



## TEHNOLOGIJA, INFORMATIKA I OBRAZOVANJE ZA DRUŠTVO UČENJA I ZNANJA

6. Međunarodni Simpozijum, Tehnički fakultet Čačak, 3–5. jun 2011.

## TECHNOLOGY, INFORMATICS AND EDUCATION FOR LEARNING AND KNOWLEDGE SOCIETY

6<sup>th</sup> International Symposium, Technical Faculty Čačak, 3–5th June 2011.

UDK: 004:620.1

Stručni rad

### VIBRACIONA KONTROLA INTELIGENTNIM STRUKTURAMA

Vesna Šimšić<sup>1</sup>, Željko Šimšić<sup>2</sup>

**Rezime:** U svetu koji se brzo razvija, upotreba pametnih materijala postaje sve važnija pri izvršavanju sofisticiranih funkcija unutar nekog namenskog uređaja. U protekloj deceniji tehnološki razvoj u oblasti materijala i računarske tehnike doveo je do tačke u kojoj je njihova kombinacija rezultirala novim poljem multidisciplinarnog istraživanja adaptacije. Napredak u oblasti nauke o materijalima obezbedio je sveobuhvatan teorijski okvir za primenu multifunkcionalnosti u oblasti materijala a razvoj brzih digitalnih računara omogućio je transformaciju tog okvira u metodologije za primenljivo projektovanje i proizvodnju.

**Ključne reči:** Inteligentni materijali, Električno polje, vibraciona kontrola.

### VIBRATION CONTROL OF SMART STRUCTURES

**Summary:** In a rapidly developing world, the use of smart materials becomes increasingly important when executing sophisticated functions within a designed device. In the past decade, technological developments in materials and computer sciences have evolved to the point where their synergistic combination have culminated in a new field of multidisciplinary research in adaptation. The advances in material sciences have provided a comprehensive and theoretical framework for implementing multifunctionality in materials, and the development of high speed digital computers has permitted transforming that framework into methodologies for practical design and production.

**Key words:** Smart materials, electric field, vibration control.

#### 1. UVOD

Ostvaren je značajan napredak u razvoju inteligentnih struktura koje inkorporiraju elektoreološke (ER) fluide. Tipično, ova klasa inteligentnih struktura poseduje mogućnosti autonomnog pobuđivanja što ih čini idealnim za primene u vibracionoj kontroli u različitim uslovima korišćenja i u nestrukturiranim okruženjima. Ovo se može postići upravljanjem karakteristikama krutosti i rasipanja energije kod pomenutih struktura. Ovo je, naravno, moguće zahvaljujući podesivosti reoloških odlika ER fluida putem jačine električnog polja.

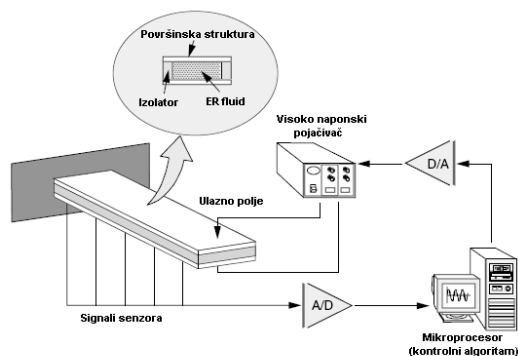
<sup>1</sup> Dipl.maš.ing. Vesna Šimšić, prof. teh.

<sup>2</sup> Dipl.maš.ing. Željko Šimšić, prof. teh., E-mail: [zeljen@eunet.rs](mailto:zeljen@eunet.rs)

Razvoj na ER-fluidima zasnovanih inteligentnih struktura je pokrenuto od strane autora Čoija i ostalih. Oni su izveli jednu eksperimentalnu studiju raznih konfiguracija smicanja zasnovanih na strukturama uklještenih greda-nosača. Autor Gandi i ostali sugerišu korišćenje ER fluida kao pobuđivača u cilju suzbijanja izvijanja struktura fleksibilne robotske ruke putem izbegavanja rezonancije. U njihovom radu, izvedene su fenomenološke jednačine pretpostavljanjem da strukture predstavljaju viskoelastične materijale. Šema pasivne kontrole za dobijanje željenog prelaznog odziva je osmišljena na bazi eksperimentalno dobijenih fenomenoloških jednačina, u kojima su modalne odlike zavisne od električnog polja korišćene kao pseudokontrolne sile. Logika vibracione kontrole, namenjene minimiziranju izvijanja na vrhu jedne na ER-fluidu zasnovane strukture sa gredom nosačem, je ilustrovana preko od polja zavisnih odziva u frekencijskom domenu.

