

CONTRIBUȚII LA EXPERIMENTAREA, MODELAREA ȘI SIMULAREA UNUI AMORTIZOR MAGNETO-REOLOGIC

Constantin Tabacu

constantin_tabacu@yahoo.com

Universitatea Politehnică București

Rezumat: În această lucrare se prezintă unele rezultate proprii, obținute prin cercetarea științifică din perioada doctoranturii privind experimentarea, modelarea și simularea unui amortizor magneto-reologic(MR) destinat controlului semiactiv al sistemului de suspensie al autovehiculelor. Pentru testare, este conceput un amortizor MR care lucrează în modul de scurgere. Testarea performanței acestui amortizor este efectuată cu dispozitivul INSTRON. Apoi este adoptat un model matematic, Bouc-Wen [1], pentru a evalua comportarea și performanțele amortizorului MR testat prin simulare în MATLAB/simulink. Din datele experimentale ale amortizorului MR, sunt determinați coeficienții modelului. Rezultatele simulării sunt comparate cu datele experimentale. Compararea făcută validează modelul și parametrii amortizorului MR măsurați în faza de testare experimentală.

Cuvinte cheie: amortizor magneto-reologic(MR), modelare, testare, estimare parametri, simulare, simulink.

Abstract: In this paper, a semi-active control of vehicle suspension system with magnetorheological (MR) damper is presented. At first a MR damper working in flow mode is designed. Performance testing is done for this damper with INSTRON machine. Then a mathematical model, Bouc-Wen model, is adopted to characterize the performance of the MR damper. With optimization method in MATLAB and experimental results of MR damper, the coefficients of the model are determined. Finally, a scaled quarter car model is set up including the model of the MR damper and a semi-active control strategy is adopted to control the vibration of suspension system. Simulation results show that with the semi-active control the vibration of suspension system is well controlled.

Keywords: magnetorheological (MR) damper ,modeling, testing ,parameters estimation, simulation,simulink.

1. Introducere

Controlul vibrației sistemului de suspensie al autovehiculului a fost un subiect de cercetare foarte activ deoarece poate asigura o performanță cât mai bună pentru confort și siguranță. Pentru un timp îndelungat, au fost făcute eforturi pentru a face ca sistemul de suspensie să funcționeze într-o condiție optimă prin optimizarea parametrilor sistemului de suspensie, dar pentru limitarea internă a sistemului pasiv de suspensie îmbunătățirea este efectivă numai într-o anumită rază de frecvență. Comparativ cu suspensiile pasive, suspensiile active pot îmbunătăți performanța sistemului de suspensie pe o frecvență cuprinzătoare. Suspensiile semiactive au fost propuse la începutul anilor 1970 [1] și pot fi aproape la fel de efective ca și suspensiile complet active în îmbunătățirea calității comportamentului autovehiculului. Când sistemul de control cedează, suspensia semiactivă poate continua să funcționeze în condiție pasivă. Comparativ cu sistemele de suspensie activă și pasivă, sistemul de suspensie semiactivă combină avantajele ambelor suspensii, active și pasive. Asigură o performanță mai bună comparativ cu suspensia pasivă și este economică, sigură, și nu necesită nici elemente de putere mare sau o sursă de alimentare electrică de mare putere[2].

În suspensiile semiactive timpurii, reglarea forței de amortizare poate fi obținută prin ajustarea zonei orificiului din racordul pentru umplere cu ulei al amortizorului, astfel schimbând rezistența la flux fluid. Mai recent, aplicațiile posibile și controlabile ale fluidelor electro-reologic (ER) și magneto-reologic (MR) în amortizoare în prezența unui câmp electric înalt sau un câmp magnetic, au fost investigate de mulți cercetători [3,4]. Fluidele ER și MR sunt două tipuri de materiale ingenioase, formate prin amestecarea de particule fine într-un lichid cu vâscozitate scăzută. În prezența unui câmp electric intens sau respectiv un câmp magnetic de intensitate adecvată, particulele se vor ordona în structuri fibroase ca un lanț. Când intensitatea câmpului electric sau respectiv a câmpului magnetic ajunge la o anumită valoare, suspensia va fi solidificată și are un efort de scurgere mare; invers, suspensia poate fi lichefiată din nou prin înlăturarea câmpului electric sau câmpului magnetic. Procesul de schimbare este foarte rapid, mai puțin de câteva milisecunde și poate fi ușor de controlat. Consumul de energie este, de asemenea foarte mic, numai câțiva watti. Ambele fluide ER și MR au fost dezvoltate independent, inițial în anii 1940 [5,6]. Inițial, fluidele ER au primit cea mai mare atenție, dar în cele din urmă s-a constatat că nu sunt atât de potrivite pentru majoritatea aplicațiilor și au fost înlocuite cu fluide MR. În starea de ne activare sau oprire, ambele fluide MR și ER în mod caracteristic au vâscozitate similară, dar fluidele MR manifestă o mai mare creștere în vâscozitate și deci putere critică, decât corespondentele lor electrice. Pentru fluidul ER, efortul maxim de scurgere este de 10kPa; dar pentru fluidul MR, efortul maxim de scurgere poate atinge 100 kPa. Pentru a caracteriza performanța amortizorului MR, au fost propuse mai multe modele de mulți dintre cercetători [1-4]. Spencer și colaboratorii săi [2], spre exemplu, au propus un model pe care l-au denumit *Bouc-Wen modificat* pentru a descrie comportamentul amortizorului MR.

