

Vpliv mehčanja in premreženja naravnega kavčuka na dušenje vulkanizatov

Effect of Softening and Crosslinking of Natural Rubber on Damping Properties of Vulcanizates

M. Gubanc¹, P. Munih, Z. Šušterič, Sava Kranj
A. Šebenik, FKKT Univerze v Ljubljani

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

Uporaba gumenih ležišč za dušenje potresnih nihanj je ena od možnih rešitev v protipotresni gradnji. Zato so dušilne lastnosti gume osnovnega pomena. Namen tega dela je ugotoviti vpliv mehčal in premreženja na dušilne lastnosti gume iz naravnega kavčuka z visoko vsebnostjo saj in poiskati sestavo gume z optimalno sposobnostjo dušenja v frekvenčnem območju potresnih nihanj ob ustreznih drugih fizikalnih lastnostih. Izkaže se, da je močno dušenje nihanj možno doseči z nizko premreženim naravnim kavčukom ob visoki vsebnosti saj in čim nižji vsebnosti mehčal, ki v splošnem slabšajo druge, za gumena ležišča zahtevane fizikalne lastnosti.

Ključne besede: naravni kavčuk, dušenje vibracij, mehčala, premreževanje, potres

Application of rubber bearings for earthquake vibration damping is one of the possible solutions in earthquake resistant building. Hence, damping properties of rubber are of fundamental importance. The aim of this work is to ascertain the effect of softening and crosslinking on damping properties of highly carbon black filled natural rubber vulcanizates and to find a composition with optimum damping ability in the earthquake vibration frequency range along with other acceptable physical properties. It turns out that strong vibration damping can be achieved by weakly crosslinked natural rubber of high carbon black content and as low as possible content of softeners which, in general, worsen the other, for rubber bearings required properties.

Key words: natural rubber, vibration damping, softeners, crosslinking, earthquake

1 Uvod

Eden izmed možnih načinov izolacije zgradb od potresnega nihanja tal je vgradnja gumenih ležišč, ki ta nihanja dušijo. Zaradi primernih viskoelastičnih lastnosti se v ta namen večinoma uporablja guma iz naravnega kavčuka z dodatki. Razvoj in konstruiranje takšnih protipotresnih ležišč temelji na teorijah vibracijske in seizmične izolacije¹.

Gibanje tal pri potresu je nihanje, ki ni enostavno harmonično temveč kaotično. Seizmična merjenja kažejo, da je za horizontalno potresno nihanje značilno frekvenčno območje od 3 do 5 Hz, čeprav se celotni spekter rasteza od nizkih do zelo visokih frekvenc². Te frekvence se ujemajo z lastnimi frekvencami večine gradbenih objektov, kar pomeni, da pri potresih prihaja do resonance. Pri prehajanju v resonanco se nihajne amplitude in pospeški naglo večajo, kar pri močnejših potresih povzroča rušenje objektov.

Da bi se to preprečilo, se morata lastna in zbujevalna frekvenca razlikovati. Na primer, če je lastna frekvenca objekta mnogo nižja od zbujevalne frekvence tal, objekt zbujanja skorajda ne občuti, saj je njegov nihajni čas daljši, pospeški pa so nižji. S tem je seveda nižja tudi potresna (kinetična) energija objekta.

Lastno frekvenco objekta je možno občutno znižati s protipotresnimi gumenimi ležišči in s tem objekt potres-

no izolirati. S primernim ležiščem se lahko lastna frekvenca objekta zmanjša na primer iz 2-5 Hz na 0,5 Hz³. Za to je odgovorna t.i. podajnost ležišča, ki je odvisna od njegove geometrije in viskoelastičnih lastnosti gume. Zaradi podajnosti ležišča se pri potresu deli objekta le malo premaknejo in pospeški se malo spreminjajo z višino⁴. Zaradi frekvenčnega spektra potresnih nihanj pa objekt z ležiščem ne glede na znižano lastno frekvenco v določenem trenutku preide tudi skozi resonanco². Neizoliran objekt pa se pri potresu vede kot nihalo. Pospeški z višino naraščajo, kar ima uničujoče učinke.

