

izr. prof. dr. **Koleta Zafirova**, univ. dipl. inž.  
izr. prof. dr. **Vera Meško**, univ. dipl. inž.  
izr. prof. dr. **Liljana Markovska**, univ. dipl. inž.  
Univerza „St. Cirila i Metoda“, Fakulteta za tehnologijo in metalurgijo  
Ruđer Bošković 16, MK-91000 Skopje, Makedonija

## Računalniška simulacija stisljivosti preprog

*Dinamični simulator ISIM je zmogljivo orodje za numerično reševanje diferencialnih enačb. S pridom se že uporablja v kemijski tehnologiji. V tem članku pa je obravnavana njegova uporabnost na področju tekstilstva.*

*Preučevan je bil model stisljivosti preproge, do katere pride zaradi impulznega udarca. Dobljeni rezultati so lahko zelo koristni pri predvidenju zvočne izolacije preprog pri udarcu. Poskusi so pokazali, da se dinamični simulator ISIM zadovoljivo uporablja za rešitev tourstnega problema.*

**Ključne besede:** stisljivost preprog, zvočna izolacija preprog, računalniška simulacija stisljivosti preprog, uporaba dinamičnega simulatorja ISIM v tekstilstvu

### Computer Simulation of Carpet Compression

*ISIM Dynamic Simulator is a powerful tool for numerical solving of differential equations. It is successfully used in chemical engineering. This paper is concerned with the application of ISIM Simulator in the field of textiles. Modelling of carpet compression due to an impulse shock is taken in consideration. The obtained results can be used for prediction of impact sound insulation of carpets. The experiment shows that ISIM Dynamic Simulator is satisfactorily applied in solving the problem.*

**Keywords:** carpet compression, sound insulation of carpets, computer simulation of carpet compression, application of ISIM Dynamic Simulator in the field of textiles

Izvirni znanstveni članek  
Original Scientific Paper

UDK 645.1 : 677.017.435 : 681.3

### 1.0 UVOD

V predhodni raziskavi smo ugotovili precejšnjo medsebojno odvisnost zvočne izolacije preproge ob udarcu in konstrukcijskih parametrov preproge (debeline preproge, mase lasu, gostote površinskega lasu, tipa in finoče vlaken). Da je elastičnost lasu ključni dejavnik pri zvočni izolaciji, je potrdila precejšnja soodvisnost z vrednostjo udobja hoje, dinamične najvišje udarne sile ter povrnitvijo debeline preproge po stisnjenosti [1, 2, 3].

Enostavna, vendar zanesljiva metoda merjenja, s katero bi lahko ugotovili, kakšna bo zvočna izolacija preproge ob udarcu, bi zelo koristila proizvajalcu že takrat, ko razvija nov proizvod. Standardna metoda merjenja zahteva tehnološko dovršeno in drago opremo. Zato predlagamo kot alternativo metodo merjenja maksimalne udarne sile med simuliranim udarnim testom s kladivom, ki ima pospeševalnik (akcelerator) [4]. Po tej metodi lahko teoretično udarno izolacijsko izboljšanje (UII), pri frekvenci  $f$ , kjer je  $f > f_0$ , ki je podano z enačbo

$$UII = 40 \log (f/f_0) \quad \text{dB} \quad (1)$$

izrazimo z maksimalno silo takole

$$UII = 40 \log (I \pi f/F) \quad \text{dB} \quad (2)$$

kjer je  $I$  impulz,  $F$  sila,  $UII$  udarno izolacijsko izboljšanje in  $f_0$  naravna frekvenca.

Preučevali smo matematični model, s katerim ugotovimo dinamični odziv preproge na impulzni udarec. Ocenjene vrednosti maksimalne udarne sile in koeficient dušenja zvoka smo določili z računalniško simulacijo. Eksperimentalne podatke smo dobili z merjenjem stisnjenosti preproge [5].

