

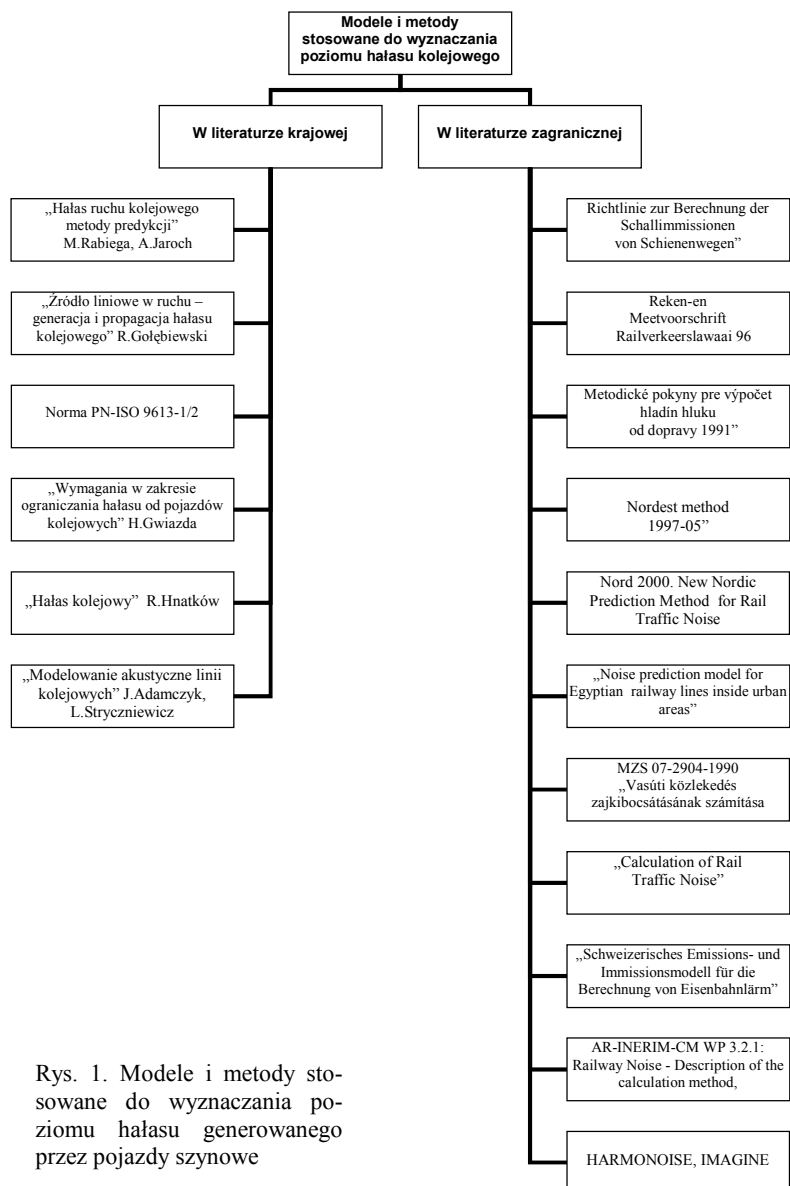
Metodyka obliczania poziomu dźwięku generowanego przez tabor kolejowy

Poprawa stanu środowiska i jakości terenów zurbanizowanych oraz zapewnienie zdrowego środowiska życia mieszkańcom państw europejskich to główne cele założone przez organy Unii Europejskiej. Ważną rolę odgrywa w tym programie również walka z hałasem generowanym przez pojazdy szynowe. W artykule przedstawiono analizę metod szacowania poziomu hałasu od pociągów opracowanych w krajach europejskich i innych. Główna uwaga zwrócona została na metodę holenderską, która jest rekomendowana przez UE.

1. Wstęp

Systematyczne rozszerzanie UE o nowe państwa, w tym Polskę wywołało szereg zmian prawnych w wielu dziedzinach nauki, również tych zajmujących się hałasem. Ogłaszane sukcesywnie przez Komisje UE nowe dyrektywy (np. 2001/16/WE [1], 2002/49/WE [2]) oraz normy (np. EN ISO 3095 [3]) mają na celu ujednoczenie przepisów dotyczących pomiarów poziomu hałasu, w tym również hałasu generowanego przez pojazdy szynowe. Dyrektywy te obligują państwa członkowskie do dostosowania się do nich lub sporządzenia własnych krajowych przepisów (np. Ustawa „Prawo Ochrony Środowiska” [4], Rozporządzenia Ministra Środowiska itp.) nie odbiegających merytorycznie od unijnych.

W dziedzinie obliczeń poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe do środowiska zalecaną metodą jest nazywana powszechnie „Metoda Holenderska”[5]. Jednak wiele krajów opracowało i stosuje własne modele (metody) pozwalające szacować poziom hałasu generowanego przez pojazdy szynowe, uwzględniające zarówno warunki środowiskowe jak i aspekt techniczny taboru w danym kraju. Modele te są na różnym poziomie szczegółowości od prostych (jedno lub dwu parametrycznych) do złożonych posiadających dużą liczbę parametrów.



Rys. 1. Modele i metody stosowane do wyznaczenia poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe

Wydaną w 08.2005r. normę EN ISO 3095 (PN-EN ISO 3095) [3] stosuje się do badań poziomu hałasu na zewnątrz pojazdów szynowych a wartości dopuszczalne określone zostały w załączniku Dyrektywy UE 2006/66 [22]

Analiza literatury krajowej jak i zagranicznej pozwoliła na wyodrębnienie kilkunastu modeli i metod wykorzystywanych do wyznaczania (szacowania) hałasu od pojazdów szynowych, co zostało przedstawione na rysunku 1. Istotę tych metod przedstawiono w niniejszej pracy, w której zawarto również wybrane modele (metody) wykorzystywane w innych krajach, nie tylko europejskich, do oceny poziomu hałasu generowanego i propagowanego przez pojazdy szynowe do środowiska.