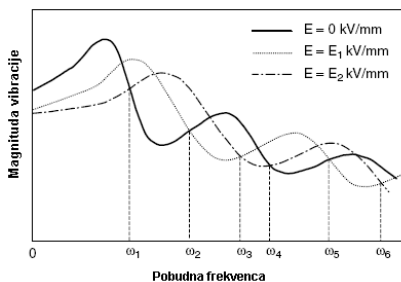
## 2. INTELIGENTNA STRUKTURA ZA VIBRACIONU KONTROLU

U ovom radu, šema fazi kontrole zavisne od električnog polja je data nakon kratkog objašnjavanja tipičnog blok dijagrama za vibracionu kontrolu inteligentnih struktura zasnovanih na ER fluidu, koji je prikazan na slici 1. *Slika 1. Šematski dijagram za kontrolisanje vibracija neke inteligentne strukture zasnovane na ER fluidu pomoću ulaznog električnog polja*



Sistem za kontrolu se sastoji od skupa senzora, pretvarača signala, mikroprocesora, visokovoltaznog pojačivača i algoritma kontrole. Većina sada raspoloživih senzora poput merača ubrzanja mogu biti adaptirani za merenje dinamičkog odziva inteligentnih struktura zasnovanih na ER fluidu. Mikroprocesor koji uključuje

A/D (analogno-digitalne) i D/A (digitalno-analogne) pretvarače signala igraju veoma važnu ulogu u vremenskom trajanju kontrole sa zatvorenim petljom. Mikroprocesor treba da ima najmanje 12 bitova za funkcionisanje upravljačkog softvera a takođe treba uzeti u obzir i visoku učestalost uzorkovanja koja ide do 10 kHz.

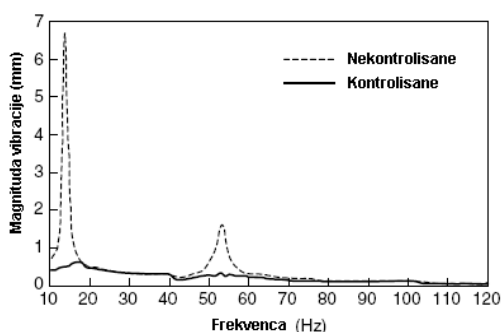


*Slika 2. Frekencijski odzivi zavisni od električnog polja kod neke strukture sa ER nosač-gredom*

Visokovoltazni pojačivač treba da ima dovoljno snage da generiše potrebni ER efekat u inteligentnim strukturama. Pored toga, odzivno vreme visokovoltaznog pojačivača treba da bude dovoljno brzo da ne okašnjava upravljačku akciju fidbek kontrolnog sistema. Tipično, inteligentna struktura se sastoji od dve osnovne (čeo)ne) strukture, izolatora i jednog sloja ER fluida, što je prikazano na slici 2.

### 3. ELASTODINAMIČKE ODLIKE INTELIGENTNE STRUKTURE ZASNOVANE NA ER FLUIDU

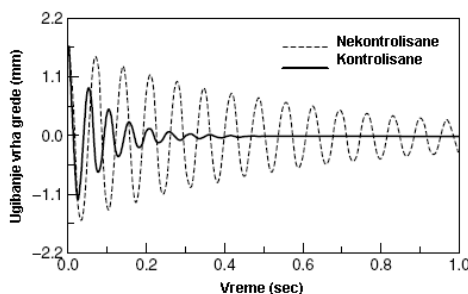
Elastodinamičke odlike inteligentne strukture zasnovane na ER fluidu variraju sa jačinom električnog polja, što je dato na slici 3. Ovo implicira da prirodna frekvenciju svakog vibracionog režima može biti skrojena podešavanjem električnog polja i da, shodno tome, vibracija u realnom vremenu može biti efektivno suzbijena pri postojanju rezonantnih smetnji (pobuđivanja). Željeno električno polje koje odgovara željenom odzivu može se izraziti kao fazi upravljački algoritam: ukoliko je  $\omega_i \leq \omega < \omega_{i+1}$  onda je  $E_d = E_j$ . Promenljiva  $\omega$  označava frekvenciju poremećaja, a  $E_d$  je željeno električno polje.



**Slika 3. Prinudni vibracioni odzivi poduprte ER nosač-grede**

Slika 3 prikazuje vršna ugibanja neke poduprte ER nosač-grede u frekvenzijskom domenu, što je dobijeno eksperimentalno putem primene fazi upravljačke logike. Očigledno je sa ove slike da postoje efektivna vibraciona suzbijanja u okolini rezonantnih frekvencija. Ipak, postoji jedna ne-nulta (nezanemarljiva) vibraciona magnituda duž šireg frekvenzijskog opsega. Ovo

ukazuje da ER fluidi ne obezbeđuju pobuđivačku silu već menjaju krutost i odlike prigušivanja radi izbegavanja rezonance. Da bi se poboljšale performanse vibracione kontrole kod fazi upravljačke logike, odgovarajuće funkcije za pobuđivačke magnitude i frekvencije mogu biti korišćene za određivanje željenog električnog polja. druge strane, poznato je da ER fluid koji je zastupljen u distribuirano parametarskom strukturnom sistemu pod stalnim i periodičnim malim deformacijama ostaje u stanju nereagovanja, koje iskazuje viskoelastične odlike predstavljene putem kompleksnog modula smicanja.



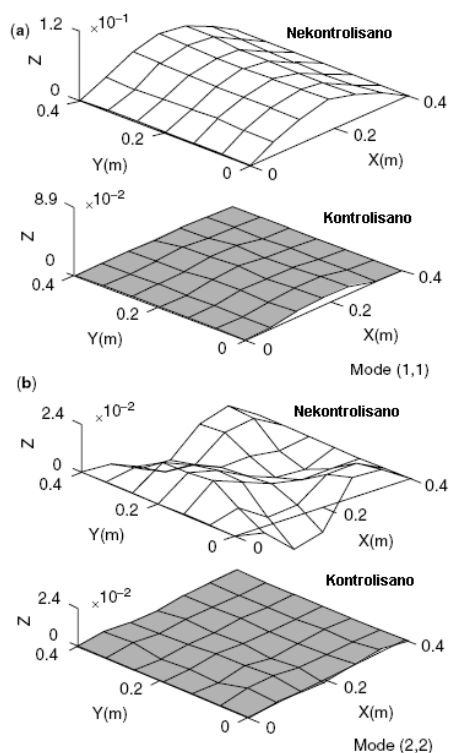
**Slika 4. Prelazni vibracioni odzivi poduprte ER nosač-grede.**

U prelaznoj vibracionoj kontroli bez nekog spoljašnjem poremećaja, željena sopstvena vrednost sistema, koja direktno ukazuje na prirodne frekvencije i koeficijente prigušivanja sistema, može se dobiti podešavanjem intenziteta električnog polja u matrici  $A(E)$ . Jedan od algoritama efektivne kontrole za postizanje ovog cilja je tkz. kontroler fidbek pseudostanja koji su predložili autori Čoi i ostali.

Mi možemo lako podesiti željene sopstvene vrednosti sistema radi izbegavanja fenomena rezonancije, a sve korišćenjem ovog algoritma kontrole. Slika 4 daje prelazni vibracioni kontrolni odziv poduprte ER nosač-grede.

#### 4. AMORTIZERI OD INTELIGENTNIH ER MATERIJALA

Odnedavno, velika pažnja se posvećuje projektovanju amortizera koji bi značajno suzbili vibracije vozila. Vibracije vozila trebaju da se priguše pri različitim stanjima puteva. Ovo se obično postiže korišćenjem nekog sistema vešanja. Do sada su predložena i uspešno primenjena tri sistema vešanja: pasivno, aktivno i poluaktivno. Pasivni sistem vešanja koji poseduje uljni prigušivač (ili apsorber udaraca) je jednostavan za projektovanje i troškovno efektivan. Ipak, neizbežna su ograničenja u performansama. S druge strane, aktivni sistem vešanja daje visoke performanse kontrole duž širokog opsega frekvencija vibriranja. Ipak, aktivni sistemi vešanja iziskuju veliku energiju, resurse, mnoštvo senzora, servoventile i sofisticiranu upravljačku logiku. Jedan od načina razrešavanja ovih zahteva aktivni sistem vešanja je korišćenje poluaktivnog sistema vešanja. Poluaktivni sistem vešanja nudi poželjne performanse koje su generalno poboljšane u aktivnom režimu rada bez potrebe za velikom energijom i prekomernom mašinskom opremom. Nedavno, veoma atraktivan i efektivan sistem vešanja koji koristi ER fluide je predložen od strane mnogih istraživača.



**Slika 5. Izmereni magnituda modalnih oblika neke ER ploče kontrolisane**

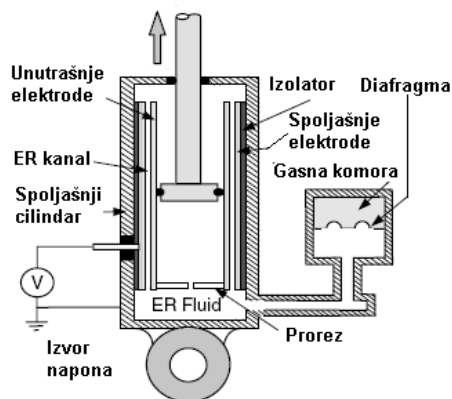
**(nekontrolisane) jačinom električnoig polja**

Jedna od istaknutih odlika ER fluida je njegovo brzo reagovanje na električno polje, i stoga njegov širok kontrolni dijapazon. Ova svojstvena odlika je pokrenula obimne istraživačke aktivnosti u razvoju različitih inženjerskih primena uključujući amortizere za kontrolisanje vibracija vozila. Stark i ostali su predložili visokonaponski agregat koji ima ER

apsorber udaraca i obezbeđuje svoju efektivnost preko četvorodelnog sistema vešanja vozila. Nokano je konstruisao četvorodelni model vešanja vozila u kome se koristi ER amortizer i predložio je proporcionalni kontrolni algoritam za izolovanje vibracija. Petek i ostali su konstruisali poluaktivan sistem punog vešanja koji koristi 4 ER amortizera i ocenjuje performanse vešanja primenom tkz. skyhook kontrolnog algoritma koji prati teško, rulajuće i odskačuće kretanje tela vozila.

**Slika 6. Šematska konfiguracija nekog ER amortizera**

U ovom radu, cilindričan ER amortizer, prikazan na slici 6 se uvodi radi ocenjivanja performansi

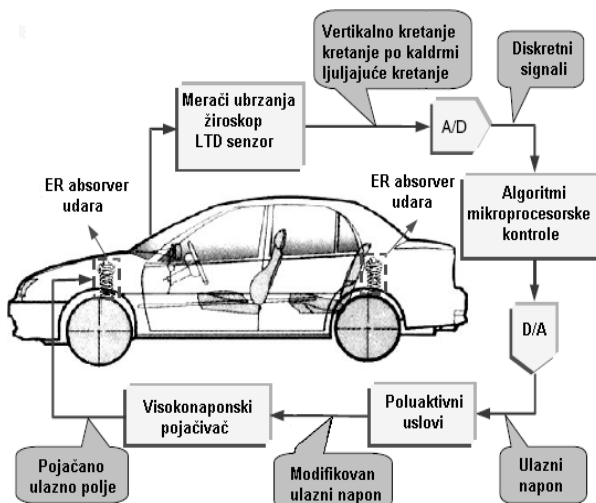
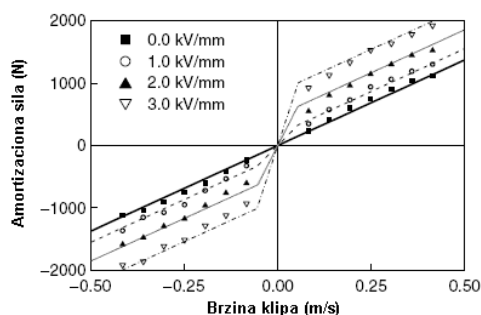


vibracione kontrole u nekom putničkom vozilu. ER amortizer je podeljen na gornje i donje komore pomoću klipa, koji je napunjen sa ER fluidom. ER fluid se kreće pomoću kretanja klipa kroz otvor između unutrašnjih i spoljnih cilindara iz jedne komore u drugu. Pozitivan napon se dobija putem visokonaponskog agregata povezanog sa unutrašnjim cilindrom, a negativan napon je povezan sa spoljnim cilindrom. Gasna komora smeštena izvan donje komore deluje kao sakupljač Er fluida unešenog kretanjem klipa. Ukoliko se ne primeni električno polje, Er akumulator proizvodi amortizacionu silu stvaranu jedino od strane otpora samog fluida. Ali, ukoliko se određeni nivo električnog polja dovede do ER amortizera, on će proizvoditi dodatnu amortizacionu silu zahvaljujući dodatnom naprezanju ER fluida. Ova amortizaciona sila ER amortizera može biti neprekidno podešavana putem kontrole jačine električnog polja.

#### 4.1. Primena amortizera od inteligentnih materijala kod putničkih vozila

##### Slika 7. Amortizaciona sila nekog ER amortizera koja je zavisna od električnog polja

Slika 7 prikazuje izmerenu amortizacionu silu nekog cilindričnog ER amortizera za putničko vozilo. Kao što se vidi sa slike, amortizaciona sila raste kako se pojačava električno polje. Na primer, amortizaciona sila se povećava sve do 1000 N pri brzini



klipa od 0.25 m/s primenom električnog polja od 3kV/mm. Uočimo da nivo amortizacione sile nekog konvencionalnog pasivnog uljnog amortizera je skoro isti kao nivo pri 0 kV/mm. Tako, mi možemo očekivati da unapredimo performanse vešanja nekog vozila kontrolisanjem amortizacione sile.

##### Slika 8. Konfiguracija vozila za jedan test ER vešanja

Da bi se ocenile performanse vibracione kontrole nekog vozila u kome se koristi ER amortizer, može se konstruisati kontrolni sistem zatvorene petlje, što je

prikazano na slici 8. Portabl kompjuter (mikroprocesor) opremljen sa procesorom za digitalni signal (DSP) obično je pozicioniran pored sedišta vozača automobila. četiri para (jedan za karoseriju a ostali za točkove) merača ubrzanja su postavljeni na 4 nezavisna vešanja radi merenja vertikalnih pomeraja vozila. Signali iz merača ubrzanja, žiroskopa, i LDT-a (linearnog diferencijalnog transformatora) se upućuju ponovo do mikroprocesora, i zavisno od kontrolnog algoritma koji se koristi, određuje se potrebni nivo za input

kontrolnog napona a zatim se primenjuje na četiri ER amortizera kroz četiri visokonaponska pojačivača pozicionirana na četiri ugla.

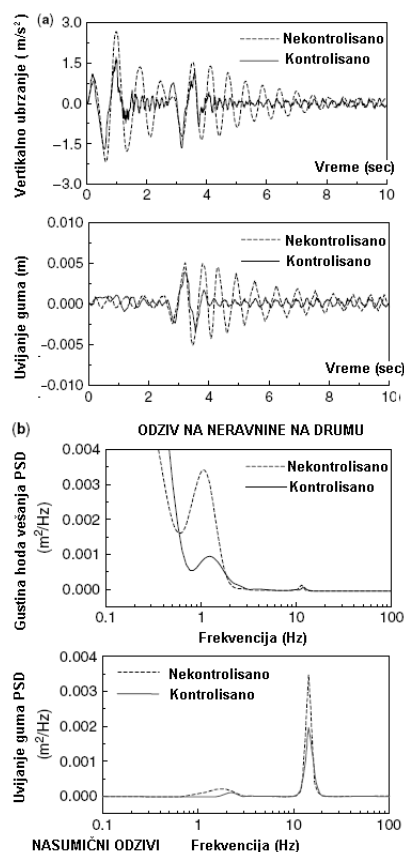
U finalnoj fazi za praktičnu upotrebu, visokonaponski pojačivač treba da ima kratko odzivno vreme i treba da bude integrisan sa elektronskom upravljačkom jedinicom (ECU). Uočimo da je jedino kontrolni unos  $u_i$  određen, kontrolno električno polje koje se primenjuje na ER amortizer se dobija na osnovu veze između električnog polja i amortizacione sile. Kontrolne karakteristike za suzbijanje vibracija sistema vešanja se ocenjuju pod uslovima dve vrste putnih pobuđivanja. Prvo pobuđivanje koje se obično koristi da prikaže karakteristike prelaznog odziva je neravnina na putu. U pobuđivanju tipa neravnina na putu, vozilo prelazi preko nje pri konstantnoj brzini od 3.08 km/h ( $=0.856$  m/s). Drugi tip putnih pobuđivanja se obično koristi za ocenjivanje frekventijskog odziva u nekom stacionarnom nasumičnom procesu. U slučajnom pobuđivanju, vrednosti putnih nepravilnosti se biraju pod pretpostavkom da vozilo ide asfaltiranim putem pri konstantnoj brzini od 72 km/h ( $=20$  m/s).

Slika 9a daje vremenske odzive sistema ER vešanja za pobuđivanje tipa neravnina na putu. Opšte je poznato da vertikalno ubrzanje obešene mase (masa svih delova iznad elastičnih elemenata vozila) i uvijanje gume se koristi za određivanje komfora pri vožnji i ponašanja vozila na drumu, redom. Vidi se da su i vertikalno ubrzanje obešene mase i uvijanje guma značajno smanjeni korišćenjem kontrolnog električnog polja. Ovo implicira da sistem ER vešanja može istovremeno obezbediti i konformnu vožnju i bezbednost vožnje, korišćenjem kontrolnog električnog polja na ER amortizere.

Slika 9b daje frekventijske odzive na nasumična pobuđivanja. Frekventijski odzivi se dobijaju iz spektralne gustine snage (PSD) za hod vešanja i uvijanje guma. Kao što se i očekivalo, spektralna gustina snage za hod vešanja i ugibanje guma je značajno smanjena u blizini rezonance tela (1-12 Hz). Uočeno je, takođe, da je ugibanje guma značajno smanjeno pri rezonanciji točka (10-15 Hz). Ovo ukazuje na značajna poboljšanja stabilnosti vozila pri kretanju.

**Slika 9. (a) Odzivi na neravnine i (b) nasumični odzivi nekog putničkog vozila u kome se koriste ER amortizeri**

Uočimo da najaktuelniji kontrolni algoritam koji se koristi za vibraciono prigušivanje, a koji koristi pobuđivač baziran na ER fluidu, jeste poluaktivan. Poluaktivni kontrolni sistem nudi pogodne performanse koje se generalno poboljšavaju u aktivnom režimu a da se pritom ne zahteva velika energije. Jedna od najpopularnijih kontrolnih logika za poluaktivne kontrolne sisteme je tzv. skyhook kontrolni sistem jer je lak za formulisanje i primenu u praksi. Mogući kandidati za aktivne kontrolere za poluaktivni kontrolni sistem su kontrola kliznog moda, kontrola sa neuronskom mrežom, Ljapunova kontrola sa



fidbekom stanja, i optimalna kontrola. Ipak, pošto poluaktivni pobuđivač ne može da poveća mehaničku energiju kontrolnog sistema, posebnu pažnju (semiaktivni uslovi sa slike 8) treba obratiti pri usvajanju ovih strategija aktivne kontrole. S druge strane, može se konstruisati aktivni kontrolni sistem koji koristi neki ER fluid, korišćenjem nekog hidrauličkog, sistema sa Er ventilom-cilindrom, sa zatvorenom petljom. U tom slučaju, kontrolne logike adaptirane za konvencionalne hidrauličke servomehanizme mogu biti primenjene bez bilo kakvih izmena. Jedina razlika je zamenjivanje elektromagnetnih servoventila sa ER ventilom.

## 5. ZAKLJUČAK

Nezajajljiva potražnja za visokim performansama kod različitih dinamičkih sistema koje odlikuje rad sa velikom brzinom, visoka upravljačka preciznost i niska potrošnja energije je pokrenulo obimno istraživanje upravljanja vibracijama kod distribuiranih fleksibilnih struktura i diskretnih sistema.

Ove svojstvene sposobnosti inteligentnih materijala mogu izvršavati specifične funkcije na autonoman način, u smislu odziva na promenljive stimulanse iz okruženja.

## 6. LITERATURA

- [1] M.V. Gandhi and B.S. Thompson, *Smart Materials and Structures*. Chapman & Hall, London, 992.
- [2] S.B. Choi, B.S. Thompson, and M.V. Gandhi, *Proc. Damping'89 Conf.*
- [3] M.V. Gandhi, B.S. Thompson, S.B. Choi, and S. Shakir, *ASME J. Mech. Transmissions Autom. Design* (3): 328–336 (1989).
- [4] S.B. Choi, Y.K. Park, and J.D. Kim, *Int. J. Mech. Sci.* (9):757–768 (1993).
- [5] Y. Choi, A.F. Sprecher, and H. Conrad, *J. Intelligent Mater.Syst. Struct.* : 17–29 (1992).
- [6] J.P. Coulter and T.G. Duclos, *Proc. 2nd Int. Conf. ER Fluids*, Raleigh, NC, Aug. 1989, pp. 300–325.
- [7] C.D. Rahn and S. Joshi, *Modeling and Control of an Electrorheological Sandwich Beam, Active Control of Vibration and Noise*. ASME Publication, NY, pp. 159–167.
- [8] S.O. Oyadiji, *J. Intelligent Mater. Syst. Struct.* : 541–549(1996).
- [9] S.B. Choi, Y.K. Park, and C.C. Cheong, *J. Intelligent Mater.Syst. Struct.* **7**(4): 411–419 (1996).
- [10] H. Gong and M.K. Lim, *J. Intelligent Mater. Syst. Struct.* :401–413 (1997).
- [11] M. Yalcintas and J.P. Coulter, *Smart Mater. Struct.* **7**(1): 128–143 (1998).
- [12] S.B. Choi and Y.K. Park, *J. Sound Vib.* (3): 428–432 (1994).
- [13] D.J. Mead and S. Markus, *J. Sound Vib.* (2): 163–175 (1969).
- [14] H.S. Tzou and G.L. Anderson, *Intelligent Structural Systems*. Kluwer Academic, London, 1992.
- [15] S.B. Choi, Y.K. Park, and S.B. Jung, *J. Aircraft* (2): 458–464(1999).
- [16] T. Bailey and J.E. Hubbard, Jr., *J. Guidance, Control Dynamics*(5): 605–611 (1985).
- [17] A. Baz and S. Poh, *J. Sound Vib.* (2): 327–343 (1988).
- [18] H.S. Tzou and M. Gadre, *J. Sound Vib.* (3): 477–490 (1990).
- [19] H.S. Tzou, *ASME J. Dynamic Syst. Meas. Control*: 494–499 (1991).
- [20] A. Baz, S. Poh, and J. Fedor, *ASME J. Dynamic Syst. Meas. Control* (1): 96–103 (1992).

- 
- [21] S.B. Choi, C.C. Cheong, and S.H. Kim, *J. Intelligent Mater.Syst. Struct.* (5): 430–435 (1995).
- [22] S.B. Choi and M.S. Kim, *J. Guidance Control Dynamics* (5):857–864 (1997).
- [23] S.M. Yang and G.S. Lee, *ASME J. Dynamic Syst. Meas. Control*(1): 34–39 (1997).
- [24] J.L. Meyer, W.B. Harrington, B.N. Agrwal, and G. Song, *SmartMater. Struct.* : 95–104 (1998).
- [25] J. Tang, K.W. Wang, and M. Philen, *Proc. SPIE Conf. SmartStruct. Integrated Syst.* Newport Beach, CA, Mar. 1999, ,pp. 543–554.
- [26] S.B. Choi, S.S. Cho, and Y.P. Park, *ASME J. Dynamic Syst.Meas. Control* (1): 27–33 (1999).
- [27] M. Sturk, X.M.Wu, and J.Y.Wong, *Vehicle Syst. Dynamics* :101–121 (1995).
- [28] M. Nakano, *Proc. 5th Int. Conf. ER Fluids MR SuspensionsAssoc. Technol.* (1996), Sheffield, UK, pp. 645–653.