

CARACTERISTICI FIZICE NECESARE ÎN ANALIZA COMPORTĂRII DINAMICE A ORGANISMULUI UMAN

PHYSICAL CHARACTERISTICS NECESSARY TO ANALYZE THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE HUMAN BODY

Daniela Mariana BARBU¹, Ion BALCU²

^{1,2}Universitatea Transilvania din Brașov
Bulevardul Eroilor 29, Brașov, Romania
e-mail: dbarbu@unitbv.ro

Rezumat. Problema comportării organismului uman la vibrații constă în explicarea fenomenelor fiziologice și patologice, în prezicerea comportării acestuia la alte acțiuni mecanice, în determinarea limitelor rezistenței la oboseală a organismului în condiții extreme, precum și în elaborarea unor noi mijloace de protecție. Lucrarea de față își propune să prezinte o parte dintre cercetările noastre în domeniu și să arate modul în care caracteristicile fizice ale organismului uman studiat au influențat modelele dinamice dezvoltate în diferite situații de expunere a organismului uman la vibrații.

Cuvinte cheie: vibrații, corp omenesc, analiza dinamică, caracteristici fizice

Abstract. Body vibration behavior issue is to explain physiological and pathological phenomena in predicting its behavior to other mechanical actions, determining the limits of the body's resistance to fatigue under extreme conditions, and in developing new ways of protection. This paper aims to present some of our research in the field and to show how the physical characteristics of the human body studied influenced dynamic models developed in different situations of human body vibration exposure.

Keywords: Vibrations, Human Body, Dynamical Analyses, Physical Characteristics

1. INTRODUCERE

Vibrația poate fi definită ca o oscilație a masei relativ la un punct fix, prin urmare acest termen se referă la mișcările oscilatorii ale unui corp sau ale unui sistem de corpuri față de un sistem de referință [1]. Vibrațiile corpului uman apar ca efect al vibrațiilor mecanice din mediul înconjurător asupra unor părți sau a corpului uman privit în ansamblu. În cazul în care organismul vine în contact cu o sursă mecanică de vibrație, țesuturile corpului pot fi deplasate față de poziția de repaus. În timpul activităților zilnice, corpul uman este expus la diverse surse de vibrații, cum ar fi cele ce apar în timpul transportului. Mai mult, există posibilitatea ca o serie de categorii profesionale să fie expuse la astfel de fenomene la locul de muncă, precum vibrațiile produse de mașini-unelte, utilaje sau vehicule grele [2].

Cercetările au arătat că există mai multe tipuri de vibrații, care sunt semnificative în analiza comportării organismului uman expus, în funcție de modul în care acestea acționează și influențează [3]. Cea mai importantă categorie se referă la vibrația întregului corp (denumită *Whole Body Vibration* – WBV). În acest caz vibrația este transmisă la întreg organismul, privit ca un întreg, în principal prin suprafața de sprijin (adică picioare, șezut, spate, etc.) [4]. Expunerea prelungită la astfel de unde mecanice corp poate provoca fie afecțiuni fizice permanente sau chiar poate să perturbe sistemul nervos central [5].

O altă categorie se referă la expunerea la vibrații doar a unei anumite părți a organismului uman. Cele mai reprezentative sunt efectele pe care le au vibrațiile asupra membrului superior. Denumită în literatura de specialitate ca *Hand-Arm Vibration* (HAV), reprezintă expunerea pe care o au vibrațiile asupra mâinii și a brațului. Expunerea zilnică la astfel de oscilații poate provoca în timp afecțiuni medicale fizice permanente, ce pot conduce la ceea ce este cunoscut în mod obișnuit ca "sindromul degetelor albe", sau poate deteriora articulațiile și mușchii la încheietura mâinii și / sau a cotului [3].

De-a lungul timpului, literatura de specialitate a arătat o serie de cercetări ce au fost realizate pentru a evalua efectul pe care îl are supraexpunerea la vibrații a corpului uman, în special în mediul de lucru, când aceasta poate fi continuă și de lungă durată (caz în care poate conduce la ceea ce se numește generic "boală a mișcării") [2,3]. Aceasta demonstrează că există interes științific în prezicerea comportării organismului uman la alte acțiuni mecanice sau în diferite alte tipuri de expuneri, la determinarea limitelor rezistenței la oboseală a organismului în condiții deosebite sau chiar extreme, precum și la elaborarea mijloacelor de protecție și a altor mijloace biomedicale ce pot îmbunătăți calitatea vieții.

