

## ZNIŽOVANIE DYNAMICKÉHO NAMÁHANIA POMOCOU SELEKTÍVNEHO RIADENIA

### MITIGATION OF DYNAMIC STRESSES USING SELECTIVE CONTROL

Martin JUHÁS<sup>1</sup>, Marián VRABEC<sup>2</sup>, Vladimír SVRČEK<sup>3</sup>

#### *Abstrakt*

Príspevok je venovaný experimentálnej analýze postupov znižovania dynamického namáhania stavebných a iných konštrukcií pri nestacionárnych účinkoch z rôznych zdrojov kmitania, prírodných aj umelých. Výsledky sú prezentované na základe poznatkov získaných počas skúšok riadených modelových zostáv v laboratóriách ISMES (CESI) Seriate v Taliansku. Popisuje sa príprava stratégie riadenia, overované alternatívy riadenia a výsledky získané z numerických simulácií a z meraní na veľkorozmerových modeloch. Hodnotia sa možnosti praktických aplikácií získaných výsledkov.

**Kľúčové slová:** dynamická odozva, dynamický zaťažovací systém, riadenie kmitania, seizmické stoly

#### *Abstract*

The paper deals with experimental analysis of measures and procedures for the mitigation of dynamic stresses in structures caused by different non-stationary effects from natural or artificial sources. Presented results are based on extensive experimental research carried on the large scale models with the use of control systems. Tests were executed in laboratories of ISMES (CESI) Seriate in Italy. The strategy of tests, applied alternatives of control and some obtained results are presented. The options for application in practice are discussed.

**Keywords:** dynamic response, dynamic loading system, vibration control, shaking tables.

## ÚVOD

V súčasnosti sa mnohé vypracované inovačné metódy a techniky riadiacich systémov považujú za dostatočne pripravené na použitie pre zníženie poškodenia konštrukcií a zariadení od účinkov nadmerných dynamických zaťažení. Najznámejšie typy, ako sú pasívne pohlcovače energie (passive energy dissipation – PED), hydraulické systémy (hydraulic coupling – HC) a systémy základovej seizmickej izolácie (base seismic isolation – BSI), už viackrát preukázali, že sú spoľahlivé a cenovo akceptovateľné na použitie v mnohých konštrukciách. Príkladom takýchto konštrukcií sú mosty a viadukty, občianske budovy, historické stavby a pamiatky, ako aj objekty s kritickou prevádzkou, ktorá nesmie byť narušená. Nadalej však v súčasnosti pretrvávajú problémy súvisiace s pravidlami a normovými požiadavkami na konštrukcie, ktoré sú vybavené systémami znižujúcimi vibrácie. Aj keď vo viacerých krajinách takéto pravidlá alebo smernice navrhovania existujú, značne sa medzi sebou odlišujú a každé použitie nových anti-dynamických,

<sup>1</sup> Ing. Martin JUHÁS, KAIPT Sjf STU, Bratislava, martin.juhás@stuba.sk

<sup>2</sup> Ing. Marián VRABEC, ÚSTARCH SAV, Bratislava, usarmaro@savba.sk

<sup>3</sup> Ing. Vladimír SVRČEK, KAIPT Sjf STU, Bratislava, vladimir.svrcek@stuba.sk

Lektoroval: doc. Ing. Štefan SEGLA, CSc., KAMaM, Sjf TU v Košiciach, stefan.segla@tuke.sk

