

Dalibor Gelo¹, Damir Lazarević², Josip Atalić³

UTJECAJ PRIGUŠIVAČA NA DINAMIČKI ODZIV VISKOKE GRAĐEVINE

Rezime

Proučavanjem sustava s dva stupnja slobode dobiveni su osnovni zakoni ponašanja prilagodljivog pasivnog prigušivača (TMD). Ova nam je analiza omogućila spoznati karakteristike (masu i krutost) TMD. Ispravnim odabirom mase i krutosti povećava se učinkovitost prigušivača, a također izbjegava se i problem rezonancije. Saznanja stečena na jednostavnom modelu s dva stupnja slobode primijenjena su na modelu Cibonina poslovnog tornja u Zagrebu. Usporedbom pomaka na vrhu tornja i poprečnih sila u njegovu podnožju, utvrđeno je da se model s TMD nalazi u povoljnoj situaciji.

Ključne riječi

Stupnjevi slobode, prilagodljivi pasivni prigušivači (TMD), horizontalna djelovanja

IMPACTS OF DAMPERS ON DYNAMIC RESPONSE OF HIGH BUILDINGS

Summary

Studies of systems with two degrees of freedom give us the basic laws of behavior of the tuned mass damper (TMD). These analyses enable us to know the characteristics (mass and stiffness) of the TMD. Proper selection of mass and stiffness increases the effectiveness of the TMD, and also avoids the problem of resonance. Knowledge gained on a model with two degrees of freedom has been applied to model of the Cibona office tower in Zagreb. Comparison of displacement at the top of the tower and transverse forces at the base, it was found that the model with TMD is in a favorable situation.

Key words

Degrees of freedom, tuned mass damper (TMD), horizontal loads

¹ Mag. ing. aedif, Karlovačka cesta 58a, 10020 Novi Zagreb, Hrvatska, daliborgelo@gmail.com

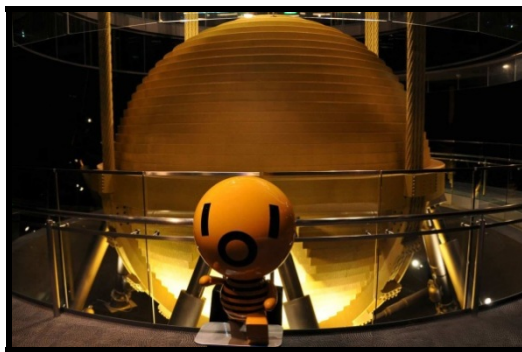
² Prof.dr.sc., dipl.ing.građ, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, damir@grad.hr

³ Dr.sc., dipl.ing.građ, Građevinski fakultet, Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska, atalic@grad.hr

1. UVOD

Želja za prestižem i izazovom potiču čovjeka u posljednjih četiri do pet tisućljeća na gradnju sve većih i viših građevina, a taj je trend nastavljen do današnjih dana. Uvođenje novih i razvoj postojećih građevinskih materijala, poboljšavanje proračunskih metoda i iznalaženje boljih konstruktivnih rješenja omogućili su da naši objekti postanu sve viši. Izgradnja sve viših građevina ima za posljedicu povećanje utjecaja horizontalnih pobuda, prvenstveno se misli na dinamičko djelovanje potresa i vjetra. S ciljem smanjenja tih pobuda inženjeri počinju primjenjivati prigušivače na svojim objektima, a sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća počinju se ugrađivati pasivni prigušivači koji su i tema ovoga rada.

Pasivni prigušivači su na prvi pogled vrlo jednostavna rješenja. Njihov način rada zasniva se isključivo na Newtonovom principu zakona akcije i reakcije. Velika prednost tih sistema je pouzdanost i jednostavnost jer njihov rad ne ovisi o složenoj tehnologiji. Također moguća je i naknadna ugradnja, što pruža priliku za saniranje objekata koji imaju problema s horizontalnim pobudama. Naknadna ugradnja je moguća jer se pasivni prigušivači ugrađuju na vrh objekta, za razliku od velikog broja prigušivača koji se postavljaju iznad temelja.



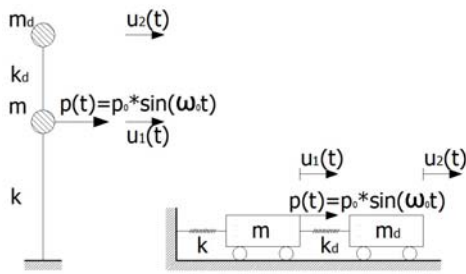
Slika 1. Prilagodljivi pasivni prigušivač (TMD) izveden u tornju Taipei 101

2. NUMERIČKI MODELI

Teorijska analiza ponašanja prilagodljivog pasivnog prigušivača provedena je na sustavu s dva stupnja slobode, a njega opisujemo sljedećim matematičkim modelom

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k+k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p(t) \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

Zaključci koji proizlaze iz analize sustava s dva stupnja slobode primijenjeni su na znatno složenijem modelu, a u našem slučaju radi se o Ciboninu tornju u Zagrebu. Cilj rada je usporediti razliku između poprečnih sila na modelu Cibonina tornja - kada imamo postavljen pasivni prigušivač i kada ga nema.



