

Włodzimierz CZYCZUŁA, Barbara KOŻUCH

HAŁAS W OTOCZENIU LINII KOLEJOWYCH – PORÓWNANIE HAŁASU EMITOWANEGO PRZEZ EMU 250 (PENDOLINO) I INNE POCIĄGI KURSUJĄCE PO CENTRALNEJ MAGISTRALI KOLEJOWEJ

Streszczenie

Artykuł opisuje problem hałasu emitowanego przez tabor kolejowy. Hałas przedstawia się jako zjawisko dźwiękowe oraz problem dla człowieka w XXI wieku. Szczegółowo omawiane są dwa główne źródła hałasu kolejowego: hałas toczenia oraz hałas aerodynamiczny. Zaprezentowane zostały wyniki pomiarów hałasu emitowanego przez pociągi Pendolino. Badania wykonano w 2013 r. na linii kolejowej numer 4. Przeanalizowano wpływ zespołu trakcyjnego na klimat akustyczny. Nowe pociągi zostały porównane do obecnie eksploatowanego taboru.

WSTĘP

Od czasów Rakiety Stephensona, która w 1829 r. na pierwszej linii kolejowej Manchester – Liverpool osiągnęła prędkość 46,8 km/h po aktualny rekord prędkości z 2007 r., kiedy to skład TGV rozpędził się do prędkości 574,8 km/h [17], ewoluowało wiele czynników i problemów związanych z eksploatacją kolei. Wzrost uzyskiwanych prędkości o ponad 500 km/h przez niespełna dwa wieki rozwoju techniki wymusza nieustanną czujność i systematyczne niwelowanie lub minimalizowanie nowych problemów. Jednym z problemów zwiększającym się proporcjonalnie do wzrostu szybkości pojazdu jest problem hałasu.

Na dźwięk emitowany przez przejeżdżający tabor składa się kilka czynników. Głównym źródłem hałasu jest hałas toczenia, silnie zależny od prędkości pociągu, wzrastający ok. 9 dB przy podwajaniu prędkości. Innym czynnikiem, jest hałas trakcyjny, słabo zależny od prędkości, z tego względu dominuje przy niższych szybkościach. Dźwiękiem, na którego wzrost prędkość ma największy wpływ jest hałas aerodynamiczny, stanowiący główne źródło problemu emisji akustycznej dla kolei dużych prędkości. Infrastruktura oraz geometria linii również mają wpływ na zjawiska akustyczne. Hałas na łuku, na moście oraz wzbudzony drganiami gruntu to kolejne składowe emisji. (na podstawie [15] [17])

1. HAŁAS KOLEJOWY

1.1. Hałas toczenia

Najważniejszym źródłem hałasu kolejowego jest dźwięk generowany na styku koła z szyną. Mimo, iż obszar styku każdego z kół z szyną wynosi ok. 1,5 cm², nierówności na ich powierzchniach prowadzą do powstania pionowych drgań w obu elementach. Rozprzestrzeniające się w materiale vibracje warunkują powstanie promieniowania dźwiękowego poszczególnych części, które łącznie tworzą dźwięk zwany hałasem toczenia.

Hałas na styku elementów spowodowany jest ich chropowatością. Podczas gdy mikro-chropowatość jest niezbędna dla przyczepności (m. in. podczas hamowania), makro-chropowatość jest zjawiskiem niepożądanym. Nierówności koła i szyny powodują przemieszczanie się elementów względem siebie. Jeśli na którejś z części stykowych (koło lub szyna) obecna jest fala o długości λ [m], a skład porusza się z prędkością v [m/s], to sinusoidalne drgania będą generowane z częstotliwością f [Hz] [15]:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

Drgania przekazywane są do obu struktur jednakowo, bez względu na to w którym elemencie (kole czy szynie) występują większe nierówności. Fale dźwiękowe powstałe w wyniku drgań emitowane są do powietrza w postaci hałasu. (na podstawie [9])

Dzięki wieloletnim badaniom hałasu toczenia, ustalono, iż poziom ciśnienia akustycznego zwiększa się logarytmicznie w stosunku do prędkości. Zjawisko to opisano wzorem [15]:

$$L_p = L_{p0} + N \cdot \log \frac{v}{v_0} \quad (2)$$

gdzie:

L_p – poziom dźwięku [dB] przy prędkości V [km/h]

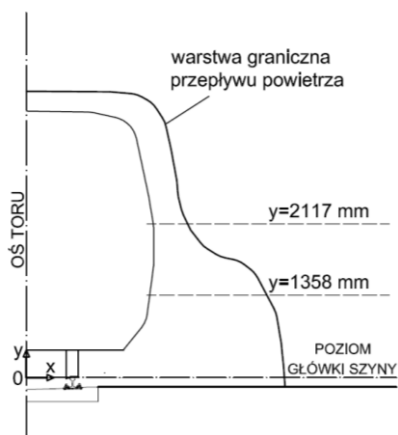
L_{p0} – poziom dźwięku [dB] dla prędkości V_0 [km/h]

N – stała ustalona na podstawie pomiarów z regresji liniowej, której wartość znajduje się w przedziale 25-35 (zwykle ok. 30) (na podstawie [15])

1.2. Hałas aerodynamiczny

W przeciwieństwie do pozostałych składowych hałasu – hałas aerodynamiczny generowany jest przez ruch cząstek w gazie, którym jest powietrze, a nie drganiami w ciałach stałych. Powodowany jest niestałym przepływem powietrza nad jadącym pociągiem, z tego względu silnie zależy od prędkości pojazdu. Zależność ta waha się od $60 \log(v)$ do $80 \log(v)$, podczas gdy hałas toczenia wykazuje zależność $30 \log(v)$, dlatego hałas aerodynamiczny staje się głównym źródłem dźwięku powyżej prędkości 250 - 300 km/h. (na podstawie [15])