Drugi bistveni vidik potresne izolacije z gumenimi ležišči je dušenje nihanj, ki nastane zaradi disipacije dela deformacijske energije v ležišču. Zaradi dušenja se nihanje objekta po končanem vzbujanju ustavi. Obenem dušenje tudi znižuje lastno frekvenco in preprečuje prevelike premike objekta v horizontalni smeri⁴. Mera za dušilne sposobnosti ležišč je t.i. transmisivnost^{1,5}, ki podaja razmerje prenesene in vsiljene zunanje sile in ki je odvisna od razmerja vsiljene in lastne frekvence ter viskoelastičnih lastnosti gume.

Protipotresna gumena ležišča izolirajo objekt pred horizontalnimi potresnimi valovi, medtem ko vertikalni za objekt niso usodni. Vendar je poleg podajnosti in dušenja učinkovitost ležišč pogojena še z drugimi fizikalnimi lastnostmi. Najpomembnejša izmed teh je trajna deformacija gume zaradi pritiska objekta. Le-ta naj bi bila čim manjša, možnost lezenja gume pa se zmanjša tudi z laminarno konstrukcijo ležišča, t.j. z vgradnjo jeklenih plošč med plasti gume. Takšna armirana ležišča so

¹ Marko GUBANC, dipl.inž.
Sava Kranj
Razvojno tehnološki inštitut
4000 Kranj, Škofjeloška 6

zelo toga v vertikalni smeri, je klene plošče pa ne vplivajo na njihovo horizontalno podajnost⁴.

Zahtevane fizikalne lastnosti protipotresnih ležišč je možno zagotoviti z gumo iz naravnega kavčuka in visoko vsebnostjo saj. Vendar je pri tem važna tudi stopnja premreženja (vulkanizacije) in vsebnost mehčal, ki se kavčukovim zmesem dodajajo za boljšo predelavo. Namen tega dela je preučiti vpliv stopnje premreženja in mehčal na dušenje gume in poiskati takšno sestavo kavčukove zmesi, ki bo po premreženju dala gumo z optimalnim kompromisom zahtevanih lastnosti.

2 Teoretične osnove

2.1 Periodične deformacije v linearni viskoelastičnosti^{6,7}

Guma spada med viskoelastične snovi, pri katerih se del vložnega mehanskega dela, potrebnega za deformacijo, uskladišči v obliki prožnostne energije, drugi del pa pomeni disipacijsko ali izgubljeno energijo, ki se zaradi notranjega trenja sprosti v obliki toplote. V okviru linearne viskoelastičnosti, kjer so lastnosti neodvisne od velikosti deformacije (t.j. pri majhnih deformacijah), je reološko enačbo stanja gume možno postaviti na osnovi Boltzmannovega načela superpozicije. Ta pravi, da so ob linearnosti odgovori snovi na postopne obremenitve aditivni in neodvisni od mehanske (obremenitvene in deformacijske) preteklosti. Pri horizontalnem premiku tal se protipotresna ležišča strižno deformirajo. Če je strižna deformacija γ zvezna in njena začetna vrednost (pri času $t = 0$) enaka 0, ima reološka enačba stanja naslednjo obliko:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t \frac{d\gamma(t')}{dt'} G(t-t') dt', \quad (1)$$

kjer je $\sigma(t)$ časovno odvisna strižna napetost in $G(t)$ strižni relaksacijski modul. Pri večjih deformacijah postane relaksacijski modul odvisen od velikosti deformacije in enačba (1) v gornji obliki ne velja več. Takšne primere obravnavajo nelinearne teorije viskoelastičnosti, vendar za izpeljavo količin, potrebnih za izračun transmisivnosti ležišč, enačba (1) zadošča.