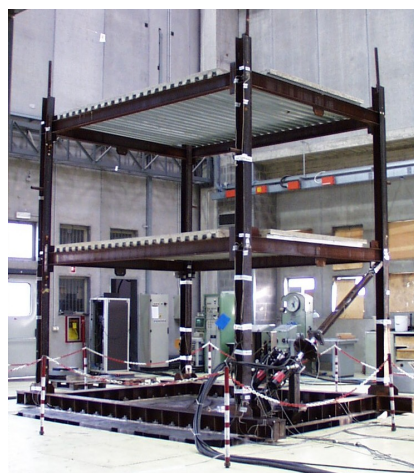
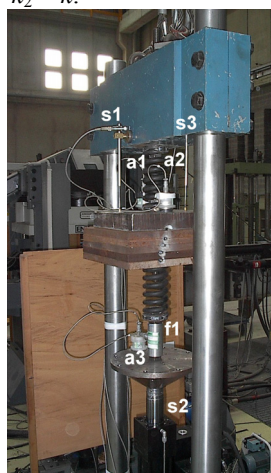
kmitanie redukujúcich systémov vyžaduje enormné úsilie a veľmi zdĺhavý schvaľovací proces. Pri semiaktívnych a aktívnych systémoch je situácia ešte zložitejšia, keďže tieto techniky sa nateraz v pravidlách navrhovania nenachádzajú. Existujú praktické príklady implementácie systémov redukujúcich dynamickú odozvu do rôznych konštrukcií vrátane železobetónových rámov a murovaných stavebných objektov. V súčasnosti sú to najmä oceľové konštrukcie, ktoré zaznamenali najväčší nárast úspešného použitia viacerých pasívnych i aktívnych metodík riadenia a vibroizolačných systémov [1,2,12]. Tento príspevok opisuje poznatky z experimentálneho výskumu venovaného otázke znižovania seizmickej odozvy oceľovej dvojpodlažnej rámovej konštrukcie prostredníctvom riadenia. V laboratórnych podmienkach postavená úloha predstavuje experimentálne atypickú konfiguráciu, kde pre riadenie treba sklbiť dva nezávislé hydraulicky riadené laboratórne systémy: prvý predstavuje riadenie seizmického stola, druhý má za účel modifikovať kmitanie konštrukcie – modelu. Preto aj riešenie predloženého problému sa rozložilo na dve etapy: a) skúška nezávislého riadenia kmitania jednoduchého modelu, b) sklbenie kinematického budenia – riadenia seizmického stola a riadenia kmitania skúšanej rámovej konštrukcie. Pohľad na zostavy zmienených skúšok je na obr.1.

## RIADENIE ODOZVY JEDNOHMOTOVÉHO SYSTÉMU

Najprv sa prešetrovala základná jednohmotová zostava, upravená ako dynamická zaťažovacia skúška v lise, avšak s tým rozdielom, že nešlo o zaťažovanie, ale o riadenie odozvy vzorky tak, aby jej kmitanie bolo minimálne.

Zostava pre skúšku v lise je na obr.1, vľavo. Systém tvorí tuhé teleso pozostávajúce z hrubých oceľových platní o hmotnosti  $m$ , ktoré je umiestnené medzi dve pružiny, s tuhosťami:

$$k_1 = k_2 = k.$$



Obr.1 Pohľad na skúšobné zostavy: vľavo - tuhé teleso medzi dvoma pružinami, umiestnené v lise v zostave pre riadenie jeho kmitania, vpravo – rámový model s inteligentnou vzperou

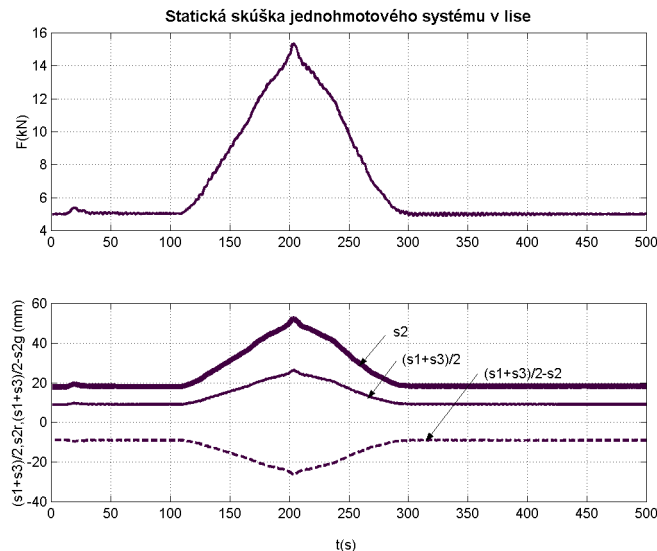
Merané veličiny boli:

- zrýchlenia  $a_1(t)$ ,  $a_2(t)$  okrajov skúšaného tuhého telesa,
- relatívne výchylky  $s_1(t)$ ,  $s_3(t)$  okrajov skúšaného tuhého telesa oproti rámu lise,
- zrýchlenie  $a_3(t)$  na pieste zaťažovacieho/riadiaceho hydraulického valca,
- výchylka  $s_2(t)$  piestu zaťažovacieho/riadiaceho hydraulického valca,
- sila  $F(t)$ , ktorú vyvodzuje piest zaťažovacieho/riadiaceho hydraulického valca.