Ruch powietrza w otoczeniu jadącego z dużą prędkością pociągu jest bardzo złożony. Obejmuje niejednorodne warstwy powietrza których przepływ zmienia się od swobodnego aż po zmniejszony do zera przy powierzchni pociągu – na skutek sił tarcia. Początkowo – przy przednich częściach składu przepływ odbywa się laminarnie. Równoległe warstwy powietrza poruszają się z różną prędkością, przez co szybko tworzą się turbulencje i zaburzenia w przemieszczaniu gazu przy powierzchniach pojazdu. Grubość warstwy granicznej definiowana jest jako średnia odległość od powierzchni pociągu, w której prędkość przepływu wynosi 99 % przepływu swobodnego. Badania wykazały, że warstwa ta ma względnie stałą grubość wzdłuż składu (zaczynając 2 m za czołem pociągu), jednak zmienia się istotnie wzdłuż pionowej osi pociągu. Ze względu na działanie podłoża oraz wpływ wózków (szczególnie pierwszego) największe wymiary osiąga przy samej nawierzchni, co ukazuje rysunek 1. (na podstawie [1] [14] [15])



Rys. 1. Schemat warstwy granicznej przepływu powietrza (na podstawie [14])

1.3. Normowe parametry hałasu kolejowego

Parametry wykorzystywane, do oceny badań „in situ” to: SEL (Sound exposure level), TEL (transit exposure level), $L_{Aeq,T}$ (short-term equivalent continuous sound level). Ekspozycyjny poziom dźwięku SEL jest poziomem ciśnienia akustycznego wywołanego przejazdem pociągu, znormalizowanym do czasu jednej sekundy. SEL obliczamy zgodnie ze wzorem [2]:

$$SEL = 10 \lg \left[\int_{t_1}^{t_2} \frac{P^2(t)}{P_{ref}^2} dt \right] dB \quad (3)$$

gdzie:

$t_1 - t_2$ – czas przejazdu pociągu, definiowany jako czas w którym poziom dźwięku osiąga wartość 10 lub 20 dB mniejszą od maksymalnego poziomu dźwięku

$p(t)$ – wartość chwilowa ciśnienia akustycznego w czasie t

p_{ref} – ciśnienie akustyczne odniesienia (20 μ Pa) [2]

Norma PN-EN ISO 3095:2005 (U) „Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe” określa również poziom TEL znormalizowany do czasu przejazdu pociągu przez przekrój pomiarowy. Czas przejazdu pociągu oblicza się jako długość pociągu liczona od zderzaka do zderzaka podzieloną przez prędkość pojazdu. TEL określa się wzorem [6]:

$$TEL = 10 \lg \left[\frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right] dB \quad (4)$$

gdzie:

T – czas trwania pomiaru [s]

T_p – czas przejazdu pociągu przez przekrój pomiarowy [s]

$p_A(t)$ – wartość chwilowa ciśnienia akustycznego skorygowana według charakterystyki częstotliwościowej A mierzonego sygnału akustycznego

p_0 – ciśnienie akustyczne odniesienia (20 μ Pa) (na podstawie [6] [2] [3] [15])

2. BADANIA HAŁASU W TRAKCIE PRZEJAZDU POCIĄGU EMU 250 Z PRĘDKOŚCIAMI DO 300 KM/H

W listopadzie 2013 r. przeprowadzono testy homologacyjne oraz prędkościowe jednego z dwudziestu nowo zakupionych pociągów Pendolino (EMU 250). Elektryczna jednostka trakcyjna kursowała na odcinku Psary – Góra Włodowska (długości około 36 km) znajdującego się w ciągu linii kolejowej nr 4 (Centralnej Magistrali Kolejowej). Pociąg kursował z prędkościami, nie osiąganymi do tej

pory na ziemiach polskich przez inne pojazdy szynowe (dotychczasowy rekord prędkości z 1994 roku wynosił 250,1 km/h). Dnia 24 listopada jednostka osiągnęła prędkość 293 km/h ustanawiając nowy rekord prędkości Polski i Europy Wschodniej. Istotą testów nie było jednak bicie rekordów, a uzyskanie homologacji dla pociągów przy prędkości eksploatacyjnej 250 km/h. W tym celu przy pomiarach wymagana była jazda z prędkością o 10% większą (rzędu 275 km/h). Podczas testów mierzono m. in. przyspieszenia i przemieszczenia szyn, drgania mechaniczne poszczególnych elementów nawierzchni kolejowej oraz hałas. Analizie poddano również warunki geotechniczne w otoczeniu Centralnej Magistrali Kolejowej. Pomiar prowadzono przez trzy weekendy listopada po torze nr 1 przy zamkniętych obu torach (kursował wyłącznie analizowany skład EMU 250). W dni robocze dokonano analogicznych badań dla jednostek rozkładowo kursujących po rzeczonym odcinku CMK. (na podstawie [7] [10] [13])