Pri periodičnem deformiranju viskoelastičnih snovi napetost in deformacija nista v fazi, ampak ju loči za dano snov značilen fazni kot δ . Tako pri preprosti sinusni strižni deformaciji velja

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (3)$$

kjer sta γ_0 in σ_0 amplitudi strižne deformacije in strižne napetosti ter ω krožna frekvenca. Z vnosom enačbe (2) v enačbo (1) sledi:

$$\sigma(t) = \gamma_0 [G'(\omega) \sin(\omega t) + G''(\omega) \cos(\omega t)], \quad (4)$$

kjer je prvi člen na desni strani v fazi z deformacijo in drugi za $\pi/2$ zunaj faze. $G'(\omega)$ in $G''(\omega)$ sta snovni količini, dinamični strižni prožnostni modul in strižni modul izgub, ali dinamični funkciji, v okviru linearne

viskoelastičnosti odvisni le od frekvence in temperature, ter definirani kot:

$$G'(\omega) = \omega \int_0^{\infty} G(s) \sin(\omega s) ds \text{ in} \\ G''(\omega) = \omega \int_0^{\infty} G(s) \cos(\omega s) ds, \quad (5)$$

kjer je $s = t - t'$. G' je pri tem mera za prožnostno energijo, G'' pa za energijske izgube. S primerjavo enačb (3) in (4) sledi:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \text{ in } G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta. \quad (6)$$

Razmerje $G''/G' = \tan \delta$ se imenuje tangens izgub, ki je prav tako kot G' in G'' funkcija frekvence in temperature.

Pri deformaciji je opravljeno delo na volumsko enoto w enako vsoti gostot prožnostne energije w_p in disipacijske energije w_d

$$w = \int \sigma d\gamma = w_p + w_d. \quad (7)$$

S kombinacijo enačb (2), (4) in (7) sledita za w_p in w_d po četrtini nihaja izraza:

$$w_p = \frac{1}{2} \gamma_0^2 G' \text{ in } w_d = \frac{\pi}{4} \gamma_0^2 G'' \quad (8)$$

Njuno razmerje je sorazmerno s tangensom izgub: $w_d/w_p = (\pi/2) G''/G' = (\pi/2) \tan \delta$. Poleg odvisnosti od narave snovi in frekvence sta w_p in w_d v okviru linearne viskoelastičnosti odvisni le še od temperature.

2.2 Dušenje nihanj

Če stoji objekt z maso m na gumenem ležišču z višino h , ploščino osnovne ploskve S in dinamičnim strižnim prožnostnim modulom G' , je lastna frekvenca takšnega nedušenega sistema dana kot⁵:

$$\omega_0 = \left(\frac{G' S}{mh} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Recipročna vrednost izraza $G' S/h$ v gornji enačbi pomeni podajnost ležišča. Z dušenjem nihanj se lastna frekvenca sistema zniža in je v naslednji odvisnosti od lastne frekvence nedušenega sistema:

$$\omega_0 = \omega_0' \left(1 + \frac{tg^2 \delta}{4} \right)^{-1/2} \quad (10)$$

Lastna frekvenca dušenega sistema pojema z naraščajočim $tg \delta$. Znižanje lastne frekvence sistema objekta ležišča je torej možno doseči s povečevanjem podajnosti, t.j. količine $h/G' S$, kot narekuje enačba (9), in dodatno s povečevanjem $tg \delta$, kot narekuje enačba (10).

Najpomembnejša značilnost dušilnega elementa (ležišča) je transmisivnost T , definirana kot razmerje prenesene in vsiljene zunanje sile oz. ustreznih pospeškov ali razmerje amplitud premika objekta in tal, saj so pri nihanju te količine povezane kot $F = ma_0 = -\omega^2 x_0$,

če je F sila ter a_0 in x_0 amplitudi pospeška in premika. Transmisivnost kot funkcija frekvence je podana z naslednjo enačbo^{1,5}:

$$T(\omega) = \left\{ \frac{1 + \text{tg}^2 \delta(\omega)}{[1 - (\omega/\omega_0)^2 G'(\omega)/G'(\omega_0)]^2 + \text{tg}^2 \delta(\omega)} \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

kjer je ω frekvenca vsiljenega nihanja in ω_0 lastna frekvenca sistema. Pri dušenju nihanj je v splošnem zaželeno čim nižja transmisivnost. Pri tem sta zanimiva zlasti dva primera in sicer, ko je vsiljena frekvenca blizu lastne (resonančne) frekvence, $\omega = \omega_0$, in ko je vsiljena frekvenca veliko višja od lastne frekvence, $\omega \gg \omega_0$.