Slika 2. Model s dva stupnja slobode



Slika 3. Mode Cibonina tornja u Zagrebu

3. MODEL S DVA STUPNJA SLOBODE

Možemo pretpostaviti sljedeće prisilno svojstvo odgovora konstrukcije

$$\begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{10} \\ u_{20} \end{Bmatrix} \sin(\omega t), \quad (2)$$

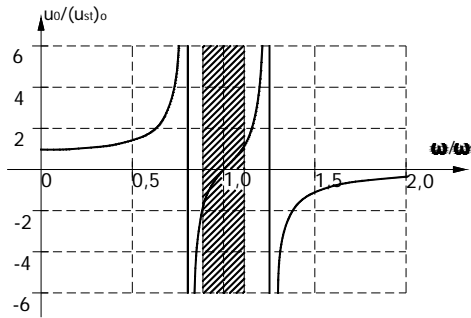
a tu pretpostavku možemo uvesti jer je naš model neprigušen. Rješavanje sustava jednačbi, uz pretpostavku prisilnog odgovora konstrukcije i zanemarivanje člana $\frac{k_d}{m} \omega^2$ (u rješenju zanemarujemo član jer ima iznimno mali doprinos), a dobivaju se sljedeće jednačbe pomaka

$$\begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{(k_d - m_d \cdot \omega^2) p_0}{m \cdot m_d (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)} \\ \frac{k_d \cdot p_0}{m \cdot m_d (\omega^2 - \omega_1^2)(\omega^2 - \omega_2^2)} \end{Bmatrix} \sin(\omega \cdot t). \quad (3)$$

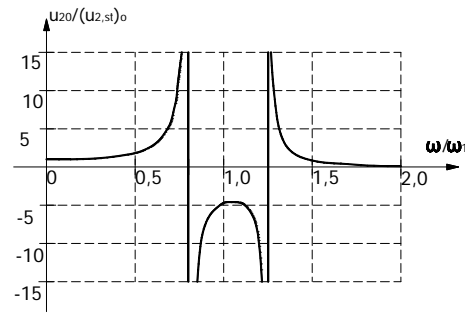
Uvođenjem uvjeta da je pomak u_{10} jednak nuli i njegovim uvrštavanjem u sustav jednačbi 3, proizlazi da vrijedi

$$\omega = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \quad (4)$$

Zaključujemo da pomak u_{10} u potpunosti iščezava u slučaju kada su kružne frekvencije pobude i dampera jednake.



Slika 4. Dijagram omjera $\frac{\omega}{\omega_1} - \frac{u_{10}}{(u_{1st})_0}$

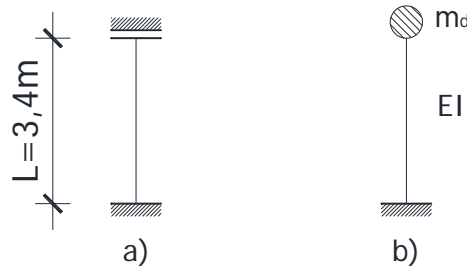


Slika 5. Dijagram omjera $\frac{\omega}{\omega_1} - \frac{u_{20}}{(u_{2st})_0}$

Količina mase i krutosti opruge ovise o dopuštenoj vrijednosti u_{20} . Ima i drugih faktora koji utječu na količinu mase. Očito, velika masa uzrokuje problem montaže na velikim visinama, a mala masa smanjuje operativno frekventno područje primjene prigušivača.

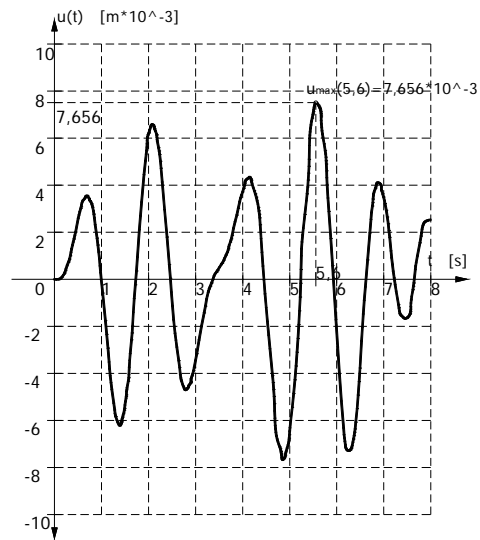
4. MODEL CIBONINA TORNJA

Model Cibonina tornja izrađen je u kompjuterskom programu ETABS 9.6 koji nam omogućuje odrediti vlastite vrijednosti i periode titranja. Prigušivač je modeliran kao jedan stupanj slobode uz kinematičko ograničenje rotacije u vrhu stupa. Ograničenja se uvode radi jednostavnijeg proračuna.

