

# **SIMULAREA COMPORTARII DINAMICE A INFRASTRUCTURII ELASTICE PENTRU CLADIRI SUPUSE ACTIUNILOR SEISMICE**

Silviu NASTAC, Dr.ing.,  
Centrul de Cercetari pentru Mecanica Masinilor si Echipamentelor Tehnologice  
Universitatea "Dunarea de Jos", Facultatea de Inginerie din Braila  
Calea Calarasilor 29, 810017, Braila, Romania  
email: snastac@ugal.ro

**Abstract:** This study handle the base isolation elastic system simulation, based on the innovative solution, which assure the dynamic parameters to the limit values that provides structural strength and stability. Hereby, it will be presents two physico-mathematical models of a building, on the vertical deployment variant, respectively on the horizontal deployment variant, both with the relevant concluding remarks.

## **1. INTRODUCERE**

Lucrarea abordeaza modelarea sistemului elastic de izolare a bazei, utilizand o solutie inovativa, care asigura parametrii dinamici la valori limita ce nu pericliteaza rezistenta si stabilitatea structurala. Nivelul de performanta ce caracterizeaza utilizarea sistemelor elastice antivibratorii si/sau antiseismice este determinat de valorile parametrilor vibratiilor transmise - amplitudine, frecventa, transmisibilitate. Astfel, vor fi prezentate doua modele ale unei cladiri in varianta dezvoltarii pe verticala cat si in varianta dezvoltarii pe orizontala cu concluzii pertinente. Se face mentiunea ca pentru ambele situatii analizate au fost adoptate modele fizice de calcul bazate pe *ipoteza solidului rigid*, structura izolata, fiind considerata o masa concentrata rezemata elastic ortogonal de teren.

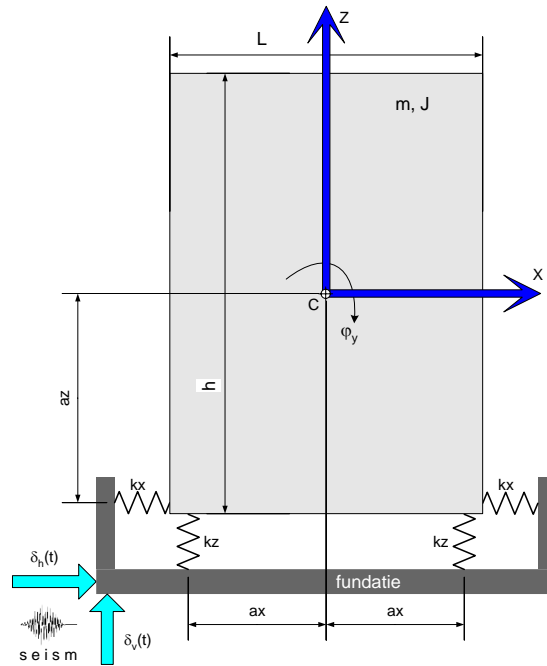
## **2. MODELE MATEMATICE UTILIZATE LA SIMULAREA COMPORTARII DINAMICE**

Analiza nivelului de performanta in cazul izolarii antivibratorii si antiseismice a unei cladiri a fost realizata pentru o constructie P+7, rezemata pe sisteme elastice speciale in configuratie etajata. Parametrii caracteristici ai cladirii sunt

- numar de niveluri = 8
- suprafata construita =  $20 \times 20 = 400$  mp
- inaltimea totala a constructiei = 24 m
- masa totala a constructiei = 2912 tone

Modelul fizic adoptat este prezentat in figura 1 si este caracterizat de sistemul de ecuatii de miscare (1). Varianta adoptata, caracterizata printr-o singura masa concentrata (modelul solidului rigid), rezemata elastic ortogonal la extremitati, este justificata de urmatoarele ipoteze

- a) caracterizarea nivelului de performanta in ceea ce priveste izolarea vibratiilor si a undelor seismice se face pe faza evaluarii valorilor parametrilor specifici ai vibratiilor transmise la fundatie.
- b) conform *principiului izolarii bazei*, montarea unui element elastic suplimentar ofera structurii izolate o valoare foarte scazuta a frecventei fundamentale, comparativ cu situatia in care structura este montata rigid pe fundatie si, de asemenea, comparativ cu domeniul de frecvente specific miscarii terenului (fundatiei). Primul mod dinamic al structurii izolate implica deformatii numai in sistemul de izolare, structura avand o comportare specifica unui corp rigid. Modurile dinamice superioare nu participa la miscare, astfel incat daca exista un aport superior de energie pe aceste frecvente inalte, aceasta energie nu se transmite structurii izolate.



**Figura 1. Modelul dinamic de calcul pentru o structura P+7 supusa miscarilor seismice**

Sistemul de ecuatii diferentiale de miscare, corespunzator modelului schematizat in figura 1, tinand cont de faptul ca excitatia seismica, de tip deplasare, actioneaza dupa cele doua directii ortogonale X si Z, este urmatorul

$$\begin{cases} m\ddot{x} + 4k_x x + 4a_z k_x \varphi_y = 4k_x \delta_h \\ J_y \ddot{\varphi}_y + 4\varphi_y (k_z a_x^2 + k_x a_z^2) + 4a_z k_x x = 4k_x a_z \delta_h \\ m\ddot{z} + 4k_z z = 4k_z \delta_v \end{cases} \quad (1)$$

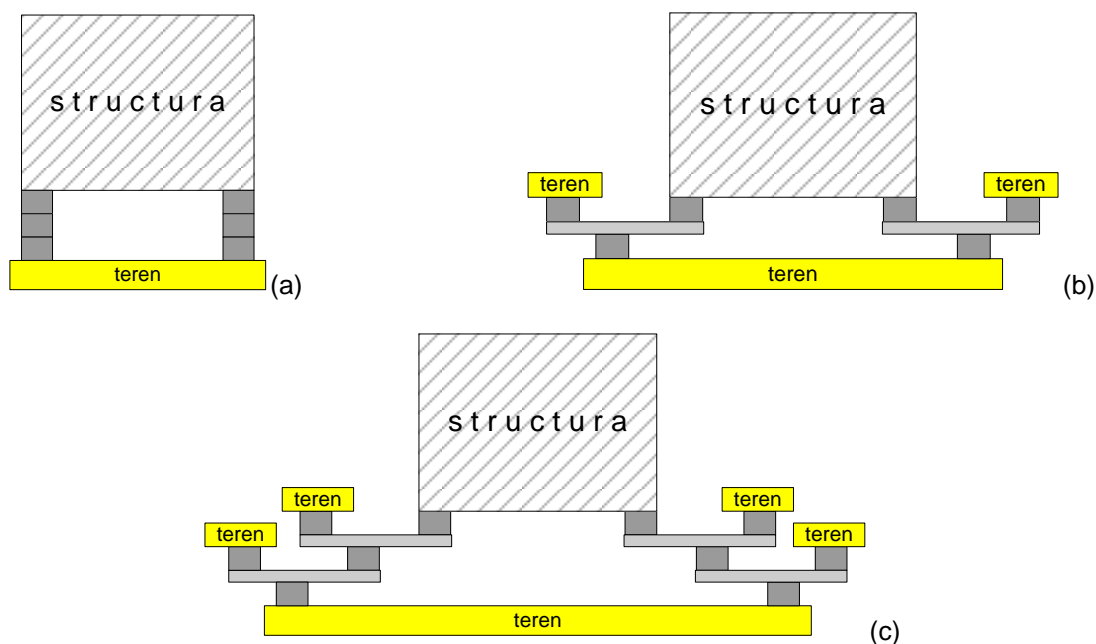
in care  $\delta_h$ ,  $\delta_v$  sunt deplasarile undelor seismice masurate pe cele doua directii ortogonale. Pentru  $\delta_h$  se va alege directia N-S sau E-V, in functie de modul de amplasare a constructiei si de directia predominanta a miscarii seismice.

Analiza comportarii in regim dinamic a fost realizata comparativ, pentru trei tipuri de rezemare si anume

- ⇒ utilizarea unui numar de elemente elastice identice, de forma paralelipipedica cu dimensiunile 1000x1000x250mm, din cauciuc antivibratil cu duritatea de 70<sup>0</sup> ShA, cu modulul elastic longitudinal static  $E_s=15\text{MN/m}^2$ , modulul elastic transversal static  $G_s=1,6\text{MN/m}^2$  si coeficientul de forma  $\Phi=1$ ; acestea sunt montate in grupuri de cate trei elemente in serie, cu armaturi metalice intermediare, grupurile fiind dispuse echidistant intre cladire si cuva de fundare - figura 2(a); au fost utilizate un numar  $n = 50$  de grupuri de elemente elastice.

- ⇒ utilizarea aceluiași număr de elemente elastice, de tipul celor descrise anterior, dispuse în configurație etajată cu o singură treaptă de funcționare; acest caz de rezemare este prezentat schematic în figura 2(b); au fost utilizate un număr  $n = 50$  de sisteme etajate.
- ⇒ utilizarea elementelor elastice descrise anterior, dispuse în configurație etajată cu două trepte de funcționare; acest caz de rezemare este prezentat schematic în figura 2(c); au fost utilizate un număr  $n = 50$  de sisteme etajate.

În tabelul 1 sunt prezentate valorile parametrilor caracteristici pentru toate elementele și sistemele elastice de rezemare utilizate în această analiză.



**Figura 2. Tipuri de rezemare a unei structuri**  
 (a) rezemare directă pe elemente elastice; (b) rezemare pe SES-CE cu o treaptă de lucru;  
 (c) rezemare pe SES-CE cu două trepte de lucru

**Tabelul 1. Sisteme elastice speciale utilizate la rezemarea unei clădiri P+7**

	directia	cazul de rezemare		
		1 rezemare directă pe elemente elastice	2 rezemare pe SES cu o treaptă de lucru	3 rezemare pe SES cu două trepte de lucru
numarul total de elemente elastice	-	150	150	250
numarul de sisteme elastice	-	50	50	50
rigiditatea unui element [MN/m]	H	6,4	6,4	6,4
	V	180	180	180
rigiditatea unui grup de elemente [MN/m]	H	2,13	4,3	4
	V	60	12,9	1,4
rigiditatea totală [MN/m]	H	106,5	215	200
	V	3000	645	70

Pe baza modelului prezentat în figura 1, cu sistemul de ecuații diferențiale de mișcare (1) și ținând cont de ecuațiile pulsațiilor proprii, se calculează valorile frecvențelor proprii pentru toate cele trei

moduri de vibratie si pentru fiecare din cele trei variante de rezemare considerate. Rezultatele sunt prezentate in tabelul 2.

**Tabelul 2. Valorile parametrilor de izolare la rezemarea unei cladiri P+7**

	gradul de libertate	cazul de rezemare		
		1	2	3
frecventa proprie [Hz]	Z	5,12	2,37	0,78
	X	5,82	3,31	2,31
	$\varphi_y$	0,94	1,09	0,50

Analizand valorile din tabelul 2, corespunzatoare modului de vibratie Z, se observa ca valoarea minima se inregistreaza pentru cel de al treilea caz de rezemare si este de 0,78 Hz. Acestei valori ii corespunde valoarea de 0,408 m pentru sageata statica totala. Tinand cont de faptul ca aceste valori corespund situatiei de utilizare a unui SES-CE cu doua trepte de lucru, de dimensiunile geometrice ale elementelor elastice din cauciuc ( $h = 0,250$  m) si de valoarea parametrului definitiviu a SES-CE-2tr,  $\delta = b/a = d/c = 2$  (figura 2.b), rezulta ca aceasta situatie de utilizare practica a SES este perfect realizabila. Verificarea acestei afirmatii se face prin evaluarea deformatiilor pe fiecare reazem elastic din componenta SES-CE-2tr. Astfel

a) sarcina pe fiecare SES-CE-2tr este  $Q_o = mg/50 \cong 0,6 \cdot 10^6$  N

b) sarcina distribuita pe fiecare reazem se calculeaza cu relatiile

$$Q_o^{(1)} = Q_o i; Q_o^{(2)} = Q_o i \delta; Q_o^{(3)} = Q_o i^2; Q_o^{(4)} = Q_o \delta; Q_o^{(5)} = Q_o;$$

in care

$$\delta = b/a = d/c = 2 \text{ si } i = b + a/c = d + c/c = \delta + 1 = 3$$

c) deformatia pe fiecare reazem al SES-CE-2tr se calculeaza cu relatia  $z_i = Q_o^{(i)} / k_i$ , in care  $k_i$  este rigiditatea reazemului ( $i$ ).

Tinand cont de valorile parametrilor sistemului de rezemare considerat, rezulta ca deformatiile pe fiecare reazem sunt

$$z_1 = 0,01 \text{ m}; z_2 = 0,02 \text{ m}; z_3 = 0,03 \text{ m}; z_4 = 0,007 \text{ m}; z_5 = 0,003 \text{ m};$$

deci valoarea maxima este in reazemul numarul 3 si are valoarea  $z_3 = 0,03$  m. Daca deformatia maxima pe element este 20% din inaltimea sa, rezulta ca elementul elastic montat in reazemul 3 ar trebui sa aiba minimum 0,15 m inaltime.

In concluzie, avand in vedere faptul ca elementele elastice utilizate au  $h = 0,25$ m, se confirma faptul ca sistemul elastic considerat initial este fezabil si asigura performantele necesare unei bune izolari antivibratorii si antiseismice.

In ceea ce priveste valorile frecventelor proprii pentru celelalte moduri de vibratie, se observa urmatoarele aspecte:

a) pentru modul X, valoarea minima a frecventei proprii este de 2,31 Hz, corespunzatoare situatiei 3 de rezemare, ceea ce inseamna o sageata statica (echivalenta) de 0,047 m; aceasta situatie de lucru este perfect acceptabila, tinand cont numai de faptul ca un singur element elastic din cauciuc cu dimensiunea pe directie orizontala  $h_e = 1,00$

m, are deformatia maxima acceptabila la forfecare de 15% din  $3h_e$  adica 0,450 m (ceea ce asigura capacitatea de preluare a sagetii statice calculate anterior).

- b) valorile foarte reduse ale frecventelor proprii pentru modul de vibratie  $\varphi_y$ , nu impun masuri deosebite in ceea ce priveste capacitatea sistemului de rezemare de a prelua sageata statica corespunzatoare, pentru ca amplitudinile miscarii dupa acest mod propriu sunt foarte mici si participatia acestor componente la miscarea generala a sistemului poate fi neglijata.

Daca se considera o cladire cu un singur nivel, cu urmatoarele caracteristici

- numar de niveluri = 1
- suprafata construita =  $40 \times 40 = 1600$  mp
- inaltimea totala a constructiei = 4 m
- masa totala a constructiei = 2912 tone

rezemata pe sisteme elastice antivibratorii si antiseismice de tipul celor prezentate in paragrafele anterioare (solutii de rezemare identice cu cele utilizate la constructia P+7), a carei model fizic este cel prezentat in figura 3, cu sistemul de ecuatii de miscare asociat (2), rezulta urmatoarele valori ale frecventelor proprii pentru cele trei grade de libertate si pentru cele trei variante de rezemare considerate - tabelul 3.

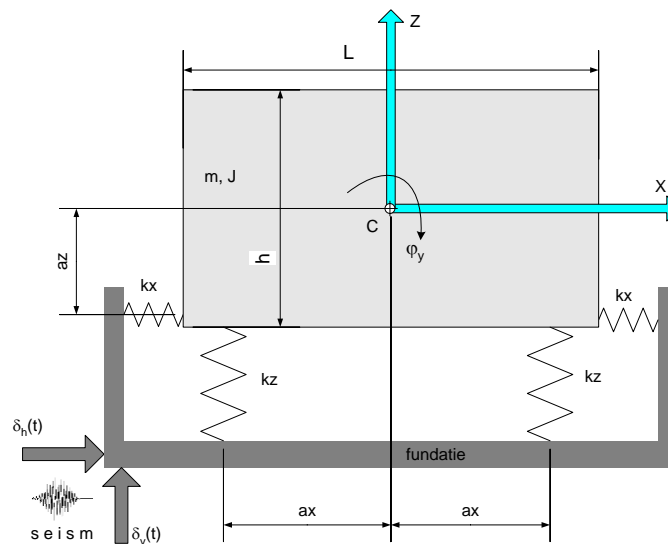


Figura 3. Modelul dinamic de calcul pentru o structura P+0 supusa miscarilor seismice

$$\begin{cases} m\ddot{x} + 4k_x x + 4a_z k_x \varphi_y = 4k_x \delta_h \\ J_y \ddot{\varphi}_y + 4\varphi_y (k_z a_x^2 + k_x a_z^2) + 4a_z k_x x = 4k_x a_z \delta_h \\ m\ddot{z} + 4k_z z = 4k_z \delta_v \end{cases} \quad (2)$$

Tabelul 3. Valorile parametrilor de izolare la rezemarea unei cladiri cu un singur nivel

	gradul de libertate	cazul de rezemare		
		1	2	3
frecventa proprie [Hz]	Z	5,12	2,37	0,78
	X	8,82	4,10	1,45
	$\varphi_y$	0,96	1,37	1,23

### 3. REZULTATELE SIMULĂRII COMPORTĂRII ÎN REGIM DINAMIC

Pentru evaluarea directă a nivelului de performanță a acestor SES în condiții reale de exploatare, a fost realizată o analiză dinamică a comportării clădirilor considerate, în timpul acțiunii unui seism. Modelele fizico-matematice sunt cele prezentate anterior - figura 1, figura 3 - cu sistemele de ecuații de mișcare descrise de (1), respectiv (2), iar mișcarea perturbatoare dată de semnalul de deplasare înregistrat în timpul cutremurului din Vrancea, din 13 martie 1998, înregistrat de stația *INCERC* (file header: INCERC // Vrancea 13 MAR 1998 13:14:37.0 5.2md 45.55N 26.41E 155Km). Din cele două semnale N-S și E-V, a fost adoptat cel pe direcția N-S, datorită faptului că amplitudinea acestuia, pe perioada de analiză, a avut valori superioare celui de pe direcția E-V. Se face mențiunea că din întreaga durată de înregistrare a semnalului seismului (7680 de esantioane), a fost preluată zona de amplitudine maximă, între secunda 6,9 și secunda 12,5 (o durată de 5,6 secunde; 810 esantioane).

A fost evaluat răspunsul sistemului la acțiunea acestui seism, obținut cu ajutorul metodelor numerice de integrare a sistemelor de ecuații diferențiale, pentru toate cele trei cazuri de rezemare propuse și analizate anterior și pentru valorile rigidității elementelor elastice de rezemare din tab. 1.

Analizând comparativ variațiile celor trei parametri, se observă următoarele aspecte

- ✓ pentru deplasarea pe verticală Z, se observă că odată cu îmbunătățirea soluției de rezemare nivelul maxim al semnalului descrește semnificativ.
- ✓ comparativ cu amplitudinea maximă a seismului pe direcție verticală, chiar și pentru soluția de rezemare directă pe elementele elastice, răspunsul sistemului pe această direcție este de aproximativ 2 ori mai redus.
- ✓ pe direcția N-S, analiza răspunsului sistemului trebuie să țină cont și de valorile corespunzătoare ale rigidităților echivalente ale sistemelor speciale de rezemare. Astfel, în oricare din soluțiile de rezemare analizate, amplitudinea maximă a răspunsului sistemului este inferioară celei a excitației după aceeași direcție (N-S).
- ✓ în ceea ce privește mișcarea de rotație în jurul axei Y, aceasta are valori foarte reduse (inferioare valorii de 0,008 grade), a căror influență asupra mișcării generale a sistemului, poate fi neglijată - deplasarea pe direcție orizontală la capătul superior al clădirii este de aproximativ 0,002 m. Se menționează că diagramele prezintă mișcarea reală a sistemului, ca sumă a tuturor modurilor proprii. Acest fapt, împreună cu analiza valorilor extreme ale evoluției temporale ale  $\varphi_y$ , întărește afirmația anterioară conform căreia mișcarea după acest grad de libertate este neglijabilă.
- ✓ deși compozițiile spectrale ale semnalelor seismice indică un domeniu de frecvențe destul de larg, se observă că valorile frecvențelor proprii ale SES analizate asigură o funcționare stabilă a ansamblului *structura - reazem - fundație*, în *regim post-rezonantă*, cu un grad superior de izolare a vibrațiilor.

### 4. CONCLUZII

Analizând valorile din tabelul 3, se observă că valoarea minimă a frecvenței este identică cu cea din tabelul 2 (corespunzătoare clădirii P+7) și a fost obținută pentru același caz de rezemare (pe SES-CE cu două trepte de funcționare). Ținând cont de faptul că, în ambele cazuri, au fost utilizate elemente elastice din cauciuc identice, rezultă că și în acest caz (P+0), sistemul elastic de rezemare este fezabil și asigură preluarea deplasărilor maxime sub acțiunea sarcinilor statice și dinamice.

În tabelul 4 sunt prezentate comparativ valorile parametrilor amplitudine maximă și frecvență dominantă din compoziția spectrală, pentru cele două cazuri analizate - clădire P+7 și clădire P+0 - în cele trei condiții de rezemare. Amplitudinea maximă a semnalului a fost determinată din

diagrama evolutiei temporale a deplasarii dupa cele trei grade de libertate considerate ( $Z$ ,  $X$ ,  $\varphi_y$ ). Valoarea frecventei dominante corespunde valorii maxime a modulului amplitudinii determinat din caracteristica frecventiala a semnalului de deplasare dupa cele trei grade de libertate considerate ( $Z$ ,  $X$ ,  $\varphi_y$ ). Daca pe diagrama corespunzatoare caracteristicii frecventiale au existat doua (sau mai multe) valori ale frecventei, pentru care modulul amplitudinii avea valori semnificative, atunci au fost preluate primele doua valori, cea de a doua valoare fiind trecuta in tabelul 4 in paranteza.

**Tabelul 4. Valori comparative ale parametrilor specifici pentru cladirile P+7, respectiv P+0**

tip cladire	gradul de libertate	u.m.	cazul de rezemare		
			1 rezemare directa	2 rezemare pe SES-CE-1tr	3 rezemare pe SES-CE-2tr
<b>amplitudinea maxima</b>					
inalta (P+7)	Z	m	0.0060	0.0026	0.0021
joasa (P+0)		m	0.0060	0.0026	0.0021
inalta (P+7)	X	m	0.0010	0.0008	0.0006
joasa (P+0)		m	0.0012	0.0010	0.0020
inalta (P+7)	$\varphi_y$	$\times 1E-04$ rad	0.2	1.4	1.1
joasa (P+0)		$\times 1E-04$ rad	0.03	0.3	3
<b>frecventa dominanta</b>					
inalta (P+7)	Z	Hz	15.4	7.3	2.3
joasa (P+0)		Hz	15.4	7.3	2.3
inalta (P+7)	X	Hz	2.9 (17.4)*	3.2 (10.0)*	7.0 (1.4)*
joasa (P+0)		Hz	2.9	4.3	4.7 (3.6)*
inalta (P+7)	$\varphi_y$	Hz	17.4 (2.9)*	10.0 (3.4)*	7.0 (1.4)*
joasa (P+0)		Hz	26.1 (2.9)*	12.2 (4.3)*	4.7 (3.6)*

Nota: \* valorile din paranteza corespund celei de a doua frecvente dominante din compozitia spectrala a semnalului analizat (in cazul in care valoarea amplitudinii corespunzatoare este semnificativa).

Analizand valorile prezentate sintetic in tabelul 4, se contureaza urmatoarele concluzii