2. Modele stosowane do wyznaczania poziomu hałasu kolejowego

2.1. Metoda holenderska („Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai 96”) wg AR-INTERIM-CM [5],

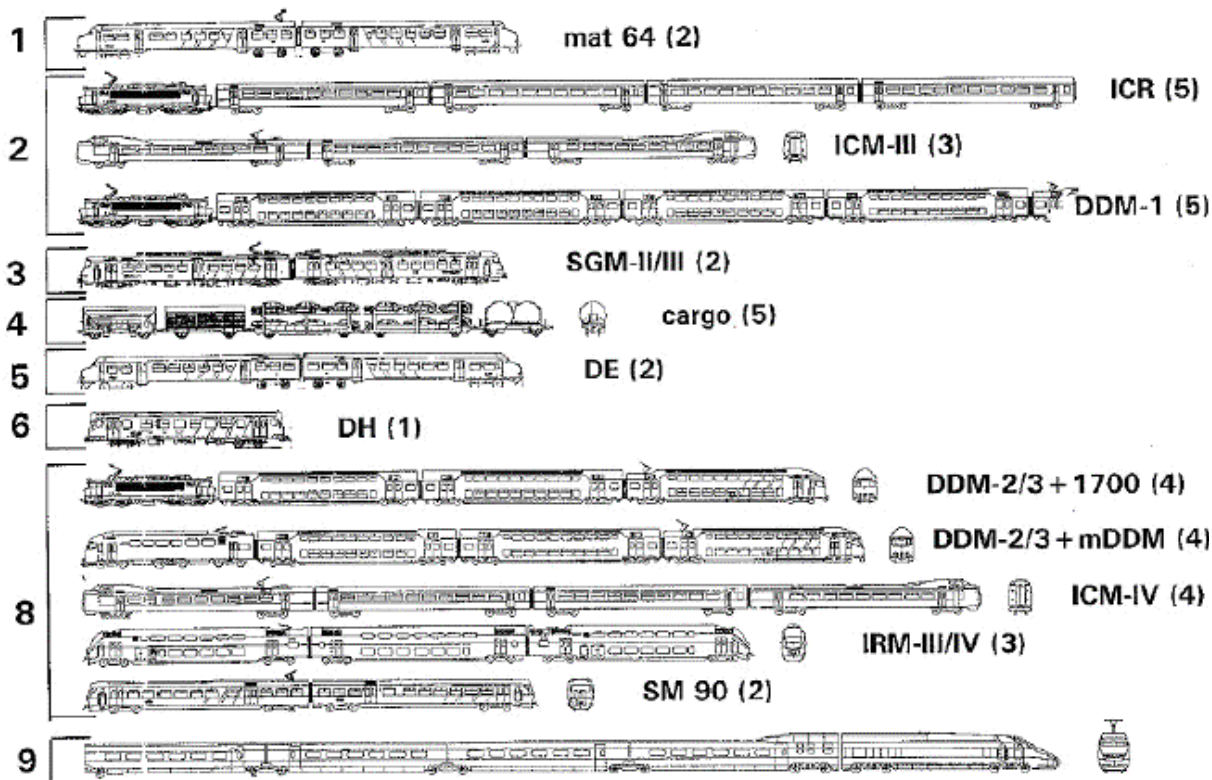
Pierwsza wersja „Metody holenderskiej” powstała w 1996r, w kolejnych latach wprowadzano do niej poprawki wynikające ze zmieniającego się prawa. Metoda została zarekomendowana przez UE jako oficjalna metoda do wyznaczania poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe w krajach Unii Europejskiej.

Zredagowany przez Wölfel Meßsysteme Software GmbH & Co projekt AR-INTERIM-CM, zawierający tłumaczenie tzw. Metody Holenderskiej z języka holenderskiego na angielski, znacznie przybliżył sposób wykorzystywania tejże metody. W poszczególnych rozdziałach opracowania przedstawiono m.in. kategorie pojazdów szynowych, standardową metodę obliczeniową (SRM I) oraz obliczenia propagacji hałasu w poszczególnych pasmach oktawowych (SRM II) [6].

W metodzie wszystkie pojazdy, które używane są na określonych liniach kolejowych podzielone zostały na kategorie (rysunek 2) ze względu na rodzaj napędu oraz zastosowany system hamulcowy.

Kategoria 1 - Pociągi pasażerskie wyposażone w hamulce klockowe

- wyłącznie elektryczne pociągi pasażerskie z hamulcami klockowymi wyposażonymi we wstawki żeliwne z odpowiednio dobraną lokomotywą dla danego rodzaju składu pociągu, zarówno pociągi serii 1964 z Holandii jak i pociągi pasażerskie należące do Kolei Niemieckich (DB);
- elektryczne pojazdy trakcyjne (w Holandii – np. pociągi pocztowe)



Rys. 2 Kategorie pojazdów szynowych wykorzystywanych w metodzie RMR

Kategoria 2 - Pociągi pasażerskie wyposażone w hamulce tarczowe oraz klockowe

- elektryczne pociągi pasażerskie wyposażone głównie w hamulce tarczowe i dodatkowym hamulcem klockowym ze wstawkami żeliwnymi z odpowiednio dobraną lokomotywą dla danego rodzaju składu pociągu, np. Intercity-Material IMC-III i DDM-1,
- pociągi pasażerskie należące do Kolei Francuskich (SNCF) i Trans Europe Express (TEE),
- lokomotywy elektryczne np. należące do Kolei Belgijskich (B) serii 1100, 1200, 1300, 1500, 1600 i 1700

Kategoria 3 - Pociągi pasażerskie wyposażone w hamulce tarczowe

- wyłącznie pociągi pasażerskie z hamulcami tarczowymi np. pociągi regionalne (SGM, Sprinter).

Kategoria 4 - Pociągi towarowe wyposażone w hamulce klockowe

- wszystkie rodzaje pociągów towarowych z hamulcami klockowymi ze wstawkami żeliwnymi

Kategoria 5 - Pociągi spalinowe wyposażone w hamulce klockowe

- spalinowe pociągi pasażerskie o napędzie spalinowo - elektrycznym, wyposażone w hamulce klockowe ze wstawkami żeliwnymi z odpowiednio dobraną lokomotywą dla danego rodzaju składu pociągu, np. typy DE I, DE II, DE III;
- spalinowo – elektryczne lokomotywy, np.: lokomotywy serii 2200/2300 i 2400/2500.

Kategoria 6 - Pociągi spalinowe wyposażone w hamulce tarczowe

- spalinowe pociągi pasażerskie z przekładnią hydrauliczną wyposażone w hamulce tarczowe

Kategoria 7 - Metro i szybka kolej miejska (np. tramwaje) wyposażone w hamulce tarczowe

- Metro i pociągi podmiejskiej szybkiej kolei

Kategoria 8 - Intercity oraz pociągi jeżdżące z mniejszymi prędkościami wyposażone w hamulce tarczowe

- wyłącznie elektryczne pociągi pasażerskie z hamulcami tarczowymi z odpowiednio dobraną lokomotywą dla danego rodzaju składu pociągu, np.: typy InterCities – ICM IV, IRM i SM90;
- elektryczne pociągi pasażerskie głównie z hamulcami tarczowymi i dodatkowym hamulcem klockowym ze wstawkami spiekanyymi lub żeliwnymi np. ABEX z odpowiednio dobraną lokomotywą dla danego rodzaju składu pociągu, np.: typy InterCities – ICM III i DDM-2/3.

Kategoria 9 - Pociągi dużych prędkości z hamulcami klockowymi i tarczowymi

- elektryczne pociągi pasażerskie głównie z hamulcami tarczowymi i dodatkowym hamulcem klockowym ze wstawkami żeliwnymi na wagonie silnikowym, np.: typy TGV-PBA lub HLS-South.

Kategoria 10 - Tymczasowo zarezerwowana dla pociągów dużych prędkości typu ICE-3 (M) (HST East)

- Pojazdy nie wymienione powyżej przydziela się do stosownej kategorii bazując na ich systemie napędnym i hamowania lub maksymalnej prędkości (tabela 1).

