

PARTICULARITĂȚI ALE ZGOMOTULUI FERROVIAR

FEATURES OF RAILWAY NOISE

George DUMITRU¹, Radu Teodor COSTACHE², Mirel UNGUREANU³,
Elisabeta CRĂCIUN BOJE⁴, Andreea DRAGNEA⁵, Alexandra Simona DRAGNEA⁶

¹Autoritatea de Siguranță Feroviară Română - ASFR, Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România

e-mail autor: George DUMITRU: george.dumitru.cfr@gmail.com

²Rail Cargo Carrier România SRL - str. „Calea Bucureștilor”, nr. 21-25, Otopeni, România:

e-mail autor: Radu Teodor COSTACHE: radu.teodor.costache@gmail.com;

³Deutsche Bahn Cargo România SRL, str. „sergent Nuțu Ion”, nr. 44, clădirea „One Cotroceni Park Office”, corpul A, etajul 6, CP 050762, sectorul 5, București, România,

e-mail autor: Mirel UNGUREANU: Mirel.Ungureanu@deutschebahn.com;

⁴Autoritatea de Siguranță Feroviară Română - ASFR, str. „Calea Griviței”, nr. 393, sectorul 1, București, România, e-mail autor: Elisabeta CRĂCIUN BOJE: elisabetacraciunboje@afer.ro;

^{5,6}Cargo Trans Vagon SA, str. „Vaselor”, no. 34, sectorul 2, București, România, e-mail autor: Andreea DRAGNEA: andreeadrg6136@yahoo.com; Alexandra Simona DRAGNEA:

alexandra.dragnea@tts-group.ro;

Rezumat: *Calculul zgomotului produs de traficul feroviar se efectuează în benzi de o octavă, cu excepția calculului puterii acustice a sursei zgomotului. Pentru zgomotul produs de traficul feroviar în baza rezultatelor evidențiate în benzile de o octavă, nivelul mediu de presiune acustică pe termen lung, ponderat (atât pe timp de zi cât și pe timp de noapte).*

Cuvinte cheie: *zgomot, emisie, câmp de undă, vibrații acustice, trafic feroviar, frecvență.*

Abstract: *The calculation of the noise produced by the railway traffic is carried out in bands of one octave, except for the calculation of the acoustic power of the noise source. For rail traffic noise based on the results highlighted in one-octave bands, the long-term weighted average sound pressure level (both day and night).*

Keywords: *noise, emission, wave field, acoustic vibrations, railway traffic, frequency.*

1. INTRODUCERE

Puterea acustică a sursei de zgomot am considerat-o „câmp semideschis”, astfel încât să poată include efectul reflexiei pe sol sub sursa de zgomot modelată (considerată un tren de marfă remorcat de o locomotivă în simplă tracțiune, în absența oricăror obiecte considerate perturbatoare în vecinătatea imediată, cu excepția reflexiei pe suprafața căii de rulare (a infrastructurii feroviare) care nu se găsește imediat sub sursa modelată.

Am considerat de asemenea că emisiile de zgomot ale fluxului de trafic feroviar sunt reprezentate printr-o sursă liniară [5], caracterizată de puterea sa acustică direcțională per metru și per frecvență [7]. Aceasta corespunde sumei emisiilor de zgomot provenite de la vehiculele individuale aflate în compunerea trenului, iar analiza efectuată ține seama de timpul petrecut în parcurs de vehicule pe secțiunea de cale ferată respectivă.

Din principiu, toate valorile de intrare care afectează nivelul emisiilor unei surse de zgomot se stabilesc cel puțin cu acuratețea corespunzătoare unei incertitudini din nivelul

emisiilor sursei iar datele de intrare trebuie să reflecte utilizarea reală. În cadrul determinărilor experimentale, am considerat că fluxul de trafic feroviar este reprezentat printr-o sursă de zgomot liniară [7].