- sistemele elastice de izolare a bazei la actiuni dinamice perturbatoare ajuta la minimizarea efectelor dinamice resimtite in structura, prin reducerea frecventei proprii a ansamblului cladire - izolator - teren si "mutarea" regimului de lucru in zona post-rezonanta - a se vedea si valorile din tab. 2 si 3.
- tinand cont de compozitia spectrala a miscarii perturbatoare, de valorile din tabelul 4 si de evolutiile temporale, respectiv compozitiile spectrale ale deplasarii dupa cele trei grade de libertate, se observa reducerea amplitudinii deplasarii liniare dupa cele doua grade de libertate X si Z, in domeniul frecventelor superioare celei de 10 Hz (valoarea limita inferioara a domeniului de frecventa pentru care amplitudinile miscarii seismice sunt semnificative).
- cele doua frecvente dominante corespund celor doua grade de libertate X si  $\varphi_y$  cu miscari cuplate (au valori identice pentru aceeasi situatie de lucru analizata).
- miscarea pe directie verticala este decuplata de celelalte doua si nu este influentata de modul de distribuire al "sarcinii"; parametrii specifici pentru miscarea pe directie verticala sunt influentati doar de rigiditatea echivalenta a sistemului de rezemare, pe directie verticala si de valoarea masei totale a structurii rezemate; valorile din tabelul 4, atat in ceea ce priveste amplitudinea, cat si frecventa, sunt justificative in acest sens.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] **Bratu, P.** – *Vibratiile sistemelor elastice*, Ed. Tehnica, Bucuresti, 2000.
- [2] **Bratu, P.**, *Sisteme elastice de rezemare pentru masini si utilaje*, Ed. Tehnica, Bucuresti, 1990.
- [3] **Bratu, P., Năstac, S.**, *Sistem elastic de izolare cu acordare joasa pentru echipamente vitale supuse miscarilor seismice*, Buletinul Stiintific al celei de a XXVI-a Conferinta Nationale de Mecanica Solidelor, Braila, 14-15 iunie 2002, ISBN 973-8132-28-2.
- [4] **Nastac, S.**, *Experimental Dynamics of the PoSEID Systems*, The Proceedings of the Symposium - SISOM 2006, Romanian Academy - Institute of Solid Mechanics, Bucharest, May 17-19, 2006.
- [5] **Nastac, S.**, *Computational Dynamics of the PoSEID Systems*, The Proceedings of the Symposium - SISOM 2006, Romanian Academy - Institute of Solid Mechanics, Bucharest, May 17-19, 2006.
- [6] **Nastac, S.** - *Non-Linear Stiffness Influences About the Dynamics of the Anti-Vibrational Passive Isolation Systems*, Romanian Journal of Acoustics and Vibration, volume 1, number 1, october 2004.
- [7] **Nastac, S.** - *Model fizico-matematic pentru analiza comportarii in regim dinamic a sistemelor de protectie antivibratila*, Buletinul Stiintific al celei de a XXVIII-a Conferinta Nationale de Mecanica Solidelor, Targoviste, 28-29 mai 2004.
- [8] **Nastac, S., Axinti, G.** - *Minimizarea efectelor produse de undele seismice prin izolarea bazei structurilor*, Buletinul Stiintific al Conferintei de Dinamica Masinilor, Universitatea "Transilvania" din Brasov, mai 2005.
- [9] **Nastac, S.** - *The Functional Characteristics Influences of the Base Isolation Systems About the Global Dynamic Performances of the Structures*, Proceedings of the VIII-th Symposium "Acustica si vibratiile structurilor mecanice", Universitatea "Politehnica" din Timisoara, mai 2005.
- [10] **Nastac S.**, *Dynamic Analysis of Vibration Isolation Systems for Construction Embedded Equipments*, A Dissertation submitted to the University "Dunarea de Jos" of Galati for the PhD Degree, Braila, Romania, 2006.
- [11] **Nastac S.**, *Contributions for Dynamic Behaviour of the Antivibrational and Antiseismical Passive Isolation Elastic Systems*, A Dissertation submitted to the University "Dunarea de Jos" of Galati for the Master of Science in Mechanical Engineering Degree, Braila, Romania, 2004.
- [12] **Nastac S.**, *Computation Engineering with Applications*, Impuls House Publishing, Bucuresti, Romania 2004.
- [13] **Oproescu, Gh., Nastac, S.**, *Elemente de modelare numerica*, Ed. Libertatea, Braila, 2000.
- [14] **Sajal Kanti Deb**, *Seismic Base Isolation - An Overview*, Current Science Rev., Special Section: Geotechnics and Earthquake Hazards, Vol. 87, No. 10, November 2004.
- [15] **Trevor E. Kelly**, *Base Isolation of Structures*, Design Guidelines, Holmes Consulting Group Ltd., July 2001.
- [16] **Harris C.M., Piersol A.G.**, *Shock and Vibration Handbook* - 5th Edition, McGraw Hill, 2002.
- [17] **Ivan S., Robinson W.H., McVerry G.H.**, *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley and Sons Inc, New York, 1993.
- [18] **James, M.K.**, *Base Isolation: Origin and Development*, EERC News, Vol. 12, No. 1, January 1991.