W metodzie sklasyfikowano rodzaje torowisk:

- tory kolejowe z szyn bezстыkowych na podkładach betonowych (pojedynczych lub podwójnych), na podsypce tłuczniowej,
- tory kolejowe z szyn bezстыkowych na podkładach drewnianych lub zygzakowatych betonowych, na podsypce tłuczniowej,
- szyny nie spawane na podsypce tłuczniowej, szyny stykowe lub pojedyncze zwrotnice,
- tory kolejowe na betonowych podkładach bez podsypki,
- tory kolejowe na betonowych podkładach umieszczonych na podsypce tłuczniowej,
- tory kolejowe z nastawnym mocowaniem szyn, bez podsypki (głównie na wiaduktach)
- tory kolejowe z nastawnym mocowaniem szyn na podsypce tłuczniowej,
- tory z wbudowanymi szynami
- tory kolejowe na przejeździe kołowym

Autorzy metody podkreślają, iż wyznaczenie współczynnika korekcji dla torów nie jest proste. Każdorazowo określa się wartości dla poszczególnych pasm oktawowych oraz osobno wartości dla każdej kategorii pojazdu szynowego.

Metoda RMR 1996 określa pięć możliwych wysokości pomiarowych (wysokości źródeł dźwięku):

- 0.0 m - na wysokości główki szyny,
- 0.5 m powyżej główki szyny,
- 2.0 m powyżej główki szyny,
- 4.0 m powyżej główki szyny,
- 5.0 m powyżej główki szyny,

Trzy ostatnie wysokości pomiarowe dotyczą wyłącznie pociągów dużych prędkości.

Maksymalne prędkości obliczeniowe dla poszczególnych kategorii pojazdów Tabela 1

Kategoria	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Max. prędkość [km/h]	140	160	140	100	140	120	100	160	300	330

Według metody SRM I równoważny poziom dźwięku powodowany ruchem kolejowym określa się w następujący sposób:

$$L_{Aeq} = E_s + C_{reflection} - D_{distance} - D_{air} - D_{soil} - D_{meteo} \quad (1)$$

gdzie:

E_s - złożona wartość emisji obliczana wg równania:

$$E_s = 10 \lg \frac{1}{127} \sum_{i=1}^n \phi_i 10^{E_i/10} \quad (2)$$

gdzie:

E_i - wartość emisji odcinka i (określona w §2 opracowania [6])

ϕ_i - kąt przy odcinku i , widziany z punktu odbioru

n - numer odcinka w granicach rozpatrywanej powierzchni

$C_{reflection}$ - wartość poprawki dla odbić, jeśli występują, pochodzących od budynków lub innych płaszczyzn odbijających

$$C_{reflection} = f_{obj} \quad (3)$$

gdzie:

f_{obj} - całkowita długość odcinka (równoległy do toru i prostopadły do punktu odbioru) po drugiej stronie badanego toru przez który rozprzestrzenia się dźwięk od odbitej powierzchni w zakresie

$$4(d_r + d_w) \quad (4)$$

d_r - odległość pomiędzy obiektem odbijającym a źródłem [m]

d_w - odległość pomiędzy punktem odbioru a źródłem [m]

$D_{distance}$ - wartość obniżająca poziom dźwięku, zależna od odległości

$$D_{distance} = 10 \lg r \quad (5)$$

gdzie:

r - najkrótsza odległość pomiędzy punktem odbioru a źródłem liniowym [m]

D_{air} - wartość obniżająca poziom dźwięku, wynikająca z pochłaniania przez atmosferę

$$D_{air} = 0.016r^{0.9} \quad (6)$$

gdzie:

r - najkrótsza odległość pomiędzy punktem odbioru a źródłem liniowym [m]

D_{soil} - wartość obniżająca poziom dźwięku, wynikająca z pochłaniania przez grunt

$$D_{soil} = 3B^{0.5} (1 - e^{-0.03r}) (1.25e^{-0.75(0.6h_{bs}+0.5)} + e^{-0.9h_w}) + 1.6B - 1.8 - 3(1 - B) \left(1 - e^{\frac{-0.01r}{h_w+h_{bs}+0.4}} \right) \quad (7)$$

gdzie:

B - współczynnik pochłaniania przez grunt, odcinek gruntu pomiędzy punktem odbioru a źródłem – niewybrukowany np. tłuczeń, trawa, grunty rolne uprawne lub nie, piaski, grunty na których nie uprawia się warzyw

r - najkrótsza odległość pomiędzy punktem odbioru a źródłem liniowym [m]

h_{bs} - wysokość źródła powyżej średniego poziomu terenu wewnątrz obszaru źródła [m]

h_w - wysokość punktu odbioru powyżej średniego poziomu terenu wewnątrz ocenianego obszaru [m]

D_{meteo} - wartość poprawki dla warunków meteorologicznych

$$D_{meteo} = 3.5 \left(1 - e^{-0.04 \frac{r}{h_w+0.6h_{bs}+0.5}} \right) \quad (8)$$

Jeśli wynik jest wartością ujemną, współczynnik D_{meteo} przyjmuje wartość zero.

Według metody SRM II równoważny poziom dźwięku w odległości r od źródła określa się w następujący sposób:

$$L_{Aeq} = 10 \lg \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N 10^{\Delta L_{eq,i,j,n}/10} \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta L_{eq,i,j,n}$ - określony udział w paśmie oktawowym i sektora j i źródła punktowego n

$$\Delta L_{eq,i,j,n} = L_E + \Delta L_{GU} - \Delta L_{OD} - \Delta L_{SW} - \Delta L_R - 58.6 \quad (10)$$

gdzie:

L_E - wartość emisji dla danej wysokości źródła w paśmie oktawowym

ΔL_{GU} - rozbieżność geometryczna i kierunkowość

$$\Delta L_{GU} = 10 \lg \frac{\phi \sin \nu}{r} \quad (11)$$

gdzie:

- r - odległość pomiędzy źródłem i punktem pomiarowym, mierzona wzdłuż najkrótszej linii łączącej te punkty [m],
- v - kąt pomiędzy sektorem powierzchni i odcinkiem źródła liniowego [w stopniach],
- ϕ - kąt otwarty sektora [w stopniach].
- ΔL_{OD} - tłumienie z powodu propagacji

$$\Delta L_{OD} = D_L + D_B + C_M \quad (12)$$

gdzie:

- D_L - wpływ powietrza,
- D_B - wpływ gruntu,
- C_M - współczynnik korekcji meteorologicznej.
- ΔL_{SW} - efekt ekranowania, jeśli występuje

$$\Delta L_{SW} = HF(N_f) - C_p \quad (13)$$

gdzie:

- H - skuteczność ekranowania,
- $F(N_f)$ - funkcja z argumentem N_f (= liczbie Fresnel'a),
- C_p - współczynnik korekcji zależny od profilu.
- ΔL_R - tłumienie z powodu odbić, jeśli występuje

$$\Delta L_R = N_{ref} \delta_{ref} \quad (14)$$

gdzie:

- N_{ref} - liczba odbić pomiędzy źródłem a punktem pomiarowym
- δ_{ref} - obniżenie poziomu wskutek odbicia
- $\delta_{ref} = -10 \log_{10}(0.8)$ dla budynków, w całym zakresie pasma oktawowego
- $\delta_{ref,i} = -10 \log_{10}(1 - \alpha_i)$ dla powierzchni pochłaniających, w paśmie oktawowym i
- $\delta_{ref} = 1$ dla każdej innej powierzchni, w całym zakresie pasma oktawowego
- α_i - współczynnik pochłaniania dźwięku w paśmie oktawowym i

2.2. Metoda niemiecka Schall 03 z 1990r. - („Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen“) [7]

Schall 03 to jedna ze starszych metod wyznaczania poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe opracowana w 1990r. dla Kolei niemieckich (Deutsche Bundesbahn).