Pre kmitanie tuhého telesa o hmotnosti  $m$  za predpokladu rovnosti tuhosti pružín  $k_1 = k_2 = k$  platí

$$f_1 = 1/T_1 = \omega_1 / 2\pi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad (1)$$

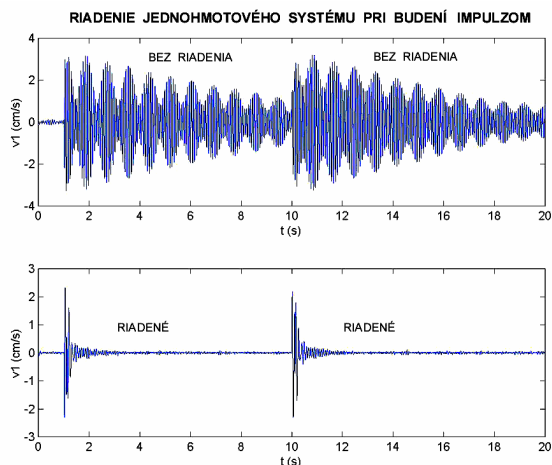
Pred samotnou dynamickou skúškou sa overilo správanie pomalým statickým zaťažovaním a odľahčovaním v ťahu a to tak, že pre ďalšiu skúšku sa ponechala začiatočná ťahová sila o veľkosti 5 kN, pozri obr.2. Zámerom bolo dosiahnuť, aby počas vonkajšieho dynamického zaťažovania nedošlo k preklopeniu namáhania pružín do tlaku a tak k potenciálnemu vybočeniu alebo skrúteniu celej zostavy. Zavedená začiatočná ťahová sila umožnila nasledovné riadené správanie len pri pulzácii v ťahu a tým bolo možné dodržať podmienky pre simuláciu správania ako systému s jedným stupňom voľnosti.



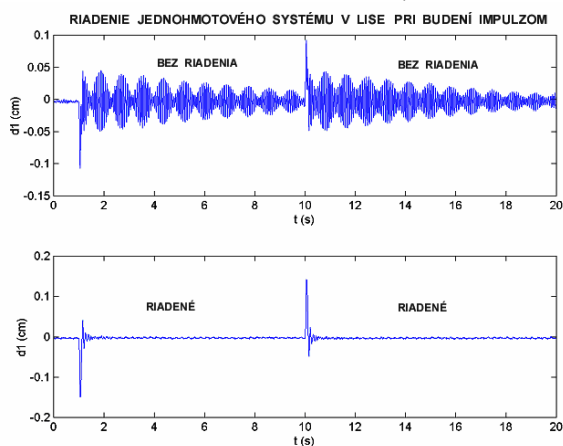
Obr.2 Statické zaťažovanie a odľahčovanie tuhého telesa medzi dvoma pružinami. Hore – priebeh pôsobiacej sily, dolu – priebeh výchyliek:  $s_2$  – piestu valca,  $(s_1+s_3)/2$  – tuhého telesa oproti rámu lisu,  $(s_1+s_3)/2-s_2$  – tuhého telesa oproti piestu lisu

### Riadenie odozvy jednodnotového systému pri impulzovom budení

Po vytvorení a numerickom odladení riadiaceho algoritmu sa overovalo správanie skúšaného jednodnotového systému a to jeho vertikálne kmitanie pri impulzovom budení. Pretože skúšaná zostava je citlivá na tlakové namáhanie, s možnosťou vybočenia, v systéme sa prostredníctvom hydraulického riadenia zaviedlo už spomínané základné ťahové namáhanie silou  $F_0 = 5$  kN. Príklady získaných výsledkov v tvare časových priebehov neriadenej a riadenej odozvy na impulzové budenie sú na obr.3 a 4. Zo záznamov vidieť, že lepšia účinnosť riadenia pohybu sa prejavuje pri dlhšie trvajúcich dejoch. Odozva v prvých zlomkoch sekundy počas pôsobenia impulzu poklesne pri prvej amplitúde odozvy len mierne a oveľa vyšší účinok sa prejavuje pri dokmitávaní, keď po 1,5 až 2 sekundách je systém prakticky upokojený a nevykazuje žiadne kmitanie. Za rovnaký čas neriadenej systém dosiahne pokles amplitúdy kmitania len asi o 20%, pričom pri druhom zázneji dochádza k narastaniu amplitúdy rýchlosti kmitania oproti začiatočnej amplitúde vybudenej impulzom.



Obr.3 Príklady riadenia kmitania jednohmotového systému pri impulzovom budení, priebeh rýchlosti kmitania: hore – neriadené kmitanie, dolu - riadené kmitanie

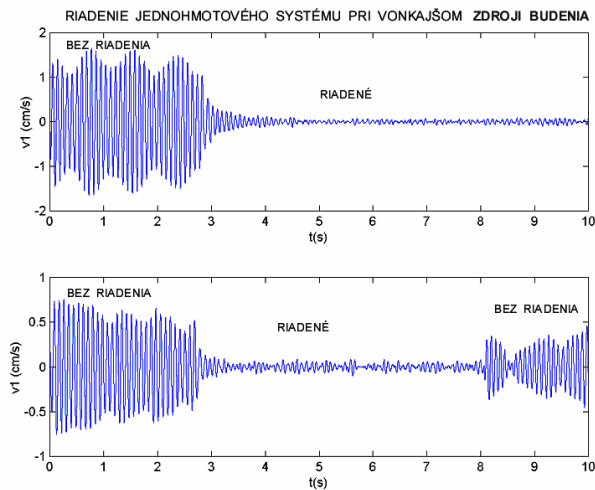


Obr.4 Príklady riadenia kmitania jednohmotového systému pri impulzovom budení, priebeh výchylky kmitania: hore - neriadené kmitanie, dolu - riadené kmitanie

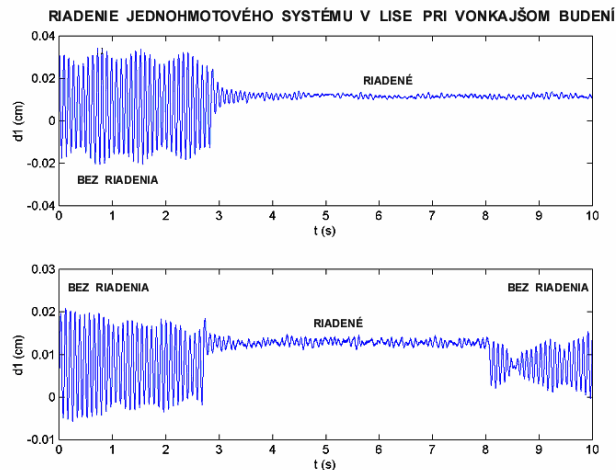
### Riadenie odozvy jednohmotového systému pri externom kinematickom budení

Okrem impulzového rozkmitania, na overenie algoritmu riadenia sa využil aj náhodný zdroj kinematického budenia. Skúšobný rám bol počas skúšky uchytý do základového bloku. Paralelne iná výskumná skupina uskutočňovala identifikačné skúšky elektrického zariadenia na veľkom seizmickom stole MASTER [2]. Pôsobiacie zaťažovanie bolo harmonické s pomaly lineárne narastajúcou frekvenciou vo forme tzv. „sweep sine“ testu. Tento typ zaťažovania sa zavádzal postupne v horizontálnych a vo vertikálnom smere. Počas budenia vo vertikálnom smere, dochádzalo k rozkmitaniu pôdneho podlažia laboratória, čo sa následne prejavilo aj na kmitaní základov laboratórnych strojov. Takto došlo, aj ku kmitaniu základu skúšobného rámu, v ktorom sa uskutočňovali skúšky riadenia kmitania tuhého telesa medzi pružinami pri jeho umiestnení v lise. Na overenie riadenia systému nebolo už viac treba zavádzať umelo vonkajší impulz, ale zamerať sa len na riadenie kmitania systému rozkmitaného vonkajším účinkom. Aplikáciou

pripraveného riadiaceho algoritmu, (predtým overovaného pri impulzovom budení) sa aj v tomto prípade dosiahol výrazný pokles kmitania, pozri obr.5, 6.