V prvem primeru ($\omega = \omega_0$) preide enačba (11) v:

$$T(\omega) = [1 + \text{tg}^{-2} \delta(\omega)]^{1/2}. \quad (12)$$

Da bi bila transmisivnost pri resonanci čim nižja oz. čim bližje vrednosti 1, mora biti $\text{tg} \delta$ čim večji. Za nedušene sisteme ($\text{tg} \delta = 0$) gre T čez vse meje.

V drugem primeru ($\omega \gg \omega_0$) se enačba (11) poenostavi v:

$$T(\omega) = [(\omega_0/\omega)^2 G'(\omega_0)/G'(\omega)] [1 + \text{tg}^{-2} \delta(\omega)]^{1/2}. \quad (13)$$

$\text{Tg} \delta$ ima v tem primeru manjšo vlogo, saj transmisivnost pojema s kvadratom frekvence. Kljub temu je zaželen čim manjši $\text{tg} \delta$.

Za dušenje celotnega spektra potresnih nihanj bi bil pri izbiri gume za protipotresna ležišča potreben kompromis, pri čemer pa dušenje v resonanci ne bi bilo optimalno. Ker pa je ravno to dušenje najvažnejše, je za protipotresna ležišča pomemben predvsem prvi od zgoraj navedenih primerov. Cilj dela je torej poiskati gumo s čim višjim $\text{tg} \delta$ in z ostalimi fizikalnimi lastnostmi v mejah sprejemljivosti.

3 Eksperimentalni del

3.1 Materiali in priprava merjencev

Znano je, da aktivna polnila v kavčukih delujejo ojačevalno, t.j. povečujejo trdoto, ravnovesne in dinamične prožnostne module ter natezno trdnost, torej togost gume, obenem pa zaradi povečanega notranjega trenja in posledične disipacije deformacijske energije ali histereze zmanjšujejo prožnost gume, kar se kaže v povečanju modula izgub, $\text{tg} \delta$, zaostale in trajne tlačne deformacije ter v zmanjšanju raztezkov pri pretrgu in odbojne elastičnosti. Na vse te lastnosti pa vplivajo tudi mehčala, ki se kavčukom dodajajo za olajšanje predelave, in stopnja premreženja (vulkanizacije) oz. gostota medmolekulskih kovalentnih vezi, ki je določena z vrsto in količino vulkanizacijskih sredstev ter načinom vulkanizacije.

Osnovna kavčukova zmes, zmešana v laboratorijskem mešalniku vrste Bambury (Pomini-Farrell), je vsebovala naravni kavčuk (vrste SMR CV60), 80 phr (masnih delov na 100 masnih delov kavčuka) saj (vrste N-550), 1 phr stearinske kisline, 5 phr cinkovega oksida

in 1,5 phr antioksidacijskega sredstva (IPPD - N-izo-propil N-fenil-p-fenilendiamin). Z Box-Hunterjevo statistično eksperimentalno shemo⁸ so bile na laboratorijskem dvovaljčniku (Berstorff) pripravljene eksperimentalne zmesi z domešanjem aromatskega olja (vrste Solar3) kot mehčala, v količinskem območju 0 - 80 phr ter pospeševala (vrste TBBS - tert. butil-2-benzotiazol sulfenamid) v območju 0,5 - 2 phr in žvepla v območju 0,5 - 3,5 phr, kot vulkanizacijskih sredstev. Po predpisu Box-Hunterjeve sheme za tri spremenljivke je bilo narejenih 20 eksperimentalnih zmesi, od katerih je 6 enakih za določitev eksperimentalnih napak. Za določitev dinamičnih lastnosti gume so bile zmesi nato vulkanizirane kar v napravi za merjenje dinamičnih lastnosti (Rubber Process Analyser - RPA 2000, Monsanto), za določitev drugih lastnosti pa v laboratorijskih stiskalnicah pri 150°C do najvišje stopnje, pri čemer so bili vulkanizacijski časi predhodno določeni vulkometrično (Rheometer 100 - Monsanto).

3.2 Merjenja

Dinamične lastnosti vulkanizatov vseh 20 eksperimentalnih zmesi, podane z dinamičnimi funkcijami $G'(\omega)$, $G''(\omega)$ in $\text{tg} \delta$, so bile izmerjene z napravo RPA 2000 v frekvenčnem območju od 0,5 do 7,5 Hz pri 2,8 in 42% amplitudi strižne deformacije in pri sobni temperaturi (25°C).