2. CARACTERISTICI FIZICE ALE ORGANISMULUI UMAN NECESARE ÎN ANALIZA DINAMICĂ

Foarte importante în analiza comportării organismului uman într-un mediu poluat de șocuri și vibrații sunt caracteristicile anatomice ale acestuia [6]. Structural, corpul omenesc este format dintr-un schelet osos tare, ale cărui elemente sunt legate prin ligamente fibroase, care este acoperit de structuri musculare și pe alocuri de țesut conjunctiv. Poziția și rolul funcțional al articulațiilor sunt menținute prin ligamente flexibile, puțin extensibile, ce permit mișcarea scheletară cu un anumit grad de libertate [7]. În completare, viscerele conținute în cutia toracică și în cavitatea abdominală sunt constituite din țesuturi moi, formând elemente încapsulate separat, care se pot mișca liber unul în raport cu celălalt; ele sunt prinse fiecare prin membrane și ligamente, și susținute în colectiv de către oasele, mușchii și țesuturile conjunctive ce le înconjoară. Greutatea lor este cuprinsă între zecimi de newton până la zeci de newtoni, iar majoritatea membranelor ce le suportă sunt relativ flexibile [6].

Musculatura corpului, prinsă pe schelet prin tendoane și strânsă într-o rețea de țesuturi conjunctive, formează structura de suport secundară pentru schelet și articulații. Grăsimea și pielea conțin de asemenea țesuturi conjunctive. La solicitarea de compresiune, țesuturile moi se aseamănă - în ceea ce privește proprietățile lor mecanice - cu apa, dar la forfecare se apropie de comportarea gelurilor mai puțin elastice, cu proprietăți reologice neliniare și cu frecări interne [7].

În poziția cea mai reprezentativă, cea ortostatică, pentru o persoană fără afecțiuni anatomice și fiziologice, o linie verticală dusă prin centrul de greutate al corpului, trece prin vertebra lombară inferioară și cea sacrală superioară, prin spatulele cavităților articulației șoldului și prin fața articulațiilor genunchiului și gleznei. În partea superioară, această linie trece prin fața curbei toracice a coloanei vertebrale și prin vertebrele aflate la baza craniului. Loviturile verticale axiale pot fi preluate prin comprimarea articulațiilor și prin încovoierea coloanei vertebrale [5]. Adesea apare și un mic moment de rotire a pelvisului, în special la adulții mai în vârstă. Anomaliile de la poziție, mai ales micile deviații de la simetrie, pot produce o distribuție pronunțat asimetrică a forțelor, în cazul unei lovituri verticale. În cazul unei astfel de expuneri pe o perioadă mare pot apărea afecțiuni permanente sau nu ale poziției ortostatice a corpului [6].

Majoritatea caracteristicilor fizice ale corpului omenesc necesare în analiza comportării dinamice a organismului uman se pot obține experimental, luând în considerare faptul că acesta este un sistem mecanic pasiv și liniar, ceea ce este valabil doar în cazul unor amplitudini și forțe foarte mici. În caz contrar, pot apărea vătămări corporale prin leziuni mecanice ale țesuturilor și astfel răspunsul sistemului devine neliniar [7]. S-a demonstrat experimental [6,7] că, într-un astfel de mediu, comportarea oaselor este asemănătoare cu cea a corpurilor solide obișnuite. În schimb, țesuturile elastice moi (ca de exemplu mușchii, tendoanele și țesuturile conjunctive) se comportă asemănător cu un mediu vâsco-elastic. În cazul în care vibrațiile depășesc limitele admisibile, se pot produce leziuni ale țesuturilor, cazuri în care apar deformațiile plastice. Proprietățile mecanice ale țesuturilor corpului omenesc determinate experimental, în condiții de laborator, sunt rezumate în tabelul 1 [6]. Aceste date sunt esențiale în modelarea dinamică a comportării organismului într-un mediu vibrațional.