Metoda ta określa poziom mocy akustycznej źródła emisji $L_{m,E}$ (dotyczy źródła) według następującej zależności:

$$L_{m,E} = 10 \cdot \log \left[\sum_i 10^{0,1 \cdot (51 + D_{Fz} + D_D + D_l + D_v)} \right] + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bu} + D_{Ra} \quad (15)$$

Zawiera liczne dodatkowe składniki - poprawki odnoszące się zarówno do pojazdu jak i torów.

Poprawki odnoszące się do pojazdu:

D_{Fz} - wpływ typu pojazdów szynowych (wartości zawarte w tabeli 2)

D_D - wpływ rodzaju hamulca

$$D_D = 10 \lg(5 - 0,04 \cdot p) \quad (16)$$

gdzie:

p - procentowy udział hamulców tarczowych w składzie pociągu (łącznie z lokomotywą)

D_l - wpływ długości pociągu

$$D_l = 10 \lg(0,01 \cdot l) \quad (17)$$

gdzie: l - suma długości pociągów w danej klasie na godzinę

przyjmuje się:

- długość lokomotywy 20 [m]
- długość wagonu pasażerskiego 26,4 [m]

D_v - wpływ prędkości pociągu

$$D_v = 20 \lg(0,01 \cdot v) \quad (18)$$

gdzie: v - dopuszczalna prędkość na danym odcinku

Poprawki odnoszące się do torów:

D_{Fb} - wpływ torowiska (wartości zgodnie z tabelą 3),

D_{Br} - wpływ mostu $D_{Br} = 3dB$,

D_{Bu} - wpływ przejazdów kolejowych

$D_{Bu} = 5dB$,

D_{Ra} - wpływ łuku torowego.

Wpływ rodzaju pojazdu D_{Fz} Tabela 2

Lp.	Rodzaj pojazdu	D_{Fz}^*
1	Pojazdy poruszające się z dopuszczalną prędkością $V > 100 km/h$, wyposażone w koła absorbujące hałas (np. Typ 401)	- 4
2	Pojazdy wyposażone w koła z hamulcami tarczowymi (Typ 403, 420, 472)	- 2
3	Pojazdy wyposażone w koła z hamulcami tarczowymi (wagony typu Bx , łącznie z lokomotywą)	- 1
4	Metro	2
5	Tramwaje	3
6	Pozostałe rodzaje pojazdów	0

Wpływ rodzaju toru D_{Fb} Tabela 3

Lp.	Rodzaj torowiska	D_{Fb}^*
1	Torowiska pokryte trawą - trawmwyje	- 2
2	Torowiska na podsypce tłuczniowej - podkłady drewniane	0
3	Torowiska na podsypce tłuczniowej - podkłady betonowe	2
4	Płyty betonowe - nie absorbujące	5

Do obliczeń wykorzystywane są również następujące dane:

- rodzaj pojazdu - wyróżnia się 14 kategorii pojazdów (tabela 4),

Prędkości oraz długości różnych kategorii pojazdów Tabela 4

Lp.	Kategoria pojazdu	Max. prędkość [km/h]	Średnia długość [m]
1	ICE	250	420
2	EC/IC	200	340
3	Pociągi regionalne	200	205
4	D – pociągi pospieszne FD – pociągi dalekobieżne	160	340
5	Pociągi przyspieszone	140	205
6	Pociągi podmiejskie	120	150
7	Pociągi kolei dojazdowych (Zespoły trakcyjne)	120	130
8	Pociągi kolei dojazdowych (Berlin)	100	70
9	Pociągi kolei dojazdowych (Hamburg)	100	130
10	Pociągi kolei dojazdowych (Nadrenia-Zagłębie Rury)	120	120
11	Pociągi towarowe (dalekobieżne)	100	500
12	Pociągi towarowe (regionalne)	90	200
13	Metro	80	80
14	Tramwaje	60	25

- rodzaj hamulca (tabela 5),

Procentowy udział hamulców tarczowych w składzie pociągu Tabela 5

Lp.	Kategoria pojazdu	Procentowy udział hamulców tarczowych na pojeździe	
		do 1988r.	do 2000r.
1	D – pociągi pospieszne FD – pociągi dalekobieżne	30%	100%
2	Pociągi przyspieszone Pociągi podmiejskie	20%	30%
3	Pociągi towarowe	0%	0%
4	wszystkie inne kategorie pojazdów	100%	100%

- długość i skład pociągu (tabela 4),
- prędkość (tabela 4),
- mosty,
- przejazdy kolejowe,
- łuki toru.

2.3. „Schall 03 2006“ – Nowa metoda niemiecka [8]

Nowa, niemiecka metoda służąca do wyznaczenia poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe, opracowana została wg zharmonizowanej metody obliczeniowej zawartej w Dyrektywie 2002/49/UE i opublikowana na międzynarodowej konferencji EURONOISE, która odbyła się w 2006r. w Tampere (Finlandia).

Obecnie stosowana metoda zawiera także liczne, parametry odnoszące się zarówno do pojazdu jak i torów. Metoda bazuje na poziomach dźwięku wyznaczanych w pasmach oktawowych, opisuje emisję hałasu na różnych wysokościach dla różnych kategorii pojazdów (np.: lokomotywy elektryczne, spalinowe, wagony pasażerskie towarowe, itp.), źródeł hałasu (hałas toczenia, hałas aerodynamiczny, hałas zespołu maszyn, hałas od silnika) oraz elementów źródeł hałasu (np.: chropowatość kół i szyn, hałas od pantografu oraz hałas od wentylatorów, wózków itp.).

Poziom mocy akustycznej emisji na jednostkę długości dla źródła zastępczego $L_{W'A,f,h,m,Fz}$ opisany jest następującym równaniem:

2.3. „Schall 03 2006“ – Nowa metoda niemiecka [8]

Nowa, niemiecka metoda służąca do wyznaczenia poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe, opracowana została wg zharmonizowanej metody obliczeniowej zawartej w Dyrektywie 2002/49/UE i opublikowana na międzynarodowej konferencji EURONOISE, która odbyła się w 2006r. w Tampere (Finlandia).

Obecnie stosowana metoda zawiera także liczne, parametry odnoszące się zarówno do pojazdu jak i torów. Metoda bazuje na poziomach dźwięku wyznaczanych w pasmach oktawowych, opisuje emisję hałasu na różnych wysokościach dla różnych kategorii pojazdów (np.: lokomotywy elektryczne, spalinowe, wagony pasażerskie towarowe, itp.), źródeł hałasu (hałas toczenia, hałas aerodynamiczny, hałas zespołu maszyn, hałas od silnika) oraz elementów źródeł hałasu (np.: chropowatość kół i szyn, hałas od pantografu oraz hałas od wentylatorów, wózków itp.).