Druge fizikalne lastnosti: modul M_{100} (napetost pri 100% natezni deformaciji), natezna trdnost, raztezek pri pretrgu, tlačna deformacija in histereza, so bile izmerjene po standardiziranih metodah s trgalnim strojem (Instron). Iz meritev histereze je bil ugotovljen odstotek disipirane energije. Trdota je bila merjena z merilnikom trdote Shore A (Zwick).

3.3 Obdelava rezultatov in optimizacija

Ker zveze med fizikalnimi lastnostmi gume in količinami sestavin večinoma niso natančno poznane, znano pa je, da so zvezne (bodisi monotono rastoče ali padajoče), jih je v optimizacijske namene možno opisati s preprostimi aproksimativnimi funkcijami. Pokazalo se je, da kot takšna namenska funkcija v neprevelikih količinskih območjih sestavin zadošča splošen polinom drugega reda⁸⁻¹⁰:

$$f(X_i, X_j) = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_i \sum_j a_{ij} X_i X_j, \quad (14)$$

kjer je $f(X_i, X_j)$ fizikalna lastnost kot funkcija količin sestavin X_i , koeficienti a_i in a_{ij} pa določajo velikost vpliva posameznih sestavin, slednji tudi velikost medsebojnega vpliva.

Namenske funkcije oblike (14) so bile postavljene za vse merjene fizikalne količine v odvisnosti od količin treh sestavin ali spremenljivk X_i : mehčala, pospeševala in žvepla, pri čemer so bili koeficienti a_i in a_{ij} določeni z računalniško regresijsko analizo. S tako dobljenimi na-

menskimi funkcijami je možno v kratkem času računalniško izvesti poljubno število "eksperimentov" v tridimenzionalnem eksperimentalnem prostoru spreminjanih sestavin in določiti fizikalne lastnosti za poljubne kombinacije.

Za iskanje optimalne sestave gume, t.j. gume z največjim $tg\delta$ ob kompromisu sprejemljivih drugih fizikalnih lastnosti, je bila izbrana Harrington-Derringerjeva optimizacijska metoda⁸⁻¹⁰. Metoda najprej zahteva določitev sprejemljivih območij fizikalnih lastnosti, pri čemer naj bi optimalne vrednosti ležale v sredini. Za količine, ki so omejene le s spodnjo mejo - v tem primeru odstotek disipirane energije in $tg\delta$ - se za zgornjo mejo postavi visoka, teoretično komaj dosegljiva vrednost. Za gumo protipotresnih ležišč so bila določena naslednja omejitvena območja fizikalnih količin:

- odstotek disipirane energije (%) 45-65
- tangens izgub $tg\delta$ pri 3 Hz in 2,8% deformaciji 0,15-0,30
- tangens izgub $tg\delta$ pri 3 Hz in 42% deformaciji 0,20-0,45
- modul M 100 (MPa) 4-11
- natezna trdnost (MPa) 15-23
- raztezek pri pretrgu (%) 300-400
- tlačna deformacija (%) 30-40
- trdota (Shore A) 50-80

Naslednji korak v metodi je Harringtonova transformacija vseh lastnosti v t.i. d-skalo na osnovi gornjih sprejemljivih območij lastnosti. Pri tem se vrednosti vsake fizikalne količine f_k , dane z enačbo (14), priredi brezdimenzijsko število d_k , ki ima vrednost med 0 in 1. Število d ima vrednost 1, če fizikalna lastnost popolnoma ustreza zahtevam, vrednost 0 pa, če ne ustreza oz. če izpade iz sprejemljivega območja. S tako dobljenimi d -vrednostmi vseh relevantnih fizikalnih količin se nato tvori t.i. funkcija želja (angl. *desirability function*) D , ki pomeni geometrijsko sredino vseh d_k :

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n)^{1/n} \quad (15)$$

V funkciji želja D so zajete vse fizikalne lastnosti, ki so pomembne za kakovost ležišča. Takoj ko je ena lastnost slaba (nizek d_k), je avtomatično nizka tudi D in izdelek je slab. Po drugi strani pa je maksimum funkcije D najboljši kompromis lastnosti. Optimizacija sestave gume je tako iskanje maksimuma funkcije D v večdimenzionalnem eksperimentalnem prostoru spreminjanih sestavin (v tem primeru treh), ki predstavlja svet z vrhovi in dolinami. Pri tem pa vsi vrhovi niso dobri. Če so prestrmi, je rešitev nestabilna, saj že majhna sprememba pomeni padec v dolino. Stabilne optimalne rešitve so položni vrhovi. Računalniški programi so prirejeni za iskanje takšnih vrhov⁸.