Acest model poate capta cu mai multa fidelitate bucelele de *histerezis forță-deplasare* cât și bucla *histerezis forță-viteză*, care implică nu mai puțin de 14 parametri.

În această lucrare, mai întâi este concepută și realizată structura bazei de experimentare a unui amortizor MR prevăzut cu fluid MR132LD. Este efectuată estimarea parametrilor modelului matematic Bouc-Wen folosind datele obținute prin experimentarea amortizorului. Rezultatele simulării în MATLAB/simulink (pe baza modelului obținut) sunt comparate cu datele experimentale. Comparația făcută validează modelul și parametrii măsurați în faza experimentării amortizorului MR.

2. Experimentarea amortizorului MR și estimarea parametrilor

2.1. Structura amortizorului MR și organizarea experimentării

Amortizorul prototip MR funcționează în modul de scurgere după cum rezultă din figura 1. Amortizorul are o lungime de 218 mm în poziție extinsă și cursa de ± 25 mm. Cilindrul principal conține un piston, un circuit magnetic, un acumulator și fluid MR. Fluidul MR 132 LD, care a fost procurat de la Corporația Lord, este folosit în amortizor [5]. Valva de fluid MR conținută de piston este compusă dintr-un canal circular de curgere cu o trecere de 1.5 mm. Câmpul magnetic este aplicat radial peste trecere, perpendicular pe direcția curgerii fluidului. Lungimea axială totală (de 6 mm) a canalului de curgere este expusă acțiunii câmpului magnetic aplicat. Vâscozitatea fluidului MR din valva va fi crescută prin creșterea curentului electric ce trece prin electromagnet, astfel curgerea fluidului MR prin valvă va fi rezistența și mărind forța de amortizare a amortizorului MR. Rezistența bobinei electromagnetice este 19 ohmi.

Pentru a simula comportamentul amortizorului MR în regim de control al vibrației a sistemului de suspensie a autovehiculelor, trebuie dezvoltat un model care să reproducă cât mai fidel comportamentul amortizorului MR. Un mecanism de testare experimental este montat pentru a determina proprietățile funcționale ale amortizorului MR și a obține datele dinamice necesare pentru estimarea parametrilor modelului. Amortizorul MR este fixat într-un Mecanism de Testare INSTRON automatizat (Model 8874). Mecanismul de Testare INSTRON încorporează o celulă sarcină și un senzor de deplasare pentru a măsura forța produsă de amortizorul MR și deplasarea pistonului. Sunt folosite două tipuri de tensiuni de excitație, sinusoidală și triunghiulară. Frecvențele de excitație sunt 1, 2 și 4 Hz și amplitudinile excitației sunt 1, 2 și respectiv 4 mm. Curentul electric aplicat este de la 0 la 1 A cu majorare de 0.25 A. Semnalele achiziționate corespunzătoare reacțiilor de forță și deplasare în timp ale amortizorului sunt eșantionate simultan de computer printr-un convertor A/D. Semnalul de excitație este produs de computer și trimis către elementul de acționare hidraulic printr-un convertor D/A.

Rezultatele testării amortizorului MR. Graficele răspunsului în timp la excitația amortizorului MR cu frecvența de 1 Hz sub influența a cinci valori distincte ale curenților electrici constanți sunt prezentate în figura 2. Efectul câmpului magnetic pe forța de amortizare este arătată clar în aceste figuri. O dată cu creșterea curentului electric aplicat, forța de amortizare va crește remarcabil, deși când curentul electric aplicat este mai mare de 0.75 A, creșterea forței de amortizare nu mai este semnificativă. Acest lucru înseamnă că saturația efectului MR are loc la 0.75 A. Este, de asemenea, de observat că forța produsă de amortizor nu este chiar centrată la zero. Acest lucru se datorează în parte prezenței unui acumulator în amortizorul MR, care este umplut cu aer comprimat puternic și în parte datorită existenței aerului în cilindru (deoarece cilindrul nu poate fi umplut complet cu fluid MR). Forța maximă a amortizorului MR la 1 A este aproximativ de opt ori mai mare de cât forța dezvoltată în absența câmpului electric. Rezultate similare au fost obținute prin experimentarea la alte frecvențe și amplitudini ale excitației.

