

MODALNA DINAMIČKA ANALIZA VIBRACIJA NA KONSTRUKCIJI MODAL DYNAMIC ANALYSIS OF VIBRATIONS IN CONSTRUCTION

mag.stroj. Igor Bošnjak
Fakultet strojarstva i računarstva, Sveučilište u Mostaru
Mostar, B&H

dr.sc. Davorka Šaravanja, izv.prof.
Fakultet strojarstva i računarstva,
Sveučilište u Mostaru
Mostar, B&H

dr.sc. Mladen Kožul, doc.
Građevinski fakultet, Sveučilište u
Mostaru
Mostar, B&H

REZIME

Vrlo visoke konstrukcije često su izložene utjecaju vibracija koje generiraju različite dinamičke sile. Vibracije mogu utjecati na kvalitetu i pouzdanost konstrukcija i stvoriti razne nepravilnosti, čak i velike nezgode. U cilju rješavanja problema izazvanih vibracijama i u cilju poboljšanja kvalitete konstrukcija vrše se vibracijska mjerenja na modelima konstrukcije. Vibracije na visokim konstrukcijama ovise o različitim faktorima koji utječu ne samo na vlastite oblike i frekvencije konstrukcije, na veličinu prigušenja, nego i na izbor i optimalnu poziciju montiranja prigušivača. Zbog toga je analiza dinamičkih parametara takvih konstrukcija i odziva uslijed dinamičkih opterećenja vrlo složen postupak. U ovom radu je, stoga, prikazan postupak ispitivanja učinka prigušivača sa dodanom masom na modelu konstrukcije zvonika u funkciji određivanja dinamičkih parametara vibracija i deformacija uslijed njih. Izvršena je simulacija djelovanja prigušivača primjenom softvera tvrtke Computers and Structures, Inc. (CSI).

Ključne riječi: prigušivač s dodanom masom (TMD), dinamičko ispitivanje, parametri konstrukcije

SUMMARY

Very high structures are often exposed to the vibration generated by the different dynamic forces. Vibrations can affect the quality and reliability of structures and create a variety of irregularities, even large accidents. In order to solve the problems caused by vibrations and in order to improve the quality of construction are carried out vibration measurements on models of the structure. Vibrations on high structures depend on various factors that influence not only on its own forms and frequencies structure, the size of the damping, but also on the choice of the optimal position of mounting dampers. Therefore, the analysis of the dynamic parameters of such structures and its response due to dynamic loads are very complex procedures. This paper, therefore, presents a method for testing the effect of tuned mass dampers on the model structure of the bell tower in function to define the dynamic parameters of vibration and deformation due to them. Simulation has been done action TMD by software companies Computers and Structures, Inc. (CSI).

Keywords: tuned mass damper (TMP), dynamics testing, design parameters

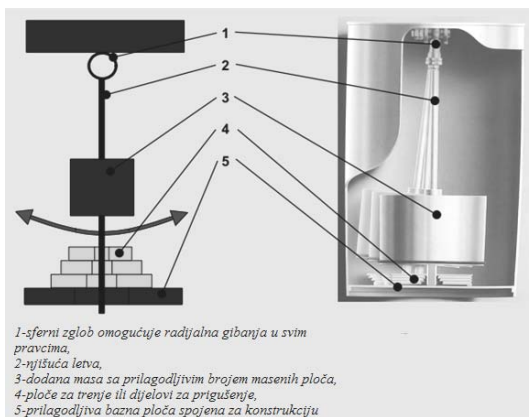
1. UVOD

Značajan problem vrlo visokih konstrukcija jesu vibracije koje su obično povezane sa dinamičkim izvorima pobude, a posljedica su specifičnih karakteristika konstrukcije. Takve konstrukcije su, zbog velikih dimenzija, osjetljivije na vibracije zbog vlastite fleksibilnosti. Prilikom pobude takvih konstrukcija dinamičkim opterećenjem, dolazi do pojave vibracijskih problema i pomaka velikih amplituda. Pored toga, uslijed takvih opterećenja dolazi do pojave smanjenja čvrstoće i zamora materijala, kao najčešćih uzroka prijeloma konstrukcije. Tako oslabljena konstrukcija pokazuje osobine smanjenja krutosti što izaziva povišene amplitude vibracija na pozicijama koje su udaljenije od oslonaca. Postupci sprječavanja takvih problema zahtijevaju veća ulaganja u održavanje i rekonstrukciju takvih objekata što predstavlja značajne financijske troškove izrade istih, a u cilju rješavanja ovih problema i poboljšavanje kvaliteta ovakvih objekata potrebno je vršiti kontrolu vibracija. [1,2] Kontrola i ispitivanje vibracijskih parametara povezana je sa metodom modeliranja ovakvih konstrukcija.

Značajnost ovog problema navodi na činjenicu da se rješenja smanjenja vibracija traže još u fazi izgradnje objekta. Jedna od metoda kontrole vibracija zasniva se na teoriji kojom se vrši manipulacija amplitudama i frekvencijama vibracija na modelima konstrukcija promjenom masa konstrukcijskih elemenata, promjenom njihove krutosti, oblika i udarnih impulsa. Npr. uslijed dinamičkih opterećenja i njima generiranih vibracija na pojedinim pozicijama konstrukcije vrše se dodavanja pasivnih i aktivnih vanjskih prigušnih uređaja koji ublažavaju učinak vibracija, kao što je prigušivač sa dodanom masom TMD (*eng. tuned mass damper*).

2. PRIGUŠIVAČ SA DODANOM MASOM-TMD

TMD prigušivač ili amplitudni apsorber je pasivni sustav koji se modelira kao sustav masa-opruga-prigušnica. Sinkroniziran je u odnosu na vlastitu frekvenciju konstrukcije. Kad je konstrukcija pobuđena na toj frekvenciji, TMD prigušivač rezonira izvan faze na mjestu spoja sa konstrukcijom, a vibracijska energija se disipativno prenosi pomoću disipativnih elemenata koji su dio TMD sustava. Dakle, funkcija TMD prigušivača kod vrlo visokih konstrukcija povezana je s činjenicom da se radi o konstrukcijama s prirodno malim prigušenjem u kombinaciji s niskom prirodnom frekvencijom. Jedan od najčešće korištenih uređaja ove vrste jeste PTMD prigušivač (*eng. pendulum tuned mass damper*) sa dodanom masom u obliku njihala (slika 1.). [3]

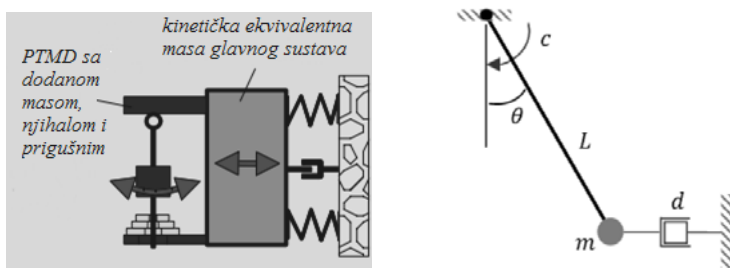


Slika 1. PTMD prigušivač

2.1. Princip rada PTMD prigušivača

PTMD se postavlja na mjestima konstrukcije sa odgovarajućim maksimumom amplitude vibracije. Pričvršćenost na konstrukciju je osigurana obično vijčanom vezom za gredu ili konstrukcijske nosače. PTMD se sastoji od njišuće mase, koja je fiksirana na kraj njišuće

letve. Decentriranje je osigurano gravitacijom koja djeluje na masu. Prigušenje se postiže trenjem ploča ili uređaja za viskozno prigušenje (slika 2a.). [3]



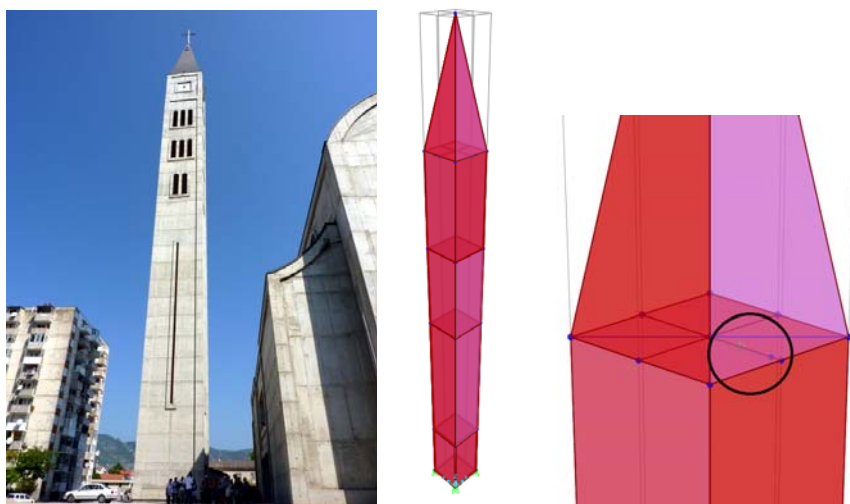
Slika 2. a) Princip rada PTMD-a, b) Model PTMD-a [4]

2.2. Model PTMD-a

PTMD sustav modelira se kao njihalo sa dodatnom masom m obješenom o letvu zanemarive mase dužine L (slika 2b.) koja rotira oko točke. Konstanta trenja njihala je predstavljena koeficijentom c . Prigušivač koji je povezan sa masom njihala i konstrukcijom je viskozni prigušivač sa koeficijentom prigušenja d . Prigušivaču je onemogućeno horizontalno gibanje.

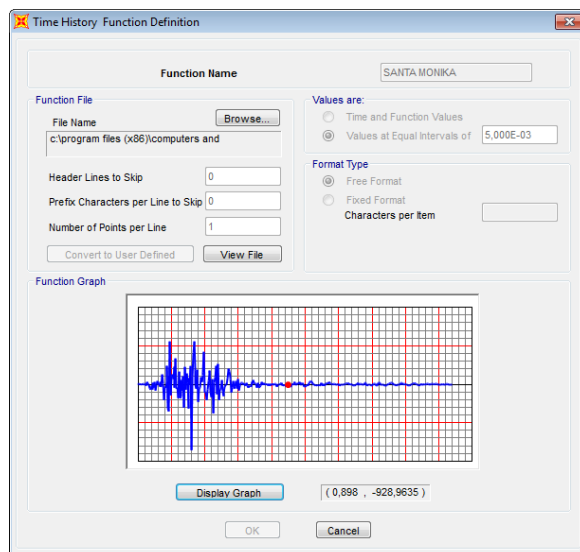
3. UČINAK PTMD-a NA MODELU KONSTRUKCIJE

Učinak prigušivača u obliku njihala ispitivan je na konstrukciji zvonika Crkve sv. Petra i Pavla u Mostaru. Budući se radi o relativno visokoj građevinskoj konstrukciji (visina oko 105 m), ispitivanja učinaka prigušivača vršena su na modelu konstrukcije kako bi se odredile mehaničke karakteristike i deformacije na njoj. Poprečni presjek zvonika je kvadrat duljine 5 metara, zidovi su promjenjive debljine, od 50 cm na dnu do 30 cm na vrhu objekta, a masa konstrukcije je 2688 t (slika 3.).



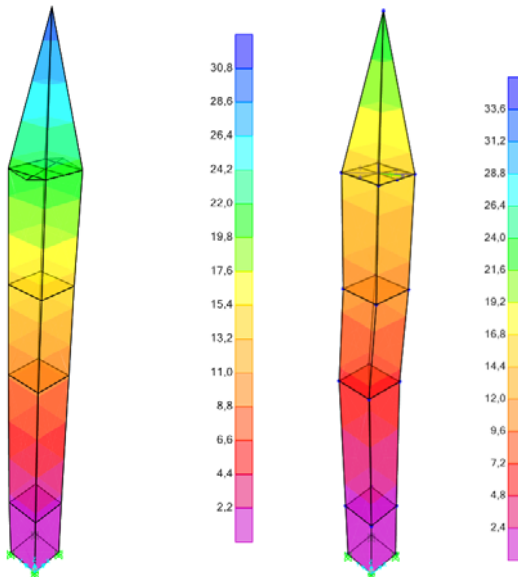
Slika 3. Zvonik Crkve sv. Petra i Pavla u Mostaru, model iste konstrukcije i uvećani prikaz modela prigušivača u obliku njihala

Za ispitivanje je korišten softver SAP 2000 v17, a u zadnjoj gredi na visini od 85,25 m ugrađen je model prigušivača u obliku njihala. Konstrukcija je pobuđena opterećenjem u obliku potresa. Iz baze podataka softvera uzeta je funkcija ubrzanja tla (akcelerogram) SANTA MONIKA (slika 4).



Slika 4. Akcelerogram potresa

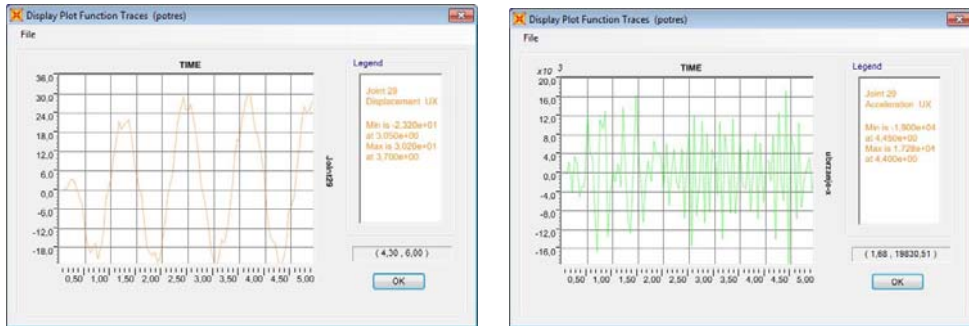
U prvoj fazi ispitivanja vršena je simulacija opterećenja konstrukcije bez prigušivača što je izazvalo najveći pomak na vrhu konstrukcije od 30,26 cm. Slika 5a. pokazuje da se sa visinom povećavao iznos pomaka konstrukcije. Isto je urađeno na konstrukciji sa prigušivačem. Postavljena je duljina $L=2$ m, te masa prigušivača od 200 t. Uočeno je smanjenje pomaka vrha sa 30,26 cm na 23,9 cm ili 26,6% (slika 5b).



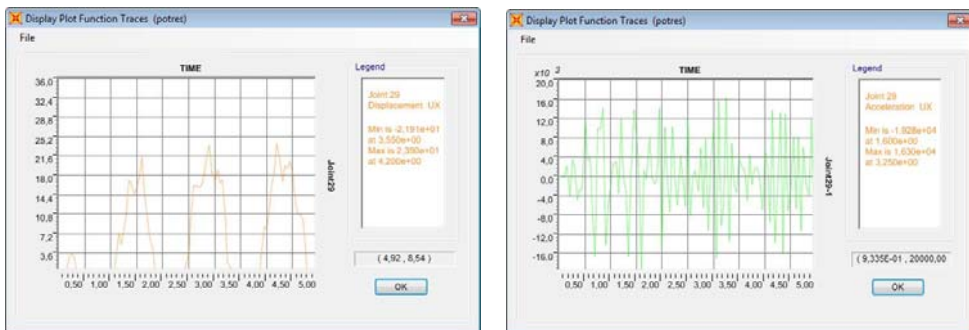
Slika 5. a) Deformirani oblik konstrukcije bez prigušivača,
b) Deformirani oblik konstrukcije sa prigušivačem

Na slikama 6. i 7. pokazana je funkcija pomaka vrha te funkcija ubrzanja vrha konstrukcije sa i bez prigušivača. Vidljivo je da funkcije pomaka i ubrzanja vrha konstrukcije sa dodanim

prigušivačem imaju manju vrijednost od funkcija pomaka i ubrzanja vrha konstrukcije bez prigušivača. [5]

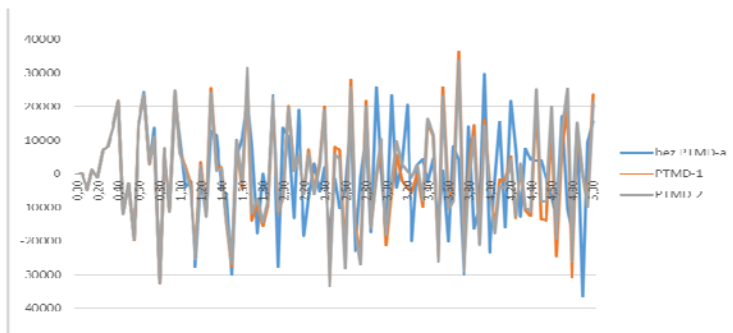


Slika 6. Funkcije pomaka i ubrzanja vrha konstrukcije bez prigušivača



Slika 7. Funkcije pomaka i ubrzanja vrha konstrukcije s prigušivačem $m=200$ t

Radi usporedbe, vršena je analiza funkcija pomaka i ubrzanja vrha konstrukcija sa dodanim prigušivačem, čija je masa dvostruko manja od prethodnog prigušivača (100 t). Primjećuje se da funkcije pomaka i ubrzanja vrha konstrukcije sa prigušivačem mase 100 t imaju veće iznose pomaka i ubrzanja od konstrukcije sa prigušivačem mase 200 t. Veličina pomaka za konstrukciju sa prigušivačem mase 100 t iznosi 28,4 cm, što je smanjenje od 6,5% u odnosu na pomak konstrukcije bez prigušivača. Pored ovih analiza, rađena je analiza ukupne funkcije poprečnih sila i momenata savijanja u razini temelja (slika 8.).



Slika 8. Dijagram poprečnih sila u razini temelja

Uočeno je kako konstrukcija sa dodanim prigušivačem ima manje iznose maksimuma poprečnih sila i momenata savijanja (tablica 1).

Tablica 1. Maksimalne poprečne sile i momenti savijanja u razini temelja za različite slučajeve, sa i bez PTMD-a

	Max. poprečna sila [kN]	Max. moment savijanja [kNcm]
Bez PTMD-a	36500	7.101×10^7
PTMD-1	32450	$5,967 \times 10^7$
PTMD-2	33630	6.529×10^7

4. ZAKLJUČAK

Trendovi u konstruiranju objekata u građevinarstvu jesu čvršće i lakše konstrukcije, fleksibilnije i sa prilično niskom vrijednosti prigušenja. Međutim, takav pristup konstruiranja povećava mogućnost narušavanja i pojavu probleme pri njihovom korištenju.

Danas se sve više koriste metode koje omogućuju smanjenje amplituda povišenih vibracija pri eksploataciji i korištenju konstrukcija, a jedna od najvažnijih jeste ugradnja prilagodljivih prigušivača sa dodanim masama (TMD). Iskustva potvrđuju uspješno korištenje i ugradnju TMD prigušivača u funkciji kontrole vibracijskih pojava unutar i oko konstrukcije.

Eksperimentalna istraživanja potvrđuju da su TMD prigušivači učinkovitiji u smanjivanju pomaka konstrukcija sa nižim stupnjem prigušenja (2%), ali su manje učinkoviti za konstrukcije sa višim stupnjem prigušenja (5%). Eksperimentom koji je pokazan u ovom radu je postignuto znatno smanjenje relativnog pomaka vrha modela za slučaj ispitivanja s njihalom. Povećanjem odnosa mase njihala prema masi konstrukcije uočen je porast operativnog područja njihala. Smanjenje relativnog pomaka vrha modela postignuto je i za slučajeve kad frekvencije prigušivača nisu bile usklađene s frekvencijom konstrukcije.

Konstrukcija opterećena dinamičkom pobudom rasipa energiju ulaskom u plastično područje i pri tome trpi znatna oštećenja. Ugradnjom prigušivača s dodanom masom (TMD) znatna disipacija energije ostvaruje se već u elastičnom području čime se značajno smanjuju oštećenja, povećava kvalitetu konstrukcije, a time i troškovi sanacije konstrukcije. [5] Može se zaključiti da pravilno dizajniranje i implementacija TMD-a na kojima se provela optimizacija parametara utječe na poboljšanje performansi konstrukcija. Dakle, ovaj rad pokazuje učinak podešavanja frekvencije i omjera prigušenja na primjeru konstrukcije podvrgnute širokopojasnoj i uskopojasnoj pobudi sa TMD prigušivačem. Optimizacijom parametara prigušivača sa dodanom masom, kao što je omjer frekvencija, omjer prigušenja i omjer masa osnovnog sustava i prigušivača, smanjuje se maksimalni otklon konstrukcije koja je pod utjecajem pobudne sile, tj. takvom postupkom moguće je utjecati na identificiranje i smanjenje vibracija u realnom vremenu.

5. LITERATURA

- [1] Šaravanja, D.; Petković, D.: Vibracijska dijagnostika-teorija i praksa, Fakultet strojarstva i računarstva Sveučilišta u Mostaru, Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici, 2010.
- [2] C.W. de Silva: Vibration Fundamentals and Practice, Taylor & Francis Group, London – New York, 2006.
- [3] www.maurer-soehne.de
- [4] Lourenco, R.: Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper, University of Waterloo, Waterloo, Canada 2011
- [5] Koščak, J., Turkalj, G.: Modalna analiza modela konstrukcije i ispitivanje utjecaja njihala i spremnika s vodom kao prigušivača, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2012.