Poziom mocy akustycznej emisji na jednostkę długości dla źródła zastępczego $L_{W'A,f,h,m,Fz}$ opisany jest następującym równaniem:

$$L_{W'A,f,h,m,Fz} = a_{A,h,m,Fz} + \Delta a_{f,h,m,Fz} + 10 \lg \frac{n_Q}{n_{Q,0}} dB + b_{f,h,m} \lg \left(\frac{v_{Fz}}{v_0} \right) dB + \sum c_{f,h,m} + \sum K \quad (19)$$

gdzie:

$a_{A,h,m,Fz}$ - poziom A mocy akustycznej przypadającej na jednostkę długości dla prędkości odniesienia $V_0=100$ km/h na torze o średniej jakości powierzchni szyn

$\Delta a_{f,h,m,Fz}$ - różnica poziomu w pasmach oktaowych f w dB,

n_Q - ilość źródeł dźwięku na jednostce pojazdu,

$n_{Q,0}$ - liczba odniesienia źródeł dźwięku na jednostce pojazdu,

$b_{f,h,m}$ - współczynnik prędkości,

v_{Fz} - prędkość,

v_0 - prędkość odniesienia, $v_0 = 100$ km/h

$c_{f,h,m}$ - poprawki poziomu dla rodzaju toru i powierzchni szyny,

K - poprawki poziomu dla mostów i uciążliwości hałasu.

Dalszy sposób wyznaczania poziomu dźwięku jest zgodny z metodą zalecaną w normie ISO 9613-2.

2.4. Metoda stosowana w Anglii ("Calculation of Rail Traffic Noise") [9] [21]

Metoda wyznaczania poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe stosowana w Anglii, w skrócie nazywana (CRN), stosowana jest m.in. w oprogramowaniu do tworzenia map akustycznych SoundPLAN. Pojazd szynowy traktowany jest jako źródło liniowe.

Rodzaje pojazdów szynowych oraz poprawka C_1

Tabela 6

Rodzaj pojazdu	Poprawka C_1 [dB(A)]
<i>Wagony pasażerskie – hamulce klockowe</i>	
- EMU klasa 421 lub 422	10.8
- Koleje Brytyjskie MK I lub II	14.8
<i>Wagony pasażerskie – hamulce tarczowe, 4 osiowe</i>	
- EMU klasa 319	11.3
- EMU klasa 465 i 466	8.4
- EMU klasa 165 i 166	7.0
- Koleje Brytyjskie MK III lub IV	6.0
<i>Wagony pasażerskie – hamulce tarczowe, 6 osiowe</i>	
<i>Wagony pasażerskie – hamulce tarczowe, 8 osiowe</i>	14.9
<i>Wagony towarowe - hamulce klockowe, 2 osiowe</i>	12.0
<i>Wagony towarowe - hamulce klockowe, 4 osiowe</i>	15.0
<i>Wagony towarowe - hamulce tarczowe, 2 osiowe</i>	8.0
<i>Wagony towarowe - hamulce klockowe, 2 osiowe</i>	7.5
<i>Lokomotywy spalinowe (ustalona prędkość)</i>	
- Klasa 20 i 33	14.8
- Klasa 31,37,47,56,59,60	16.6
- Klasa 43	18.0
<i>Lokomotywy spalinowe pod pełnym obciążeniem</i>	
- Klasa 20,31,33,37,43,47,56,59	0.0
- Klasa 60	-5.0
<i>Lokomotywy elektryczne</i>	
Eurostar – hałas toczenia (2 napędne wagony rozdzielone 14 lub 18 wagonami)	17.2
Eurostar – hałas wentylatorów (2 napędne wagony rozdzielone 14 lub 18 wagonami)	-7.4

Metoda określa rodzaje pojazdów (tabela 6) oraz torów (tabela 7) a także poprawki korygujące różnicę pomiędzy poszczególnymi kategoriami:

Rodzaje szyn/torów oraz poprawka Tabela 7

Opis szyn	Poprawka [dB(A)]
Szyny stykowe	2,5
Rozjazdy i skrzyżowania	2,5
Tory na płytach betonowych	2,0
Betonowe mosty i wiadukty (wykluczając ekranowanie przez bariery)	1,0
Stalowe mosty (wykluczając ekranowanie przez bariery)	4,0
Szyny bezpośrednio połączone z dźwigarem skrzynkowym	9,0

Obliczenia hałasu kolejowego wg. metody CRN przeprowadza się w następujący sposób:

1) Pojedyncze pojazdy SEL_v

- dla pojazdów nienapędnych:

$$SEL_v = 31.2 + 20 \log_{10} v + C_1 \quad (20)$$

- dla lokomotyw przy pełnej mocy:

$$SEL_v = 112.6 - 10 \log_{10} v + C_1 \quad (21)$$

C_1 – poprawka odnosząca się do pojazdu (tabela 7)

2) SEL_T dla pociągów o identycznym składzie

3) SEL_v przy każdej prędkości

$$SEL_v = SEL_T - 10 \log_{10} N \quad (22)$$

4) Całkowita wartość SEL dla każdego pociągu o identycznym składzie SEL_{Ti} :

$$SEL_{Ti} = SEL_v + 10 \log_{10} N \quad (23)$$

5) Obliczenia SEL_{Ref} dla każdego odcinka toru według udziału pociągów o identycznym składzie SEL_{Ti}

$$SEL_{Ref} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^{N_T} 10^{SEL_{Ti}/10} + \text{poprawka od toru} \quad (24)$$

6) Skorygowana wartość SEL w punkcie odbioru

$$SEL = SEL_{Ref} + C_{dist} + C_{abs} + \max(C_{ground}, C_{barrier}) + C_{view} + C_{reflection} \quad (25)$$

7) Dla każdego rodzaju toru na każdym odcinku toru obliczamy L_{Aeq} :

$$L_{Aeq,6h} = SEL - 43.3 + 10 \log_{10} Q_{NIGHT} \quad (26)$$

$$L_{Aeq,18h} = SEL - 48.1 + 10 \log_{10} Q_{DAY} \quad (27)$$

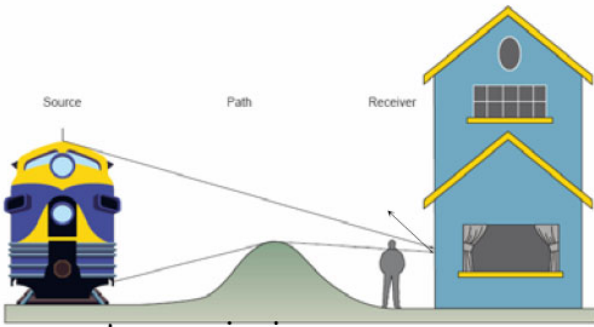
Q_{NIGHT} - jest liczbą pociągów tego samego typu, przejeżdżających przez punkt odbioru w okresie czasu: 00.00 – 06.00

Q_{DAY} - jest liczbą pociągów tego samego typu, przejeżdżających przez punkt odbioru w okresie czasu: 06.00 – 00.00

8) Obliczamy całkowita wartość L_{tot} poprzez połączenie składowych L_{Aeq}

$$L_{tot} = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right)$$

CRN określa również współczynniki (poprawki) na tłumienie wynikające z propagacji hałasu kolejowego w atmosferze (rysunek 3):



