

DR. ING. AURELIA MIHALCEA

VIBRAȚIILE MASINILOR DE CONSTRUCȚII
TRANSMISE CORPULUI UMAN

EDITURA IMPULS
2001

• Editat de:

ICECON - S.A. BUCUREȘTI - Editura IMPULS » la data de 21. 12.2001.
Consilier editorial ing. Nicolae Clătici - tcl.255 04 72: fax 255 14 20

Descrierea CIP a Bibliotecii Nationale

MIHALCEA, AURELIA

Vibratiile masinilor de constructii transmise corpului uman /
dr.ing.Aurelia Mihalcea - Bucuresti: IMPULS, 2001 147 p.; cm 21 Bibliogr.

Index.

ISBN 973-8132-19-3

62-752

CUVÂNT ÎNAINTE

Lucrarea pe care o am în față sub formă de manuscris și care sper că va apărea cât mai curând în formă tipărită, se datorește efortului de concepție și redactare depus de domnișoara doctor inginer Aurelia Mihalcea, cercetător științific în cadrul Institutului de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții-ICECON București, membru colectiv al Societății Române de Acustică, profilat în principal pe mașini de construcții, dar în care se abordează și probleme actuale de mare interes în domeniul vibrațiilor și acusticii.

Cercetările științifice care se derulează în cadrul ICEC(N) sunt cunoscute atât în țară, cât și în străinătate. Pe cercetătorii institutului, între care se remarcă autoarea Aurelia Mihalcea, i-am întâlnit la prestigioase manifestări științifice din țară și străinătate, unde lucrările lor impresionează prin aspectele de noutate și nivel științific ridicat al problemelor abordate. O caracteristică importantă a activității în cadrul ICEC(N) este îndrăzneala cu care sunt puse în practică ideile științifice, acestea fiind materializate sub forma unor realizări tehnice cu aplicabilitate imediată în producție.

Nu se poate aborda activitatea în cadrul ICECON, fără a evidenția personalitatea Președintelui-Director General, colegul nostru prof.dr.ing. Polidor Bratu, care a reușit să aplice în practică un tip de manageriat al cercetării științifice care să ducă la obținerea unor rezultate profitabile pentru știința și tehnica din țara noastră și, în același timp, să realizeze o situație prosperă pentru întregul institut și pentru cercetătorii care își desfășoară activitatea aici.

Domnișoara Aurelia Mihalcea și-a obținut titlul științific de doctor inginer sub conducerea profesorului Bratu și a învățat de la acesta că o lucrare științifică nu are valoare dacă rezultatele ei nu conduc la realizări practice utile.

Pe aceste principii este construită și cartea de față: aspectele teoretice au ca suport modelări ale corpului uman supus acțiunii vibrațiilor, nivelele intensității vibrațiilor fiind comparate cu valorile corespunzătoare admise de normele europene. Toate aceste dezvoltări teoretice sunt însoțite de bogate anexe, care prezintă valori ale intensității vibrațiilor măsurate și înregistrate ca urmare a testării unui mare număr de mașini de construcții, pentru care ICECON, în calitate de Registru Național pentru Mașini de Construcții, eliberează certificate de atestare.

Cartea este utilă specialistului în protecția muncii, cercetătorului din domeniul protecției mediului ambiant împotriva poluării vibratorii și, nu în ultimul rând, constructorului de mașini și utilaje de construcții, care le poate utiliza ca elemente de referință pentru reducerea nivelului de vibrații nocive, chiar din faza de concepție a utilajului proiectat.

Cartea este utilă specialistului în protecția muncii, cercetătorului din domeniul protecției mediului ambiant împotriva poluării vibratorii și, nu în ultimul rând, constructorului de mașini și utilaje de construcții, care le poate utiliza ca clemente de referință pentru reducerea nivelurilor de vibrații nocive, chiar din faza de concepție a utilajului proiectat.

În concluzie, recomand eu cu căldură lucrarea și declar că voi fi unul dintre cei care o vor utiliza în cadrul cercetărilor teoretice și aplicative pe care le dezvoltăm în domeniul vibrațiilor mașinilor, în cadrul Catedrei de Mecanică a Universității "Politehnica" din București.

București, 7 decembrie 2001

Prof.univ.dr.ing. Nicolae I. Enescu.
Președinte al Societății Române de Acustică
Universitatea "Politehnica" București

PREFAȚĂ

Nivelul vibrațiilor transmise omului în relația directă cu mașinile și echipamentele de construcții constituie una dintre cauzele esențiale de apariție a riscurilor de îmbolnăvire în procesul muncii. Noxele profesionale, efectele psihosenzoriale și patologice datorate vibrațiilor transmise omului se constituie ca puncte de plecare în realizarea unor vaste cercetări teoretice și experimentale menite să ducă la reducerea nivelului de vibrații la postul de conducere al mecanicului sau la elementele de comandă.

Reglementările (standarde și directive) europene și internaționale referitoare la mașini sau produse de construcții acordă o atenție deosebită nivelului de zgomot și vibrații transmise omului.

Calificarea mașinilor și echipamentelor tehnologice pentru construcții sub aspectul respectării normelor de zgomot și vibrații constituie un pas important în certificarea acestora potrivit Directivelor Europene în vigoare.

Pornind de la exigențele impuse de norme privind nivelul accelerațiilor vibrațiilor, direcția de acțiune și durata de expunere, prezenta lucrare conține cercetări efectuate în cadrul Institutului de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții București, Institutului de Igienă și Sănătate Publică, precum și în centre de cercetare din Austria, Franța, Germania, Belgia privind efectul vibrațiilor asupra omului, cu implicații fiziologice și patologice.

Pentru evidențierea efectelor psihosenzoriale și a riscurilor la vibrații au fost prezentate răspunsurile organismului uman în diverse condiții de expunere la vibrații, fie ca urmare a experimentărilor pe diverși subiecți în laborator, fie ca urmare a prelucrării statistice a rezultatelor obținute pe un lot reprezentativ de subiecți și durată mare de observare 10-20 de ani. În acest context, se menționează soluțiile tehnice adoptate în diverse țări și variante constructive pentru reducerea vibrațiilor la mașinile de construcții.

De asemenea, sunt prezentate normele specifice pentru aprecierea nivelului vibrațiilor transmise omului, precum și cele referitoare la vibrațiile cu efect distructiv asupra organelor vitale ale mașinilor de construcții.

Măsurarea vibrațiilor transmise omului constituie un capitol consistent și coerent, ținându-se seama de toate documentele normative în domeniu (standarde și reglementări tehnice europene și internaționale). În acest sens, se menționează rezultatele experimentale obținute pe baza metodologiei și a procedurilor de evaluare, analiză și interpretare a vibrațiilor transmise omului în cazul lucrului pe mașini de construcții.

Rezultatele experimentale privind nivelul de vibrații măsurat la unele mașini și echipamente tehnologice sunt prezentate în anexă.

Prezenta lucrare este utilă cercetătorilor și proiectanților din domeniul evaluării riscurilor la îmbolnăviri profesionale și elaborării normelor specifice. Totodată poate fi utilizată și de studenții din anii terminali ai facultăților tehnice din domeniul construcțiilor și echipamentelor.

București, 7 decembrie 2001

Dr.ing. Aurelia Mihalcea

CUPRINS

I	CARACTERIZAREA VIBRAȚIILOR TRANSMISE OMULUI	
2	EFFECTUL VIBRAȚIILOR ASUPRA OMULUI	3
2.1	Efecte fiziologice și patologice ale vibrațiilor asupra omului	3
2.1.1	Influența de natură mecanică a vibrațiilor asupra organismului	3
2.1.2	Influența de natură fiziologică a vibrațiilor asupra organismului	4
2.1.3	Răspunsuri subiective la solicitări prin vibrații	4
2.1.4	Evaluarea efectului acțiunii vibrațiilor asupra organismului	5
2.2	Sisteme elastice antivibratile folosite la mașinile de construcții	7
2.3	Scaune de protecție contra vibrațiilor	10
2.4	Sisteme în cascadă multiplă pentru protecție activă împotriva vibrațiilor	16
2.5	Caracteristicile biomecanice ale corpului uman și cerințe privind sistemele de protecție a operatorului împotriva vibrațiilor	20
3.	VALORI NORMATE ALE VIBRAȚIILOR TRANSMISE OMULUI LA POSTUL DE COMANDĂ	42
4.	DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND EXPUNEREA OMULUI LA VIBRAȚIILE TRANSMISE	59
4.1	Vibrații transmise asupra corpului uman, ținând seama de timpul de expunere	59
4.1.1	Condiții tehnice pentru determinarea experimentală a vibrațiilor transmise operatorului	59
4.1.2	Măsurări experimentale	59
4.2	Determinări experimentale ale nivelului de vibrații la postul de comandă pentru atestarea tehnică a mașinilor de construcții	65
	ANEXE	
	BIBLIOGRAFIE	

2.5. Caracteristicile biomecanice ale corpului uman și cerințe privind sistemele de protecție a operatorului împotriva vibrațiilor

Efectul vibrației de intrare asupra organismului uman depinde de frecvența și amplitudinea vibrației, de durata și direcția acesteia. Cazurile tipice de excitații vibratorii pentru un operator sunt: vibrațiile cu o singură componentă după axa verticală, când operatorul lucrează în picioare sau șezând; vibrațiile cu mai multe componente după coordonatele liniare sau unghiulare, transmiterea vibrațiilor realizându-se prin intermediul brațelor operatorului. În ambele situații vibrațiile pot fi armonice sau pot avea o compoziție spectrală complexă.

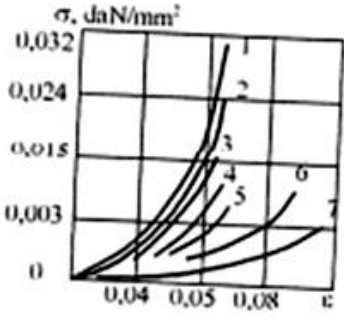
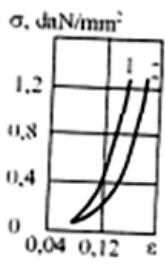
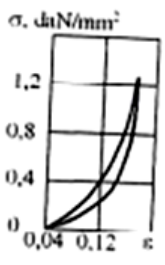
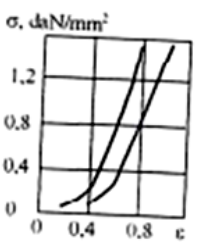
Vibrațiile de intrare cu intensitate înaltă și apariție unică pot provoca leziuni traumatice (contuzii, arsuri, fracturi). Vibrațiile cu frecvența până la 3-5 Hz produc reacții ale aparatului vestibular și pot cauza tulburări cardiovasculare și de mișcare. La frecvențe între 3-11 Hz s-au observat tulburări datorate acțiunii vibrațiilor de rezonanță asupra întregului corp al operatorului, ca și asupra unor părți ale corpului (cap, stomac, ficat, intestine). Vibrațiile cu frecvențe între 1-45 Hz pot fi însoțite de alterarea funcțională a sistemului urogenital, pot afecta vederea și pot produce stări de greață și vomă. O acțiune prelungită a vibrațiilor verticale unidirecționale în lungul corpului operatorului aflat în picioare, cu frecvențe mari de 45 Hz, are ca rezultat o tulburare vibratorie gravă și afecțiuni ale vaselor sanguine la nivelul creierului, tulburări ale sistemului circulator și creșterea fluxului de excitații pulsatorii asupra activității nervoase la nivel central și asupra condițiilor fiziologice funcționale ale operatorului.

Deoarece factorii care caracterizează percepția umană a vibrațiilor sunt complecși și nu se dispune de suficiente date cantitative comparative, una dintre cele mai importante probleme biomedicale constă în stabilirea unor criterii obiective unificate pentru caracterizarea semnalului vibrator de intrare, precum și a metodelor de determinare a caracteristicilor dinamice.

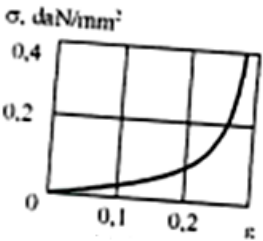
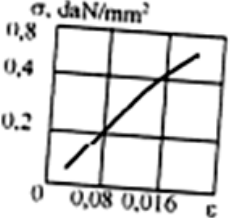
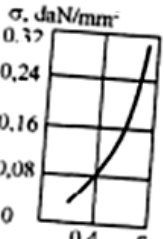
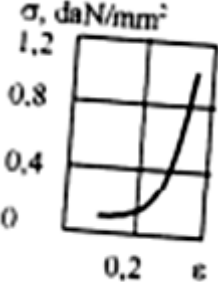
Rezolvarea problemelor referitoare la protecția subiecților umani împotriva vibrațiilor necesită modelarea corpului uman. În general, un astfel de model ar trebui să fie un sistem neliniar netaționar cu un număr infinit de grade de libertate. Proprietățile dinamice ale unui astfel de sistem sunt foarte complexe, deoarece sunt influențate de structura organismului, poziția din timpul lucrului, gradul de oboseală și starea psihologică și mentală generală. Deoarece nu toți acești factori pot fi luați în considerare la modelare, de obicei, se au în vedere: numărul gradelor de libertate, neliniaritatea și variabilitatea.

Relația tensiune-deformație a țesuturilor biologice umane este neliniară. Tabelul 2.2 prezintă relațiile efort-deformație pentru diferite țesuturi moi și osoase ale corpului uman

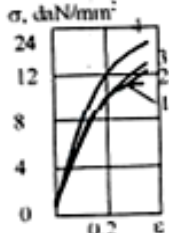
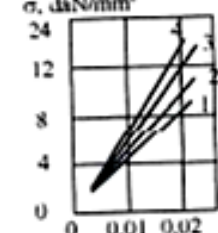
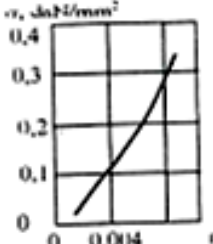
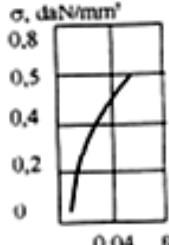
Tabelul 2.2. Eforturi funcție de deformație, pentru sistemul osos și țesuturi umane

Țesuturi	Solicitare	Diagramă
<p>Mușchi</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. mușchiul lui Tailor 2. sternocleidomastoidian 3. biceps 4. subabdominal 5. rectofemural 6. stemului 7. gastrointestinal 	Intindere	
		<p>Tendoane din regiunea femurală</p> 
Fibre nervoase		<ol style="list-style-type: none"> 1. nerv sciatic 2. nerv femural 3. nerv median 
Artere		<ol style="list-style-type: none"> 1. direcție transversală 2. direcție longitudinală 

Tabelul 2.2 (continuare)

Țesuturi	Solicitare	Diagramă
Cartilaje	Intindere	
	Compresiune	
Discuri intervertebrale	Intindere	
	Compresiune	

Tabelul 2.2 (continuare)

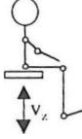
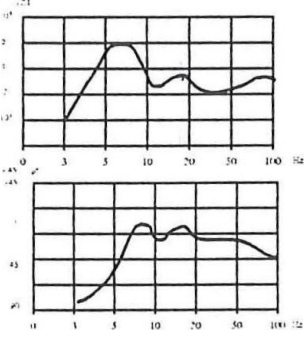
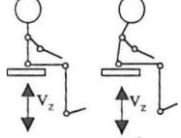
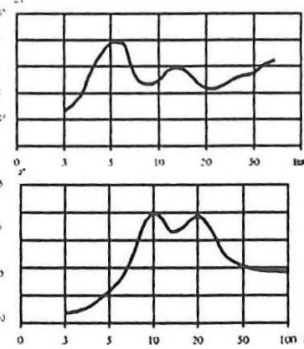
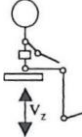
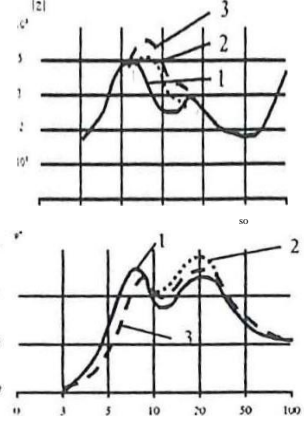
Țesuturi	Solicitare	Diagramă
Oase	Intindere	
	Compresiune	<p data-bbox="792 583 938 709">1.femur 2.humerus 3.tibie 4.osul cotului</p> 
Vertebre lombare	Intindere	
	Compresiune	

Proprietățile dinamice ale corpului uman, considerat ca un sistem mecanic liniar vâscoelastic, pot fi determinate cu ajutorul caracteristicilor de frecvență, ca de exemplu impedanța mecanică de intrare $Z(p)$, care descrie relația dintre forța transmisă corpului și viteza vibrației din punctul de aplicare al forței. Amplitudinea impedanței mecanice de intrare Z reprezintă raportul dintre amplitudinea forței transmise corpului în punctul excitației și amplitudinea vitezei în același punct. Argumentul impedanței de intrare (P) reprezintă defazajul dintre forță și viteză.

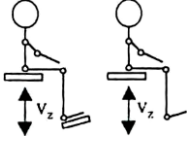
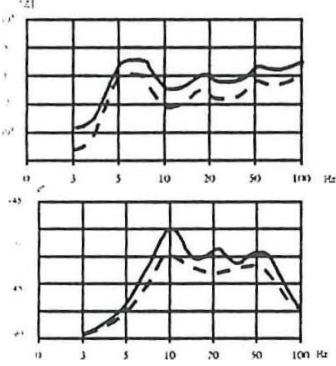
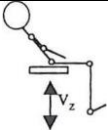
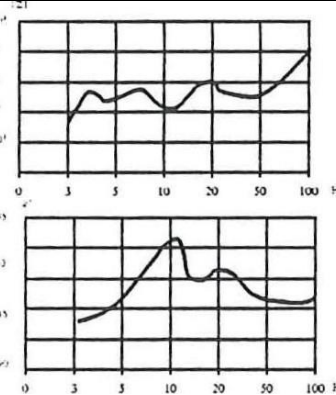
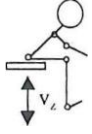
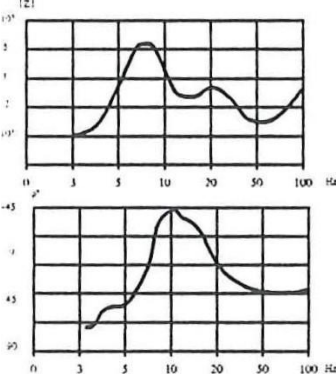
Caracteristicile de frecvență ale corpului uman stau la baza calculului efectiv al sistemelor de protecție a subiecților umani împotriva vibrațiilor. a proiectării mașinilor în regim de siguranță la vibrații. la elaborarea standardelor privind nivelul admisibil al vibrațiilor transmise și la determinarea parametrilor modelelor mecanice echivalente. Valorile numerice și comportarea caracteristicilor de frecvență depind de alegerea atât a punctului de aplicație a vibrațiilor, cât și a punctului de măsurare a vibrațiilor forțate ale corpului. Modificarea poziției de lucru sau a activității diferitelor grupe de mușchi, precum și interacțiunea cu suprafețele suport (spătarul scaunelor, scaunele, cotierele) sau cu sisteme suplimentare externe (mâner de control) pot afecta considerabil proprietățile dinamice ale organismului uman. Tabelele 2.3-2.5 prezintă rezultatele măsurărilor impedanțelor mecanice de intrare ale corpului, în diferite poziții și pentru diferite puncte de aplicare a semnalelor vibratorii. Din analiza acestor rezultate se pot concluziona următoarele:

- proprietățile de rezonanță ale corpului uman se manifestă la frecvențe sub 60 Hz;
- prezența unui suport suplimentar pentru picioarele unei persoane aflate în poziția șezând (schița 4—tabelul 2.3) nu modifică semnificativ comportarea impedanței ca funcție de frecvență. Totuși, în acest caz, amplitudinile impedanțelor descresc în întregul domeniu;
- forțe suplimentare aplicate corpului uman (schița 3—tabelul 2.3, schița 2—tabelul 2.4) generează variații maxime de amplitudine a impedanței la frecvențe ridicate (lucru care poate fi explicat prin teoria liniară și confirmând astfel proprietățile neliniare ale corpului uman);
- impedanța se modifică în mod considerabil. în cazul corpului înclinat (schițele 5 și 6—tabelul 2.3). Graficele care indică amplitudinea impedanței sunt caracterizate de un maxim la frecvențe sub 5 Hz, datorită vibrațiilor transversale ale coloanei vertebrale;
- impedanța corpului este influențată de poziția persoanei aflate în picioare; scăderea unghiului de rotație a încheieturilor genunchilor reduce energia de vibrație absorbită de corpul uman (schița 3— tabelul 2.5) ;
- poziția "întins pe spate" corespunde maximelor modulului impedanței la frecvențe de 15 și 6() Hz (schița 1—tabelul 2.5);
- poziția "întins cu fața în jos" este caracterizată de maxime ale amplitudinii impedanței la frecvențele de 7 și 14() Hz și de un minim absolut la 20 Hz (schița 2—tabelul 2.5).

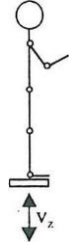
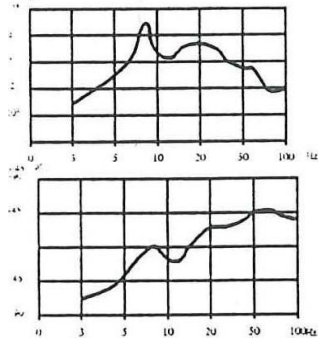
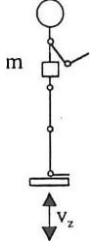
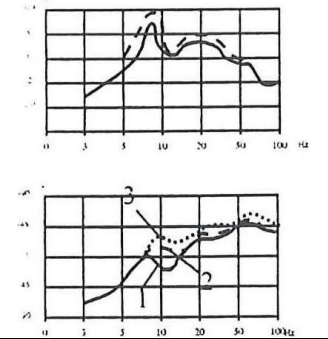

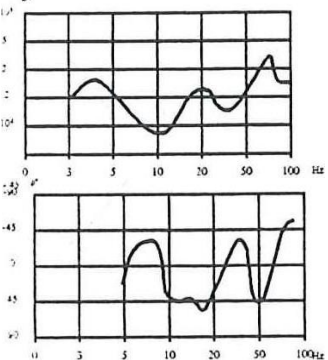
Tabelul 2.3 Impedanța mecanică de intrare $Z(p)$ pentru o persoană în poziția șezând

Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
1			Poziție naturală
2			1. Poziție încordată 2. Poziție relaxată
3			Solicitare suplimentară cu masa m la nivelul secțiunii lombare a coloanei vertebrale 1. $m=0$ kg 2. $m=0,8$ kg 3. $m=1,6$ kg


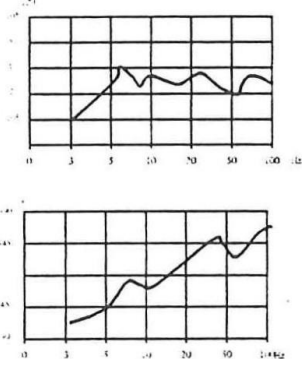

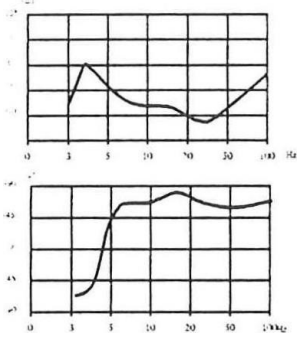

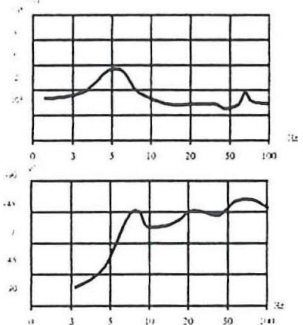
Tabel 2.3 (continuare)

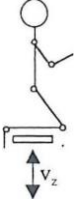
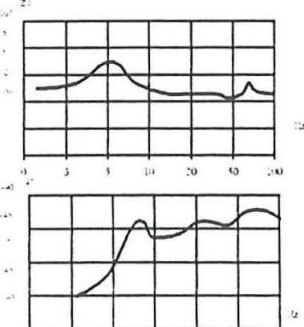
Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
4			<p>1. picioarele se sprijină pe un suport fix</p> <p>2. fără suport pentru picioare</p>
5			<p>Corpul este aplecat spre înapoi</p>
6			<p>Corpul este aplecat spre înainte</p>

Tabelul 2.4 Impedanța mecanică de intrare $Z(p)$ a unei persoane aflate ”în picioare”

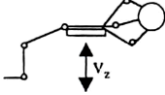
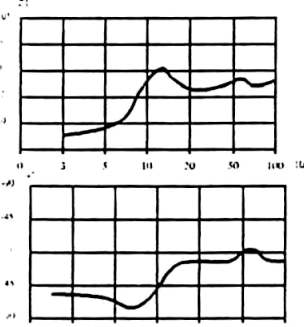
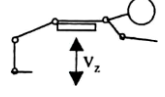
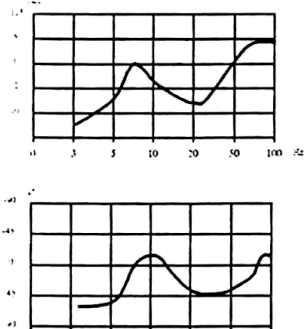
Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
1			Picioarele sunt întinse
2			Picioarele sunt drepte; solicitare suplimentară eu masa m la nivelul secțiunii lombare a coloanei vertebrale 4. $m=0$ kg 5. $m=0,8$ kg 6. $m=1,6$ kg
3			Picioarele sunt îndoite de la genunchi

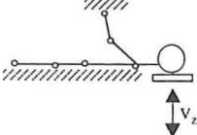
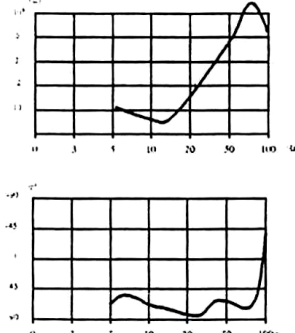
Tabel 2.4 (continuare)

Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
4			Subiectul stă pe călcâie
5			Subiectul stă pe vârfuri
6			Subiectul stă într-un picior

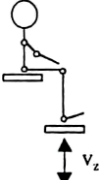
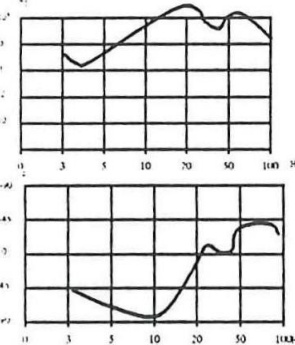
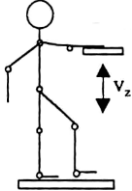
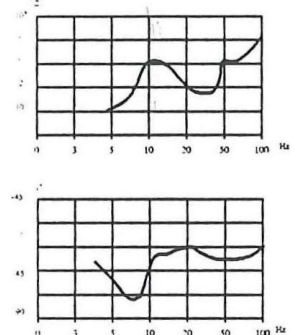
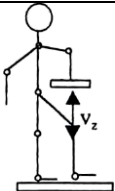
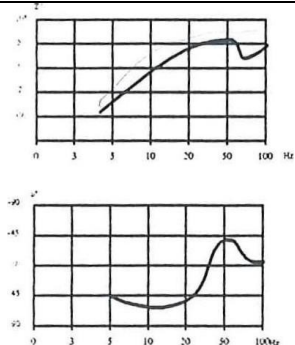
7			Subiectul stă în genunchi
---	---	--	---------------------------

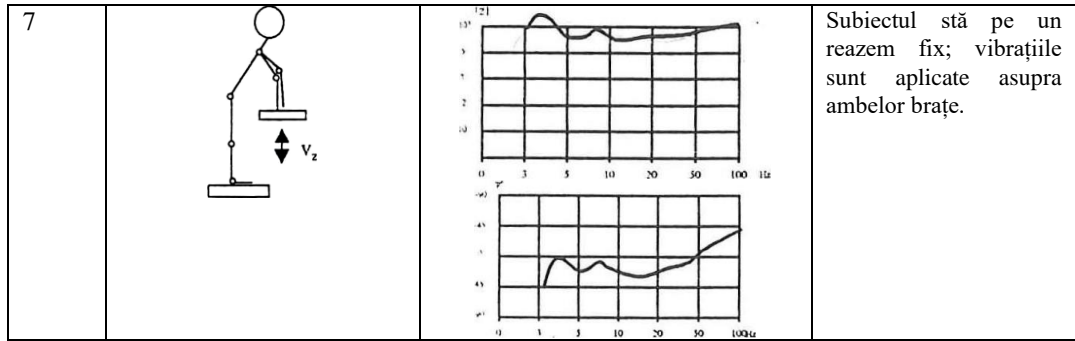
Tabelul 2.5 Impedanța mecanică de intrare $Z(p)$ în cazul vibrației aplicate diferitelor părți ale corpului uman

Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
1			Subiectul stă întins pe spate ; vibrațiile sunt aplicate în zona spatelui
2			Subiectul stă întins cu fața în jos ; vibrațiile sunt aplicate în zona pieptului

3			<p>Subiectul stă întins pe spate; vibrațiile sunt aplicate în zona capului</p>
---	---	---	--

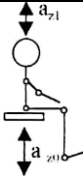
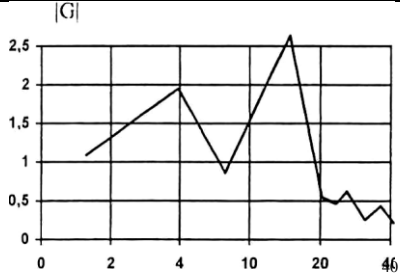
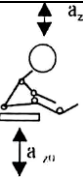
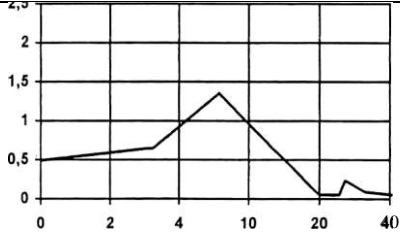
Tabel 2.5 (continuare)

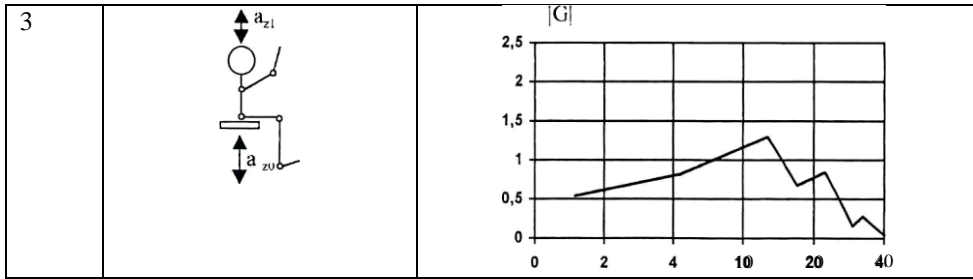
Nr.crt.	Schema de excitație și poziția	Modulul (Z) [daNs/m] Și argumentul impedanței φ	Observații
4			<p>Subiectul stă pe un reazem fix; vibrațiile sunt aplicate în zona picioarelor.</p>
5			<p>Subiectul stă pe un reazem fix; vibrațiile sunt aplicate asupra brațului întins.</p>
6			<p>Subiectul stă pe un reazem fix; vibrațiile sunt aplicate asupra brațului îndoit de la cot în unghi drept.</p>



Tabelele 2.6 și 2.7 prezintă caracteristicile amplitudine-frecvență ale vibrațiilor capului pentru diferite poziții ale subiectului uman, excitate după axa z. Principalele frecvențe de rezonanță se află între 4 și 6 Hz. Atunci când se analizează proprietățile dinamice ale corpului uman cu ajutorul modelului mecanic al unui sistem global de parametri, numărul maselor legate elastic este ales în funcție de numărul maximelor (vârfurilor) de rezonanță obținute experimental în caracteristica de frecvență.

Tabel 2.6 Caracteristica amplitudine-frecvență în cazul persoanei în poziția șezând

Nr.crt.	Poziție	Caracteristica amplitudine-frecvență $ G = \frac{a_{z1}}{a_0}$
1		
2		



Tabel 2.6 Caracteristica amplitudine-frecvență în cazul persoanei în picioare

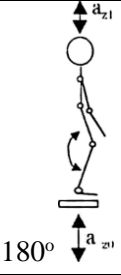
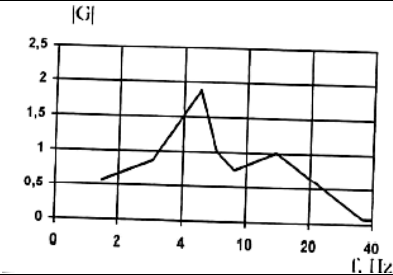

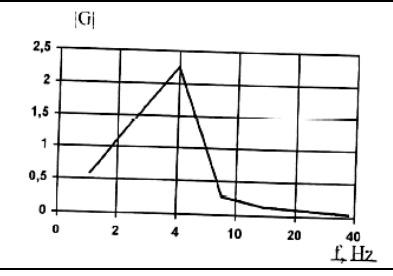
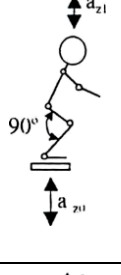
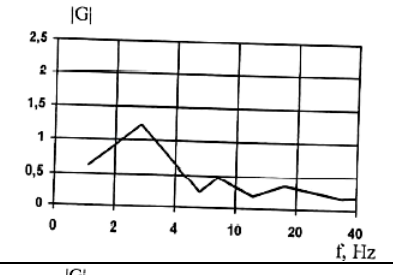
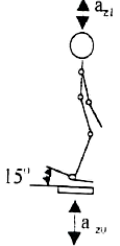
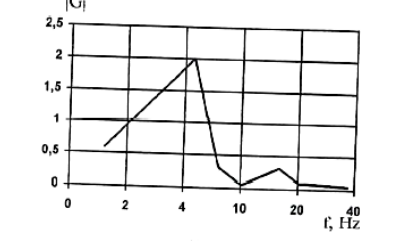
Nr.crt.	Poziție	Caracteristica amplitudine-frecvență $ G = a_{z1}/a_{z0}$
1		
2		
3		
4		

Figura 2.7 prezintă rezultatele expunerii unci persoane allate în poziția șezând, la vibrații verticale, în trei situații, și anume: poziția naturală; poziția încordată; poziția relaxată (destinsă).

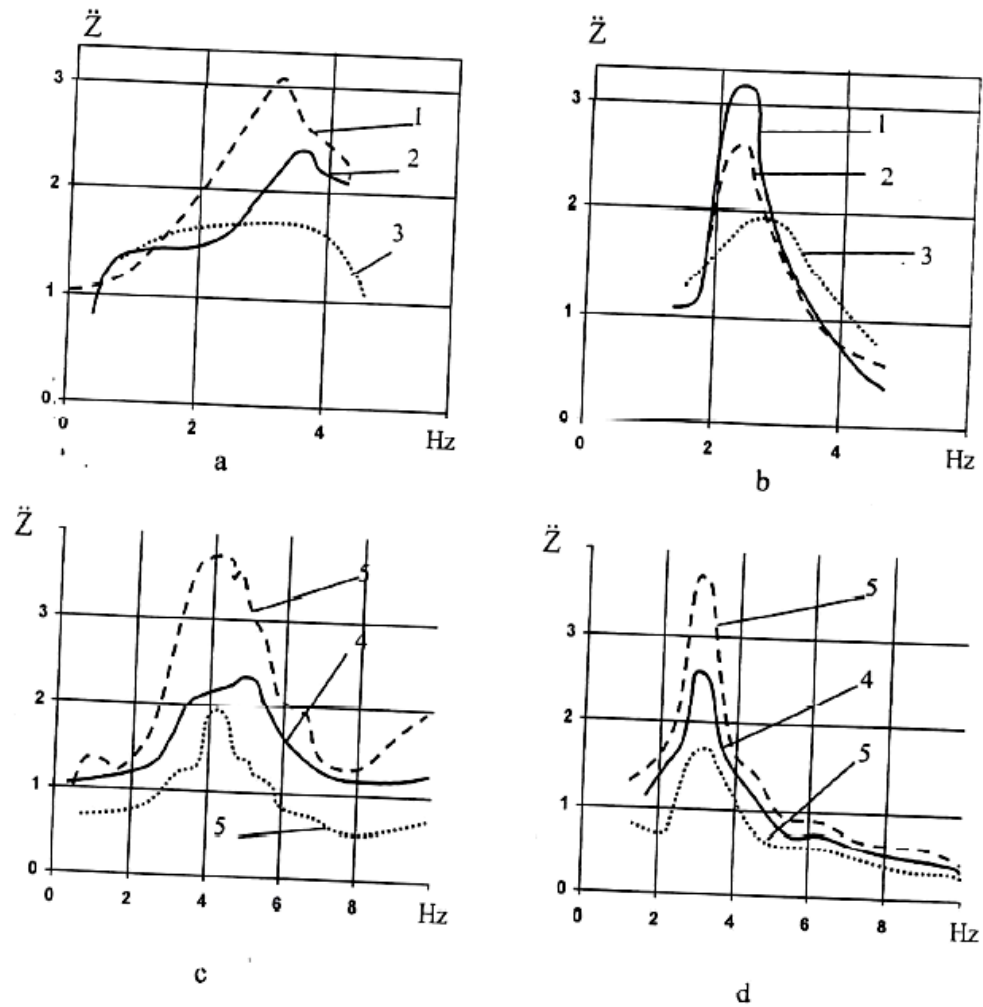


Figura 2.7 Caracteristica amplitudinea accelerației-frecvență în funcție de modul de așezare, masa și înălțimea persoanei:
a) și b) pentru diferite poziții (1- naturală, 2 — încordată, 3- relaxată);
c) și d) pentru diferite mase și înălțimi (4 — valori medii, 5- valori limită)

Accelerațiile la nivelul sternului, raportate la zona bazinului sunt foarte mici în cazul poziției relaxate (curba 3), mari în cazul poziției încordate (curba 2) și foarte mari în cazul poziției naturale (curba 1) (figura 2.7, a și b).

Accelațiile bazinului față de masa vibrantă sunt cele mai mari în poziția încordată și cele mai mici în poziția relaxată.

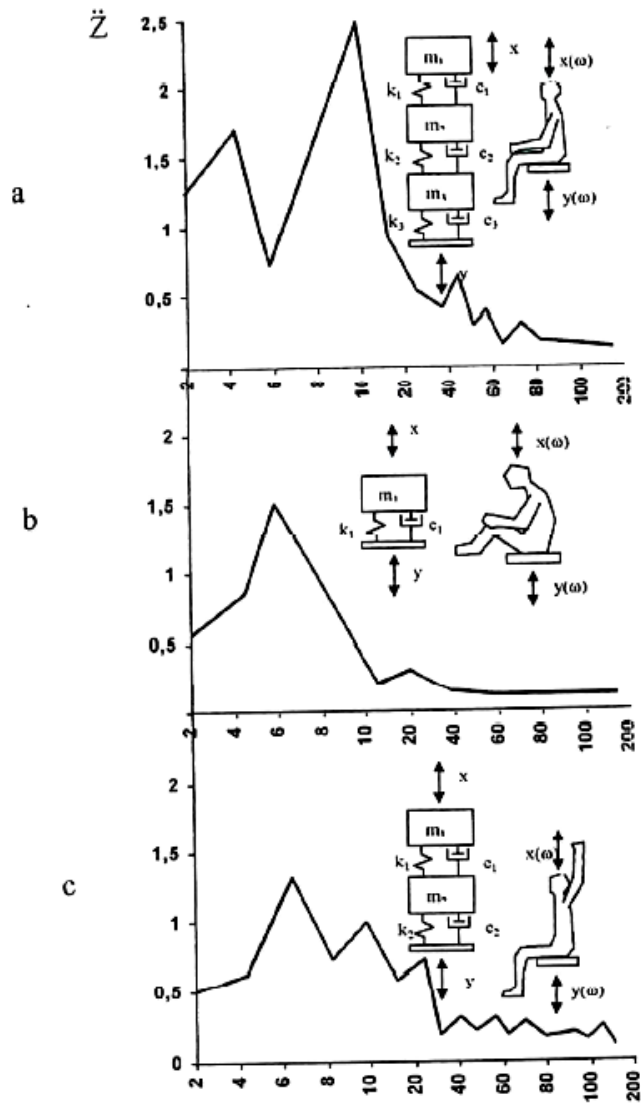


Figura 2.8 Caracteristici amplitudinea accelerației-frecvență ale corpului uman

Figura 2.8 (a, b și c) prezintă caracteristicile amplitudinea accelerației-frecvență pentru operatori șezând și în picioare, pentru diferite poziții de lucru. Accelerațiile capului în raport cu zona bazinului sunt, de asemenea, cele mai mari pentru poziția naturală (șezând).

În realitate, însă, operatorul care interacționează cu mașina este supus, pe lângă vibrațiile verticale, la excitații mecanice orizontale și unghiulare.

Comportarea unui operator, considerat ca un sistem vibrator, depinde atât de frecvența vibrațiilor, cât și de direcția excitației. În figura 2.9 sunt prezentate rezultatele cercetărilor efectuate asupra unui operator supus la vibrații prin intermediul unui scaun rigid, fixat la masa vibrantă. Toate curbele corespund acelorași senzații ale unei persoane pentru diferite direcții ale vibrațiilor, corespunzătoare principalelor axe ale corpului său. Curbele 1 și 2 reprezintă vibrațiile verticale transmise prin scaun și, respectiv, prin extremitățile membrelor inferioare. Pentru fiecare poziție a corpului există o frecvență la care acest nivel de senzații este cauzat chiar de un nivel minim al accelerației. Astfel, se observă că sub 3-4 Hz subiectul uman manifestă un disconfort mai pronunțat la vibrațiile verticale și la vibrațiile longitudinale și laterale pentru frecvențe superioare. De asemenea, vibrațiile verticale transmise prin extremitățile membrelor inferioare sunt suportate mai bine decât vibrațiile verticale transmise prin scaun.

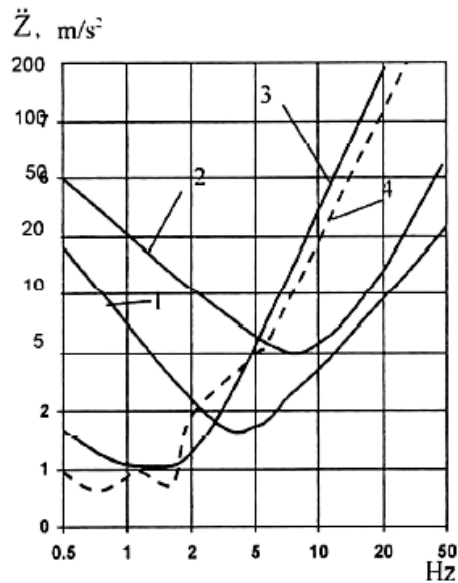


Figura 2.9 Linii de percepție egală a subiecților umani supuși la vibrații armonice:
 1, 2 — accelerații verticale transmise prin scaun și picioare;
 3, 4 — accelerații longitudinale și laterale

În figura 2.10 este reprezentată variația în timp a proprietăților dinamice ale corpului uman supus la vibrații longitudinale. Se observă că modificarea coeficientului de transmisibilitate, X_{cap}/X_{scaun} corespunzător unei persoane supuse timp de două ore la vibrații cu parametri constanți (frecvență—2.5 Hz, amplitudine—3 mm) este aleatorie. Totuși media coeficientului de transmisibilitate relativ dat de relația

$$K = \left[\frac{(X_{cap} / X_{scaun})_t}{(X_{cap} / X_{scaun})_{t_0}} \right] 100\%$$

pentru diferite niveluri de vibrații cu frecvența de 2.5 Hz indică reducerea considerabilă a acestuia, până la 64-76 % din valoarea inițială, în primele 15-30 minute. Experimental s-a dovedit că la vibrații orizontale și verticale, sistemul biologic are proprietatea de a-și modifica structura, astfel încât frecvența sa naturală să difere cât mai mult de frecvența perturbatoare. Această proprietate ar trebui avută în vedere la proiectarea sistemelor de protecție a operatorilor împotriva vibrațiilor.

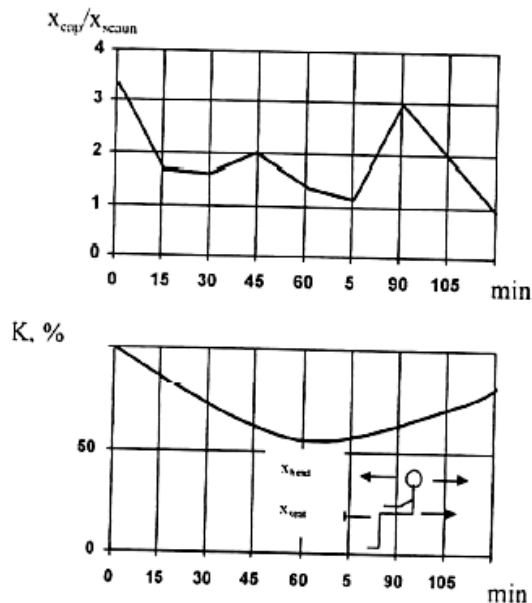


Figura 2. 10 Variația în timp a proprietăților dinamice ale corpului uman supus la vibrații longitudinale

Pe baza rezultatelor experimentale, au fost elaborate modele biomecanice cu mai multe mase, pentru excitații în plan vertical (figura 2.11).

Modelul din figura 2.11 a armonizează masele simulate ale capului, toracelui, bazinului, mâinilor, organelor interne și picioarelor. Modelul cu trei mase din figura 2.11 b corespunde unei persoane în poziția șezând, cu mâinile pe volan. Figura 2.11 c reprezintă tot un model cu trei mase, corespunzător unei persoane așezate pe o masă vibrantă.