2. STABILIREA PUTERII ACUSTICE DIRECȚIONALE A ZGOMOTULUI SPECIFIC TRAFICULUI FEROVIAR

Zgomotul produs de traficul feroviar se determină prin însumare pentru toate frecvențele cu formula următoare:

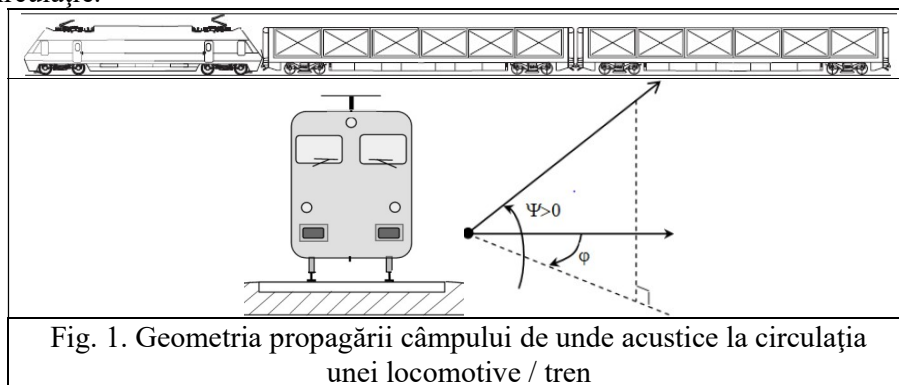
$$L_{Aeq,T} = 10 \times \lg \sum_{i=1}^{10} 10^{(L_{eq,T,i} + A_i)/10} \quad (1)$$

unde: A_i reprezintă corecția corespunzătoare ponderării pe curba de variație conform standardului IEC 61672-1, i este indicele benzii de frecvență [15] iar T reprezintă perioada de timp corespunzătoare analizei, măsurătorilor și determinărilor. Dacă se presupune un flux de trafic feroviar constant de Q_m trenuri din categoria m pe oră, atunci cu viteza medie v_m măsurată în [km/h], puterea acustică direcțională per metru în banda de frecvență i a sursei liniare $L_{W',eq,line,i,m}$, puterea acustică direcțională a unui singur vehicul feroviar din compunerea trenului este definită cu formula următoare:

$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W',i,m} + 10 \times \lg \left(\frac{Q_m}{1000 \times v_m} \right) \quad (2)$$

unde: $L_{W',i,m}$ este puterea acustică direcțională a unui singur vehicul feroviar din compunerea trenului iar $L_{W',m}$ este exprimată în [db], aceste niveluri de putere acustică calculându-se pentru fiecare bandă i de o octavă.

Fluxul de trafic Q_m se exprimă ca medie anuală pe oră (atât pe timp de zi cât și pe timp de noapte), pe clasă / tip de vehicule (categorie tren) și pe sursă liniară. Viteza v_m este viteza reprezentativă pentru categoria de vehicule: în majoritatea cazurilor, este vorba de valoarea cea mai mică dintre viteza maxim admisă de linie și categoria de tren [5]. În eventualitatea că nu pot fi prelevate sau nu pot fi disponibile măsurători efectuate și obținute prin determinări și măsurători, atunci se va utiliza viteza maxim admisă de linie în funcție de categoria trenului aflat în circulație.



Pentru determinarea fluxului de trafic feroviar, am presupus că toate trenurile aflate în circulație sunt compuse din aceleași tipuri de vehicule feroviare [1] din categoria m precum și că toate trenurile se deplasează cu aceeași viteză respectiv viteza medie v_m a fluxului de trafic feroviar. Astfel, un tren va fi modelat printr-un set de ecuații care reprezintă cele două surse principale de zgomot și anume zgomotul de rulare cauzat de interacțiunea roată - șină

PARTICULARITĂȚI ALE ZGOMOTULUI FERROVIAR

(zgomotul aerodinamic fiind inclus în sursa zgomotului de rulare), precum și zgomotul de propulsie produs de transmisia vehiculului motor (locomotiva) [2].