Rys.3. Propagacja hałasu w atmosferze

- tłumienie związane z odległością:

$$C_{dist} = -10 \log_{10}(d'/25), \quad d' > 10m \quad (29)$$

gdzie: d' - jest odległością od odcinka toru do punktu odbioru

- tłumienie przez atmosferę

$$C_{abs} = 0,2 - 0,008d' \quad (30)$$

- tłumienie przez grunt

$$C_{ground} = \begin{cases} -3P_d \log_{10}(d/25) \\ -0,6P_d(6-H) \log_{10}(d/25) \\ 0 \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} H \leq 1m \\ 1 < H < 6m \\ H > 6m \text{ lub } 10 < d < 25m \end{array} \right\} + C_{ballast} \quad (31)$$

gdzie: d - jest składową poziomą odległości od odcinka toru do obserwatora,

H - jest średnią wysokością propagacji (wysokość źródła + wysokość w punkcie odbioru)/2 – dla terenu płaskiego

P_d - jest to stopień pochłaniania gruntu pomiędzy źródłem a punktem odbioru

$$C_{ballast} = \begin{cases} -1,5dB^{*1} \\ 0dB^{*2} \end{cases} \quad (32)$$

*1 dla wszystkich odcinków toru, z wyjątkiem najbliższego obserwatorowi,

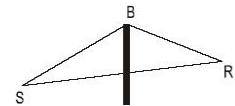
położonych na podsypce

*2 jeśli tory nie leżą na

podsypce

- poprawka na ekranowanie

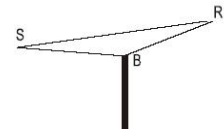
Strefa cienia



$$C_{barrier} = \begin{cases} -7.75 \log_{10}(5.2 + 203\delta) dBA \\ -21dB \end{cases} \quad (33)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 < \delta < 2.5m \\ \delta > 2.5m \end{array} \right\}$$

Strefa bezpośredniego oddziaływania

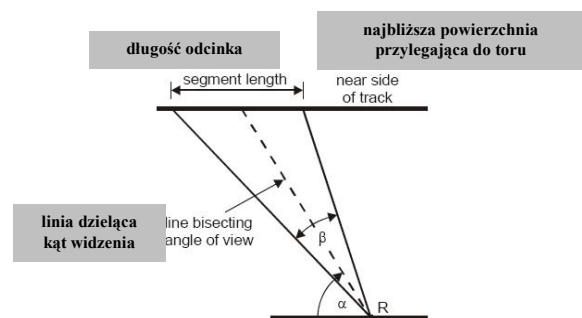


$$C_{barrier} = \begin{cases} 0.88 + 2.14 \log_{10}(\delta + 0.001) dBA \\ 0dB \end{cases} \quad (34)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 < \delta < 0.4m \\ \delta > 0.4m \end{array} \right\}$$

gdzie: $\delta = SB + BR - SR$ - jest różnicą długości drogi od źródła do punktu odbioru

- poprawka na kat widzenia



$$C_{view} = \begin{cases} 0 \\ -10 \log_{10}(\sin \alpha \sin(\beta/2)) \\ 10 \log_{10}(\beta - \cos(2\alpha)\sin(\beta)) - 5 \end{cases} \left. \begin{array}{l} \alpha \leq \beta/2 \\ \alpha > \beta/2^{*1)} \\ \alpha > \beta/2^{*2)} \end{array} \right\} \quad (35)$$

*1) & lokomotywy spalinowe pod pełnym obciążeniem

*2) & inne (nie spalinowe) lokomotywy pod pełnym obciążeniem

- poprawka na odbicia

$$C_{reflection} = \sum \begin{cases} + 2.5dBA^{*1)} \\ + 2.5dBA^{*2)} \\ + 1.5dBA^{*3)} \end{cases} \quad (36)$$

*1) jeśli punkt odbioru znajduje się 1m od fasady budynku

*2) jeśli punkt odbioru znajduje się po drugiej stronie ulicy (z budynkami), prostopadłe do linii kolejowej

*3) jeśli punkt odbioru znajduje się

2.5. Metoda stosowana w Austrii („ÖAL 30”) [10]

Metoda, opisana i stosowana w oprogramowaniu do tworzenia map akustycznych SoundPLAN. Wykorzystywana jest na trzy sposoby, pierwszy, standardowy opisujący emisję i propagację hałasu w pasmach oktawowych. Drugi, pozwala na zastosowanie metody do kalibracji modelu dla różnych pojazdów szynowych. Trzeci, stosuje ustalone standardy do wyznaczenia propagacji dźwięku.

Poziom dźwięku w punkcie odbioru L_i od elementu toru określany jest równaniem:

$$L_i = L_w - 11 + 10 * \log(\text{dlugosc odcinka}) + 20 * \log(1 / \text{odleglosc}) + 10 * \log(0.15 + 0.85 * \text{sqr}(S) / \text{sqr}(R)) \quad (37)$$

w którym do wartości poziomu mocy akustycznej odcinka toru odniesionego do 1m dodaje się następujące wartości poprawek:

- + 10 * log (dlugosc odcinka) poprawka na długość odcinka dla źródła zastępczego,
- + 20 * log(1 / odleglosc) spadek poziomu wraz z odległością,
- + 10 * log(0.15 + 0.85 * sqr(S) / sqr(R)) kierunkowość pociągu,

- + pochłanianie przez powietrze,
- + pochłanianie przez grunt,
- + ekranowanie.

2.6. Metoda wykorzystywana w Szwajcarii („Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm”) [11]

Model akustyczny stosowany w Szwajcarii nazywany w skrócie SEMIBEL, opracowany został w 1990r. Określa równoważny poziom dźwięku wg następującego równania:

$$L_{eq,z} = Summe \left\{ \begin{array}{l} A(w) + B(w) \cdot \log[v_{eff}(z)] + \\ + 10 \cdot \log[Lange(w)] + 10 \cdot \log[M(z)] \end{array} \right\} \quad (38)$$

$$L_{r,e} = L_{eq,e} + F + K1 \quad (39)$$

gdzie:

- $L_{eq,z}$ - ocena emisji hałasu pociągów z, dB(A)
- $L_{eq,e}$ - poziom emisji odcinka, dB(A)
- $L_{r,e}$ - poziom emisji odcinka, dB(A)
- w - typ wagonu
- z - typ pociągu
- v_{eff} - prędkość średnia, km/h
- $l(w)$ - długość danego typu wagonu w , m
- $M(z)$ - ilość pojazdów danej kategorii pociągów na godzinę, Z/h
- F - poprawka dotycząca torów, dB(A)
- $K1$ - poprawka poziomu dla hałasu jazdy, dB(A)

2.7. Słowacka metoda („Metodické pokyny pre výpočet hladín hluku od dopravy”) [12]

Metoda wykorzystywana na Słowacji do wyznaczania równoważnego poziomu dźwięku pojazdów szynowych obliczana wg równania:

$$Y = 40 + 10 \cdot \log X \quad (40)$$

gdzie:

parametr X obliczany jest wg następującej formuły :

$$X = 140 \cdot F_4 \cdot F_5 \cdot F_6 \cdot m \quad (41)$$

gdzie:

- F_4 - współczynnik wpływu trakcji,
- $F_4 = 1,0$ - dla trakcji spalinowej;
- $F_4 = 0,65$ - dla trakcji elektrycznej
- F_5 - współczynnik wpływu prędkości jazdy na odcinku pomiarowym,

$$F_5 = 0,241 \cdot e^{(0,024V)} \quad (42)$$

F_6 - współczynnik średniej ilości pojazdów (wagonów i lokomotyw) w składzie

$$F_6 = 0,0375z - 0,5 \quad (43)$$

m - średnia liczba pociągów pasażerskich podczas godziny

V - prędkość pojazdu

2.8. Metoda stosowana w krajach skandynawskich („nordtest method”) [13]

Metoda sporządzona w roku 1997, zawiera procedurę pomiaru równoważnego poziomu dźwięku od ruchu kolejowego zarówno na zewnątrz jak i wewnątrz budynków a także w otwartej przestrzeni. Metoda wykorzystuje do obliczeń następujące parametry:

- typ pociągu,
- prędkość i długość pojazdu,
- pora dnia w której wykonuje się pomiary,
- inne znaczące elementy.