2.1. Metodyka badań

Pomiary hałasu generowanego przez tabor powierzono akredytowanemu laboratorium badawczemu Ekkom Sp. z o. o. Badania przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 3095:2005 (U) „Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe”. Pomiary hałasu w terenie („in situ”) wykonywano przy użyciu cyfrowych analizatorów i mierników dźwięku klasy 1 - SVAN 945A i SVAN 955. Stałą czasową detektora RMS13 ustawiono FAST (umożliwiająca pobieranie 8 próbek dźwięku na 1 sekundę). Spośród filtrów korekcyjnych A, C, Z, wybrano charakterystykę A – zgodną z normami IEC 651 i IEC 61672-114. Krzywa A odpowiada właściwościom ucha ludzkiego które najlepiej słyszy w częstotliwościach średnich (szczególnie w zakresie 1 – 5 kHz), a jest mniej czułe na częstotliwości niskie i bardzo wysokie. Na zmierzone wartości nałożono poprawki w pasmach tercjowych, tak by poziom dźwięku odpowiadał doznaniom słuchowym człowieka. Pomiary prowadzone były przy użyciu filtrów 1/3 oktawowych. Kalibrator klasy 1 RION typ NC-74 posłużył do sprawdzenia zgodności wskazań mierników poziomu dźwięku. Sprawdzenia dokonano przed i po pomiarach. Sprzęt użyty w trakcie badań posiada świadectwa wzorcowania akredytowanych laboratoriów wzorcujących. (na podstawie [2] [4] [5] [12])

2.2. Poligon pomiarowy

Pomiary przeprowadzono w trzech przekrojach linii kolejowej, oznaczonych odpowiednio A, B, C. Odcinek Psary – Góra Włodowska posiada spadek 6‰ w kierunku Góry Włodowskiej. W każdym z punktów pomiarowych dane zostały zbierane przez trzy odbiorniki umieszczone w odpowiednich odległościach w poziomie w stosunku do osi, w pionie w stosunku do wysokości główki szyny toru nr 1 rzeczonyj linii. Mikrofon nr 1 (zwany dalej M1) usytuowano w odległości 7,5 m od osi toru i na wysokości 1,2 m powyżej poziomu główki szyny. Mikrofon nr 2 (zwany dalej M2) znajdował się w odległości 7,5 m i na wysokości 3,5 m. Mikrofon nr 3 (zwany dalej M3) umieszczono w odległości 25 m i na wysokości 3,5 m. Wysokość nasypu przy odpowiednich poligonach pomiarowych nie była jednokowa, co skutkowało różnicą położenia odbiorników względem gruntu. Jako wysokość mikrofonów nad terenem przyjęto odpowiednio wysokości odbiorników w stosunku do główki szyny dodając odpowiednio, w punkcie A - 1,1m, w punkcie B - 2,3 m i w punkcie C - 0,9 m. Skład poruszał się po torze nr 1, zarówno w kierunku zasadniczym (zgodnym z rosnącym kilometrażem), jak i przeciwnym do zasadniczego. Rysunek 2 schematycznie przedstawia rozmieszczenie urządzeń pomiarowych na poligonach. (na podstawie [2] [13])

Badanie zostały przeprowadzone w starannie dobranych warunkach meteorologicznych zgodnie z normą PN ISO 1996-1:1999

Akustyka - Opis i pomiary hałasu środowiskowego - Arkusz 1: Podstawowe wielkości i procedury. Monitorowanie warunków atmosferycznych następowało przy użyciu termohigrometru i anemometru. Na podstawie danych uzyskanych za pomocą sprzętu pomiarowego uznano, iż warunki panujące na poligonach są sprzyjające i nie stwierdzono potrzeby korekcy meteorologicznej. (na podstawie [2] [13])

2.3. Analiza i interpretacja wyników

Pomiary w terenie służyły rejestracji ekspozycyjnego poziomu dźwięku SEL. Z uzyskanych danych, po uwzględnieniu czasu przejazdu przez przekrój pomiarowy wyliczono poziom ekspozycyjny TEL, zgodnie ze wzorem przedstawionym we wcześniejszych rozdziałach.

Analizie poddano poziom ekspozycyjny dźwięku TEL_A oraz maksymalny zmierzony ekspozycyjny poziom dźwięku TEL dla kolejnych prędkości.

Analizując wyniki, a priori przyjęto brak błędów grubych oraz wyników obarczonych nadmiernym błędem, które należałoby wyrzucić z serii.

Każdemu z odbiorników w punktach pomiarowych na podstawie odczytanych wartości przypisano funkcję logarymiczną opisaną wzorem:

$$f(v) = a \cdot \log v + b \quad (5)$$

gdzie:

$f(v)$ – ekspozycyjny poziom dźwięku TEL_A [dB]

v – prędkość [km/h]

a, b – stałe równania [dB]

Oś x jest osią prędkości (w km/h) w zakresie mierzonym podczas testów, oś y stanowi oś ekspozycyjnego poziomu dźwięku TEL_A [dB]. Wartości a i b są stałymi dopasowanymi tak, aby funkcja maksymalnie dokładnie opisywała badane zjawisko. Poprawność dopasowania modelu (funkcji) do rzeczywistości (zmierzonych danych) odzwierciedla współczynnik determinacji R^2 . Współczynnik przyjmuje wartości z zakresu 0-1, gdzie wartość 1 oznacza idealne odwzorowanie.