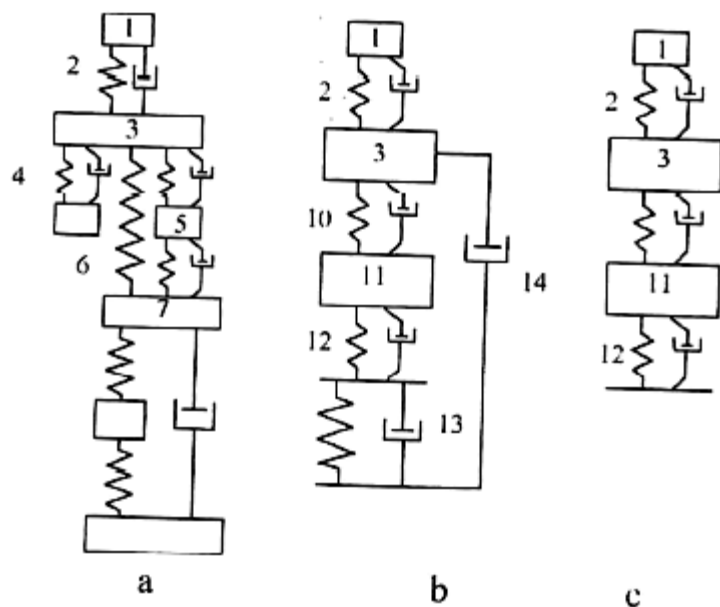


Figura 2.11 Modele dinamice ale corpului uman:

- 1 — cap; 2 — gât; 3 — piept;
 4 — mâini; 5 — abdomen; 6 — coloana vertebrală; 7 — bazin; 8 — picioare;
 9 — piept și mâini; 10 — zona lombară; 11 — bazin și mâini; 12 — fese; 13 — perna
 scaunului; 14 — frecarea cu perna scaunului

Parametrii acestor modele sunt enumerați în tabelul 2.8.

Tabelul 2.8 Masele diferitelor părți ale corpului uman

	Modelul din figura 2.11b	Modelul din figura 2.11c
cap	0,0051	0,0051
zona toracică	0,0235	0,0235
zona inferioară a corpului	0,0295	0,0430

Deoarece corpul uman, ca sistem vibrator este neliniar, se caracterizează prin vibrații cuplate după coordonate diferite. Excitațiile după axa orizontală generează vibrații după axa verticală și reciproc. Figura 2.12 ilustrează modurile de vibrație ale capului unui subiect supus la excitații vibratorii armonice orizontale, în pozițiile "în picioare" și "șezând". În ambele cazuri, amplitudinile vibrațiilor verticale ale capului cresc cu creșterea frecvenței, apropiindu-se de anumite valori de rezonanță (aproximativ 2 Hz) și apoi descresc din nou.

Comportarea corpului uman, ca sistem vibrator, poate fi descrisă și de funcția experimentală de transfer $H(s)$, $s = j\omega$, utilizând relația:

$$\ddot{H} = \ddot{Z}_{cap} / \ddot{Z}_{scaun},$$

unde \ddot{Z}_{cap} și \ddot{Z}_{scaun} sunt accelerații ale capului și, respectiv, ale scaunului.

Această funcție de transfer este prezentată în tabelul 2.9, aproximarea ei printr-o expresie algebrică și apoi transformarea dintr-o variabilă complexă s într-o variabilă reală, conducând la obținerea unei ecuații de ordinul șase dependentă de $\ddot{Z}_{cap}(t)$.

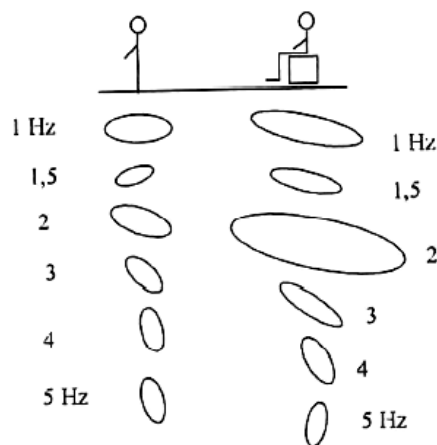


Figura 2.12 Traectoria deplasării corpului la vibrații armonice

Tabelul 2.9-Valorile funcției de transfer

Frecvența	Valoarea medie	Abatere efectivă	Limitele intervalului	
			superioară	inferioară
1	1,011	0,032	1,032	0,989
3	1,182	0,105	1,253	1,111
4	1,389	0,157	1,495	1,282
5	1,298	0,302	1,401	1,195
7	0,901	0,282	1,092	0,710
10	0,76	0,20	0,836	0,684
15	0,74	0,23	0,828	0,652
20	0,76	0,22	0,843	0,677
30	0,63	0,18	0,698	0,562
40	0,49	0,14	0,570	0,410
50	0,35	0,12	0,423	0,277
60	0,25	0,12	0,302	0,198

Funcția de transfer pentru o persoană în poziția șezând este construită după determinarea experimentală a caracteristicii amplitudine-frecvență și aproximarea polinoamelor sale fracțional-liniare. Tabelul 2.10 cuprinde coeficienții de rigiditate și de amortizare pentru un model cu trei mase (figura 2.11) la excitații armonice și de șoc. Aceste date coroborează neliniaritatea caracteristicilor elastice și de amortizare ale corpului uman.

Tabelul 2.9-Valorile funcției de transfer

Excitație	Partea corpului	Rigiditate	Coefficient de atenuare
armonică	gât	189	$0,12 \cdot 10^{-2}$
	regiune lombară	97	$1,01 \cdot 10^{-2}$
	șezut	47	$12,3 \cdot 10^{-2}$
prin impact	gât	223	$0,32 \cdot 10^{-2}$
	regiune lombară	170	$1,65 \cdot 10^{-2}$
	șezut	53	$4,53 \cdot 10^{-2}$

Atât performanța mașinii, cât și sănătatea operatorului sunt afectate de eficiența sistemului de protecție împotriva vibrațiilor și de reglarea corectă dintre proprietățile dinamice ale sistemului și caracteristicile dinamice ale operatorului.

Analiza proprietăților dinamice ale modelelor biomecanice permite formularea unor cerințe specifice pentru sistemele de protecție a operatorului împotriva vibrațiilor, și anume:

- necesitatea de a lua în considerare caracteristicile dinamice ale corpului uman la sintetizarea unci structuri și specificarea parametrilor sistemului de protecție împotriva vibrațiilor;
- eficiența sistemului de izolare a vibrațiilor în domeniul de frecvențe prescris;
- invarianța sensibilității sistemului de protecție împotriva vibrațiilor la variația proprietăților dinamice ale sistemului biologic, precum și la modificarea poziției de lucru, a gradului de oboseală;
- invarianța eficienței sistemului de protecție împotriva vibrațiilor la dispersia datelor antropometrice ale subiecților umani.