Pentru trenurile grele de marfă [3], puterea acustică [6] totală va corespunde sumei energetice dintre zgomotul de rulare și zgomotul de propulsie iar nivelul total de putere acustică [9] al surselor liniare $m=1,2,3,\dots$ cunoaște expresia:

$$L_{WR,i,m}(v_m) = 10 \times \lg \left(10^{L_{RR,i,m}(v_m)/10} + 10^{L_{WP,i,m}(v_m)/10} \right) \Rightarrow L_{WR,i,m=4}(v_{m=4}) = L_{WP,i,m=4}(v_{m=4}) \quad (3)$$

unde: $L_{WR,i,m}$ este nivelul de putere acustică pentru zgomotul de rulare și $L_{WP,i,m}$ este nivelul de putere acustică pentru zgomotul de propulsie.

Pentru vehiculele feroviare pe două osii [10] se ia în considerare pentru sursă numai zgomotul de propulsie, condiție impusă care este valabilă pentru toate intervalele de viteză de circulație a trenurilor. Nivelul de putere acustică al zgomotului de rulare în banda de frecvență i pentru un vehicul din clasa $m=1,2,3,\dots$ se determină cu formula:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \times \lg \left(\frac{v_m}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,i,m} \quad (4)$$

Coefficienții $A_{R,i,m}$ și $B_{R,i,m}$ sunt dați în benzi de octavă pentru fiecare categorie de vehicul și pentru o viteză de referință $v_{ref} = 70$ [km/h]. Creșterea emisiilor de zgomot de rulare trebuie să fie atribuită conform proporției de trenuri de călători și de marfă, raportat la o perioadă limitată, T_s (în luni) pe parcursul anului. Temperatura aerului afectează emisiile de zgomot de rulare, nivelul puterii acustice a zgomotului de rulare având tendințe de scădere atunci când temperatura aerului crește. Acest efect este introdus în corecția suprafeței căii de rulare iar corecțiile suprafeței de rulare a căii sunt de obicei evaluate la o temperatură a aerului de $\tau_{ref} = 20$ °C. În cazul unei temperaturi a aerului medii anuale diferite, zgomotul produs de contactul roată - șină trebuie să fie corectat prin:

$$\Delta L_{W,temp,m}(\tau) = K_m \times (\tau_{ref} - \tau) \quad (5)$$

Coefficientul de corecție este pozitiv (adică nivelul de zgomot crește) pentru temperaturi sub 20 °C și negativ (adică nivelul de zgomot scade) la temperaturi mai ridicate. Coeficientul K depinde de suprafața de rulare a șinelor de cale și de caracteristicile suprafețelor de rulare ale roților vehiculelor feroviare aflate în compunerea trenurilor din circulație. În cazul locomotivelor, emisiile de zgomot de propulsie includ toate contribuțiile motorului, eșapamentului, elementelor tracțiunii etc. Nivelul puterii acustice a zgomotului de propulsie în banda de frecvență i pentru un vehicul din clasa m este definit cu formula următoare:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \times \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m} \quad (6)$$

Coefficienții $A_{P,i,m}$ și $B_{P,i,m}$ sunt prezentați în benzi de octavă pentru fiecare categorie de vehicul și pentru o perioadă de referință raportată la viteza de croazieră medie a traficului feroviar $v_{ref} = 70$ [[km/h]. termenul $\Delta L_{WP,i,m}$ corespunde sumei coeficienților de corecție [11] care trebuie aplicați emisiei de zgomot de propulsie pentru condiții specifice de conducere sau condițiile de trafic (feroviar).

Declivitățile căii de rulare respectiv panta caracteristică produc două efecte asupra emisiilor de zgomot ale vehiculului feroviar și a trenului în general, prin afectarea vitezei trenului și astfel, modificarea emisiei de zgomot de rulare și de propulsie. Efectul pantei caracteristice a căii de rulare asupra zgomotului de propulsie este luat în considerare de un coeficient de corecție $\Delta L_{WP,grad,m}$ care este o funcție a declivității s (în %), viteza vehiculului v_m (în [km/h]) și categoria trenului.