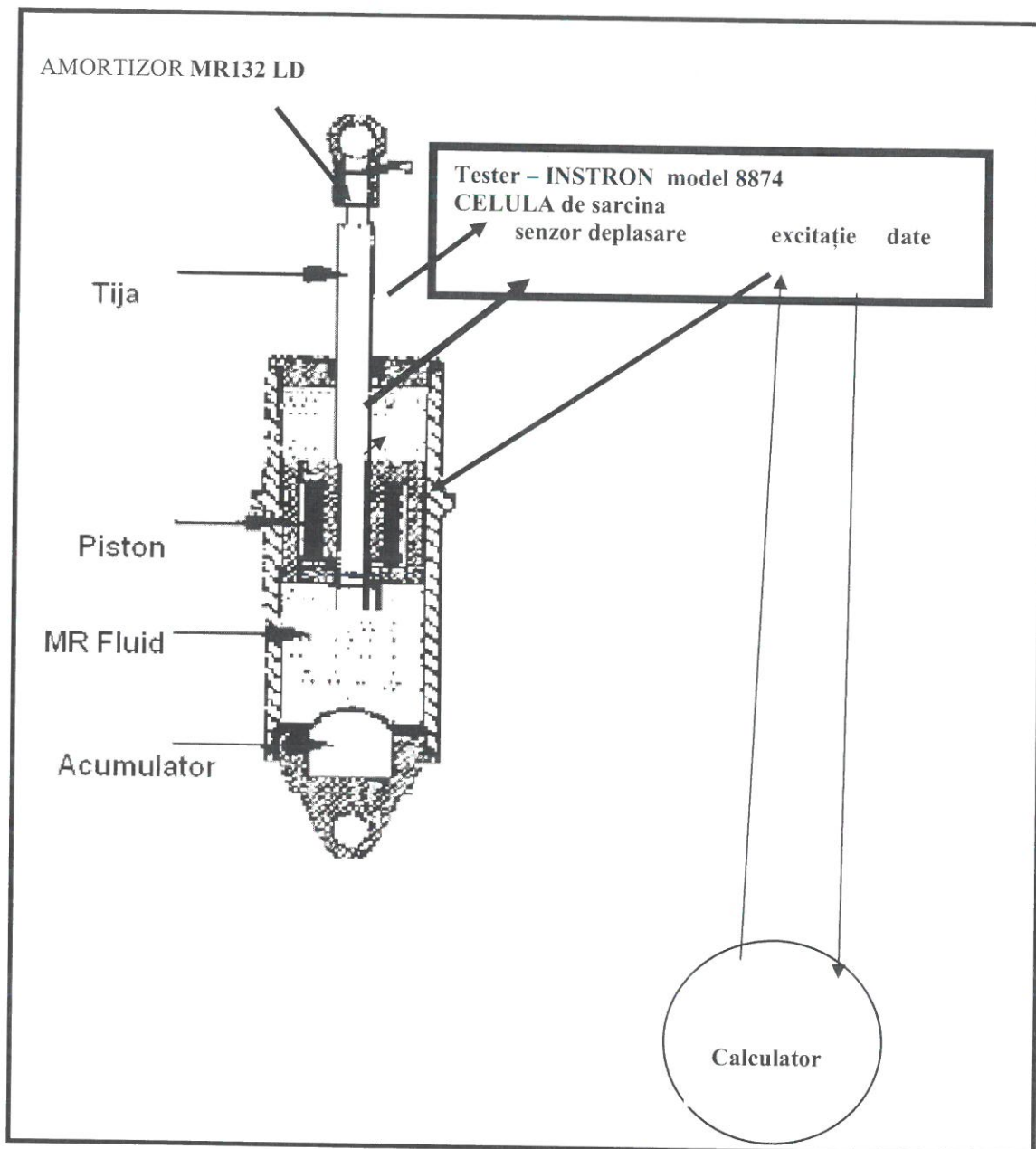


Figura 1. Structura amortizorului RM cuplat la INSTRON pentru testare

Pentru a obține relația coeficientului de amortizare echivalent cu viteza și curentul electric, experimentele sunt efectuate sub influența de excitație triunghiulară. Coeficientul de amortizare echivalent al amortizorului contra vitezei sub influența curenților electrici variați este arătată în figura 3. Se observă că la viteză mică, coeficientul de amortizare echivalent va crește considerabil. În timp ce viteza crește, coeficientul de amortizare echivalent descrește. Aflat sub influența curentului electric puternic, scade rapid, în timp ce, fără curent electric acesta scade lent. La viteză mare, efectul curentului asupra coeficientului de amortizare echivalent este, de asemenea, mai puțin semnificativ. Acest fenomen arată că amortizorul MR nu poate fi tratat ca un amortizor hidraulic sub influența curentului electric mare. Din experimente, se observă că amortizorul MR conceput are o rază foarte mare a forței amortizoare variabile sub influența câmpului magnetic, deși câmpul magnetic saturat nu este așa mare. Trebuie propusă o îmbunătățire pentru a crește câmpul magnetic saturat și a evita efectul secundar al acumulatorului. În plus, datorită faptului că amortizorul MR nu poate fi tratat ca un amortizor hidraulic sub influența curentului electric mare, este necesar a fi elaborat un model potrivit pentru a descrie amortizorul MR.

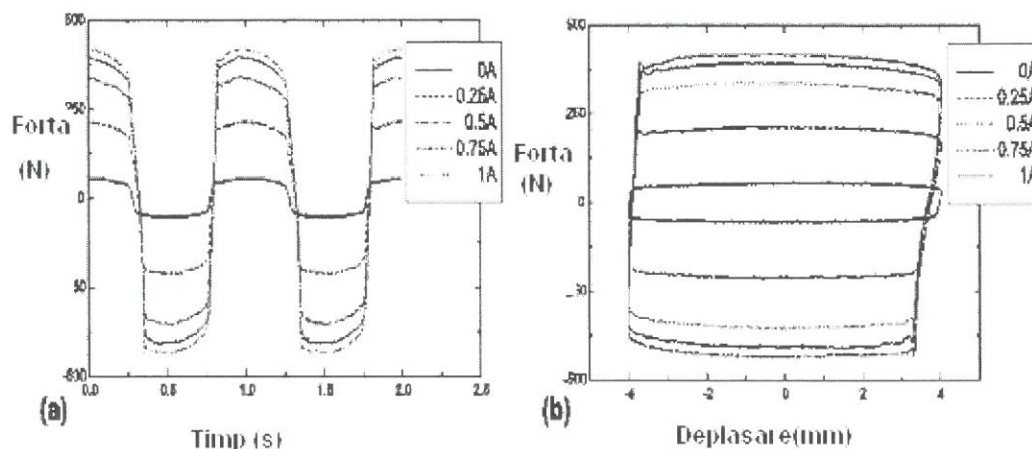


Figura 2. Graficele răspunsului (a) forța - timp (b) forța - deplasare la diverse valori ale intensității curentului electric :0; 0.25; 0.5; 0.75 ; 1 A,și $x=0.4$ mm, $f=1$ Hz

În tabelul 1, sunt prezentate estimățiile parametrilor modelului C_0 și α . Aceste valori au fost obținute din datele experimentale prelucrate prin metode clasice de identificare [6]. Aceste date au fost utilizate în faza de simulare a amortizorului MR adoptând modelul Bouc-Wen [2].

Tabelul 1. Dependența parametrilor C_0 și α de curent $I(A)$ și deplasare $x(mm)$

DEPLASARE	PARAMETRI	INTENSITATEA CURENTULUI DE EXCITAȚIE				
		0	0.25	0.5	0.75	1
2 (mm)	C_0 (N s/mm)	0.78	2.40	3.477	4.12	4.5
	α (n/mm)	5.63	4.23	6.877	7.95	8.3
4 (mm)	C_0 (N s/mm)	0.65	1.65	2.2	2.50	2.9
	α (n/mm)	5.63	4.102	6.877	7.95	8.3

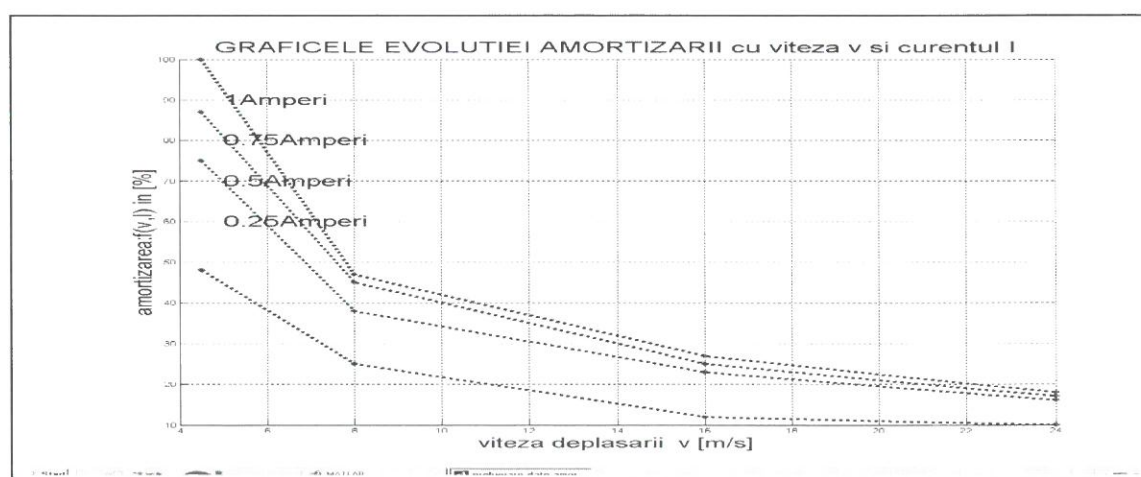


Figura 3. Influența intensității curentului electric (prin electromagnetul amortizorului) asupra evoluției cu viteza a coeficientului echivalent de amortizare

3. Modelul Bouc-Wen si simularea amortizorului MR

Structura modelului. Pentru aplicarea amortizorului MR în controlul vibrației, modelul amortizorului MR trebuie să fie continuu în toate componentele sale fapt pentru care s-a adoptat modelul Bouc-Wen a cărei schemă structurală este prezentată în figura. 4. Forța vibratoare aplicată acestui sistem dinamic MR este funcție de variabila timp t și este notată cu $F(t)$. În absența masei mobile și, deci, a forțelor de inerție, această forță F este echilibrată de trei componente descrise de funcții în care variabila independentă este deplasarea $x(t)$ ori viteza $v(t)=dx/dt$. Pentru simplificarea scrierii, în continuare, este omisă variabila de timp t , dar prezența ei trebuie subînțeleasă. Cele trei componente care echilibrează forța F sunt: **componenta liniară elastică** $f_e(x)$ determinată de resortul caracterizat de coeficientul de rigiditate k_0 ; **componenta liniară vâscoasă** $f_v(x)$ caracterizată de coeficientul de vâscozitate c_0 **componenta de histerezis**, $h_z(x)=\alpha z$, este caracterizată de coeficientul de histerezis α și de funcția neliniară de histerezis $z(x)$.

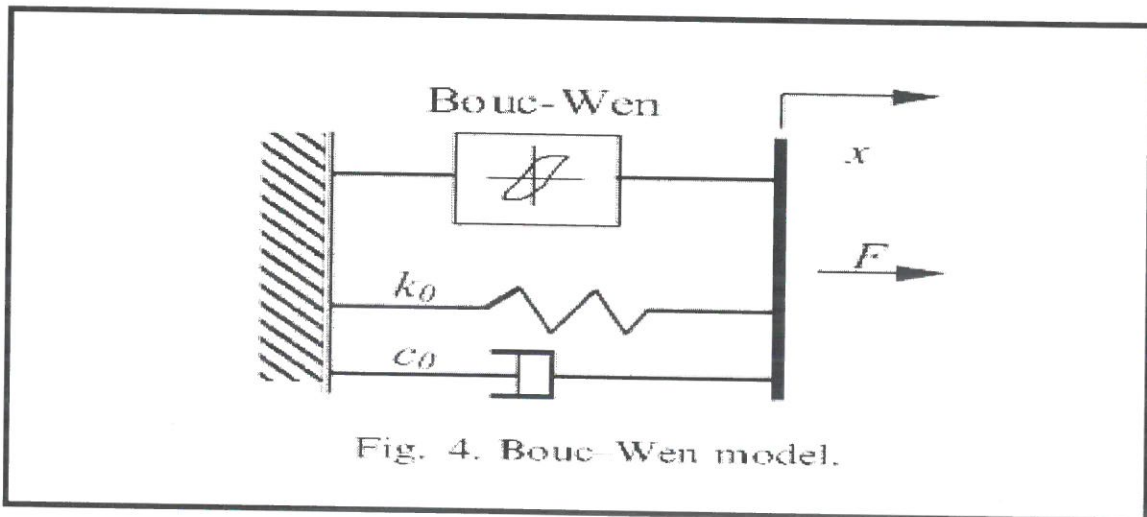


Fig. 4. Bouc-Wen model.

Când masa mobilă este nulă, forțele de inerție dispar și ecuația de echilibru a forțelor exprimate prin cele trei componente, $F=f_e+f_v+h_z$ este explicitată de:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z \quad (1)$$

În relația (1) funcția de histerezis $z(x)$ este obținută ca soluție a următoarei ecuații diferențiale neliniare:

$$\dot{z} = -y \left| \dot{x} \right| |z| |z|^{n-1} - b \dot{x} |z|^n + a \dot{x} \quad (2)$$

în care α , b și a sunt parametrii relaționați cu **forma buclei de histerezis**, iar $y=z$ în cazul absenței unei perturbații externe x_0 cum ar fi spre exemplu denivelările aferente drumului. Ajustând parametrii, modelului α , b și A este posibil controlul neliniarității în descărcare și ușurimea tranziției de la o regiune precritică la una post-critică.

Schema bloc a modelului. Din ecuațiile (1) și (2) ale modelului amortizorului, rezultă că acest sistem dinamic modelat poate fi descompus în două părți: o parte liniară L descrisă de (1) și o parte neliniară N descrisă de (2) interconectate ca în schema bloc din figura 5 în care partea neliniară (care modelează bucla de histerezis) este plasată în circuitul de reacție negativă a sistemului, în timp ce partea liniară este plasată pe calea directă a sistemului. Schema bloc din figura 5 permite transpunerea modelului în SIMULINK pe subsisteme.

Modelul simulink al ecuației liniare (1). Transpunerea în simulink a părții L din figura 5 necesită doar câteva blocuri de calcul: un **bloc derivativ** cu **amplificator** C_0 care are intrarea x și ieșirea $C_0 dx/dt$; un **bloc amplificator** k_0 care are intrarea x și ieșirea $k_0 x$; un **bloc sumator** care însumează F , $k_0 x$, $C_0 dx/dt$ și az .

SCHEMA BLOC A MODELULUI BOUC-WEN pentru AMORTIZOR

Ecuatia partii neliniare a sistemului cand : $z = h(x)$

Ecuatia partii liniare : $F - a \cdot z = f_e + f_v$

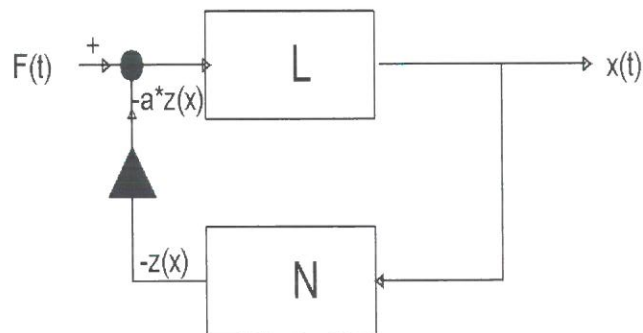


Figura 5 Schema bloc a modelului BOUC-WEN pentru amortizorul MR

Modelul simulink al ecuației neliniare(2). Partea N a modelului simulează bucla de histerezis specifică amortizorului MR și este descrisă de ecuația diferențială (2) din care rezultă că ieșirea $z(x)$ a blocului N, pentru $n=2$ și $y=z$, se calculează cu relația (3).

$$z = - \int [|\dot{x}| |z| z^2 + b \dot{x} |z|^2 - a \dot{x}] dt \quad (3)$$

Semnalul de intrare al blocului N este deplasarea x (care reprezintă ieșirea întregului model) și este primit de la ieșirea blocului L. Viteza \dot{x} din (3) se obține prin derivarea intrării x a blocului N adică $v(t) = dx/dt = \dot{x}$. Relația (3) va sta la baza modelului SIMULINK a componentei N. Pentru transpunerea în simulink a modelului (3) sunt utilizate blocuri simulink de integrare, de ridicare la putere, de înregistrare etc. Aceste blocuri și conexiunile dintre ele rezultă din relațiile (1) și (3). Conexiunile dintre blocurile simulink ale întregului sistem, realizate în conformitate cu (1) și (3) sunt prezentate în figura 6.

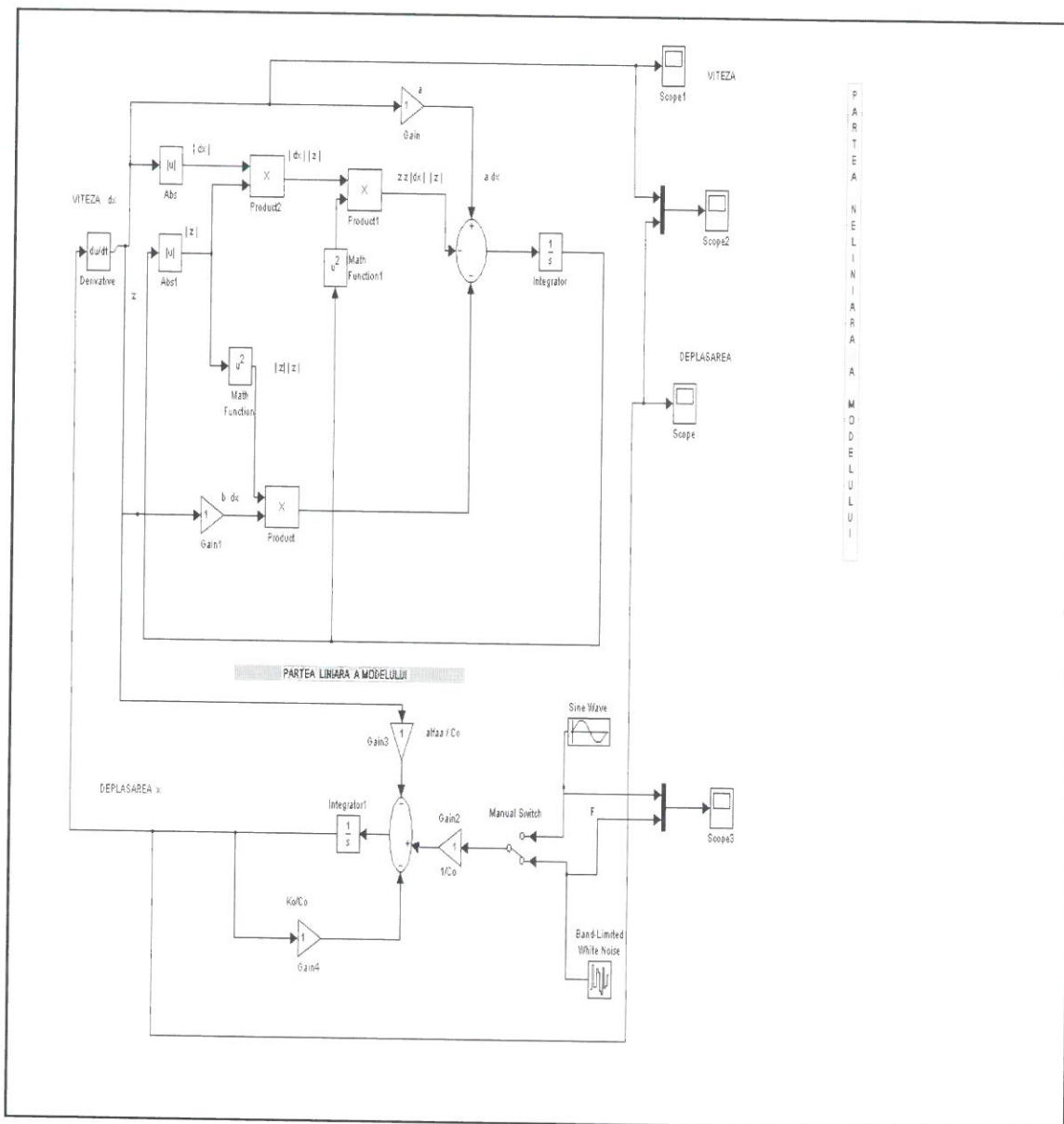


Figura 6. Schema - Program a modelului Bouc-Wen în simulink

În simulatorul din figura 6, sunt utilizate două generatoare de semnal pentru simularea variației în timp a forței $F(t)$ de intrare a modelului Bouc-Wen. Simulatorul este prevăzut cu patru înregistratoare a evoluției în timp a forței la intrare a deplasării $x(t)$ și a vitezei $v(t) = dx/dt = \dot{x}$ la ieșirea sistemului simulat. Rezultatele simulării amortizorului MR au fost comparate cu răspunsurile obținute în faza de testare experimentală a amortizorului MR. Rezultatele acestei comparații sunt prezentate sub forma grafică în figura 7. Din figura 7 rezultă o bună concordanță între datele experimentale și cele furnizate de simulatorul din figura 6. Acest fapt conduce la concluzia că modelul Bouc-Wen (pe care se bazează implementarea în simulink, din figura 6) poate fi acceptat pentru simularea pe calculator a amortizoarelor de tip MR.

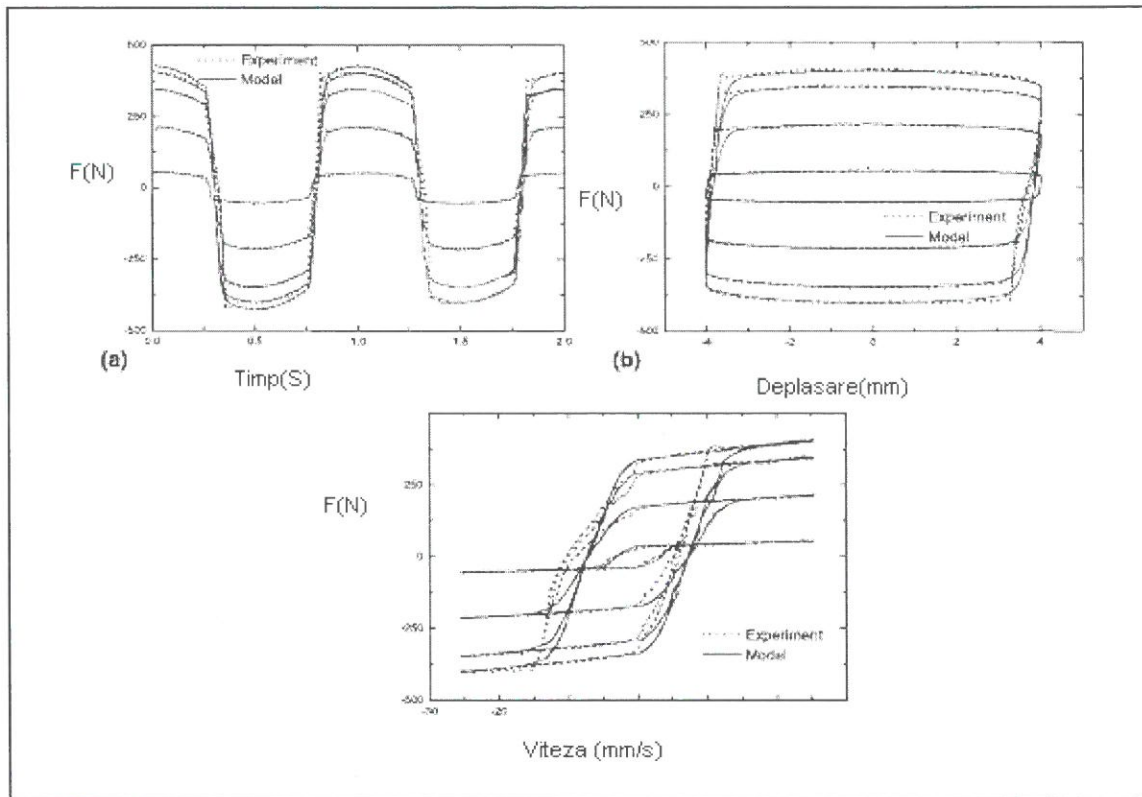


Figura 7. Compararea unor relații estimate de simulator cu reacțiile experimentale corespunzătoare: (a) forță - timp; (b) forță - deplasare; (c) forță - viteză

Continuarea cercetării științifice în perioada doctoranturii a permis valorificarea rezultatelor din prezenta lucrare pentru dezvoltarea unor sisteme evolute de control semi-activ al suspensiei autovehiculelor.

4. Concluzii

Din investigația experiment privind amortizorul MR, s-a demonstrat că amortizorul MR are o rază vastă a forței amortizoare schimbabile sub influența câmpului magnetic și coeficientul amortizorului crește cu intensitatea curentului electric, dar scade cu amplitudinea excitării. Amortizorul MR va deveni saturat o dată ce curentul electric aplicat ajunge la o anumite valoare maximă. Sub influența curentului electric, amortizorul MR nu poate fi tratat ca un amortizor hidraulic, dar proprietatea amortizorului MR poate fi descrisă cu modelul Bouc-Wen.

Bibliografie

1. **BOELTER R, JANOCHA H.** Performance of Long-stroke and Low-stroke MR fluid Damper. În: Porter Davis L, editor. Proc. of SPIE, Passive Damping and Isolation, 1998 March 2-3; San Diego.
2. **KARNOFF D, CROSBY MJ, FARWOOD RA.** Vibration Control Using Semi-active Force Generators. ASME J Eng Ind 1974; 96(2), pp. 619-26.
3. **TABACU C.** The Mathematical Model for the Spatial Mechanism Hydraulic Driven – mensuration of Earthwork of Longation Space and of Withdrawal Space.(în curs de apariție).
4. **CARLSON JD.** The Promise of Controllable fluids. În: Borgmann H, Lenz K, editors. Proc. of the Fourth International Conference on New Actuators, Actuator 94. Axon Technologies Consult GmbH, 1994.
5. **TERTISCO M. , STOICA P. PETRACHE Gh.** Identificarea experimentală a sistemelor .Editura I.P..B .1978