Wyznaczenie wartości L_{Aeq} dla wybranego okresu dnia lub całego dnia dokonuje się wg zależności:

$$L_{eq,T} = -10 \lg(3600T) + 10 \lg \left[10^{L_{AE,type,1/10}} + 10^{L_{AE,type,2/10}} + \dots \right] dB \quad (44)$$

gdzie:

$L_{AE,1}$, $L_{AE,2}$ itd. - ekspozycyjne poziomy dźwięku poszczególnych typów pojazdów,

T - czas pomiaru w godzinach, dla wybranego okresu dnia lub dla całego dnia

$$L_{AE,type} = 10 \lg \left[\frac{L_{type}}{L_{type_i}} \left(10^{L_{AE,1/10}} + 10^{L_{AE,2/10}} + \dots + 10^{L_{AE,n/10}} \right) \right] dB \quad (45)$$

gdzie:

L_{type} - całkowita długość danego typu pojazdu w rozważanym okresie dnia

$L_{type,1}$ - długość pociągów, danego typu pojazdu w serii pomiarowej

2.9. Metoda stosowana w krajach skandynawskich („Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise”) [14]

Nowsza z metod opracowana dla Szwecji, Norwegii i Danii wykorzystywana do wyznaczania poziomu dźwięku od pojazdów szynowych. Metoda zawiera bardzo szczegółowy opis obliczeń, rodzaje parametrów wchodzących w skład modelu.

Model propagacji pozwala na określenie poziomu ciśnienia akustycznego w punkcie odbioru r , wyznaczany w pasmach tercjowych w zakresie 25 Hz – 10kHz wg zależności:

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r \quad (46)$$

gdzie:

L_W - poziom mocy akustycznej w granicach rozpatrywanego pasma częstotliwości,
 ΔL_d - efekt tłumienia rozbieżności sferycznej energii dźwięku

$$\Delta L_d = -10 \lg(4\pi R^2) \quad (47)$$

gdzie:

R - jest odległością pomiędzy źródłem a punktem odbioru

ΔL_a - efekt tłumienia wynikający z pochłaniania przez atmosferę, obliczany jest na podstawie ISO 9613-1,

ΔL_t - efekt tłumienia terenu (grunt i bariery),

ΔL_s - efekt tłumienia stref rozpraszających,

ΔL_r - efekt wpływu odbić.

2.9. Metoda stosowana w Egipcie („Noise prediction model for Egyptian railway lines inside urban areas”) [15]

Również takie kraje jak Egipt wprowadziły własny model wykorzystywany do oceny poziomu hałasu kolejowego. Dla każdej kategorii pojazdów (eksploatowanych przez koleje egipskie) można stosować trzy różniące się typy wzorów:

- logarytmiczny:

$$SPL = A \log(S) + B \log(d) + C \log(N) + D \quad (48)$$

- liniowy:

$$SPL = A(S) + B(d) + C(N) + D \quad (49)$$

- wykładniczy:

$$SPL = \text{Exp}[A(S) + B(d) + C(N) + D] \quad (50)$$

gdzie:

SPL - poziom ciśnienia akustycznego (dB),

S - prędkość pociągu w km/h,

d - odległość od toru w m,

N - liczba wagonów w składzie pociągu,

A, B, C, D - stałe współczynniki (różne dla każdego wzoru).

Przeprowadzone badania hałasu na kolejach egipskich dla różnych warunków posadowienia toru oraz pociągów wykazały że najmniejsze błędy uzyskano dla modelu liniowego.

2.11. Metoda stosowana na Węgrzech („Vasúti közlekedés zajkibocsátásának számítása”) [16]

Metoda węgierska opublikowana została w normie MZS 07-2904-1990. Równoważny poziom dźwięku obliczany jest na podstawie danych z ruchu dla referencyjnej odległości 25m od najbliższej osi toru, na wysokości 0.5 m nad główką szyny, dla pory dziennej (6:00 ÷ 22:00) i pory nocnej (22:00 ÷ 6:00).

Równoważny poziom dźwięku obliczany jest wg. zależności:

$$L_{Aeq,i}(25) = L_{0i} + 10 \cdot \lg Q_i + 10 \cdot \lg \frac{l_i}{l_{0i}} + 20 \cdot \lg \frac{v_i}{v_{0i}} \quad (51)$$

gdzie:

L_{0i} - poziom hałasu emitowany przez pojazd szynowy (dB),

Q_i - średnia liczba przejeżdżających pociągów w ciągu godziny,

l_i - długość pociągu [m],

l_{0i} - długość pociągu odniesienia [m],

v_i - prędkość pociągu km/h,

v_{0i} - prędkość odniesienia km/h.

2.12. Metoda przedstawiona w normie PN-ISO 9613-2 [17]

Przedstawiony w normie model obliczeniowy tłumienia hałasu pochodzącego od zbioru źródeł punktowych zalecany jest głównie do obliczeń hałasu generowanego przez przemysł jednak pewne jego elementy mogą być wykorzystane do prognozowania hałasu w obrębie dróg kolejowych.

Równoważny poziom ciśnienia akustycznego w pasmach oktaowych w punkcie odbioru dla propagacji z wiatrem przedstawia się następująco:

$$L_{fT}(DW) = L_W + D_C - A \quad (52)$$

gdzie:

L_W - poziom mocy akustycznej punkowego źródła dźwięku w paśmie oktaowym [dB]

D_C - współczynnik kierunkowości źródła [dB],

A - współczynnik kierunkowości źródła [dB],

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (53)$$

gdzie:

A_{div} - tłumienie wynikające z rozbieżności geometrycznej,

A_{atm} - tłumienie wynikające z pochłaniania przez atmosferę,

A_{gr} - tłumienie wynikające z wpływu gruntu,

A_{bar} - tłumienie wynikające z obecności ekranu,

A_{misc} - tłumienie wynikające z różnych innych zjawisk,

2.13. Model opracowany w Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie [18]

Przedstawiony poniżej model opublikowany został w materiałach konferencyjnych RAILWAY NOISE w 1999 r. Określa on sposób wyznaczenia równoważnego poziomu dźwięku A w punkcie obserwacji od i-tego źródła:

$$L_{Aeqi} = L_{Aeqi/1m} + L_{\Theta} - L_r - L_E - L_{gr} - L_z - L_{pow} \quad (54)$$

gdzie:

$L_{Aeqi/1m}$ - równoważny obliczeniowy poziom dźwięku A w odległości 1m od i-tego punkowego,

L_{Θ} - poprawka określająca charakterystykę kierunkową promieniowania,

L_r - poprawka uwzględniająca wpływ odległości,

L_E - poprawka na ekranowanie,

L_{gr} - poprawka uwzględniająca oddziaływanie gruntu,

L_z - poprawka uwzględniająca wpływ zieleni,

L_{pow} - poprawka uwzględniająca chłonność akustyczną powietrza.