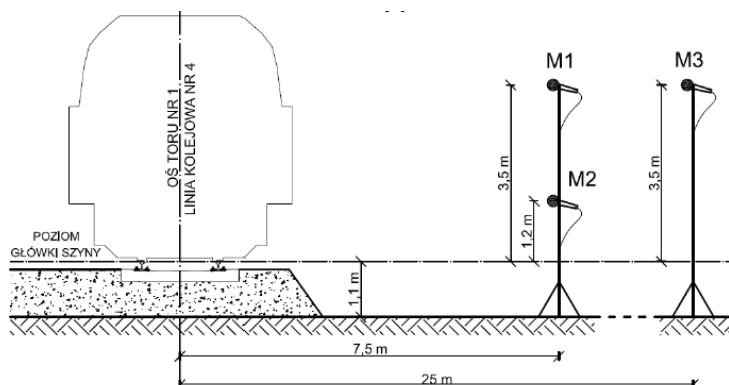
Mikrofony zostały umieszczone w sposób pozwalający różnicować główne źródło odbieranego dźwięku. Odbiornik usytuowany 7,5 m od osi toru po którym poruszał się skład i 1,2 m nad poziomem główki szyny (oznaczony M2) rejestrował hałas, którego dominujący źródłem były odgłosy emitowane na poziomie koła – szyna. Generowany w tym punkcie dźwięk jest przede wszystkim hałasem styku powierzchni koła i szyny, hałasem wózków, silnika oraz hałasem odbitym od gruntu. Na tej wysokości hałas aerodynamiczny występuje jako hałas przepływu powietrza przez wózki (szczególnie pierwszy) oraz przy „zderzeniu” ze ścianami bocznymi pojazdu. Hałas aerodynamiczny był głównym źródłem hałasu odbieranego przez odbiornik M1 (umieszczony jak M2 7,5 m od osi toru, ale na

wysokości 3,5 m nad główką szyny). W tym miejscu mikrofon słabiej „słyszał” dźwięki toczenia oraz inne generowane w niższych częściach układu tor - pojazd. (na podstawie [2])

Kierując się głównym źródłem wytwarzanych tonów analizowano funkcje otrzymane dla odbiorników M1 i M2 wszystkich poligonów pomiarowych. W każdym z analizowanych odcinków testowych otrzymaną funkcję $f(v)=a \cdot \log v + b$ rozpatrywano według dwóch składników: składowej a – stałej uzależniającej otrzymany wynik (poziom dźwięku) od argumentu funkcji (prędkości) i b – stałej niezależnej. Rozpatrując każdy poligon oddzielnie, funkcje odbiorników M2 posiadały wyższe współczynniki a , natomiast niższe współczynniki b niż mikrofony M1. Na podstawie wykresów wnioskuje się, iż hałas na wysokości 1,2 m nad poziomem główki szyny szybciej powiększa się wraz ze wzrastającą prędkością, jednak dla niższych prędkości otrzymywał wartość mniejszą niż hałas na wysokości 3,5 m. Wszystkie otrzymane współczynniki dopasowania modelu R przekraczały 0,99 – co świadczy o niemalże idealnym dopasowaniu funkcji do analizowanych danych.

Dokonano sumowania danych dla odbiorników M1 i M2 wszystkich poligonów pomiarowych (liczebność próby wyniosła 24 przejazdy), otrzymując dwie funkcje: M1: $f(x) = 27,9503 \log(x) + 40,1881$ i M2: $f(x) = 28,83 \log(x) + 38,604$, o współczynnikach determinacji kolejno 0,985 i 0,99. Zabieg ten potwierdził wcześniejszą tezę o zależności dominującego źródła dźwięku od prędkości. Dodatkowo z porównania obu funkcji wyznaczono prędkość graniczną przy której dźwięki odbierane mikrofonem M2 stawały się wyższe od dźwięków odbieranych mikrofonem M1. Prędkość ta wynosiła 63,2 km/h, a poziom ekspozycyjny dźwięku TEL_A 90,5 dB. Szybszy wzrost szumu wraz z powiększającą się prędkością dla mikrofonu umieszczonego bliżej powierzchni terenu potwierdza wcześniejsze doświadczenia, w których wykazano, iż grubość warstwy powietrza ulegającego turbulencjom jest większa przy niższych częściach pojazdu kolejowego. Rysunek 3 przedstawia schematyczną zależność położenia mikrofonów pomiarowych w odniesieniu do granicznych warstw biorących udział w tworzeniu hałasu aerodynamicznego.

Ponadto zwrócono uwagę na fakt, iż wraz ze wzrostem prędkości przesuwają się zakresy dominujących częstotliwości tercjowych. Częstotliwości na poziomie 1000 Hz przeważają przy niewielkich prędkościach, nie przekraczających 100 km/h. Przy ruchu z prędkością do 200 km/h maksima osiągane są dla częstotliwości rzędu 2000 Hz, przesuwać się do 3000 Hz dla prędkości 270 km/h. Zmiana zakresu częstotliwości 1/3 oktawowych wiąże się m.in. z dynamicznie powiększającym się udziałem hałasu aerodynamicznego w całościowej emisji akustycznej. (na podstawie [2])



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia mikrofonów na poligonie pomiarowym (na podstawie [2])

2.4. Porównanie hałasu emitowanego przez EMU 250 i pociągi rozkładowo kursujące po Centralnej Magistrali Kolejowej

Analogicznie jak dla ED 250 przeprowadzono pomiary ekspozycyjnego poziomu dźwięku TEL dla rozkładowo kursujących po linii kolejowej nr 4 pociągów. W punktach trzech poligonów pomiarowych (A, B, C) ustawiono odbiornik w odległości 7,5 m od osi toru nr 1 i na wysokości 3,5 m nad poziomem główki szyny (w pomiarach dla Pendolino oznaczane jako M1). Ekspozycyjny poziom dźwięku (SEL) rejestrowano dla dwóch rodzajów taboru pasażerskiego – dalekobieżnego składu InterCity (IC) kursującego z prędkością 160 km/h oraz regionalnego InterREGIO (IR) osiągającego szybkość 120 km/h. (na podstawie [2] [13])

Analizie poddano poziom ekspozycyjny dźwięku TEL_A oraz maksymalny zmierzony ekspozycyjny poziom dźwięku TEL dla kolejnych przejazdów taboru InterCity i InterREGIO.