Obr.5 Príklady riadenia kmitania tuhého telesa pri vonkajšom harmonickom budení. Pribeh rýchlosti kmitania

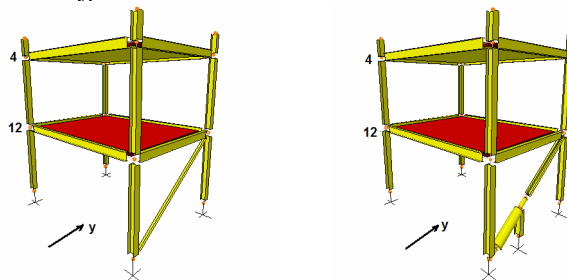


Obr.6 Príklady riadenia kmitania tuhého telesa pri vonkajšom harmonickom budení. Pribeh výchylky kmitania. Riadenie nezohľadňovalo začiatočnú predpínaciu silu

Pri riadení sa overovali dva stavové algoritmy riadenia: disp - riadenie kmitania cez výchylku (vibration control using displacement), freq - riadenie kmitania cez silu (vibration control using force). Úspešnejšie v tomto prípade bolo riadenie kmitania cez silu. Z obr.5 a 6 vidieť, že navrhnutý algoritmus riadenia je účinný aj pri priebežnom vynútenom kmitaní, ktoré sa redukovalo na skoro zanedbateľné amplitúdy. Pokles kmitania však nenastáva okamžite, ale cez prechodovú zónu, pri začiatočnom znížení amplitúdy na polovičnú až tretinovú hodnotu a následným ďalším poklesom až na cca 10-15% amplitúdy predpokladanej pri neriadenom kmitaní. Čas potrebný na dosiahnutie účinnej modifikácie kmitania sa znížil na približne jednu sekundu.

## RIADENIE ODOZVY MODELU VYBUDENEJ SEIZMICKÝM STOLOM

Predmetom výskumu bolo riadenie kmitania dvojpodlažného oceľového rámu pri rôznych vstupoch, riadení a kompozíciách rámu. Prehľad koncepčných riešení a varianty skúšok v rámci tohto výskumného programu je v [4,11]. Vstupné numerické overovanie algoritmov riadenia poskytlo predbežný odhad, do akej miery možno riadením dynamiky konštrukcie získať jej primerané správanie a udržať napätia a deformácie v bezpečných medziach. Uvedieme vybrané poznatky z riadenia cez „inteligentnú vzperu“, pozri obr.1, vpravo. Tu porovnávané zostavy konštrukcie – rámového dvojpodlažného modelu sú na obr.7.



Obr.7 Základné zostavy modelu: vľavo s pevnou vzperou, vpravo s „inteligentnou vzperou“.

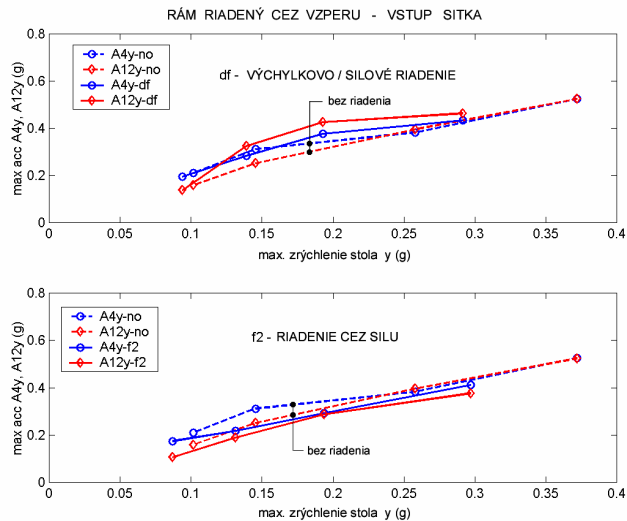
Pri použití riadenia cez inteligentnú vzperu sa najlepšie uplatnili prístupy:

- riadenie cez silu vo vzpere (**f2** force control) založené na minimalizácii rýchlosti pohybu stredu hmotnosti dosky prvého podlažia, čím sa zahŕňa do riadenia ako priečna, tak aj krútiaca (rotačná) odozva,
- riadenie cez výchylku (**df** approach), ktoré používa integrál meranej (vnútenej) sily v inteligentnej vzpere na riadenie pohybu vzpery cez výchylku.

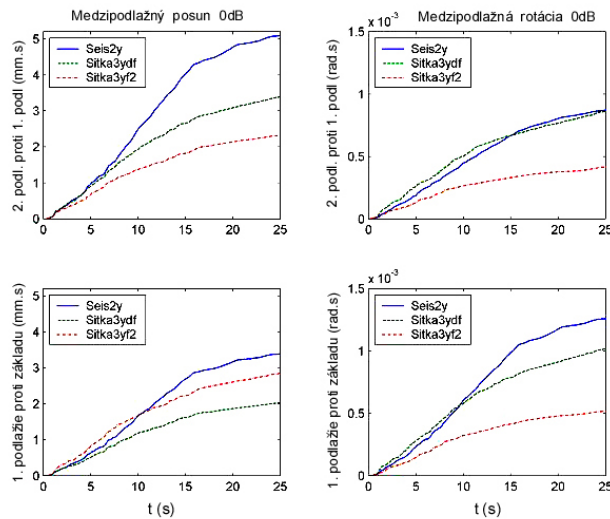
Na rozkmitanie skúšaného modelu seizmickým stolom je potrebné zohľadniť vlastnosti skutočných zemetrasení [2,5,7,9,10]. Cielene sa vybrali a použili vstupy založené na:

- USA, zemetrasenie Aljaška, 1972, záznam Sitka NS,
- USA, zemetrasenie Northridge, 1994, záznam Moorpark,
- Stredné Taliansko, zemetrasenie Umbria, 1997, záznam Nocera.

Na obr.8 sú maximálne zrýchlenia v smere  $y$  v bodoch: A4 – roh stropu druhého podlažia, A12 – roh stropu prvého podlažia, pozri obr.7. Ďalšími porovnávanými veličinami boli kumulatívne medzipodlažné výchylky a kumulatívne medzipodlažné natáčania/rotácie, ktoré poskytujú informáciu o kumulácii energie v skúmaných častiach modelu počas procesu riadenia jeho odozvy (obr.9). Ako vidieť z uvedených príkladov, riadením v čase aj pri takom obecnom vstupe, ako je simulované zemetrasenie, možno dosiahnuť lepšie prerozdelenie deformácií a napätí po konštrukcii a tak redukovať nepriaznivé zložky seizmickej odozvy. Podrobnejšie informácie o postupoch riadenia, a hodnoteniach výsledkov skúšok možno nájsť v [3,4,6,8,11].



Obr.8 Maximá zrýchlení podlaží, dosiahnuté počas skúšok, Verzia použitia inteligentnej vzpery pri seizmickom vstupe modelovanom podľa zemetrasenia Sitka



Obr.9 Kumulatívne medzipodlažné posuny a rotácie získané z meraní pri Sitka vstupe: Seis2y – tuhá vzpera, bez riadenia, Sitka3ydf – displ./force df (výchylka/sila) riadenie df cez vzperu, Sitka3yf2 – force f2 (sila) riadenie f2 cez vzperu

## ZÁVER

Prezentované výsledky sú založené na teoretickej, numerickej a experimentálnej analýze a poukazujú na možnosti výrazného zníženia seizmickej odozvy. Úspešne sa aplikovali a kalibrovali rôzne algoritmy riadenia. Experimentálne výsledky potvrdili akceptovateľné dynamické správanie skúšaných modelov. Takýto pozitívny vývoj sa dosiahol ako pri skúškach riadenia na samostatnej zostave v lise, tak aj pri riadení seizmickej odozvy cez inteligentnú vzperu. Pri praktických aplikáciách možno očakávať zvýšenie bezpečnosti a spoľahlivosti existujúcich

a novopostavených konštrukcií. Následne možno očakávať, že dôjde k efektívnejšiemu druhotnému prenosu seizmického vstupu cez podlažia k zariadeniam.