2.14. Model opracowany w Politechnice Wrocławskiej [19]

Model zaproponowany przez zespół pracowników Instytutu Telekomunikacji i Akustyki PW powstał w 1994 r. W okresie, w którym opracowali model nie istniały jeszcze konkretne zalecenia międzynarodowe dotyczące metod obliczania hałasu kolejowego.

Przedstawiony schemat metody obliczeniowej pozwala na korzystanie z dwóch możliwych wariantów obliczeń

- wariant bazujący na modelu źródła liniowego i standaryzowanych poziomach odniesienia dla pociągu,

- wariant bazujący na modelu szeregu źródeł punktowych i poziomie mocy akustycznej poszczególnych wagonów.

Poniżej przedstawiono pierwszy wariant określający poziom dźwięku w dowolnym punkcie otoczenia, związany z przejazdem pociągu:

$$L = L_o + \Delta L_r - A_p - A_g - A_e - A_f \quad (55)$$

gdzie:

L_o - max L_{Amax} lub ekwiwalentny L_{Aeq} poziom dźwięku pociągu lub lokomotywy podawany dla różnych typów pociągów lub lokomotyw w punkcie odniesienia [dB],

ΔL_r - zmiany poziomu dźwięku ze wzrostem odległości od źródła [dB],

A_p - tłumienie dźwięku wprowadzane przez powietrze,

A_g - tłumienie dźwięku związane z zejściem fali akustycznej nad powierzchnią gruntu [dB],

A_e - dodatkowe tłumienie wynikające z warunków prowadzenia linii kolejowej [dB],

A_f - korekcja uwzględniająca wpływ powierzchni odbijających.

3. Projekty HARMONOISE, IMAGINE [20]

Realizacja programów HARMONOISE (Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU Directive on the Assessment and Management Of Environmental Noise) oraz IMAGINE (Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment) jest kontynuacją procesu harmonizacji metod i budowy standardu wspólnotowego. Zadaniem projektu Harmonoise było stworzenie inżynierskiego modelu oddziaływania hałasu komunikacyjnego, uwzględniającego drogi i koleje. Model inżynierski obowiązuje w zakresie od 25 Hz do 10 kHz. Obliczenia są wykonywane w pasmach 1/3 oktaowych. Osiągany jest różny stopień dokładności w zależności od klasy dokładności wprowadzonych danych. Dokładność modelu zmniejsza się z odległością od źródła i dla nierównomiernego terenu.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd modeli obliczeniowych stosowanych w różnych krajach na świecie. Modeli tych jest bardzo dużo, uwzględniają one różne parametry charakteryzujące m.in.:

- warunki środowiskowe danego kraju (np.: rodzaj i gęstość zieleni, warunki atmosferyczne, rodzaj gruntu);
- warunki techniczne pojazdów (np.: wpływ rodzaju klocków hamulcowych);
- stan torów, podtorza;

- kategorię pojazdów (elektryczne, spalinowe, pasażerskie, towarowe)
- położenie trasy kolejowej (nasyp, prosta, zagłębienie) itd.

Dokładność modeli obliczeniowych zależy m.in. od poprawnego doboru parametrów, ich ilości oraz dokładnej analizy ich wpływu na ostateczną wartość poziomu dźwięku (niektóre z tych parametrów mają nieznaczący wpływ, inne wręcz przeciwnie).

Poszczególne metody prognozowania hałasu są trudne do porównania również ze względu na odległość pomiarową, czas trwania pomiaru lub też porę dnia w której wykonuje się badania.

Ważnym zauważalnym wnioskiem jest to, iż istnieje niewątpliwa potrzeba stworzenia modelu (metody obliczeniowej) poziomu hałasu generowanego przez pojazdy szynowe dla polskich warunków zgodnie z obowiązującymi obecnie przepisami czy też adaptacja jednego z już istniejących.

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu wszystkie przedstawione modele (metody) nie zostały opisane szczegółowo, przedstawiono jedynie ich istotę.

5. Literatura

- [1] Dyrektywa 2001/16/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady Unii Europejskiej z dnia 19 marca 2001 r. w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych
- [2] Dyrektywa 2002/49/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady Unii Europejskiej z dnia 25 czerwca 2002 r. w sprawie oceny i kontroli poziomu hałasu w środowisku
- [3] EN ISO 3095 „Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles”
- [4] Prawo Ochrony Środowiska z dnia 27.04.2001r.
- [5] Reken-en Meetvoorschrift Railverkeerslawaa 96? Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 20 November 1996”
- [6] AR-INTERIM-CM (CONTRACT: B4-3040/2001/329750/MAR/C1), Adaptation and revision of the interim noise computation methods for the purpose of strategic noise mapping, WP 3.2.1: Railway Noise - Description of the calculation method,
- [7] „Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen - Schall 03“, information – Deutsche Bundesbahn – Akustik 03, Ausgabe 1990
- [8] U. Moehler, M. Liepert, U. Kurze, H. Onnich „The new German prediction model for railway noise „Schall 03 2006“ – some proposals for the harmonised calculation method in the EU Directive on Environmental Noise”, Euronoise 2006, 30.05 – 01.06, Tampere

- [9] SoundPLAN, „Calculation of Rail Traffic Noise - CoRTN” Chapter 6 – 6.3.2.4, str. 92-96
- [10] SoundPLAN, “ÖAL 30” Chapter 6 – 6.3.2.3, str. 89-92
- [11] SEMIBEL „Schweizerisches Emissions- und Immissionsmodell für die Berechnung von Eisenbahnlärm”, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 116, Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft Bern, März 1990
- [12] M.Liberko „„Metodické pokyny pre výpočet hladín hluku od dopravy”, Brno 1991
- [13] „nordtest method“ NT ACOU 098, project 1150-94, zatwierdzony w 05.1997
- [14] „Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1 Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction, DELTA 31.12.2000r., str. 11
- [15] Akram S. M. Kotb „Noise prediction model for Egyptian railway lines inside urban areas”
- [16] A. Pultznerova “Comparision of some calculation models for railway noise prediction” Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2005 na podstawie MZS 07-2904-1990, „Vasúti közlekedés zajkibocsátásának számítása”, 1990
- [17] PN-ISO 9613-2 „Akustyka – Zmniejszanie się rozchodzenia dźwięku w wolnym powietrzu, Część 2: Ogólne metody obliczania”
- [18] Adamczyk J., Stryczniewicz L., „Modelowanie akustyczne linii kolejowych” RAILWAY NOISE 99
- [19] M.Rabiega, A.Jaroch „Hałas ruchu kolejowego metody predykcji” Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej Nr 78, 1994
- [20] M. Rabiega, Ł. Jakielaszek, A.Jaroch „Harmonizacja europejskich metod obliczania hałasu kolejowego”
- [21] P.A. Meehan „Railway noise and control” Calculation of Railway Noise (CRN)
- [22] 2006/66/WE Decyzja komisji z dnia 23.12.2005r. dotycząca technicznej specyfikacji dla interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „tabor kolejowy – hałas” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych.