

STUDII EXPERIMENTALE PRIVIND PERCEPȚIA VIBRAȚIILOR GENERATE DE ECHIPAMENTELE DE CONSTRUCȚII ASUPRA OAMENILOR

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PERCEPTION OF VIBRATION GENERATED BY CONSTRUCTION EQUIPMENT ON HUMANS

Ș.I. dr. ing. Silviu NĂSTAC¹, Prof. univ. dr. ing. Mihaela PICU²

Universitatea "Dunărea de Jos", Galați
Str. Domnească, nr. 47, Galați, Romania
e-mail: ¹silviu.nastac@ugal.ro, ²mihaelapicu@yahoo.com

Rezumat: Aceasta lucrare studiază modul în care oamenii percep vibrațiile induse de un vehicul în mișcare, pornind de la Legea puterii a lui Stevens. Mărimea fizică măsurabilă a fost accelerația transmisă sistemului mână-braț. Măsurătorile au fost făcute cu 01dB MEASTRO. Un nou model a fost dezvoltat, bazat pe rezultatele acestui experiment. Modelul conceptual prezentat include creșterea disconfortului odată cu creșterea amplitudinii vibrațiilor, precum și cu durata de expunere.

Cuvinte cheie: Camioane, Vibrațiile sistemului mână-braț, Accelerațiile vibrațiilor (pe axele x, y și z), Legea puterii a lui Stevens

Abstract. This paper studies the way humans perceive vibrations induced by a running vehicle, starting from the Stevens' Power Law. The measurable physical magnitude was the acceleration transmitted to the hand-arm system. The measurements were made with MEASTRO 01dB. A new model was developed, based on the results of this experiment. The conceptual model presented included an increase in discomfort with vibration magnitude as well as an increase in discomfort with duration of exposure.

Keywords: Trucks, Hand-arm vibration, Vibration accelerations (x-, y- and z- axes), Stevens' Power Law

1. INTRODUCERE

Mintea nu poate fi descrisă, izolată, măsurată; în schimb se poate observa și măsura comportamentul omului în diferite situații. S-a constatat că organismul reacționează la stimuli organizând un răspuns în funcție de scopul urmărit. Conduita integrează factori biologici și sociali; ea este determinată de reacțiile psihofiziologice la unii stimuli, dar și de factori culturali, caracteristici contextului social.

Mulți cercetători [1], [2] au încercat o cuantificare a acestor factori de stres, a stimulilor externi; relația dintre impactul factorului de stres (semnal) asupra comportamentului omului (mărimea percepției ψ) și mărimea fizică a aceluiași semnal (ϕ), pentru un interval mare de stimuli, a fost cuantificată de Stevens și este cunoscută sub numele de Legea Puterii a lui Stevens:

$$\Psi = k \cdot \phi^\beta \quad (1)$$

unde Ψ este mărimea percepută, k este o constantă, ϕ este mărimea fizică și β este exponentul dependent de stimul.

Această cuantificare este cel mai bine reprezentată prin Scala Likert.

Scala Likert este o scală psihometrică, folosită pe scară largă în chestionare, la cercetarea de anchetă, astfel încât termenul este adesea folosit alternativ cu scală de evaluare, chiar dacă cele două nu sunt sinonime.

Tabel 1

Scala Likert a gradului de disconfort

Gradul de disconfort	Scală
Deloc	0-1
Puțin	1-2
Potrivit	2-3
Puternic	3-4
Foarte puternic	4-5

Formatul unui item Likert cu cinci niveluri situației în care s-a studiat disconfortul produs de vibrații asupra omului, a fost aplicat la toate determinările făcute.

De asemenea, a mai fost cuantificat confortul relativ la vibrațiile transmise corpului în timpul deplasării cu diferite camioane, prin intermediul Indicelui lui Sperling [3], [4].

$$W_z = 10 \sqrt[n_f]{\sum_{i=1}^{n_f} W_{Z_i}^{10}} \quad (2)$$

unde n_f este numărul total de frecvențe discrete ale răspunsului accelerației vehiculului identificate de FFT, iar W_{Z_i} este indicele de confort corespunzător celei de-a i frecvență discretă.

Odată ce au fost obținute mărimile vibrațiilor (pentru axa cea mai nefavorabilă), este posibil să se calculeze durata de timp pentru care un vehicul poate fi condus înainte de a se ajunge la pragurile date în Tab. 2.

Tabel 2

Limita de expunere zilnică și valorile de acțiune pentru vibrațiile transmise întregului corp așa cum sunt specificate în Directiva UE referitoare la vibrații (2002/44)

Valoare de expunere de la care se declanșează acțiunea (EAV)	Valoare limită de expunere (ELV)
0.5 m/s ² A(8) r.m.s.	1.15 m/s ² A(8) r.m.s.
9.1 m/s ^{1.75} VDV	21 m/s ^{1.75} VDV

Această durată de timp [h], pentru a atinge valoarea de expunere care declanșează acțiunea (EAV) și valoarea limită de expunere (ELV), folosind calculele VDV este dată de:

$$T_{EAV_{VDV}} = t \left(\frac{9.1}{VDV} \right)^4 \quad \text{și} \quad T_{ELV_{VDV}} = t \left(\frac{21}{VDV} \right)^4 \quad (3)$$

unde t (h) este timpul, iar VDV mărimea ponderată a VDV pe axa cea mai nefavorabilă.

VDV este definit ca valoarea maximă a accelerației r.m.s. ponderate calculată pe o perioadă scurtă de timp (timpul de integrare), pe domeniul discret de timp prin [5]:

$$VDV = \max \left(\sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{n=n_0}^{n_0+\tau} a_w(n^2)} \right) \quad (n_0 = 0, 1, 2, \dots, N-1-\tau) \quad (4)$$

unde $a_w(n)$ este accelerația ponderată curentă, τ timpul de integrare și N numărul total de măsurări. ISO 2631-1 [10] recomandă utilizarea valorii de 1s pentru timpul de integrare, adică pe domeniul discret de timp $\tau=1/v_s$, unde v_s este frecvența măsurării respective.

2. STUDII PRIVIND NIVELUL PERCEPȚIEI VIBRAȚIILOR DE CĂTRE OM

În vederea realizării acestui studiu, au fost luate în considerație transmiterea vibrațiilor prin mână (HAV), iar experimentele au fost realizate în pe șoferi de camioane. Pentru a studia modul în care omul percepe HAV, s-a lucrat cu un grup de 6 șoferi de camioane, cu vârste cuprinse între 34-48ani, care au fost expuși la vibrații de diferite accelerații, iar opinia lor a fost înregistrată pe scala Likert, unde cu MP s-a notat mărimea percepției șoferilor față de vibrațiile transmise prin mână de la volan. Aceste valori ale MP s-au obținut prin medierea valorilor estimate de fiecare șofer în parte, deoarece este imposibil să se repete două experimente în mod identic (Fig. 1). Au fost măsurate accelerațiile transmise de volan prin sistemul mână-braț cu Maestro 01dB, folosind accelerometre triaxiale. Accelerațiile r.m.s. măsurate au fost: 0,22; 0,54; 1,8; 2,2; 2,5 și 4,6m/s², timp de 10min. Experimentele au avut loc pe diferite tipuri de drumuri.

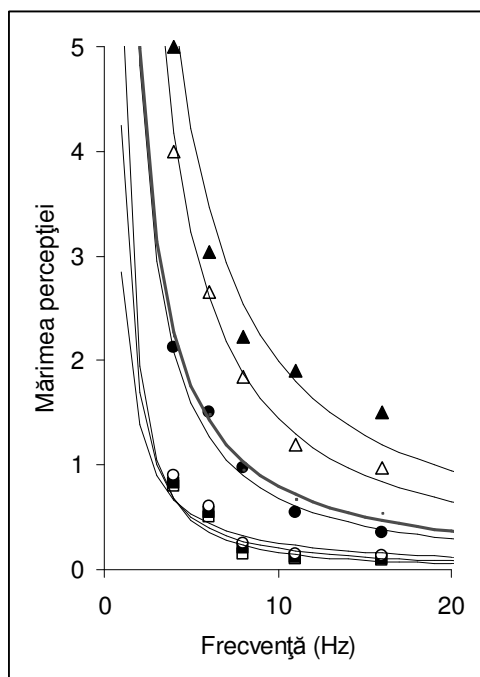


Fig. 1 Mărimea percepției șoferilor față de vibrațiile transmise prin mână de la volan
() 0,22m/s²; (■) 0,54m/s²; (o) 1,8m/s²;
(●) 2,2m/s²; (Δ) 2,5m/s²; (▲) 4,6m/s²

Pentru fiecare din aceste curbe, am determinat ecuația ce o guvernează:

Pentru: 0,22m/s ²	$\Rightarrow MP=8,517v^{-1,7486}$	(R ² =0,8959)
Pentru: 0,54m/s ²	$\Rightarrow MP=8,4624v^{-1,6794}$	(R ² =0,9335)
Pentru: 1,80m/s ²	$\Rightarrow MP=2,8506v^{-1,0443}$	(R ² =0,9324)
Pentru: 2,20m/s ²	$\Rightarrow MP=11,191v^{-1,2141}$	(R ² =0,9792)
Pentru: 2,50m/s ²	$\Rightarrow MP=20,707v^{-1,1558}$	(R ² =0,9945)
Pentru: 4,60m/s ²	$\Rightarrow MP=24,094v^{-1,082}$	(R ² =0,9619)

Se vede că aceste curbe sunt de tipul:

$$MP \sim v^{const} \quad (5)$$

unde constanta de proporționalitate și cea de la puterea frecvenței depind de o multitudine de factori, dintre care cel mai important este șoferul.

Rezultatele sunt însă similare, toți șoferii percepând disconfortul datorat vibrațiilor la frecvențe mici (4-6Hz) - frecvențe de rezonanță pentru corp și accelerații mari (2,5-4,6m/s²).

Relația (5) verifică legea Stevens; ea este foarte importantă, deoarece, prin extrapolare, am obținut o lege generală (curba roșie), pentru acest interval de frecvențe, care face legătura dintre mărimea percepției și frecvență:

$$MP=10,95v^{1,1363} \quad (R^2=0,9935) \quad (6)$$

Cu ajutorul relației (6) se poate estima, cu o eroare de 0,65%, care va fi disconfortul suferit de subiect, în condiții similare de lucru.

Odată ce au fost obținute mărimile vibrațiilor (pentru axa cea mai nefavorabilă), este posibil să se calculeze durata de timp pentru care un vehicul poate fi condus înainte de a se

ajunge la limititele de expunere zilnică și valorile de acțiune pentru vibrațiile transmise întregului corp așa cum sunt specificate în Directiva UE referitoare la vibrații (2002) (Tab. 2). Ecuțiile de variație a duratelor de atingere a EAV și a ELV sunt (Fig. 2):

$$T_{EAV(VDV)} = 20,971 \cdot VDV^{-4,0176} \quad (R^2=1) \quad (7)$$

$$T_{ELV(VDV)} = 23,574 \cdot VDV^{-3,9989} \quad (R^2=1) \quad (8)$$

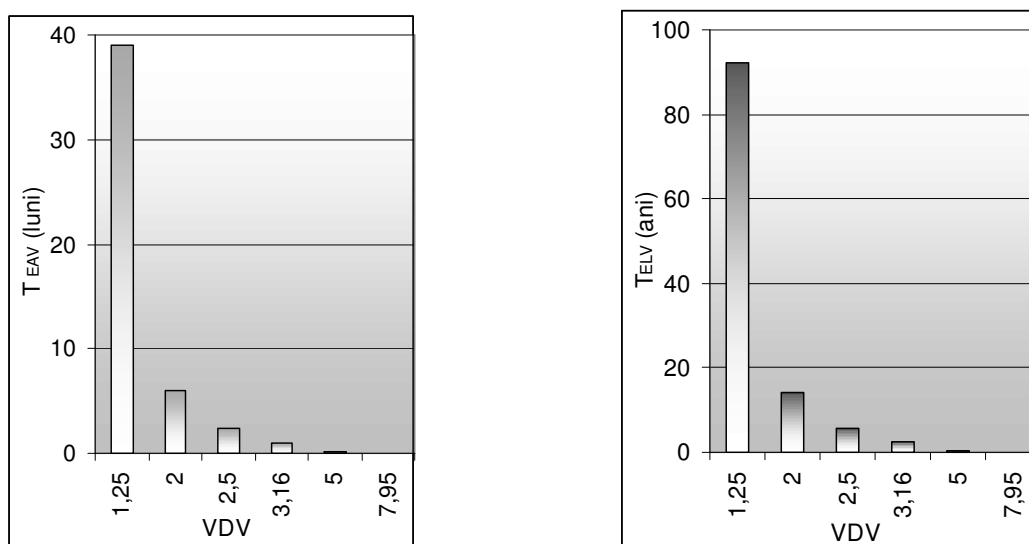


Fig. 2 Variația valorii de expunere care declanșează acțiunea (EAV) și a valorii limită de expunere (ELV) funcție de doza de vibrație VDV: (●) - EAV; (■) - ELV

Se constată că aceste ecuații sunt tot de tipul (5), adică: $T \sim VDV^{\text{const}}$, ceea ce înseamnă că doza de vibrații este una din mărimile care caracterizează foarte bine modul în care vibrațiile acționează asupra omului.

Pentru a investiga percepția pe care o au șoferii asupra transmiterii vibrațiilor prin mână și prin întreg corpul la deplasarea pe drumuri diferite (asfalt; pământ; macadam), s-au măsurat accelerațiile HAV pe 10 șoferi de camioane. Șoferii au avut vârste cuprinse între 28-54 ani, iar durata fiecărui set de teste a fost de 15 min [6].

Rezultatele determinărilor pentru HAV sunt ilustrate în Fig. 3-4. Cu datele din aceste figuri, s-a calculat și doza de vibrații $VDV(m/s^{1.75})$ pentru $T=10h$ cu relația (4):

HAV	$A_{WT} \text{ min } (m/s^2)$	$A_{WT} \text{ max } (m/s^2)$	$VDV \text{ min } (ms^{-1.75})$	$VDV \text{ max } (ms^{-1.75})$
dependența de drum	1.13	2.10	20.57	38.24
dependența de viteză	0.51	1.72	9.28	31.32

unde $A_{WT} = [(1.4a_x)^2 + (1.4a_y)^2 + (1.4a_z)^2]^{1/2}$; factorul 1,4 este raportul dintre valorile curbelor de răspuns egal (longitudinală și transversală) pentru răspunsurile umane cele mai sensibile.

Conform ISO 2631/1, valorile admise sunt cuprinse între $8.5-17ms^{-1.75}$.

Din rezultatele prezentate, se vede că doza zilnică este respectată doar în cazul $9.28ms^{-1.75}$, ceea ce înseamnă că majoritatea șoferiilor nu lucrează mai mult de 8 ore pe zi, în condiții de siguranță.

Studii experimentale privind percepția vibrațiilor generate de echipamentele de construcții asupra oamenilor

Este evident că șoferii de camioane sunt expuși zilnic la valori mari ale dozei de vibrații. Trebuie să fie luate în considerare achiziționarea de vehicule moderne [7] și, de asemenea, un program de lucru care să le permită mai mult timp de odihnă [8].