În cazul unui trafic bidirecțional, este necesar să se împartă fluxul în două componente

și să se corecteze [12], respectiv jumătate pentru circulația trenurilor în rampă și jumătate pentru porțiunile de cale în pantă. De reținut este faptul că acest coeficient de corecție este atribuit tuturor benzilor de octavă în mod egal [17]. Pentru $m=1$:

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=1}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 6\%}{1\%} & s < -6\% \\ 0 & -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{Min(12\%;s) - 2\%}{1.5\%} \times \frac{v_m}{100} & s > 2\% \end{cases} \quad (7)$$

Pentru $m=2$:

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=2}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 4\%}{0.7\%} \times \frac{v_m - 20}{100} & s < -4\% \\ 0 & -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{Min(12\%;s)}{1\%} \times \frac{v_m}{100} & s > 0\% \end{cases} \quad (8)$$

Pentru $m=3$:

$$\Delta L_{WP,grad,i,m=3}(v_m) = \begin{cases} \frac{Min(12\%;-s) - 4\%}{0.5\%} \times \frac{v_m - 10}{100} & s < -4\% \\ 0 & -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{Min(12\%;s)}{0.8\%} \times \frac{v_m}{100} & s > 0\% \end{cases} \quad (9)$$

Coeficienții de corecție pentru zgomotul de rulare, $\Delta L_{WR,acc,m,k}$, și pentru zgomotul de propulsie, $\Delta L_{WP,acc,m,k}$, sunt funcții liniare [13] ale distanței x în [m] dintre sursa punctiformă și cea mai apropiată intersecție a sursei liniare respective cu o altă sursă liniară. Pentru suprafețele căii de rulare cu proprietăți acustice diferite de cele ale suprafeței de referință, se aplică un coeficient de corecție spectral [15], atât pentru zgomotul de rulare, cât și pentru zgomotul de propulsie al trenului. Coeficientul de corecție a suprafeței căii de rulare pentru emisia de zgomot de rulare este dat de expresia următoare:

$$\Delta L_{WR,road,i,m} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg \left(\frac{v_m}{v_{ref}} \right) \quad (10)$$

unde: $\alpha_{i,m}$ reprezintă corecția spectrală în [dB] la viteza de referință $v_{ref} = 70$ [km/h], pentru categoria $m = 1,2,3,\dots$ și banda spectrală i , iar β_m este coeficientul efectului vitezei asupra reducerii zgomotului de rulare pentru categoria $m = 1,2,3,\dots$ și este identic pentru toate benzile de frecvență [16].

Coeficientul de corecție a suprafeței căii de rulare pentru emisia de zgomot de propulsie este definit de următoare expresie:

$$\Delta L_{WP,road,i,m} = \min\{\alpha_{i,m}; 0\} \quad (11)$$

Modelul pentru zgomotul produs de traficul feroviar descrie emisii de putere acustică a zgomotului provenite de la o anumită combinație de tip de vehicul și de tip de linie care îndeplinește o serie de cerințe descrise în clasificarea vehiculului și a liniei, din punct de

PARTICULARITĂȚI ALE ZGOMOTULUI FERVIAR

vedere al unei serii de putere acustică $L_{W,0}$ [18] pentru fiecare vehicul. Zgomotul emis de fluxul de trafic de pe fiecare linie este reprezentat de un set de două surse liniare, caracterizate prin puterea lor acustică direcțională per metru și per bandă de frecvență [11]. Acesta corespunde sumei emisiilor sonore generate de vehiculele individuale din fluxul de trafic. Calculul puterii acustice direcționale per metru (contribuție la partea de propagare a zgomotului) provocată de traficul mixt mediu pe tronsonul j de cale, se face cu formula:

$$L_{W',eq,T,dir,i} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{x=1}^X 10^{L_{W',eq,line,x}/10} \right) \quad (12)$$

