$$L_{16000\text{Hz}} = 1.96e - 15 \cdot e^{r \cdot 0.51} + 50.01 \cdot e^{r \cdot (-0.005)} \quad (16)$$

The notation used in the equations of the above models was adopted analogously to the functional dependencies (1-5). For the analyzed passenger train travel, the best model reflecting the changing trends of the analyzed phenomenon is the power model with the constant term (power2), which expresses equation (2). The model is used most often because it works in up to seven frequency bands.

Figs. 4 and 5 present the results of the regression analysis of the sound pressure level as a function of distance from the sound source. In order to compare the model selected in a given band with other proposed models, their characteristics are presented in common charts corresponding to individual bands.

Based on the analysis of the above characteristics, it can be noted that the power model with the constant term, marked on the charts with a red solid line (power2 model), in most cases best reflects the results of measurements at specific measuring points. According to the characteristics presented in Fig. 4, it can be seen that in the lowest and highest ranges of frequency bands there is a large dispersion both in the recorded sound pressure levels and in the curves of the developed models themselves. The values of the R^2 coefficients determined for equation (2) are in the range $\langle 0.86 \div 0.99 \rangle$, which proves that the selected models are of good quality.

5. MODEL VALIDATION

The final stage of the analysis was the validation of the model selected for each band, as shown in Fig. 5. The validation of selected models consists of measuring acoustic signals at other distances from the track axis than those intended for the development of the models, and comparing the corresponding sound pressure levels (red points in Fig. 6) with values that were obtained by simulation using the developed model.

Zarejestrowano sygnały z przejazdów 17 pociągów osobowych. Badane obiekty różniły się między sobą kategoriami pociągów, co potwierdziły wyniki badań w znacznych różnicach poziomu dźwięku w danych pasmach częstotliwości, które wynosiły od $3 \div 8$ [dB].

Wyniki analizy oktauwowej są danymi wejściowymi do opracowania modeli regresyjnych propagacji hałasu. Istotą modelowania jest odpowiedź na pytanie, jakie modele najdokładniej odzwierciedlą zjawisko propagacji dźwięku. W pierwszej kolejności sprawdzono czy powyższe dane wejściowe wykorzystane do zaimplementowania w modelach (1-5), będą spełniać warunki statystyczne [10]. Pierwszy etap modelowania polegał na weryfikacji statystycznej opracowanych pięciu modeli dla każdego pasma oktauwowego. Sprawdzono poziom istotności poszczególnych współczynników równań regresji, co pozwoliło wyeliminować modele, które słabo odwzorowywały badane zjawisko w danym paśmie częstotliwości. Spośród modeli, których parametry spełniały założenia testu istotności, wybrano model o najwyższej wartości współczynnika determinacji R^2 , co pozwoliło wybrać model najlepszy pod względem jakościowym.

$$L_{16\text{Hz}} = -5.31e - 15 \cdot r^{8.26} + 76.12 \quad (6)$$

$$L_{31,5\text{Hz}} = -5.88e - 15 \cdot r^{8.24} + 76.47 \quad (7)$$

$$L_{63\text{Hz}} = 77.77 \cdot e^{r \cdot (-0.002)} \quad (8)$$

$$L_{125\text{Hz}} = -1.17e - 11 \cdot r^{6.40} + 69.10 \quad (9)$$

$$L_{250\text{Hz}} = 69.20 \cdot e^{r \cdot (-0.001)} \quad (10)$$

$$L_{500\text{Hz}} = 79.25 \cdot e^{r \cdot (-0.003)} \quad (11)$$

$$L_{1000\text{Hz}} = -1.92e - 10 \cdot r^{5.68} + 79.40 \quad (12)$$

$$L_{2000\text{Hz}} = -2.90e - 15 \cdot r^{8.23} + 80.85 \quad (13)$$

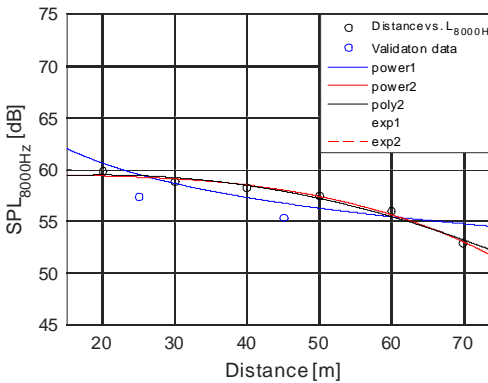
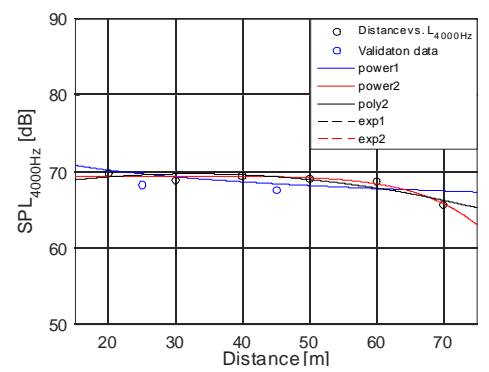
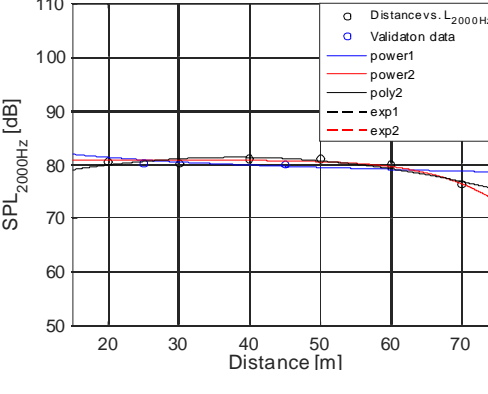
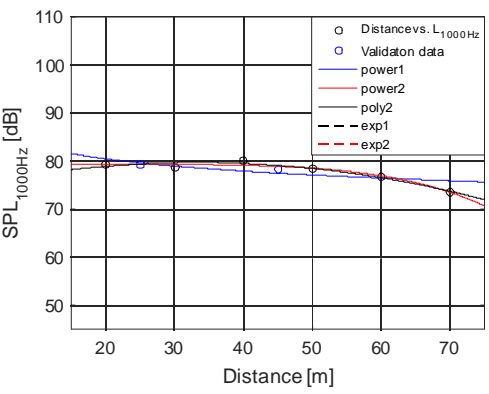
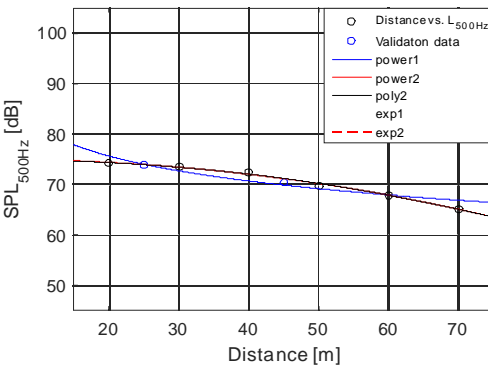
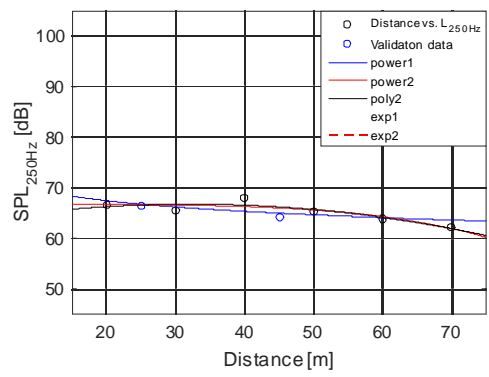
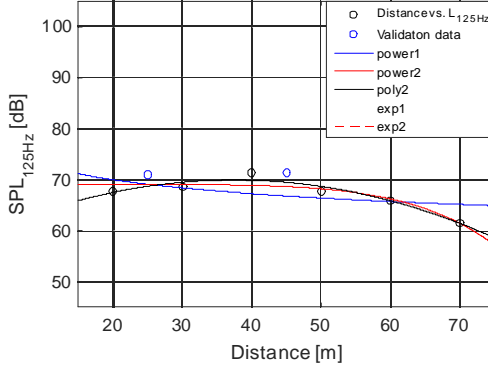
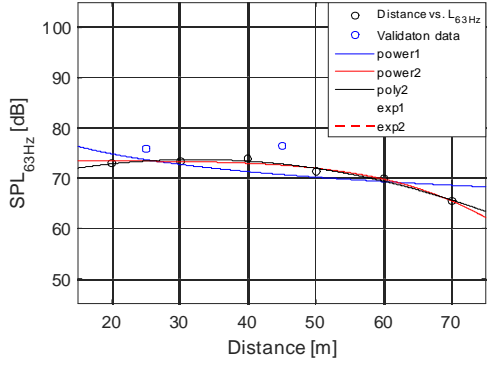
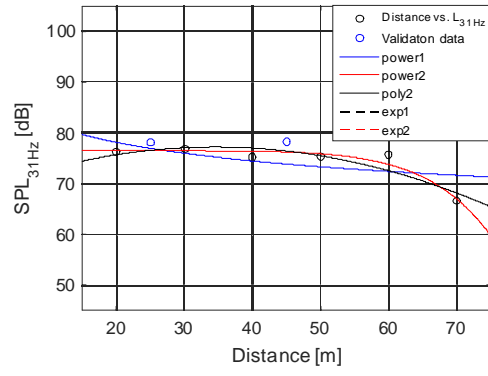
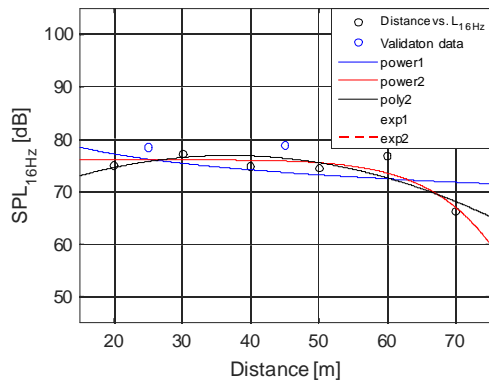
$$L_{4000\text{Hz}} = -2.41e - 15 \cdot r^{8.23} + 69.41 \quad (14)$$

$$L_{8000\text{Hz}} = -2.76e - 08 \cdot r^{4.58} + 57.47 \quad (15)$$

$$L_{16000\text{Hz}} = 1.96e - 15 \cdot e^{r \cdot 0.51} + 50.01 \cdot e^{r \cdot (-0.005)} \quad (16)$$

Oznaczenia użyte w równaniach powyższych modeli przyjęto analogicznie jak w zależnościach funkcyjnych (1-5). Dla analizowanego przejazdu pociągu osobowego najlepiej odzwierciedlającym zmienne tendencje analizowanego zjawiska jest model potęgowy z wyrazem wolnym (power2), który wyraża równanie (2). Model wykorzystywany jest najczęściej, ponieważ sprawdza się aż w siedmiu pasmach częstotliwości.

Na rys. 4 zaprezentowano wyniki analizy regresji zależności poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości od źródła dźwięku. W celu porównania wybranego w danym paśmie modelu z pozostałymi propozycjami, ich charakterystyki przedstawiono na wspólnych wykresach odpowiadających poszczególnym pasmom.



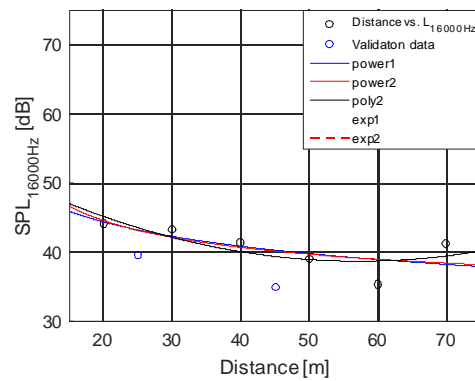
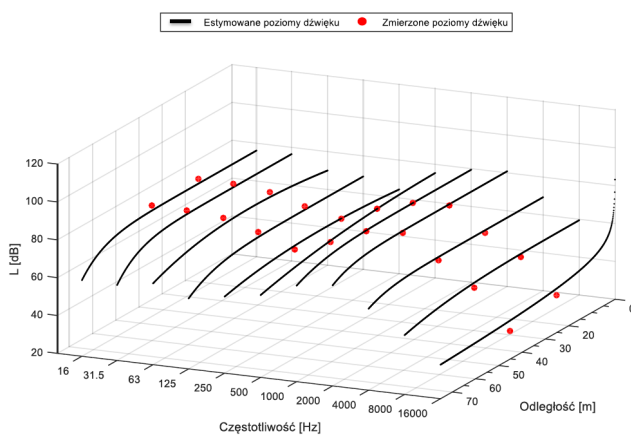


Fig. 4. The sound pressure level as a function of distance from the sound source for different octave frequencies
 Rys. 4. Zależność poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji odległości od źródła dźwięku dla różnych częstotliwości oktaowych



Rys. 5. Walidacja modelu
 Fig. 5. Model validation

The validation in Fig. 5 indicates, that checking the selected models gave the expected result. The differences between the measured and estimated sound levels do not exceed 1 dB in most of the cases shown. The greatest differences can be observed in the extreme (i.e. low and high) octave bands. In the case of the 16 kHz band the difference was about 4 dB, while in low bands (up to 63 Hz) it did not exceed 3 dB. This formed the basis for the statement that: the selected model reflects the nature of the studied phenomenon, and the model selection algorithm has been developed satisfactorily.

6. CONCLUSIONS

Based on the conducted experimental research and conducted analyses and simulations, it can be concluded that the developed models can be used to forecast the noise propagation from moving passenger trains relative to the distance between the recipient and the source. The final result of the validation of the models indicates a high probability that the conducted research was successful.

Na podstawie analizy powyższych charakterystyk można zauważyć, że model potęgowy z wyrazem wolnym, oznaczony na wykresach czerwoną linią ciągłą (model power2), w większości przypadków najlepiej odwzorowuje wyniki pomiarów w konkretnych punktach pomiarowych. Zgodnie z przedstawionymi na rys. 4 charakterystykami, można zauważyć, że w najniższych i najwyższych zakresach pasm częstotliwości jest duży rozrzut zarówno w zarejestrowanych poziomach ciśnienia akustycznego, jak i w samych przebiegach opracowanych modeli. Wyznaczone dla równania (2) wartości współczynników determinacji R^2 zawierają się w przedziale $\langle 0,86 \div 0,99 \rangle$, co świadczy o dobrym jakościowo odwzorowaniu wybranych modeli.

5. WALIDACJA MODELI

Ostatnim etapem analizy była walidacja wybranego dla każdego pasma modelu, co przedstawiono na rys. 5. Walidacja wybranych modeli polega na pomiarze sygnałów akustycznych w innych odległościach od osi toru niż przewidziane do opracowania modeli i porównaniu odpowiadających im wartości poziomu ciśnienia akustycznego (czerwone punkty na rys. 5) z wartościami, które otrzymano na drodze symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu.

Jak wynika z rys. 5, sprawdzenie wybranych modeli dało oczekiwany rezultat. W większości przedstawionych przypadków, różnice pomiędzy zmierzonymi i estymowanymi poziomami dźwięku nie przekraczają wartości 1 dB. Najwyższe różnice można zaobserwować w skrajnych (tj. niskich i wysokich) pasmach oktaowych. W przypadku pasma 16 kHz różnica wynosiła ok. 4 dB, natomiast w niskich pasmach (do 63 Hz), nie przekraczała 3 dB. Stanowi to podstawę do twierdzenia, że wybrany model dobrze oddaje charakter badanego zjawiska, a algorytm wyboru modeli opracowano zadowalająco.

It should be noted that the developed models can be used in specific environmental research conditions, the most important of which are the movement of passenger trains on an elevated track of this type. In order to comprehensively approach this issue, further research should be carried out, which will first indicate the relationship between the speed of a passing rail vehicle and the generated noise propagation. In addition, it is important to estimate the technical condition of vehicles (i.e. drive systems and propulsion systems) as well as the condition of the rail infrastructure (i.e. rail acoustic roughness parameter) in order to determine its correlation with the generated noise.

BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

- [1] Orczyk M.: *Analiza i ocena wpływu natężenia ruchu drogowego na poziom hałasu w otoczeniu autostrady A2 na odcinku Komorniki - Krzesiny. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2007*
- [2] Komorski P.: *Opracowanie modelu sygnatury akustycznej wybranego miejskiego pojazdu szynowego w teście pass-by. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2019*
- [3] Pabis S.: *Metodologia i metody nauk empirycznych. PWN, Warszawa 1985*
- [4] Komorski P., Nowakowski T., Szymański G.: *The comparison analysis of sound level emitted by various tram bogies under normal operating conditions. ICSV24, London 2017*
- [5] Seber G.A.F.: *Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York 1977*
- [6] Kudrycka I.: *Problemy i metody modelowania ekonometrycznego. PWN, Warszawa 1984*
- [7] Bitner A.: *Konstrukcja modelu regresji wielorakiej przy wycenie nieruchomości. Akademia Rolnicza w Krakowie. Acta Sci. Pol., Administratio Locorum 6(4) 2007, 59-66*
- [8] Gładysz A.: *Modelowanie ekonometryczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2007. Wyd. II*
- [9] Thron T., Hecht M.: *The sonRAIL emission model for railway noise in Switzerland. Acta Acustica United with Acustica, nr 96(5), 2010, p. 873–883, DOI: 10.3813/AAA.918346.*
- [10] Thompson D.J.: *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. ed. 1st, Elsevier, Southampton 2008, ISBN: 9780080914435.*
- [11] Staniszyn A.: *Przystępny kurs statystyki. Modele liniowe i nieliniowe. Tom 2. StatSoft, Kraków 2007, ISBN: 978-83-88724-30-5.*

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie zrealizowanych badań eksperymentalnych oraz przeprowadzonych analiz i symulacji, można stwierdzić, że opracowane modele mogą być wykorzystane do prognozowania propagacji hałasu pociągów pasażerskich w zależności od odległości odbiorcy od źródła. Rezultat końcowy walidacji modeli wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo sukcesu przeprowadzonych badań.

Należy zaznaczyć, że opracowane modele mogą zostać wykorzystane w określonych warunkach środowiskowo-badawczych, z których najważniejszym jest przejazd pociągów pasażerskich po torze usytuowanym na nasypie. W celu kompleksowego podejścia do tego typu zagadnienia należy przeprowadzić dalsze badania, które w pierwszej kolejności wskażą zależność propagacji hałasu od prędkości przejeżdżającego pojazdu szynowego. Ponadto istotne jest oszacowanie stanu technicznego pojazdów (tj. układów biegowych i napędowych) i infrastruktury kolejowej (tj. parametru chropowatości akustycznej szyn) w celu określenia korelacji z generowanym hałasem.