### 2.0 MATEMATIČNI MODEL IN METODA REŠEVANJA

Matematični model, s katerim ugotavljamo, kako se preproga odziva na impulzni udarec, je podan z naslednjo enačbo [6].

$$mx''(t) + cx'(t) + kx(t) = P(t) \quad (3)$$

Ta matematični model predstavlja enačbo ravnotežja dinamične sile za sistem z eno prosto stopnjo, kjer so

$x''(t)$ ,  $x'(t)$  in  $x(t)$  pospešek, hitrost ter premik objekta z maso,  $m$ . Parametra  $c$  in  $k$  sta koeficient dušenja zvoka in koeficient togosti.

Za preučevanje stisljivosti preprog je tretji člen enačbe nelinearen, zato je ustrezni matematični model naslednji:

$$mx''(t) + cx'(t) + f(x) = P(t) \quad (4)$$

kjer je

$x(t)$  – stisnjenost preproge, mm

$f(x)$  – nelinearna togost preproge, N

$P(t)$  – kvazi statična obremenitev ( $P = mg$ ), N

Začetni pogoji, ki so potrebni, če hočemo rešiti matematični model, so:

$$x(0) = 0, x'(0) = v_0$$

kjer je  $v_0$  začetna hitrost udarnega kladiva.

Za določitev nelinearne togosti preproge smo izbrali naslednji model:

$$f(x) = (A_1x + A_2x^2 + A_3x^3) \exp(x) \quad (5)$$

Parametre  $A_1$ ,  $A_2$  in  $A_3$  lahko ocenimo z eksperimentalnimi podatki z uporabo nelinearne regresijske programske opreme REPROCHE [7].

Za ta namen je treba izvesti eksperimente merjenja udarne sile in debeline preproge. Menimo, da je koeficient dušenja sorazmeren izgubi energije, tako da je

$$c = c_0 (W_c - W_R) \quad (6)$$

kjer je

$W_c$  – delo stiskanja (kompresije), J/m<sup>2</sup>

$W_R$  – delo povratka, J/m<sup>2</sup>

$c$  – koeficient dušenja zvoka, Ns/m

$c_0$  – koeficient v enačbi 6, s

Dušenje zvoka je po definiciji razprševanje vibracijske energije znotraj vibracijskega sistema. Višji koeficient dušenja zvoka pomeni boljše razprševanje energije. Koeficient dušenja zvoka preproge je odvisen od mnogih, med seboj povezanih parametrov: vrste in sestave vlaken lasu, saj gre za različno elastičnost, gostoto lasu, število zavojev, vrsto lasu (zankast ali rezan las), gostoto taftanja. Razen tega je treba upoštevati tudi parametre nosilne tekstilije.

Koeficient  $c_0$  lahko ocenimo s postopkom simulacije. Nekaj potrebnih podatkov v matematičnem modelu (enačba 4) je:  $m = 0,36$  kg,  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>,  $v_0 = 0,99$  m/s.

V raziskavi smo matematični model (enačba 4) rešili z uporabo dinamičnega simulatorja ISIM [8]. Razvit je bil program ISIM za simulacijo in z njim smo lahko ocenili maksimalno udarno silo  $F_{max}$ , impulz, ki se ob udarcu prenaša,  $I$ , polovično obdobje  $T_0/2$  in čas trajanja impulza  $T_0$ . Maksimalna udarna sila  $F_{max}$  je bila

določena kot vrh simulacijske krivulje udarne sile ( $F = -mx''$ ) kot funkcije časa. Impulz, ki se med udarcem prenaša, je določen takole

$$I = \int_0^{T_0/2} -mx''(t) dt \quad (7)$$

Tako impulz, ki se med udarcem prenaša, izračunamo kot ploščino pod krivuljo  $-mx''(t)$  kot funkcijo časa udarca. Programski segment za izračun prenašanega impulza je vključen v program simulacije ISIM.

Če približno ocenimo obliko impulza s polovičnim sinusom, je frekvenca ekvivalentnega sinusnega impulza

$$f_0 = F_{max}/\pi \quad (8)$$

in čas

$$T_0 = 1/f_0 \quad (9)$$

### 3.0 EKSPERIMENTALNI DEL

Preučevali smo vzorce preprog z različnimi fizikalnimi lastnostmi.

Nekaj vzorcev je bilo iglanih s podlago iz jute, nekaj pa je bilo plošč z bitumensko podlago.

- Skupna debelina: od 6,6 do 11,5 mm
- Debelina lasu: od 3,3 do 7,7 mm
- Skupna masa: od 2180 do 5642 g/m<sup>2</sup>
- Masa lasu: od 169 do 1079 g/m<sup>2</sup>

Udarni test smo izvedli na vzorcih preprog. Maksimalni pojemek udarnega kladiva smo izmerili in dobili rezultate v območju od 55,9 do 187,9 N.

Merili smo stisnjenost debeline preproge in njen povratek v skladu z BS 4098:1975. Obremenitev vzorcev preprog smo povečevali od 2 do 200 kPa. Stisnjenost debeline vzorcev preprog smo merili 30 sekund po obremenitvi. Povratek debeline smo merili po razbremenitvi vzorca.

**Preglednica 1:** Eksperimentalne vrednosti maksimalne stisnjenosti  $x_{max}$ , maksimalna udarna sila  $F_{max}$ , delo stiskanja  $W_c$  in delo povratka  $W_R$

Vzorec	$x_{max}$ (mm)	$F_{max}$ (N)	$W_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$W_R$ (J/m <sup>2</sup> )
543D	5,06	99,7	230,73	82,39
543C	6,66	72,5	248,71	86,28
538D	4,44	97,3	235,63	79,84
538C	5,94	80,8	252,72	90,37
524E	6,22	55,9	292,26	107,83
524F	5,94	69,7	243,89	78,01
E	4,96	86,3	256,99	77,37
F	4,18	187,9	212,87	83,19
L	3,10	139,1	166,01	46,24
P	2,68	139,5	189,77	42,50
S	3,14	187,9	130,42	46,70

Eksperimentalne vrednosti maksimalne stisljivosti  $x_{\max}$ , maksimalne udarne sile  $F_{\max}$ , dela stiskanja  $W_c$  in dela povratka  $W_r$  so prikazane v preglednici 1.

Prvih šest vzorcev (tip 543, 538 in 524) ima podlago iz jute in točno določeno sestavo lasu (volna/PA in njune mešanice), vzorci E, F, L, P in S pa imajo bitumensko podlago in naključno izbrano sestavo lasu.

#### 4.0 REZULTATI IN RAZPRAVA

Zato, da bi lahko izdelali študije, smo parametre  $A_1$ ,  $A_2$  in  $A_3$  v modelu, podanem v enačbi 5, ocenili z eksperimentalnimi podatki, z uporabo nelinearne regresijske programske opreme REPROCHE in jih prikazujemo v preglednici 2.

Rezultati simulacije matematičnega modela stisljivosti preproge zaradi impulznega udarca so podani v preglednici 3 in 4.

**Preglednica 2:** Ocenjeni parametri v modelu za togost preproge (enačba 5)

Vzorec	$A_1$	$A_2$	$A_3$	Povprečni odmik, $\sigma$
543D	1,113	-0,414	0,042	1,326
543C	0,281	-0,084	0,007	1,801
538D	2,645	-1,145	0,134	1,035
538C	0,495	-0,158	0,014	1,847
524E	0,478	-0,147	0,012	2,597
524F	0,509	-0,166	0,015	1,732
E	1,229	-0,427	0,040	0,966
F	2,273	-0,953	0,114	0,583
L	6,882	-4,417	0,820	1,467
P	13,460	-8,633	1,614	1,335
S	4,514	-2,976	0,595	0,379

**Preglednica 3:** Rezultati simulacije za vzorce preprog s podlago iz jute

Vzorec	$F_{\max}$ (N)	$T_0/2$ (s)	$I$ (Ns)	$T_0$ (s)	$C_0$ (s)
543D	101,36	0,0134	0,55908	0,031	0,15
543C	65,15	0,0174	0,51829	0,048	0,15
538D	107,81	0,0128	0,56377	0,029	0,15
538C	72,67	0,0156	0,53332	0,043	0,15
524E	52,00	0,0171	0,51375	0,060	0,15
524F	73,81	0,0156	0,52889	0,043	0,15