4 Rezultati in razprava

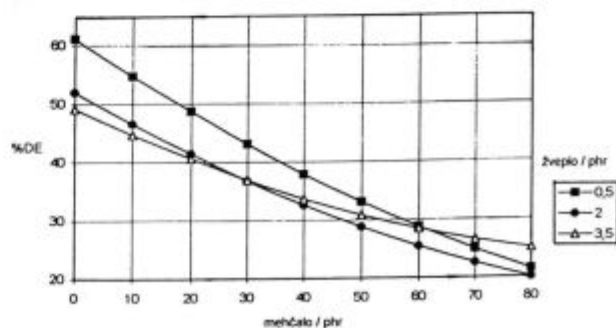
Optimalna sestava gume za protipotresna ležišča glede na količino mehčala, pospeševala in žvepla, dob-

ljena s Harrington-Derringerjevo optimizacijsko metodo oz. s funkcijo želja, je naslednja: 0 phr mehčala, 1,25 phr pospeševala in 0,5 phr žvepla. Guma s takšnim vulkanizacijskim sistemom je nizko premrežena, kar poleg optimalnega dušenja odločilno vpliva na podajnost, saj je dinamični prožnostni modul premo sorazmeren z gostoto premreževalnih kovalentnih vezi vrste C-S_x-C¹¹. Pri takšni sestavi ima guma z nespreminjanimi dodatki, navedenimi v 3.1, naslednje lastnosti:

- odstotek disipirane energije (%) 61
- tangens izgub $tg\delta$ pri 3 Hz in 2,8% deformaciji 0,23
- tangens izgub $tg\delta$ pri 3 Hz in 42% deformaciji 0,24
- modul M 100 (MPa) 6
- natezna trdnost (MPa) 19
- raztezek pri pretrgu (%) 340
- tlačna deformacija (%) 30
- trdota (Shore A) 67

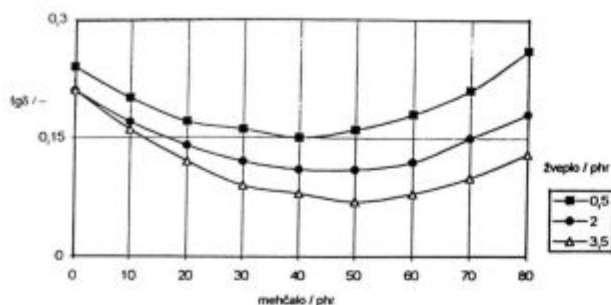
Vrednosti vseh količin se nahajajo blizu zelenih, optimalnih. Že pri meritvah se je po pričakovanju pokazalo, da mehčalo zmanjšuje disipacijo energije, kot prikazuje **slika 1**. S tem se manjša ojačevalni učinek saj in nižajo vrednosti večine fizikalnih količin, tako da padejo pod predpisano spodnjo mejo. Z naraščajočo vsebnostjo mehčala preide $tg\delta$ sicer skozi minimum in nato pri višjih vsebnostih mehčala doseže celo višje vrednosti kot pri nižjih (**slika 2**), vendar so pri tem prizadete druge fizikalne lastnosti do te mere, da takšna guma ni uporabna za protipotresna ležišča. Na **sliki 3** je prikazana funkcija D v odvisnosti od vsebnosti pospeševala in žvepla z maksimumom pri 0 phr mehčala, 1,25 phr pospeševala in 0,5 phr žvepla. Takšen maksimum je dovolj položen, da pomeni stabilno rešitev.