Tabelul 1

Proprietățile fizice ale țesuturilor corpului omenesc

	Țesut moale	Os compact	
		Proaspăt	Uscat
Densitatea, kg/m ³	1 - 1,2 x 10 ³	1,93 - 1,98 x 10 ³	1,87 x 10 ³
Modulul de elasticitate longitudinal, N/m ²	7,5 x 10 ³	2,26 X 10 ¹⁰	1,84 x 10 ¹⁰
Modulul de compresibilitate volumică, N/m ²	2,6 x 10 ⁹	-	1,3 x 10 ¹⁰
Modulul de elasticitate transversal, N/m ²	2,5 x 10 ³	-	7,1 x 10 ⁹
Vâscozitatea tangențială, Ns/m ²	15	-	-
Viteza sunetului, m/s	1,5 - 1,6 x 10 ³	3,36 x 10 ³	-
Impedanța acustică, Ns/m ³	1,7 x 10 ⁶	6 x 10 ⁶	6 x 10 ⁶
Rezistența de rupere la întindere, N/m ²	-	9,75 x 10 ⁷	1,05 x 10 ⁸
Rezistența de rupere la forfecare (paralel cu fibrele), N/m ²	-	4,9 x 10 ⁷	-
Rezistența de rupere la forfecare (perpendicular pe fibre) N/m ²	-	1,16 x 10 ⁸	5,55 x 10 ⁷

3. EFECTELE VIBRAȚIILOR MECANICE ASUPRA ORGANISMULUI UMAN

Studiile au arătat că, în ceea ce privește efectele termice și chimice, în modelările dinamice ale organismului uman, sunt de obicei negliabile.

Nu la fel stă situația în cazul acțiunilor mecanice. Anumite tipuri de mișcări sau efectele ce pot apărea ca rezultat al aplicării unor acțiuni mecanice asupra corpului omenesc sau a unor părți ale acestuia, pot produce mai multe efecte de diferite feluri, cu influențe mai mari sau mai mici asupra stării de sănătate. Cel mai important efect se referă la faptul că mișcarea poate interfera direct cu activitatea fizică pe termen mai lung sau mai scurt, influențând astfel comportamentul fizic și psihic al persoanei respective. De asemenea, pot apărea probleme patologice prin efectele unor vătămări corporale sau distrugerii mecanice cu influențe directe sau indirecte asupra stării de sănătate a organismului. Aceasta poate induce efecte secundare prin apariția unor fenomene obiective sau subiective, care, acționând prin intermediul receptorilor biologici și a mecanismelor de transmisie, pot să producă modificări în organism [2].

În funcție de structura anatomo-patologică și văzut ca o structură alcătuită atât din țesuturi moi, cât și din oase, corpul omenesc reprezintă un sistem mecanic, care reacționează

diferit în funcție de domeniul de frecvențe la care este expus (fig. 1). La frecvențe joase (sub 100 Hz), experimental s-a demonstrat ca acesta poate fi considerat drept un sistem cu parametri concentrați [6]. În acest caz, fenomenele de rezonanță apar datorită interacțiunii maselor de țesuturi rigide cu structurile pur elastice. În domeniul frecvențelor înalte, (peste 0,1 MHz), comportarea organismului uman devine complexă, cu parametri distribuiți [6]. Este cazul în care modul de propagare a undelor (transversal, de suprafață sau longitudinal) este influențat de conformația anatomică, mase, poziții și de forma suprafețelor de separație (atât din punct de vedere fizic, cât și anatomo-patologic).

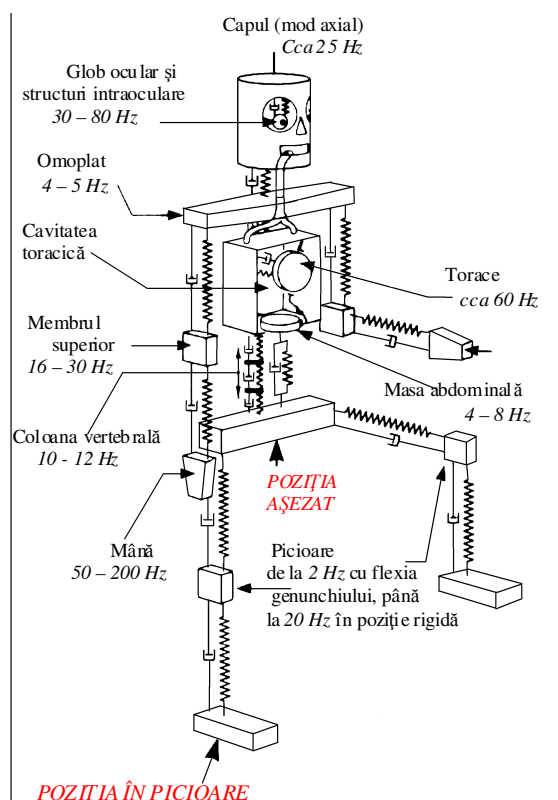


Fig. 1. Comportarea organismului uman la vibrații și frecvențele de rezonanță ale părților principale [8]