**Preglednica 4:** Rezultati simulacije za vzorce preprog z bitumensko podlago

Vzorec	$F_{\max}$ (N)	$T_0/2$ (s)	$I$ (Ns)	$T_0$ (s)	$C_0$ (s)
E	86,81	0,0136	0,56824	0,055	0,12
F	185,55	0,0112	0,64999	0,016	0,07
L	140,86	0,0088	0,53560	0,022	0,32
P	140,95	0,0091	0,57015	0,022	0,22
S	187,59	0,0080	0,56814	0,017	0,37

Dobljeni rezultati simulacije za vzorce preprog s podlago iz jute (preglednica 3) kažejo, da ima  $c_0$  v enačbi 6 za koeficient dušenja enako vrednost, to je 0,15. Korelacijski koeficient med eksperimentalnimi in ocenjenimi vrednostmi maksimalne udarne sile  $F_{\max}$  je 0,952, kar je sprejemljivo in zadovoljivo za tako raziskavo. Enaka vrednost  $c_0$  pri teh vzorcih pomeni, da koeficient dušenja upošteva vplive različnih lastnosti preprog: skupno debelino, debelino lasu, skupno maso, maso lasu in sestavo lasu. Pri vzorcih preprog z bitumensko podlago nismo mogli dobiti enake vrednosti  $c_0$ . Torej v tem primeru vpliv različne sestave ni mogel biti vključen v koeficient dušenja. Vrednosti  $c_0$ , ki smo jih dobili s postopkom simulacije, so podane v preglednici 4.

#### 5.0 SKLEPI

V raziskavi smo preučevali simulacijo matematičnega modela stisljivosti preproge. S pomočjo dobljenih rezultatov lahko predvidimo, kakšna bo zvočna izolacija preproge ob udarcu.

Dobljeni rezultati simulacije za vzorce preprog s podlago iz jute kažejo, da ima  $c_0$  v koeficientu dušenja enako vrednost, in sicer 0,15. Pri teh vzorcih je korelacijski koeficient med eksperimentalnimi in ocenjenimi vrednostmi maksimalne udarne sile  $F_{\max}$  zelo visok, in sicer 0,952. Pri vzorcih preprog z bitumensko podlago so vrednosti  $c_0$ , dobljene s postopkom simulacije, ocenjene s postopkom predlagane simulacije.

#### Viri:

- [1] ZAFIROVA, K. *Pridones kon proučevanju na izolacijata od strukturna buka so tekstilni podni prostirki : doktorska disertacija*. Skopje : University of „St.Cyril and Methodius“, 1989.
- [2] ZAFIROVA, K., JORDANOVSKI, IJ. in LJAPCEVA, K. Matematična interpretacija kompresije prostirača. *Tekstil*, 1994, let. 42, št. 8, str. 397-401.
- [3] ZAFIROVA, K. in LJAPCEVA, K. Ocjena značenja podloge tepiha za izolaciju strukturne buke. *Tekstil*, 1996, let. 45, št. 6, str. 303-306.
- [4] FORD, RD. in BAKKER, PG. The acoustical properties of various carpet and underlay combinations. *Journal of the Textile Institute*, 1984, vol. 75, no. 3, p. 164-174.
- [5] ZAFIROVA, K. A prediction of impact sound insulation with carpets by accelerometer measurements. V *Noice control : proceedings, Cracow*, 1992, p. 193-197.
- [6] KURTOVIČ, H. *Osnovi tehničke akustike*. Beograd : Naučna knjiga, 1997.
- [7] REPROCHE – *Regression Program for Chemical Engineers, User Manual, Version 5.0*. Beamster : ChemEng Software and Services, 1992.
- [8] ISIM – *Interactive Simulation Language, User Manual, 4th ed.* Beamster : ChemEng Software and Services, 1986.

Prevod: Marinka Mrak

Prispelo/Received 04-1999; sprejeto/accepted 01-2000