Na **slikah 4 in 5** je prikazana iz izmerjenih $G'(\omega)$ in $tg\delta(\omega)$ z enačbo (11) izračunana transmisivnost T kot funkcija frekvence in tangensa izgub, podanega kar s faznim kotom δ , saj pri teh vrednostih velja $tg\delta \approx \delta$. Izbrani lastni frekvenci sta 3 Hz (**na sliki 4**) in 0,5 Hz (**na sliki 5**). Pri frekvenci 0,5 Hz sta izmerjeni vrednosti $tg\delta$ gume z optimalno sestavo 0,24 pri 2,8% deformaciji in 0,25 pri 42% deformaciji, pri frekvenci 3 Hz pa sta ti



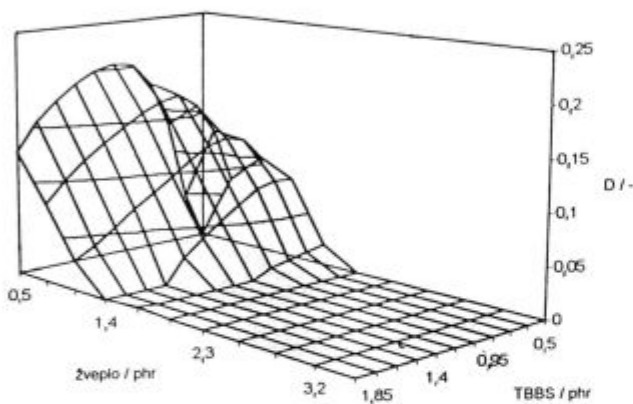
Slika 1: Delež disipacijske energije v odvisnosti od vsebnosti mehčala ob vsebnosti 1,25 phr pospeševala

Figure 1: Fraction of dissipated energy as a function of softener content at 1.25 phr content of accelerator



Slika 2: Odvisnost $tg\delta$ od vsebnosti mehčala ob vsebnosti 1,25 phr pospeševala pri frekvenci 3 Hz in 42% amplitudi strižne deformacije

Figure 2: $Tg\delta$ as a function of softener content at 1,25 phr content of accelerator and frequency of 3 Hz and 42% shear strain amplitude



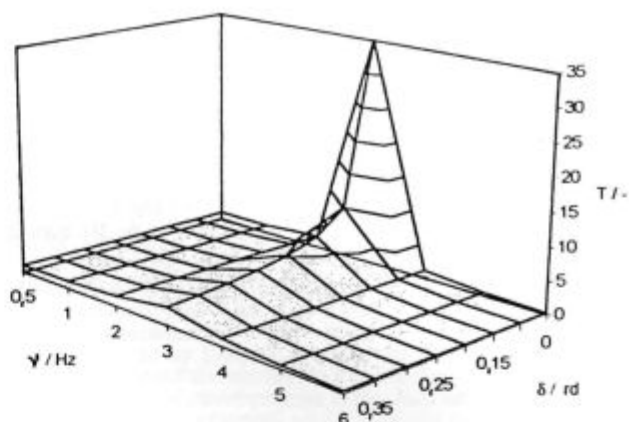
Slika 3: Optimizacija: funkcija želja D v odvisnosti od vsebnosti žvepla in pospeševala

Figure 3: Optimization: desirability function, D, as a function of sulphur and accelerator content

vrednosti 0,23 in 0,24, kot je navedeno zgoraj. S slik 4 in 5 je razvidno, da je dušenje v resonanci pri vrednostih $tg\delta$ (ali δ) v območju 0,23-0,25 znatno v obeh primerih. Z naraščajočo frekvenco dušenje močno narašča in transmisivnost pojema s kvadratom frekvence, $tg\delta$ pa se v tem frekvenčnem območju ne spreminja veliko. Slika 4 tudi prikazuje z enačbo (11) napovedano pojemanje transmisivnosti proti vrednosti 1 s pojemanjem frekvence proti 0, kar je logično, saj pri zelo nizkih frekvencah ni dušenja.

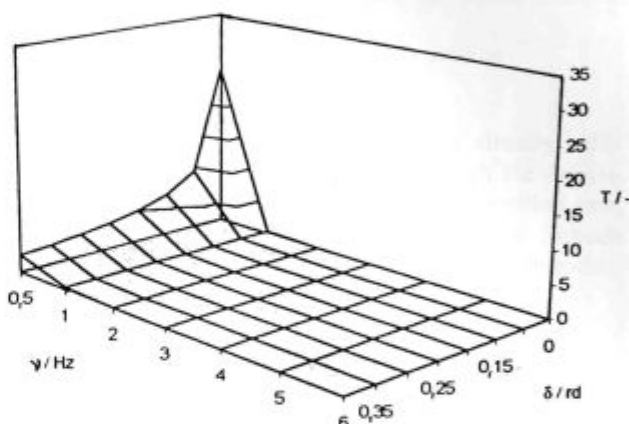
5 Sklep

Z meritvami in računalniško optimizacijo sestave gume na temelju naravnega kavčuka z večjo vsebnostjo saj je bilo ugotovljeno, da je optimalno dušenje potresnih nihanj v resonanci doseženo z gumo nizke premreženosti brez vsebnosti mehčala. Večje vsebnosti mehčala sicer ne zmanjšujejo dušenja, vendar tako spremenijo druge zah-



Slika 4: Transmisivnost T v odvisnosti od frekvence $\nu = \omega/2\pi$ in faznega kota δ ob lastni frekvenci sistema objekt-ležišče 3 Hz

Figure 4: Transmissibility, T, as a function of frequency $\nu = \omega/2\pi$ and phase angle δ at building-bearing resonance frequency of 3 Hz



Slika 5: Transmisivnost T v odvisnosti od frekvence $\nu = \omega/2\pi$ in faznega kota δ ob lastni frekvenci sistema objekt-ležišče 0,5 Hz

Figure 5: Transmissibility, T, as a function of frequency $\nu = \omega/2\pi$ and phase angle δ at building-bearing resonance frequency of 0,5 Hz

tevane fizikalne lastnosti gume, da je ta neuporabna za izdelavo protipotresnih ležišč. Poleg optimalnega dušenja, ob kompromisu drugih fizikalnih lastnosti, nizko premreženje gume odločilno vpliva na dinamični strižni prožnostni modul in s tem na njeno podajnost, ki je poleg dušenja najvažnejša karakteristika protipotresnih ležišč.

Guma za protipotresna ležišča, razvita v Savi, ima ob podobnih drugih fizikalnih lastnostih boljše dušilne sposobnosti od gum, razvitih drugje¹². Sava razpolaga tudi s tehnologijo za izdelavo protipotresnih ležišč, vendar je povpraševanje na tržišču visokih gradenj zaenkrat še premajhno.

6 Literatura

¹ J. M. Kelly: *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer Verlag, London, 1993, Chaps. 1-3

- ² F. G. Fan and G. Ahmadi: Seismic Responses of Secondary Systems in Base-Isolated Structures, *Eng. Struct.*, 14, 1992, 35-48
- ³ L. White: Seismic Bearings are in Demand, *Eur. Rub. J.*, 33, 1990, 51-55
- ⁴ P. Fajfar, J. Duhovnik in S. Sočan: Guma v protipotresni nizki in visoki gradnji, *Raziskovalno razvojni projekt, FAGG*, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1991
- ⁵ O. Kramer and J. D. Ferry: in *Science and Technology of Rubber*, (F. R. Eirich Ed.), Academic Press, New York, 1978, Chap. 5
- ⁶ I. M. Ward and D. W. Hadley: *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*, Wiley, New York, 1993, Chap. 4
- ⁷ J. D. Ferry: *Viscoelastic Properties of Polymers*, Wiley, New York, 1980, Chap. 1
- ⁸ Z. Konjar: Mešalni problem nelinearnega programiranja v DO Sava Kranj, *magistrsko delo*, Ekonomska fakulteta, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1978
- ⁹ Z. Šušterič and Z. Konjar: Compounding and Seeking the Best Rubber Compound by Computer, *Vestn. Slov. Kem. Druš.*, 26, 1979, 45-58
- ¹⁰ G. C. Derringer: Statistical Methods in Rubber Research and Development, *Rubber Chem. Technol.*, 61, 1988, 377-417
- ¹¹ J. E. Mark and B. Erman: *Rubberlike Elasticity A Molecular Primer*, Wiley, New York, 1988, Chap. 6
- ¹² V. A. Coveney and A. G. Thomas: The Role of Natural Rubber in Seismic Isolation - A Perspective, *Kautsch. Gummi Kunstst.*, 44, 1991, 861-865