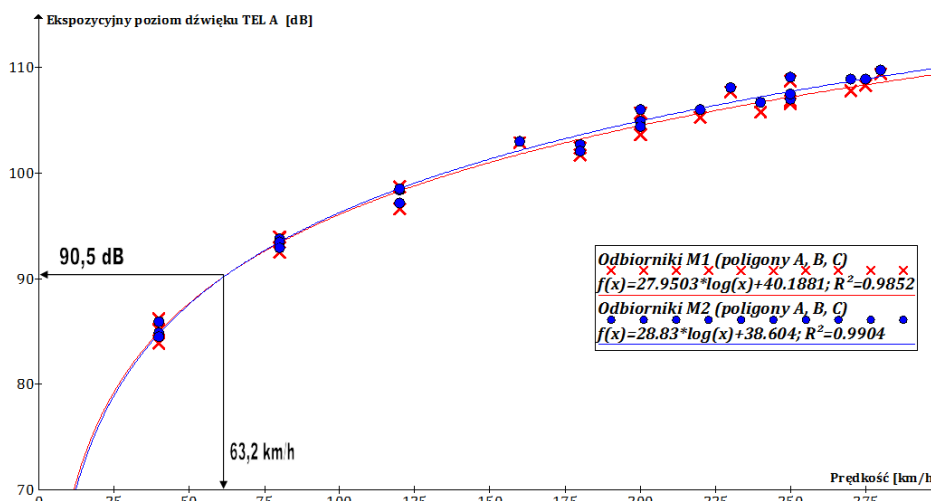
Do wykresów funkcji pociągu Pendolino obliczonych na podstawie danych mikrofonu M1, każdego z trzech poligonów pomiarowych przyrównano wartości uzyskane przez rozkładowo kursujące jednostki kolejowe. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 4. Linie ciągłe przedstawiają wyniki składu EMU 250, punktowo oznaczono informacje taboru IC i IR. Analogicznie porównano maksymalne wartości ekspozycyjnego poziomu dźwięku TEL i środkowe pasma tercjowe w których maksymalny poziom występował.

Dla każdego z punktów pomiarowych zestawiono pociągi Pendolino z pociągami InterCity i InterREGIO emitującymi zbliżone wartości ekspozycyjnego poziomu dźwięku TELA.

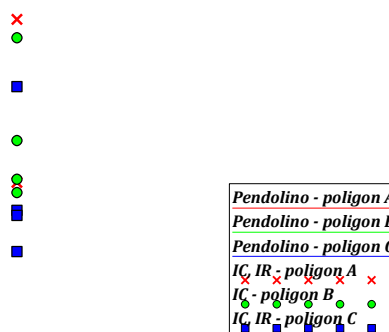
Poligon pomiarowy A charakteryzowały najniższe uzyskiwane poziomy dźwięków składu ED 250 przy jednoczesnych najwyższych poziomach dźwięku pociągów InterCity i InterREGIO (w stosunku do pozostałych poligonów pomiarowych). Różnica między rozkładem kursującymi jednostkami a nowym składem dochodziła do 10 dB zarówno dla IC, jak i IR. Zbliżony poziom dźwięku – ok. 106 dB zanotowano dla EMU jadącego z prędkością 240 km/h oraz IC z prędkością 160 km/h. Przy podanych prędkościach nowy skład w analizie widmowej rejestruje niższe wartości TEL dla częstotliwości tercjowych od 800 – 2500 Hz. Hałas rzędu 105 dB emituje Pendolino przy prędkości 220 km/h oraz InterREGIO przy 120 km/h. Widmo częstotliwości osiąga większe wartości dla IR przy częstotliwościach od 500 do 1600 Hz.

Punkt pomiarowy B cechowały mniejsze różnice emisji, nie przekraczające 4 dB. Pendolino o prędkości 200 km/h i InterCity o prędkości 160 km/h wytwarzały dźwięk rzędu 105 dB. IC osiągał wyższe częstotliwości w środkowym paśmie widma od 250 do 1600 Hz.

Stacja pomiarowa C wykazała najgorsze wartości poziomów dźwięku nowo zakupionego taboru, przy jednoczesnych najlepszych wynikach rozkładowo kursujących jednostek. Ekstremalne różnice



Rys. 3. Funkcja prędkość - poziom dźwięku TELA - porównanie odbiornika M1 i M2 (na podstawie [2])



Rys. 4. Porównanie zależności poziomu dźwięku od czasu dla pociągów Pendolino, InterCity i InterREGIO (na podstawie [20])

dochodziły do 2 dB na korzyść starszych pociągów. Przy uśrednieniu i porównaniu wszystkich przejazdów wykazano, iż przy prędkości 160 km/h składy EMU oraz IC emitowały hałas 102,9 dB, przy dominacji widma IC w zakresie od 160 do 16 000 Hz. Zbliżony hałas (102,2 dB) można było usłyszeć przy przejeździe pociągu InterREGIO z prędkością 120 km/h. Tylko dla częstotliwości 500 - 800 Hz oraz 1600 Hz, IR emitował wyższe tony niż ED.