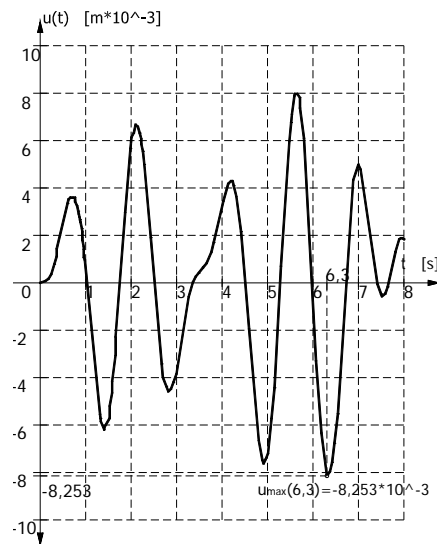


Slika 6. Model TMD-a: a) rubni uvjeti, b) koncentracija mase na vrhu stupa

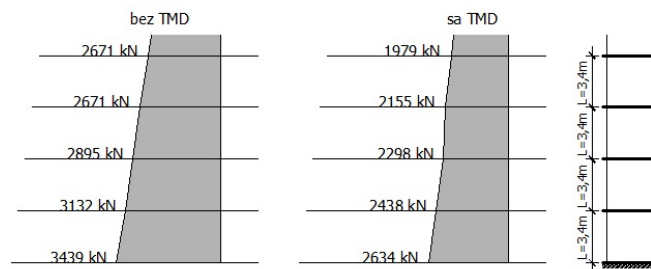
Objekt je opterećen horizontalnim dinamičkim djelovanjem od 2 Kn/m^2 , koje je svedeno na koncentrirane sile u spojevima stupa i grede. Vremenski karakter djelovanja je sinusna funkcija s periodom $T_1 = 1,838 \text{ s}$ (period prvog oblika titranja).



Slika 7. Pomaci vrha zgrade za konstrukciju s TMD-om ($u_{\max}(5,6s) = 7,656 \cdot 10^{-3}$)



Slika 8. Pomaci vrha zgrade za konstrukciju bez TMD-a ($u_{\max}(6,3s) = 8,253 \cdot 10^{-3}$)



Slika 9. Dijagrami poprečnih sila u podnožju jednog od zidova Cibonina tornja sa i bez TMD

Usporedimo li rezultate sa i bez prisilnog pasivnog prigušivača, možemo uočiti da su se pomaci objekta na vrhu građevine smanjili za 7,5%, a poprečne sile u podnožju objekta čak za 30,5%.

5. ZAKLJUČAK

Proučavanje sustava s dva stupnja slobode pomoglo nam je zaključiti kakva svojstva mora zadovoljiti pasivni prilagodljivi prigušivač. Kružna frekvencija prigušivača mora biti približno jednaka prvom obliku titranja konstrukcije. Zatim, pomaci konstrukcije su manji kada je omjer perioda pobude i prvog oblika titranja bliže broju jedan. Ovi zaključci vrijede isključivo za slučaj prisilnog (engl. steady-state) odziva konstrukcije. Primjenom modalne analize nije moguće pronaći rješenje u kojem pomaci u potpunosti iščezavaju.

Stečena znanja, dobivena proučavanjem jednostavnog primjera s dva stupnja slobode, primijenjena su na realnoj konstrukciji Cibonina tornja u Zagrebu. Provedene su dvije analize konstrukcije: prva s ugrađenim prigušivačem i druga bez njega. Model prigušivača zadovoljava uvjet jednakih frekvencija prigušivača i prvog oblika titranja. Opterećenje je zadano vrlo nepovoljno, frekvencija pobude jednaka frekvenciji prvog oblika titranja. Rezultati pokazuju smanjenje progiba (naprezanja), a posebno - ukupne poprečne sile.

Nameće se zaključak da primjena prilagodljivih pasivnih prigušivača ima smisla. Pritom posebnu važnost ima mogućnost naknadne ugradnje, ako se pojave dinamičke pobude na postojećem objektu. Prema tome, možemo relativno jednostavno, uz male troškove sanirati objekte koji imaju problema s horizontalnim djelovanjima.

LITERATURA

- [1] Chopra, Anil K.: „Dynamics of structures – Theory and Applications of Earthquake Engineering“, University of California at Berkeley, New Jersey, 2007.
- [2] Penzien, J.: „Dynamics of structures“, University Ave., Berkeley, 1995.
- [3] Sorić, J.: „Metoda konačnih elemenata“, Naklada Ljevak, Zagreb, 2004.
- [4] Herman, K...: „Teorija elastičnosti i plastičnosti“, Zagreb, 2008.
- [5] CSI Analysis Reference Manual, for SAP, ETABS and SAFE, Computers & Structures, Inc., Berkeley, 2005