Experimentele pe animale au demonstrat că pot apărea leziuni la valori mari ale accelerațiilor aplicate asupra ființelor vii. Atingerea frecvenței de rezonanță pentru organele vitale conduce la stabilirea accelerației letale. Tot în aceste experimente s-a demonstrat că atingerea pragurilor frecvențelor de rezonanță conduce la o creștere semnificativă a temperaturii corpului (probabila cauză fiind una de natură mecanică și anume atingerea organelor interne între ele).

Analiza comportării organismului uman la șocuri și vibrații a arătat că există diferențe semnificative în efectele pe care le au acestea în funcție de durata de expunere, precum și de frecvența și amplitudinea forței perturbatoare [2]. Acțiunea pe timp îndelungat poate conduce la afecțiuni cronice. Acestea nu se manifestă decât după o perioadă mai mare de expunere. Este cazul bolilor profesionale. Un exemplu clasic legat de aceasta îl constituie durerile și amorțelile degetelor ce apar când este frig, la multe din persoanele care folosesc polizoare de mână sau care lucrează timp de câteva luni cu utilaje ca ciocane și perforatoare pneumatice. În acest caz pot apărea afecțiuni ale nervilor și vaselor periferice („sindromul degetelor albe”).

Pe de altă parte, expunerea la unde cu amplitudini sau frecvențe mari poate conduce la afecțiuni acute, e se manifestă imediat și conduc la disconfort sau durere. Expuneri la astfel de forțe apar frecvent în timpul călătoriei cu diverse vehicule într-un regim de expunere la vibrații.

În studiul comportării dinamice a organismului uman, foarte importante sunt afecțiunile fiziologice ce pot apărea în urma expunerii la vibrații. S-au identificat modificări ale ritmului cardiac, ale respirației, ale circulației periferice chiar și în cazul unui regim moderat de vibrații (ca timp, frecvență sau amplitudine). De asemenea, studiile experimentale au arătat modificări ale reflexelor posturale (schimbarea poziției, pierderea echilibrului), precum și efecte neurologice (scăderea acuității vizuale, a fixării oculare, a auzului) în cazul unei expuneri la vibrații.

4. REZULTATE PROPRII ALE ANALIZEI DINAMICE

Primele cercetări cu privire la comportarea organismului uman într-un mediu poluat de vibrații le-am prezentat în lucrările [9,10], când am făcut primul model de analiză a dinamicii torsului uman și ne-am referit la vibrațiile verticale ce pot afecta corpul. Ulterior, prin intermediul unor proiecte de cercetare, am dezvoltat modelele și le-am publicat în diverse studii. Am avut în vedere modele diferite (în picioare sau în poziția șezând) în diferite condiții de expunere la șocuri și vibrații. Indiferent de acestea, pentru realizarea modelării comportării dinamice a organismului uman am folosit logica de analiză prezentată în fig. 2.

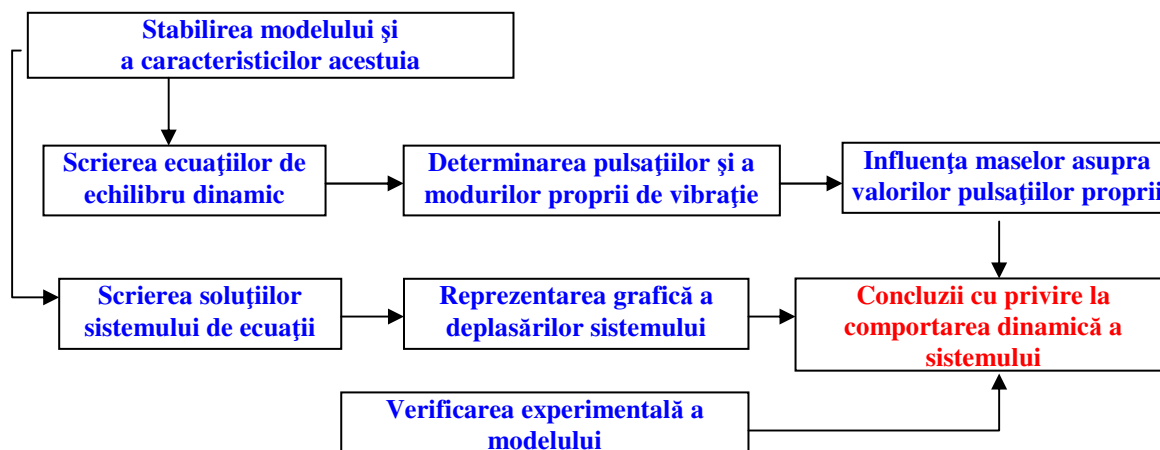


Fig. 2. Logica în analiza dinamică a sistemului

Modelul care a oferit cele mai bune rezultate și pentru care am făcut și o validare experimentală este cel din fig. 3 [11]. Structura acestuia este formată din următoarele elemente componente: 1. analizorul vizual; 2. capul; 3. viscere; 4. torace; 5. centura scapulară; 6. membrele inferioare; 7. pelvis; 8. membre inferioare. Prin urmare, este un sistem mecanic format din 8 elemente Maxwell și care este supus unei forțe perturbatoare de tip sinusoidal. Se urmărește comportarea organismului uman astfel structurat la vibrațiile verticale.

Amortizoarele și resorturile reprezintă modelarea articulațiilor, tendoanelor sau ale unor alte organe de legătură.

Ecuțiile de mișcare se pot scrie matriceal sub forma [12]:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{F\} \quad (1)$$

în care: $\{\ddot{y}\}$ - vectorul accelerațiilor, $\{\dot{y}\}$ - vectorul vitezelor; $\{y\}$ - vectorul deplasărilor, iar $\{F\}$ este vectorul forțelor.

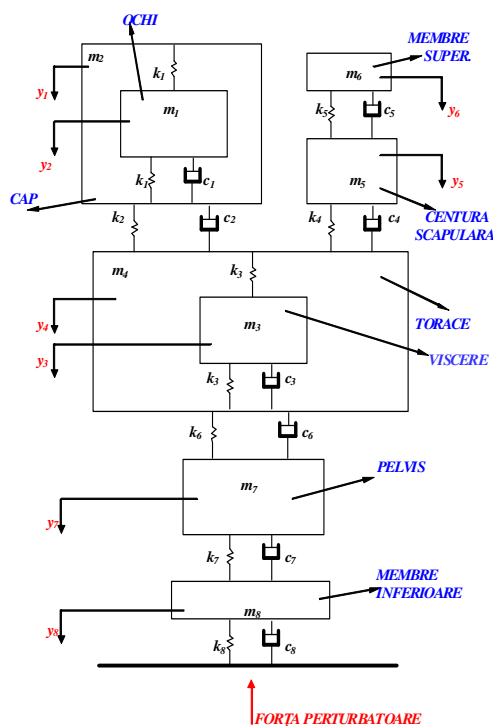


Fig. 3. Model de studiu a comportării la vibrații a organismului uman

Compararea pulsațiilor proprii conduce la concluzia că cea mai mare pulsație proprie o are capul, iar cea mai mică este a centurii scapulare. Asta arată că, prin expunerea la vibrații a organismului, pot apărea probleme neurologice (scăderea acuității vizuale, fixare slabă a obiectelor, diminuarea capacităților auditive etc.). Prin urmare, am acordat o atenție sporită comportării ochiului și capului.

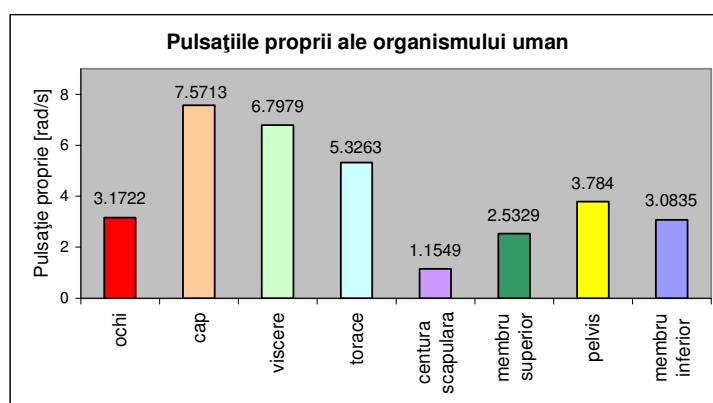


Fig. 4. Compararea pulsațiilor proprii ale organismului uman

În urma calculelor nu s-a evidențiat o influență majoră a maselor asupra valorilor pulsațiilor proprii ale elementelor organismului uman [12]. De asemenea, s-a putut observa că variațiile maselor componentelor sistemului dinamic conduc în mare parte la modificări ale

pulsațiilor proprii ale viscerelui. Aceasta poate fi o explicație a faptului că primul simptom major al atingerii unei frecvențe de rezonanță este starea de rău invocată de subiect.

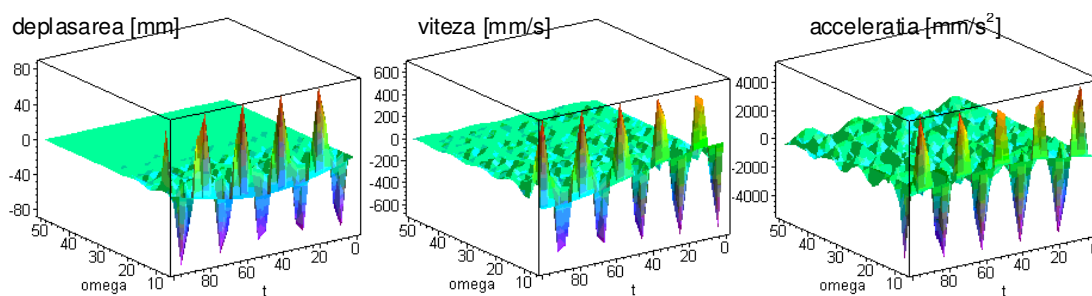


Fig. 5. Variațiile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor ochiului

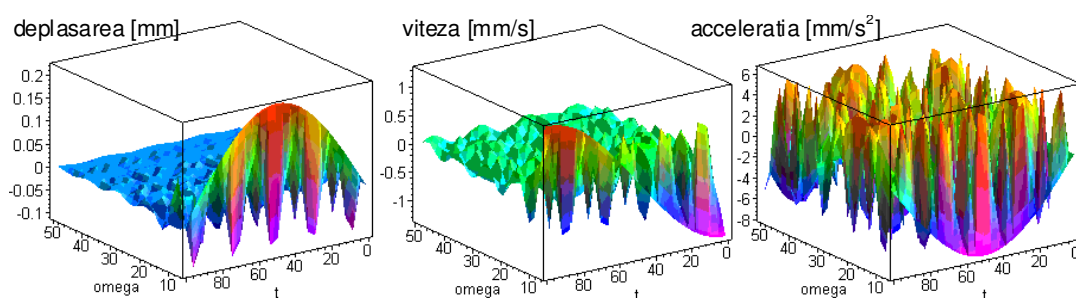


Fig. 6. Variațiile deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor capului

Conform graficelor deplasarea ochiului variază între 80 și -80 mm, cu viteze cuprinse între ± 600 mm/s și accelerații de ± 4000 mm/s², ceea ce reprezintă valori foarte mari. Prin urmare, o astfel de forță solicită foarte mult ochiul și, implicit, intervine în funcția vederii. Simptomele ar putea fi: încețoșarea vederii, tulburarea fixării și tulburarea echilibrului. S-a putut observa că deplasările, vitezele și accelerațiile celorlalte sisteme sunt foarte mici, ceea ce înseamnă că forța aplicată nu influențează foarte mult starea acestora. În mod similar se demonstrează că modificarea valorii forței influențează semnificativ doar sistemul ocular [12].

Cercetările experimentale au confirmat ideile reieșite în urma analizei numerice [13]. Standul experimental folosit este util în analiza comportării corpului uman la vibrații, prin urmărirea fenomenului de rezonanță a organismului unui subiect în condițiile unei pardoseli aflate în mișcare armonică, și scoate în evidență modul în care aceasta influențează funcția vizuală. Metoda utilizată este subiectivă, ea fiind influențată de factori de natură fiziologică, neurologică, precum și psihologică.