Dokonano uśrednienia wszystkich przejazdów i pomiarów uzyskanych przy pomocy mikrofonu M1 dla wszystkich poligonów. Na tej podstawie, oszacowano, iż IC poruszające się z prędkością 160 km/h emituje hałas 104,4 dB, co odpowiada emisji Pendolino jadącego 199 km/h. IR przemieszczając się z szybkością 120 km/h emituje dźwięk 103,6 dB - na poziomie EMU jadącego z prędkością 186 km/h.

Wcześniejsze analizy odwołują się do wartości uśrednionych z próbek pobranych na wszystkich trzech poligonach pomiarowych zarówno dla taboru testowego jak i rozkładowo kursującego. Działania te mają wyłącznie charakter informacyjny sprzyjający lepszej wizualizacji i porównaniu zjawisk akustycznych wywołanych nowym i starym taborem. Jednakże, o ile uśrednianie wartości oddzielnych przejazdów tego samego pociągu z różnymi prędkościami lub różnych składów zdaje się być racjonalne, tak uśrednianie wartości otrzymanych w innych przekrojach linii staje się bezzasadne. Klimat akustyczny w otoczeniu linii kolejowej musi być spełniony w każdym punkcie wzdłuż całej jej długości. Nie może być mowy o zasadzie, w której jeden odcinek „nadrabia” klimatem za inny. Z tego względu do dalszej analizy stosuje się wartości w podziale na poligony lub wartości najbardziej niekorzystne. Zakładamy do analiz, pociąg Pendolino – który kursuje jeden egzemplarz we wszystkich badanych momentach i poligonach oraz pociągi InterCity i InterREGIO – dla których każdy pomiar reprezentuje inny, niepowtarzalny skład. Reasumując, do dalszych analiz wykorzystujemy jeden pociąg Pendolino na trzech poligonach (3 różne zestawy danych), 2 pociągi InterREGIO (po jednym na każdym z poligonów A i C) oraz 10 pociągów InterCity (2 na poligonie pomiarowym A, 4 na poligonie B, oraz 4 na poligonie C).

2.5. Emisja hałasu w świetle Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku

W Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku [9] oraz późniejszej zmiany rozporządzenia z dnia 1 października 2014 r. [8] określa się dopuszczalne poziomy emisji dźwięku powodowanego przez drogi lub linie kolejowe wyrażone wskaźnikami L_{AeqD} i L_{AeqN} . Dopuszczalne poziomy hałasu, odpowiadające adekwatnie porze dnia (16 godzin – przedział czasu 6:00 - 22:00) i porze nocy (8 godzin – przedział czasu 22:00 - 6:00), oblicza się wg wzorów [9]:

$$L_{AeqD} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^{16} 10^{0,1x_i}}{16} \right) \quad (6)$$

$$L_{AeqN} = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^8 10^{0,1x_i}}{8} \right) \quad (7)$$

Gdzie: x_i stanowi równoważny poziom dźwięku L_{Aeq} poszczególnych godzin doby.

Do obliczeń przyjęto poligon pomiarowy C – w którym pomiary emisji wykazały najbardziej niekorzystny wpływ przejazdów składu Pendolino na środowisko. Teren przy poligonie zgodnie z rozporządzeniem [52] zaklasyfikowano jako „teren zabudowy zagrodowej”. Dopuszczalne wskaźniki emisji dla danej kategorii zagospodarowania wynoszą $L_{AeqD} = 65$ dB, $L_{AeqN} = 56$ dB. Poziomy dźwięku SEL służące obliczeniu wskaźników L_{Aeq} mierzono dla przejazdów jed-

nostek z prędkościami odpowiednio 40, 80, 120, 160, 200, 230, 250 km/h.

Z dalszych analiz wyklucza się poziomy odpowiadające prędkościom poniżej 120 km/h, ze względu na ograniczenie przejazdów na linii kolejowej nr 4 jednostek z takimi prędkościami. Obliczono ilość przejazdów które przy odpowiednich prędkościach teoretycznie można wykonać nie przekraczając normowych wartości. Równoważne poziomy dźwięku wyznaczano dla punktu znajdującego się w odległości 25 m od osi toru oraz na wysokości 3,5 m względem główki szyny (położenie M3).

Ilość teoretycznych przejazdów ogranicza się ze względu na zajętość drogi. Założono jazdę w odstępie drogi – tu posterunków ruchu Psary – Góra Włodowska. Każdy z dwóch torów odcinka o długości 36 km może być w dowolnej chwili czasu zajęty tylko przez jeden pociąg. Przy założeniu czasu następstwa równego 1 minucie obliczono wydajność linii. Ilość pociągów przy ograniczeniach emisji akustycznej oraz ograniczeniach wynikających z zajętości drogi przedstawiono w tabeli 1. Można wnioskować, iż linia staje się najbardziej wydajna przy prędkości 160 km/h przepuszczając 114 pociągów. Najmniej efektywna ze względu na ilość przejazdów jest prędkość 250 km/h – w ciągu dnia na linię może wjechać 42 jednostki trakcyjne. Zastosowany na Centralnej Magistrali Kolejowej system ECTS zwiększa możliwości przepustowe linii. Większa liczba jednostek na odcinku ma jedynie znaczenie przy prędkości 120 km/h – zwiększa to liczbę możliwych przejazdów. Przy pozostałych prędkościach ilość eksploatowanych pociągów w ciągu doby determinowana jest przez względy akustyczne.