unde: T_{ref} reprezintă perioada de timp de referință pentru care este luat în considerare un flux mediu de trafic, t este indicele pentru tipurile de vehicule feroviare din compunerea trenului de pe tronsonul de cale j , s = indicele vitezei de circulație a trenului, p = indicele pentru tipurile de sursă fizică: 1 (zgomot de rulare și de impact), 2 (scrâșnet la circulația în curbe/peste încrucișări/joncțiuni la macazuti sau simple traversări), 3 (zgomot de tracțiune), 4 (zgomot aerodinamic), 5 (efecte suplimentare) iar $L_{W',eq,line,x}$ reprezintă puterea acustică direcțională x per metru pentru o sursă liniară, în condițiile în care rezistența sursei este exprimată din punct de vedere al sursei acustice direcționale per metru lungime de linie, o serie $L_{W,0,dir,i}(\psi,\phi)$ fiind luată în considerare pentru fiecare combinație vehicul - linie - viteză - condiții de deplasare, pentru fiecare tronson de cale ferată parcurs de traficul feroviar, înălțimile corespunzând valorilor: $h=1$ și $h=2$.

Nivelul de rugozitate L_r este definit ca fiind de zece ori logaritmul la puterea a zecea a pătratului valorii medii la pătrat r^2 a rugozității suprafeței de rulare a unei șine de cale ferată sau a unei roți de vehicul feroviar în direcția de deplasare longitudinală măsurat în [μm] pe o anumită lungime a șinei sau pe întreg diametrul roții, împărțit la valoarea de referință la pătrat r_0^2 , măsurat în [dB] [7]:

$$L_r = 10 \times \lg \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (13)$$

unde: $r_0 = 1$ [μm] iar r este valoarea efectivă a diferenței dislocării verticale de suprafața de contact la nivelul mediu.

Nivelul de rugozitate L_r reprezintă un spectru cu lungimea de undă λ și care se transformă într-un spectru de frecvențe $f = v/\lambda$, unde f este frecvența benzii centrale la o treime de bandă de octavă dată în [Hz], iar λ este lungimea de undă în [m], v fiind viteza trenului în [km/h]. Spectrul rugozității este o funcție a schimburilor de frecvență [15] pe axa de frecvență [16] pentru diferite viteze, iar după transformarea în spectru de frecvență [13] prin intermediul vitezei, este necesară obținerea de noi valori spectrale ale treimii benzii de octavă care reprezintă media dintre două treimi ale benzii de octavă corespunzătoare, în domeniul lungimii de undă. Pentru estimarea spectrului frecvenței rugozității efective totale (care corespunde vitezei adecvate a trenului), cele două treimi de benzi de octavă corespunzătoare definite în domeniul lungimii de undă vor reprezenta o medie din punct de vedere energetic și proporțional. Zgomotul de impact poate fi cauzat de aparatele de cale, putând fi luat în considerare pentru liniile sudate, variind ca magnitudine și putând domina zgomotul de rulare [7]. Nivelul implicit de rugozitate la impact este dat pentru o densitate comună de $n_1 = 0,01$ [m^{-1}], care este comună la fiecare 100 [m] de linie. Linia poligonală a traiectoriei de fază [16] poate fi aproximată cu o secvență de segmente:

$$H_k = a_k x + b_k, x \in [x_k, x_{k+1}] \Rightarrow \begin{cases} a_k = (H_{k+1} - H_k) / (x_{k+1} - x_k) \\ b_k = (H_k \cdot x_{k+1} - H_{k+1} \cdot x_k) / (x_{k+1} - x_k) \end{cases} \quad (14)$$

unde: $k \in \{1, \dots, n\}$ și aproximând succesiv cu metoda celor mai mici pătrate, se determină

ecuația liniei medii:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^3 - x_k^3) + \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) \\ B = \sum_{k=1}^{n-1} a_k (x_{k+1}^2 - x_k^2) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} b_k (x_{k+1} - x_k) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} a = \frac{3(2A - B(x_n + x_1))}{(x_n - x_1)^3} \\ b = \frac{2(x_n^3 - x_1^3)}{(x_n - x_1)^4} B - \frac{3(x_n + x_1)}{(x_n - x_1)^3} A \end{array} \right. \quad (15)$$

Pentru o sursă punctiformă S a puterii acustice direcționale $L_{W,0,dir}$ și pentru o bandă a frecvenței date, nivelul presiunii sonore continue echivalente [8] la un punct receptor R în condiții atmosferice date este obținut conform ecuației: $L_F = L_{W,0,dir} - A_F$, în care A_F reprezintă coeficientul de atenuare totală de-a lungul traiectoriei de propagare în condiții favorabile, A_{div} este coeficientul de atenuare datorat divergenței geometrice.

Pentru o anumită traiectorie și bandă de frecvență, nivelul sunetului în condiții omogene L_H , pentru o traiectorie oarecare S_R , se obține din suma logaritmică [12] a energiei sonore ponderate în condiții omogene și energia sonoră [7] în condiții favorabile, aceste niveluri ale sunetului fiind ponderate de probabilitatea medie [18] p a condițiilor favorabile în direcția traiectoriei:

$$L_{LT} = 10 \times \lg \left(p \cdot 10^{\frac{L_F}{10}} + (1-p) \cdot 10^{\frac{L_H}{10}} \right) \quad (16)$$

Nivelul sunetului total pe termen lung la un receptor oarecare, pentru o bandă de frecvență [7] se obține sumativ din contribuțiile energetice însumate din toate căile N , astfel:

$$L_{tot,LT} = 10 \times \lg \left(\sum_n 10^{\frac{L_{n,LT}}{10}} \right) \quad (17)$$

Dacă S' este sursa de tip imagine a S , atunci probabilitatea p' a traiectoriei (S',R) se consideră a fi egală probabilității p a traiectoriei (S_i, R), în care i este indicele benzii de frecvență. Pentru fiecare frecvență centrală a benzii de frecvență, diferența traiectoriei δ este comparată cu cantitatea $-\lambda/20$, unde λ este lungimea undei la frecvența centrală nominală a benzii de frecvență în cauză. Dacă un obstacol nu produce difracție (acest lucru fiind, de exemplu determinat conform criteriului lui *Rayleigh*) atunci, nu este necesară determinarea parametrului A_{dif} pentru banda de frecvență [19] în cauză. De asemenea, deformarea undei sonore este luată în considerare în calculul diferenței traiectoriei și pentru a calcula efectele solului înainte și după difracție. Dacă δ este diferența traiectoriei dintre calea difractată și calea directă, atunci coeficientul C'' utilizat pentru a lua în considerare difracțiile multiple, are expresia următoare:

$$C'' = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2} \quad (18)$$

Diferența traiectoriei δ este calculată într-un plan vertical care conține sursa și receptorul, aceasta fiind o aproximare în ceea ce privește principiul *Fermat* [9]. Astfel, diferența traiectoriei δ' asociate cu fiecare retrodifracție, este opusul diferenței traiectoriei dintre S și R relativ la fiecare muchie superioară a oricărui potențial obstacol interpus în calea frontului de unde acustice (sonore). În configurațiile complexe de propagare [15], difracțiile pot exista între reflexii sau între receptor și reflexii, situație în care, retrodifracția obstacolelor este estimată prin luarea în considerare a traiectoriei dintre sursă și primul punct de difracție [7]. Nivelul de expunere la sunet (sau zgomot) al unui singur eveniment [15] este exprimat exact cu expresia matematică următoare:

PARTICULARITĂȚI ALE ZGOMOTULUI FERVIAR

$$L_E = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L(t)/10} dt \right) \quad (19)$$

unde: $t_0 = 1$ [s] denotă un timp de referință [16], iar intervalul de integrare $[t_1, t_2]$ este ales pentru a asigura că (aproape) toate sunetele semnificative ale evenimentului sunt cuprinse.

La orice configurație a puterii d_i și d_{i+1} nivelul zgomotului $L(d)$ pentru o distanță intermediară d , între d_i și d_{i+1} este:

$$L(d) = L(d_2) + \frac{L(d_1) - L(d_2)}{\lg d_2 - \lg d_1} \cdot (\lg d_2 - \lg d) \quad (20)$$

$$\Rightarrow L(d) = L(d_{I-1}) - \frac{L(d_{I-1}) - L(d_I)}{\lg d_I - \lg d_{I-1}} \cdot (\lg d - \lg d_{I-1}) \quad (21)$$

Impedanța acustică [10] este în legătură cu propagarea undelor de sunet într-un mediu acustic este produsul densității aerului și al vitezei sunetului. Pentru o intensitate a sunetului dată (putere per unitate de suprafață) și percepută la o distanță specifică de la sursă, presiunea sonoră asociată (utilizată pentru a defini metricile câmpului de unde sonore [7]), depinde de impedanța acustică a aerului la locul de propagare / măsurare și este o funcție dependentă de temperatura, presiunea și altitudinea mediului ambiant (de propagare a câmpului de unde acustice). Coeficientul fracției energiei [13] reprezintă directivitatea longitudinală pronunțată a zgomotului, iar fracția energiei F este o funcție de forma:

$$\Delta_F = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{\pi} \left(\frac{\alpha_2}{1 + \alpha_2^2} + \arctan \alpha_2 - \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1^2} - \arctan \alpha_1 \right) \right] \quad (22)$$

Nivelurile sonore echivalente ponderate în timp, care reprezintă toată energia sonoră semnificativă emisă și propagată de sursa de zgomot (trenul aflat în circulație), se exprimă generic prin însumarea tuturor evenimentelor de zgomot N din intervalul de timp T_0 căruia i se aplică indicele de zgomot, în care $L_{E,i}$ este nivelul de expunere al unui singur eveniment sonor al evenimentul sonor i iar g_i este un factor de ponderare:

$$L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[\frac{t_0}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^N g_i \cdot 10^{L_{E,i}/10} \right] + C \quad \Rightarrow \quad L_{eq,W} = 10 \cdot \lg \left[\frac{t_0}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{(L_{E,i} + \Delta_i)/10} \right] + C \quad (23)$$

Ultima expresie reprezintă ecuația nivelului sonor echivalent cumulativ.

3. CONCLUZII

Contribuția vehiculului și contribuția liniei la zgomotul de rulare [4] sunt separate în patru elemente esențiale respectiv rugozitatea roților, rugozitatea șinei, funcția de transfer a vehiculului feroviar către roți și suprastructura căii de rulare precum și funcția de transfer a liniei de cale ferată.

Rugozitatea roților și a șinelor reprezintă cauza excitării vibrației în punctul de contact dintre șină și roată, iar funcțiile de transfer sunt de natură empirică și modelabile, reprezentând întregul fenomen complex al vibrației mecanice, de natură să genereze sunet pe suprafețele roții, șinei, traversei și ale suprastructurii liniei de cale ferată.

De reținut este și faptul că zgomotul de rulare este generat în principal de rugozitatea șinelor de cale și a roților vehiculelor feroviare, în lungimea de undă de la 5 la 500 de [mm].

Caracteristicile sonore ale suprafețelor de rulare ale șinelor căii ferate, variază în funcție de vechime și de nivelul de întreținere, cu tendința de a deveni mai zgomotoase în timp pe măsură ce avansează gradul de uzură.

Numărul vehiculelor din fiecare categorie se stabilește pe fiecare din tronsoanele de cale

ferată pentru fiecare dintre perioadele de timp care urmează să fie folosite în calculul zgomotului. Diferitele surse de zgomot echivalente ale liniei sunt poziționate la diverse înălțimi, totalitatea acestora fiind raportate la planul tangențial la cele două suprafețe superioare ale celor două șine de cale.

Sursele echivalente includ diferite surse fizice, împărțite în categorii distincte, în funcție de mecanismul de generare precum zgomotul de rulare (care include nu numai vibrația șinei și a prismeii căii, cât și vibrația roților / osiilor montate precum și zgomotul suprastructurii vagoanelor de marfă, zgomotul de tracțiune; zgomotul aerodinamic și zgomotul de impact (la traversări, joncțiuni, încrucișări, macazuri și joante; „scrâșnet”, stick-slip [7] și zgomotul cauzat de efecte suplimentare, precum poduri și viaducte, tuneluri sau proximitatea amplificatorilor / acceleratorilor câmpurilor de unde sonore (precum betoane și oțeluri).

BIBLIOGRAFIE

- [1] **Dumitru George**, „*Mecanica Trenurilor*”, ISBN 978-606-25-0484-7, Editura MatrixRom, București, 2019.
- [2] **Dumitru George**, „*Dinamica Locomotivelor*”, ISBN 978-606-25-0770-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [3] **Dumitru George**, „*Locomotive Electrice*”, ISBN 978-606-25-0769-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [4] **Dumitru George**, „*Locomotive Diesel*”, ISBN 978-606-25-0768-1, Editura MatrixRom, București, 2022.
- [5] **Udriște O., Jidveianu V.**, „*Locomotive diesel electrice și locomotive electrice*”, București, Centrul de documentare și publicații tehnice, M.C.F., 1966.
- [6] **Voinea R., Voiculescu D., Ceaușu V.**, „*Mecanică*“, E.D.P., București 1975.
- [7] **Sebeșan Ioan, Mazilu Traian**, „*Vibrațiile vehiculelor feroviare*” („*Vibrations Of The Railway Vehicles*”), Editura Matrix Rom, București, 2010.
- [8] **Dumitru George**, „*Studiul influențelor vibrațiilor rotorului motorului electric de tracțiune complet suspendat asupra fenomenului de hunting*”, Revista Căilor Ferate Române, nr. 2-4 / 2003.
- [9] **Dumitru George et autres**, „*Caracteristiques dynamiques specifique des locomotives serie BR 182 Siemens 64 U2 ES 1116 Taurus*”, Proceedings Of The International Scientific Conference CIBv, Vol. 2, ISSN 1843-6617, pp. 269 - 275, 12-13 November, 2010.
- [10] **Dumitru George & others**, „*The Measuring of the Hunting Oscillations Amplitude for Electric Locomotive 060 EA Class To Speeds Between 120 And 210 [km/h]*”, The 11th Youth Symposium On Experimental Solid Mechanics, ISSN: 978-606-19-0079-4, pp. 197 – 204, 2012, Brașov, Romania.
- [11] **Gauss Johann Carl Friedrich**, „*Summatio serierum quarundam singularium*”, Göttingen, 1811.
- [12] **Germain Sophie**, „*Memoir on the Vibrations of Elastic Plate - Referat privind vibrațiile plăcilor elastice*”, Paris, 1816.
- [13] **Hamilton William Rowan**, „*Theory of Systems of Rays*”, 1828.
- [14] **Heumann H.**, „*Grundzüge der Führung der Schienenfahrzeuge*”, Olandenburg - Verlag, 1954.
- [15] **Hilbert David**, „*Methoden der Mathematischen Physik*” - Vol. 1, 1924 / Vol. 2, 1937.
- [16] **Lagrange Joseph Louis**, „*Suite des réflexions sur la résolution algébrique des équations - Reflectii continue asupra rezoluției algebrice a ecuațiilor*”, 1771.
- [17] **Riemann Georg Friedrich Bernhard**, „*Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse - Funcții cu numere prime*”, Monatsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1859.
- [18] **Laplace Pierre Simon**, „*Philosophical Essay on Probabilities. Sources in the History of Mathematics and Physical Sciences*”, 1825.
- [19] **Kawahira K. & others.**, „*AC motor drive system for electircal vehicles*”, Tischiba Review (1989), pp. 14 – 19.