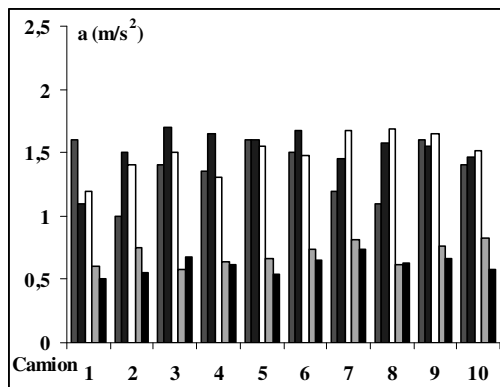


Fig. 3 Variația accelerației funcție de viteză (HAV)

■ 40km/h; ■ 50km/h; ■ 60km/h; ■ 70km/h; ■ 80km/h

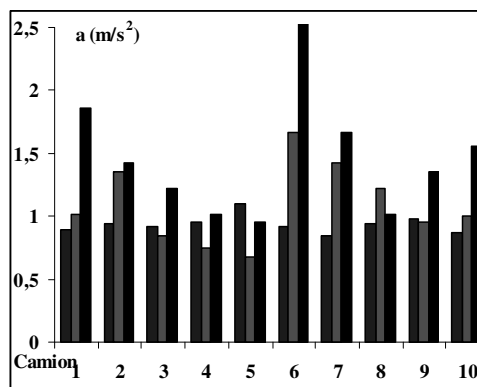


Fig. 4 Variația accelerației funcție de drum (HAV)

■ asfalt; ■ pământ; ■ macadam

Mărimea percepției (evaluată cu scala Likert) este reprezentată în Fig. 5.

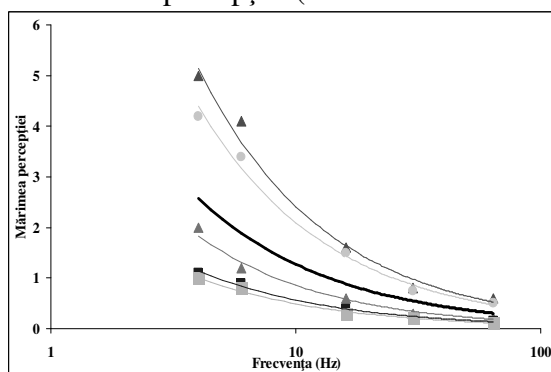


Fig. 5 Mărimea percepției șoferilor față de vibrațiile

transmise prin mână de la volanul camionului

(▲) 0,5m/s²; (●) 0,8m/s²; (▲) 1,5m/s²; (■) 2m/s²; (▼) 2,2m/s²; (—) media

Ecuatiile curbelor din Fig. 5 sunt:

$$0,5\text{m/s}^2 \Rightarrow MP=16,231v^{-0,8263} \quad (R^2=0,9838)$$

$$0,8\text{m/s}^2 \Rightarrow MP=13,552v^{-0,8094} \quad (R^2=0,9927)$$

$$1,5\text{m/s}^2 \Rightarrow MP=5,8154v^{-0,8317} \quad (R^2=0,9907)$$

$$2\text{m/s}^2 \Rightarrow MP=3,3162v^{-1,2141} \quad (R^2=0,9862)$$

$$2,2\text{m/s}^2 \Rightarrow MP=3,0337v^{-0,7914} \quad (R^2=0,9926)$$

Se vede că și aceste curbe sunt tot de tipul $MP \sim v^{-\text{const}}$ și verifică legea Puterii a lui Stevens; prin extrapolare, am obținut o relație similară cu (5), pentru acest interval de frecvențe, care face legătura dintre mărimea percepției și frecvență:

$$MP=7,4954v^{0,7703} \quad (R^2=0,9711) \quad (9)$$

Cu ajutorul relației (9) se poate estima, cu o eroare de 2,89%, care va fi disconfortul suferit de subiect, în condiții similare de lucru.

Pentru aceste cazuri studiate, indicele Sperling pentru confort la deplasare se calculează cu relația (2) [9]:

a) Pentru $v_1=4\text{Hz}$, $a_1=0,5\text{ m/s}^2 \Rightarrow W_{Z1}=0,794122$

b) Pentru $v=6\text{Hz}$, $a_1=0,8\text{ m/s}^2 \Rightarrow W_{Z2}=0,972298$, ș.a.m.d; rezultă: $W_Z=3,952302$.