Teoretyczną liczbę przejazdów należałoby zweryfikować z realną liczbą potrzebnych połączeń i na tej podstawie ocenić klimat akustyczny w otoczeniu linii kolejowej. Z tego względu na podstawie sieciowego rozkładu jazdy obliczono ilość pociągów które w ciągu doby pokonują trasę Góra Włodowska – Psary, przejeżdżając przez miejsce lokalizacji poligonu pomiarowego C. Przy pomocy rozkładu [11] obowiązującego od 15 czerwca do 31 sierpnia 2014 r. uzyskano liczbę przejazdów w podziale na rodzaje pociągów, dni kursowania, pory dnia oraz kierunek jazdy. Maksymalną liczbę przejazdów w porze dnia (6:00-22:00) uzyskano w piątki – 17 pociągów, w tym 2 składy InterREGIO i 15 jednostek InterCity. Dla pory nocnej (22:00-6:00) ekstremalne wartości przejazdów – 3 pociągi InterCity datują się na noc z niedzieli na poniedziałek.

Tab. 1. Liczba przejazdów ograniczona emisją akustyczną i zajętością drogi (na podstawie [2] [8] [9])

pora	prędkość [km/h]	ilość przejazdów		
		emisja akustyczna	zajętość drogi	max
dzień (16 h)	120	230	101	101
	160	114	132	114
	200	70	162	70
	230	50	184	50
	250	42	199	42
noc (8 h)	120	14	101	14
	160	7	132	7
	200	4	162	4
	230	3	184	3
	250	2	199	2

Założono prędkość składów IR – 120 km/h i IC – 160 km/h w momencie przejazdu przez przekrój pomiarowy. Obliczono L_{AeqD} i L_{AeqN} dla trzech scenariuszy i trzech punktów pomiarowych (M1, M2, M3):

- Scenariusz I: ilość przejazdów oraz prędkość pozostaje niezmieniona, jednak wszystkie kursy realizowane są przez składy Pendolino.

- Scenariusz II: ilość przejazdów niezmienną, podniesiono prędkość relacji IR z 120 na 200 km/h, składu IC z 160 na 250 km/h w ciągu dnia, w ciągu nocy obliczono maksymalną możliwość podniesienia prędkości, aby dla odbiornika M3 zostały spełnione limity normowe, pociągi zastąpiono EMU 250.
- Scenariusz III: dane jak w scenariuszu II, lecz podwajamy ilość przejazdów.

Uzyskane dane przedstawiono w Tabeli 3, na czerwono oznaczono wartości L_{Aeq} , które przekraczają limity obowiązujące w Polsce. Żaden ze scenariuszy nie łamie normowych progów dla odbiornika umieszczonego w odległości 25 m od osi toru. Prawie wszystkie poziomy dźwięku zostają przekroczone dla odbiorników znajdujących się 7,5 m od osi toru.

Tab. 2. Funkcja prędkość - poziom dźwięku TELA - porównanie odbiornika M1 i M2 (na podstawie [8] [9] [11] [2] [13])

Dzień						
Scenariusz	Rodzaj relacji	Liczba przejazdów	Prędkość [km/h]	L_{AeqD} [dB]		
				M1	M2	M3
I	InterCity	15	160	65,5	62,5	56,4
	InterREGIO	2	120			
II	InterCity	15	250	66,4	66,8	60,8
	InterREGIO	2	200			
III	InterCity	30	250	69,4	69,8	63,8
	InterREGIO	4	200			
Noc						
Scenariusz	Rodzaj relacji	Liczba przejazdów	Prędkość [km/h]	L_{AeqD} [dB]		
				M1	M2	M3
I	InterCity	3	160	58,2	58,3	52,2
	InterREGIO	-	-			
II	InterCity	3	230	61,4	61,9	55,8
	InterREGIO	-	-			
III	InterCity	5/1	160/200	60,8	60,9	54,8
	InterREGIO	-	-			

PODSUMOWANIE

Przytaczając słowa „Rynku Kolejowego” [16] można napisać: Jeśli kolej dalekobieżna ma stać się atrakcyjna dla pasażera musi być szybsza minimum w wersji „dworzec w dworze” od samochodu w wersji „drzwi w drzwi” co najmniej o połowę. By kolej była konkurencyjnym środkiem transportu prędkość eksploatowanych pociągów musi stać na odpowiednim poziomie.

Centralna Magistrala Kolejowa, która stanowi „kręgosłup” kolei dużych prędkości w Polsce nie może dopuszczać ograniczenia prędkości ze względów akustycznych. Nawierzchnia oraz tabor muszą być tak przystosowane, by na całej długości linii nie zostały przekroczone normowe limity emisji dźwięku przy jednoczesnym podnoszeniu prędkości taboru.

Opirając się o źródła naukowe, hałas to złożona kwestia i nie jest możliwe odpowiednie ograniczenie emisji zwracając uwagę tylko na jedną składową i skupiając zainteresowanie tylko na jej niwelacji. Walka z hałasem musi być kompleksowa. Zakładanie barier dźwiękowych jak np. ekrany akustyczne również nie jest docelowym działaniem, zmniejsza jedynie miejscowo skutki, lecz nie eliminuje przyczyny problemu.

Eksploatacja w Polsce nowo zakupionego taboru Pendolino korzystnie wpłynie na klimat akustyczny linii kolejowych. Na podstawie ekspozycyjnego poziomu dźwięku TELA [dB] średni hałas emitowany przez rozkładowo kursujące pociągi InterCity o prędkości 160 km/h plasuje się na poziomie emisji akustycznej EMU o prędkości 199 km/h. Natomiast emisja InterREGIO przy 120 km/h odpowiada emisji Pendolino przy 186 km/h. Kolejnym aspektem jest bardzo duży rozrzut w wynikach uzyskiwanych przez IC i IR, dochodzące do różnicy 10 dB dla jednakowych prędkości. Spowodowane jest to niejednorodnością taboru każdego z przewoźników. W celu popra-

wy warunków dźwiękowych należałoby ograniczyć eksploatację odpowiednich jednostek trakcyjnych, a nie liczby ogólnie wykonywanych przejazdów przez wszystkie pociągi.

Analizie poddano pociągi przejeżdżające przez przekrój pomiarowy na odcinku między Górą Włodowską a Psarami. Przy ilości oraz prędkości obecnie eksploatowanych pociągów, prędkości zwiększonej do 200 i 250 km/h oraz zwiększonej prędkości przy podwojonej ilości przejazdów przy jednoczesnym użyciu jednostek EMU 250 obliczono wskaźniki L_{AeqD} i L_{AeqN} . Limity wskaźnika obowiązującego w ciągu dnia w odległości 25 m od osi toru we wszystkich analizowanych przypadkach zostały zachowane. W porze nocnej spełnienie normowych ograniczeń musi się wiązać z kompromisem między prędkością a ilością przejazdów.

Duża prędkość pociągów nie jest celem samym w sobie, a jedynie środkiem do realizacji celu jakim jest m. in. szybsze przemieszczanie się między miejscowościami, a co za tym idzie poprawa wygody i jakości życia użytkownika kolei. Jednak poprawa komfortu jednego człowieka (tu pasażera) nie może odbywać się kosztem pogorszenia warunków życia drugiego (tu osoby zamieszkującej tereny w otoczeniu linii kolejowych). Dlatego przy aspiracjach do tworzenia kolei dużych prędkości nie można nie zwracać uwagi na aspekty środowiskowe.

BIBLIOGRAFIA

1. Bohatkiewicz J. i Hałucha M., „Pomiary i analizy hałasu kolejowego,” edroga.pl, [Online]. Available: <http://edroga.pl/ochrona-srodowiska/procedury/36-pomiary-i-analizy-poziomu-halasu-dla-linii-kolejowych-wybrane-problemy-cz-i?showall=&limitstart=>.
2. Bohatkiewicz J., M. Hałucha, S. Biernacki, Ł. Pasternak i K. Kowalczyk, „Pomiary hałasu podczas przejazdów pociągu testowego EMU250 na Centralnej Magistrali Kolejowej (CMK),” Ekkom Sp. z o. o., Kraków, 2014.
3. Carvalho A. P. O., Oliveira P. D. S., Will high speed trains change Portuguese railway noise?, w NOISE-CON 2011, Portland, Oregon, 2011
4. Dębowy Świat „Mapa akustyczna - Dąbrowa Górnicza,” [Online]. Available: <http://mapaakustyczna.dabrowa-gornicza.pl/GeoSerwer/info/slownik.html>.
5. Lawrance T., Dakin J., Paul N. i Forni M., Noise and vibration from road and rail, London: Institution of Civil Engineers, 2011.
6. Norma PN-EN ISO 3095:2005 (U) „Kolejnictwo. Akustyka. Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe”.
7. Ogólnopolska Baza Kolejowa, Linia Grodzisk Mazowiecki - Zawiercie, [Online]. Available: <http://bazakolejowa.pl/index.php?dzial=linie&id=290&okno=przebieg>.
8. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 października 2014 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu, poz.826, Dziennik Ustaw Nr 120
9. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu, poz. 1109 Dziennik Ustaw Nr 120
10. Rynek Kolejowy, Po co były te rekordy, 1 grudnia 2013. [Online]. Available: www.rynek-kolejowy.pl.
11. Sieciowy Rozkład Jazdy – Tablica 100, 2014: PKP Polskie Linie Kolejowe S. A.
12. Svantek Sp. z o. o., Miernik poziomu dźwięku SVAN 955 - Instrukcja obsługi, Warszawa, 2009.
13. Stecz P., Chelmecki J., Jordanek B., Jurkiewicz P.,: Sprawozdanie z badania nr 11_01/2013, Laboratorium Badania Odkształceń i Drgan Budowli, Kraków 2013 r.

14. Talotte C., AERODYNAMIC NOISE: A CRITICAL SURVEY, Journal of Sound and Vibration, nr 231(3), pp. 549-562, 23 września 1999.
15. Thompson D., Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control, Institute of Sound and Vibration Research University of Southampton, UK, 2009.
16. Urbaniak J., Pendolino w szponach konkurencji, Rynek Kolejowy, pp. 42-43, październik 2013.
17. World speed record, Alstom, [Online]. Available: <http://www.alstom.com/transport/news-and-events/events/archives/world-speed-record/> Nowak J., *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. WKiŁ, Warszawa 2004.

NOISE PROPAGATION IN THE SURROUNDINGS OF HIGH-SPEED RAILWAY LINES

Abstract

The article describes the problem of noise emitted by rolling stock. The noise is presented as a phenomenon of sound and the problem for a man in the twenty-first century. These are the sources of railway noise: rolling noise, curve squeal, bridge noise, aerodynamic noise, ground noise and internal noise. The results of the tests Pendolino train recorded in 2013 on the railway line number 4 were presented. Analysed the effect of the traction unit on the acoustic climate. The new trains were compared to currently operated rolling stock.

Autorzy:

prof. dr hab. inż. **Włodzimierz Czyczuła** – Politechnika Krakowska
mgr inż. **Barbara Kożuch** – Politechnika Krakowska