Táto štúdia vychádzala z výskumu, ktorý bol hlavne podporovaný Európskou komisiou v rámci projektu EC ECOLEADER FP5, HPRI-CT-1999-00046 a čiastočne SAV a MŠ SR v rámci projektov VEGA 2/4078/24, a 1/2051/05. Za finančnú podporu úprimne ďakujeme.

## LITERATÚRA

- [1] BENCHOUBANE, H., STOTEN, D. P.: *The decentralized minimal controller synthesis algorithm*. Int. Journal of Control, 2000, vol. 56, no. 4, p. 967-983.
- [2] BERGAMO, G., FRANCHIONI, G.: *The structural dynamics testing laboratory of Enel.Hydro – Ismes*. In Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control 2002, Como, Italy. Edit. by F. Casciati, Chichester: Wiley, c2003, vol. 2, p. 997-1006. ISBN 0-471-48980/8.
- [3] JUHÁS, M.: *Development of real time control system for 2DOF shaking table*. In Proceedings of Conference on Mechanical Engineering 2000. Bratislava: FME SUT, c2000, p. 2/47-52.
- [4] JUHÁS, M.: *Automatizácia riadenia kinematických pohybov a optimalizácia dynamickej odozvy vybraných systémov*. Bratislava: Sjf STU, 2006. 136 s.
- [5] JUHÁSOVÁ, E.: *Seismic Effects on Structures*. Amsterdam: Elsevier, 1991. 344 s. ISBN 80-224-0238-9.
- [6] JUHÁSOVÁ, E.: *The contribution of control to earthquake mitigation*. In Proceedings of Conference on International Collaboration in Earthquake Disaster Mitigation Research, Taipei, 17-18 November, 2003. -03-029, Taipei: NCREE, 2003, p. 167-176.
- [7] JUHÁSOVÁ, E., COELHO, E., BAIRRAO, R., COSTA, A., VIRSTA, A., SOFRONIE, R.: *Enhancing the performances of natural stone masonry*. In Proceedings of IASS 2005 Conference, September 6-10, 2005, Bucharest. Edit. by M. Mihailescu, C. Mircea, Cluj-Napoca: Technical University, c2005, vol. 2. p. 959-966. ISBN 973-713-056-1.
- [8] JUHÁSOVÁ, E., JUHÁS, M., FRANCHIONI, G., BERGAMO G.: *Numerical and experimental verification of some active control algorithms*. In Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control 2002, Como, Italy. Edit. by F. Casciati, Chichester: Wiley, c2003, vol. 3, p. 665-670. ISBN 0-471-48980/8.
- [9] JUHÁSOVÁ, E., LABÁK, P., JUHÁS, P.: *The masonry in areas of moderate seismicity*. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Aug. 1-6, 2004. Vancouver: UBC, c2004, p. 2548/1-10.
- [10] JUHÁSOVÁ, E., MATYS, M., FRANKOVSKÁ, J., LABÁK, P.: *Cooperative approach of geotechnical and earthquake engineering in seismic input assessment*. In Proceedings of CEI Conference, Bratislava, 24-25 October 2005. Edit. by M. Bielik, P. Moczo, Bratislava: FNS CU, c2005, p. 91-97. ISBN 80-223-2116-8
- [11] JUHÁSOVÁ, E., VRABEC, M., JUHÁS, M., SVRČEK, V.: *The contribution of control to the mitigation of torsion in seismic response*. In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Aug. 1-6, 2004. Vancouver: UBC, c2004, p. 2157/1-10.
- [12] LOH, C.H., LIN, P.Y., CHUNG, N.H.: *Experimental verification of building control using active bracing system*. Earthquake Engng. and Struct. Dyn., 1999, vol. 28, no. 10, p. 1099-1119.