Rezultatele au fost influențate de următorii parametri:

- poziția subiectului (verticală sau înclinată) - în poziție verticală subiectul atinge mai repede frecvența de rezonanță;
- poziția verticală cu mâinile pe lângă corp sau ridicate influențează în menținerea echilibrului;
- timpul de expunere la vibrații - prin mărirea acestui timp în organism intervine starea de oboseală, caz în care rezultatele pot fi eronate;
- starea de relaxare a organismului - dacă mușchii sunt tensionați, iar subiectul nu este relaxat, frecvența de rezonanță crește; este și cazul în care subiectul este în poziție verticală cu mâinile pe lângă corp sau ridicate;
- refracția oculară - eventualele tulburări ale refracției oculare intervin în măsurători prin faptul că o ametropie influențează acuitatea vizuală, precum și fenomenul de acomodare;

- subiectul este încălțat sau descălțat – încălțăminte intervine prin factorul său de amortizare și datorită contactului direct pe care-l are cu pardoseala;
- greutatea organismului - evidențiată prin testarea mai multor subiecți;

5. CONCLUZII

În corpul uman vibrațiile sunt generate de surse interne sau externe. Din cauza țesuturilor moi, a oaselor, articulațiilor, organelor interne și, de asemenea, din cauza particularităților componentelor sale anatomice, în general, corpul uman reprezintă un sistem vibrator complex. Particularitățile fiecărui subiect în parte pot conduce la rezultate diferite ale analizei dinamice în aceleași condiții (greutate, conformație anatomică, sex, stare fizică și psihică etc). Studiile arată că, în funcție de aceste caracteristici, între 20 și 30 Hz capul prezintă o rezonanță mecanică, caz în care amplitudinile deplasărilor sale putând depăși de trei ori pe cele ale centurii scapulare. Importanța acestei rezonanțe este legată de scăderea acuității vizuale sub influența vibrațiilor. Aceleași turburări se constată într-un domeniu de frecvențe cuprins între 60 și 90 Hz și se presupune că aceasta datorează rezonanței globului ocular.

REFERINȚE

- [1] Gh. Buzdugan, L. Fetcu, M. Radeș, “*Vibrații mecanice*”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982;
- [2] S. Lache, D.M. Barbu, M.C. Luculescu, B. Popovici, R. Necula, E. Secară, „*Boli profesionale datorate influenței vibrațiilor asupra organismului uman*”, Editura Universității Transilvania din Brașov, 2008;
- [3] S. Lache, D.M. Barbu, M.C. Luculescu, I. Barbu, „*Modele și sisteme avansate pentru protecția organismului uman la vibrații și prevenirea bolilor profesionale*”, Editura Universității Transilvania Brașov, 2009;
- [4] M. Baritz, I. Balcu I., „*Corelarea stabilității posturale cu poziția de utilizare a dispozitivelor și uneltelor vibratorii*”, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, Volumul 5 (2014), Numărul 1;
- [5] M. Baritz, „*Correlated and interconnected analyses for human walking and standing biomechanical behavior*”, Mathematics and Computers in Science and Engineering (2010), Pag. 236-243;
- [6] C. Harris, C. Crede, “*Șocuri și vibrații*”, vol. I, II, III, Editura Tehnică, 1969;
- [7] A. Denischi, s.a. „*Biomecanică*”, Editura Academiei, București, 1989;
- [8] <http://www.powerstandards.com/HumanResonance.php>, accesat martie 2016;
- [9] V. Olariu, D. Cîrîc, „*Asupra dinamicii torsului uman*”, Revista română de Mecanică fină și Optică, supliment – A, 1994; pp. 84-91;
- [10] V. Olariu, D. Cîrîc, “*Vibrațiile verticale ale corpului uman*”, Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XVII, Seria Tehnică – C. Mecanică aplicată, 1995, pp. 105-111;
- [11] D.M. Barbu, S. Chiriacescu, “*Model pentru analiza comportării organismului uman la șocuri și vibrații*”, The Romanian Review of Precision Mechanics, Optics and Mechatronics, Supplement 21b, vol. 4-21b; 2002, pp. 43-49.
- [12] D.M. Barbu, “*Numerical Methods used in Analyses of the Human Behaviour in a Vibrational Medium*”, Annals of DAAAM for 2007 & Proceedings of the The 18th International DAAAM Symposium, 24-27 october 2007, Zadar, Croatia; pp. 055-056.
- [13] D.M. Barbu, I. Barbu, “*Experimental Methods used in Analyses of the Human Behavior in a Vibrational Medium*”, Annals of DAAAM for 2007 & Proceedings of The 18th International DAAAM Symposium, 24-27 october 2007, Zadar, Croatia; pp. 057-058.