ISO 2631/1997 specifică:

$W_Z=3,5$	Vibrațiile sunt enervante, o expunere prelungită este intolerabilă
$W_Z=4$	Vibrațiile sunt extrem de neplăcute, este nocivă o expunere prelungită

ceea ce înseamnă că valoarea $W_z=3,95$ confirmă faptul că șoferii nu lucrează în condiții de siguranță și sunt expuși zilnic la valori mari ale dozei de vibrații.

3. CONCLUZII

Din măsurătorile efectuate s-a constatat că șoferii de camioane sunt expuși la vibrații care depășesc limita de atenție, precum și limita de disconfort. Am constatat că la expunerea unei persoane la vibrații în timpul condusului, maximul accelerației vibrațiilor se resimte la umeri și în zona gâtului. Frecvența de rezonanță a corpului uman a fost stabilită în jurul 4Hz. Pentru a reduce riscurile îmbolnăvirilor profesionale datorate vibrațiilor, au fost propuse mai multe metode de reducere a nivelului vibrațiilor și a timpului de expunere.

În această lucrare s-a studiat aplicabilitatea Legii Puterii a lui Stevens în cazul percepției vibrațiilor produse de vehicule în mișcare, unde a fost luat în considerare doar un singur factor de stres, dar în viața reală, se întâlnesc mai mulți factori perturbatori ce acționează alături de vibrații. Aceștia pe deoparte pot masca acțiunea vibrațiilor, astfel încât subiectul să nu-și dea seama de momentul în care ar trebui să stopeze pentru un timp expunerea (să ia o pauză) și pe de altă parte amplifică efectele vibrațiilor. Oricum Legea Puterii a lui Stevens poate fi aplicată cu succes la studiul percepției vibrațiilor (erorile pentru aceste măsurători fiind cuprinse între 1,40% și 2,89%).

BIBLIOGRAFIE

- [1] **EMBRETSON, S., REISE, S.**, Item response theory for psychologists, Erlbaum, Mahwah NJ, 2000.
- [2] **REPP, B.H.**, Mathematical models for social psychology, European Journal of Social Psychology, Vol. 10, 100-124, 2006.
- [3] **GARG, V.K., DUKKIPATI, R.V.**, Dynamics of railway vehicle systems. London: Academic Press Inc. Ltd., 1984.
- [4] **KIM, Y.G., KWON, H.B., KIM, S.W., PARK, C.K., PARK, T.W.**, Correlation of ride comfort evaluation methods for railway vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F - Journal of Rail and Rapid Transit, **217(2)**, 73-88, 2003.
- [5] **RIMELL, A.N., MANSFIELD, N.J.**, Methods for assessing whole-body vibration exposure in railway carriages, EU Asia-Link ASIE/2005/111000, 2005.
- [6] **PICU, A.**, An Investigation on the Human Sensation Induced by Wheel Hand Arm Vibration and Seat Whole-body Vibration using Single Axis and Triaxial Methods – A Study using the Steven's Power Law, Proceedings of the ACOUSTICS High Tatras 2009, "34th International Acoustical Conference-EAA Symposium", 2009.
- [7] **SIRETEANU, T., GUGLIELMINO, E., STAMMERS, C.W., GHIȚĂ, G., GIUCLEA, M.**, "Semi-active Suspension Control: Improved Vehicle Ride and Road Friendliness", Springer, **06-03**, ISBN: 1848002300, 2009.
- [8] **NĂSTAC, S., PICU, M.**, A study on the sensation of discomfort induced by cars vibrations to the drivers, The Annals of "Dunarea de Jos" of Galati, Mathematics, Physics, Theoretical Mechanics, Fascicle II, 2010.
- [9] **PICU, A.**, A new method to determine the undesirable resonance peaks in frequency for vehicle vibration reduction, Euronoise, 2009, EAA, 26-28 Oct, Edinburgh, 2009.
- [10] **ISO 2631-1:1997** – Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements