

V. prof. dr Zoran Mišković, dipl.grad.inž.¹
Asistent Saad Al-Wazni, dipl.grad.inž.²
Asistent Ahmed Alalikhhan, dipl.grad.inž.³
V. prof. dr Ratko Salatić, dipl.grad.inž.⁴

METODE DETEKCIJE OŠTEĆENJA KONSTRUKCIJA NA OSNOVU PROMENE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA

0352-2733,47 (20014), p. 163-191

UDK: 624.07 : 620.19

PREGLEDNI (NAUČNI) ČLANAK

Rezime

Rad prikazuje pregled metoda oštećenja konstrukcija primenom nedestruktivnog testiranja, kao i odgovarajućih metoda optimizacije koje se primenjuju za lokalizaciju i karakterizaciju ozbiljnosti konstrukcijskog oštećenja. Promena krutosti, kao posledica oštećenja, odslikava se u promeni modalnih karakteristika konstrukcije, što se široko primenjuje u detekciji oštećenja. Merenje ambijentalnih vibracija, sa odgovarajućom identifikacijom modalnih karakteristika, je detaljno prikazana zbog velikog značaja u procesu detekcije oštećenja. Ključna pogodnost za primenu ovih metoda je mogućnost izvršenja testiranja

^{1,4} Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

^{2,3} Građevinski odsek, Koledž za inženjerstvo. Univerzitet u Kufi, Irak; Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Rad primljen oktobra 2014.

bez remećenja funkcije konstrukcija. Takođe, prikazani su osnovni elementi detekcije i lokalizacije oštećenja primenom savremenih heurističkih metoda optimizacije.

Ključne reči: Građevinske konstrukcije, Detekcija oštećenja, Vibracije, Modalne karakteristike

METHODS OF DAMAGE DETECTION OF STRUCTURES BASED ON CHANGES OF DYNAMIC CHARACTERISTICS

Abstract

The paper presents overview of damage detection of structures using non destructive test methods and corresponding optimization procedures for detection, localization and severity of damage. Change of a stiffness, as a consequence of damage existence, reflects on changes of structural modal properties. Ambient vibration measurement, with corresponding identification of modal properties, is presented in detail because of its high importance for the whole damage detection process. The key benefit of the application of these methods is the ability to conduct tests without disrupting the function of structures. Also, there are presented the basic elements of detection and localization of damage using modern heuristic optimization methods.

Keywords: Civil Structures, Damage Detection, Vibrations, Modal Properties

1. UVOD

Tokom eksploatacije građevinskih konstrukcija u većoj ili manjoj meri dolazi do pojave oštećenja usled degradacije materijala, zamora, povećanih opterećenja, uticaja zemljotresa i drugih uzroka. Ovakva oštećenja, pored ugrožavanja stanja upotrebljivosti, mogu kompromitovati i stanje nosivosti konstrukcija, što je posebno opasno kod infrastrukturnih objekata kao što su mostovi značajnijih raspona, visoke zgrade, i drugih značajnih konstrukcija. Takođe, veći broj objekata kod nas i u svetu je u eksploataciji duži niz godina, što je sigurno uticalo na njihovo stanje u pogledu sigurnosti i pouzdanosti, te se nameće potreba primene sanacionih mera. Ovakve sanacione mere mogu biti vrlo značajne, kako po obimu radova, tako i po potrebnim finansijskim sredstvima, a neretko iste, delimično ili u potpunosti, zahtevaju ograničavanje upotrebe. Iz navedenih razloga, sve češće se primenjuju metode tzv. *Monitoringa Stanja Konstrukcija - MSK (Structural Health Monitoring - SHM)* za praćenje stanja ovakvih objekata. Aktuelnost problematike potvrđuje i pojava preporuka za sprovođenje monitoringa stanja značajnih objekata početkom 21. veka u više razvijenih zemalja, [1], [2], [3] i [4]. Kompleksna problematika monitoringa stanja konstrukcija uključuje merenja različitih konstrukcijskih parametara, analize rezultata merenja, numeričke analize konstrukcija, kao i metode procene koje se baziraju na statistici i verovatnoći. Detekcija ranih znakova konstrukcijskih oštećenja je vrlo

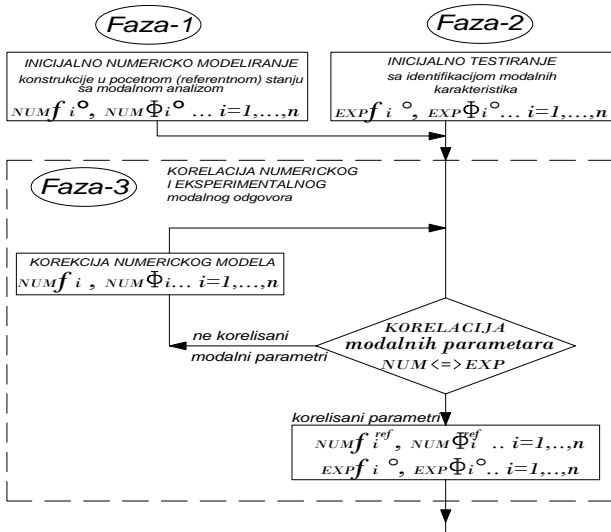
značajna kako bi se izbegle posledice usled progresivnog razvoja oštećenja i defekata. U ovom smislu, posebno su interesantne nedestruktivne metode ispitivanja (*Non Destructive Testing – NDT*), tokom kojih se registruje statički ili dinamički konstrukcijski odgovor. Često primenjene metode prilikom utvrđivanja stanja konstrukcija baziraju se na merenjima ambijentalnih vibracija, [10]. Ovim metodama se utvrđuju promene sopstvenih dinamičkih karakteristika konstruktivnih sistema [15], promene sopstvenih frekvencija i modalnih oblika, te stoga spadaju u tzv. vibracione metode detekcije oštećenja konstrukcija (*Vibration Based Damage Detection*). Razlozi za ovo leže u činjenici da je potrebna merenja moguće izvesti bez prekida korišćenja objekata, kao i u brzini izvršenja istih. Na osnovu ovakvih merenja, uz odgovarajuće metode identifikacije, moguće je dobiti pouzdane podatke na osnovu kojih je moguće izvršiti dalju analizu detekcije, lokalizacije i procenu intenziteta oštećenja.

2. DETEKCIJA OŠTEĆENJA NA OSNOVU PROMENE MODALNIH KARAKTERISTIKA KONSTRUKCIJA

Detekcija oštećenja na bazi promene dinamičkih karakteristika konstrukcija, u procesu Monitoringa Stanja Konstrukcija (MSK) uz primenu merenja ambijentalnih vibracija, uključuje, kako je prikazano na *slikama 1a i 1b*, više faza koje je potrebno izvršiti pre, tokom i nakon

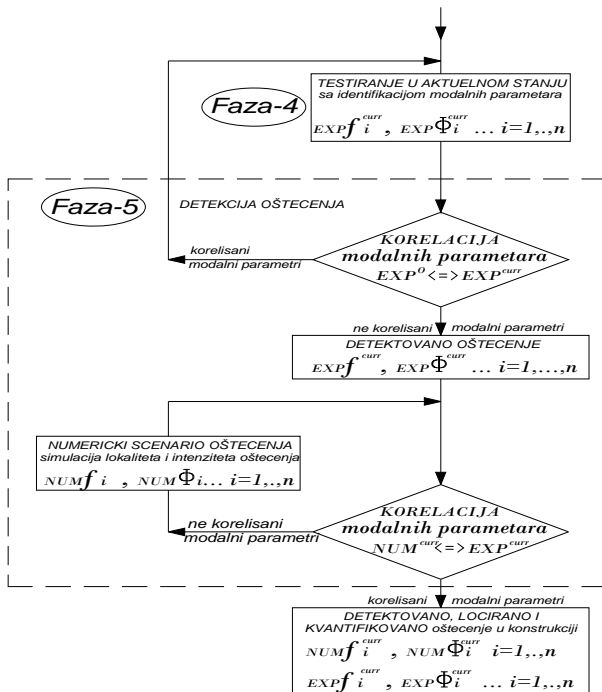
osmatranja konstrukcija koje su predmet konstrukcijskog monitoringa:

1. Modeliranje i modalna analiza konstrukcije bez oštećenja (u početnom referentnom stanju) primenom MKE;
2. Eksperimentalno utvrđivanje modalnih karakteristika konstrukcije bez oštećenja (u referentnom stanju) merenjem ambijentalnih vibracija sa ide-



Slika 1a. - Inicijalne faze detekcija oštećenja na bazi vibracija

ntifikacijom modalnih karakteristika iz rezultata izvršenih merenja;



Slika 1b. - Finalne faze detekcije oštećenja na bazi vibracija tokom monitoringa stanja konstrukcija

3. Korekcija proračunskog modela MKE konstrukcije na osnovu eksperimentalno utvrđenih modalnih karakteristika u referentnom stanju sa ciljem postizanja odgovarajuće saglasnosti modalnih frekvencija i oblika;
4. Eksperimentalno istraživanje potencijalno oštećene konstrukcije (u trenutnom stanju) merenjem ambijentalnih vibracija sa identifikacijom modalnih karakteristika iz rezultata izvršenih merenja;
5. Primena procedure optimizacije u cilju identifikacije oštećenja, lokalizacije i kvantifikacije u slučaju utvrđenog prisustva oštećenja.

Prve tri faze se mogu definisati kao inicijalne faze, jer odgovaraju stanju konstrukcije bez oštećenja (referentnom). Treća i četvrta faza predstavljaju finalne faze koje se izvršavaju tokom eksploatacionog veka potencijalno oštećene konstrukcije i za vreme monitoringa stanja konstrukcije.

2.1 Inicijalno numeričko modeliranje konstrukcije

Numeričko modeliranje konstrukcije primenom paketa za analizu konstrukcija na bazi MKE, faza-1, neophodno je u cilju formiranja numeričkog modela konstrukcije bez oštećenja, a radi određivanja modalnih karakteristika konstrukcije u neoštećenom stanju, tzv. referentnog stanja konstrukcije. Ovakav model konstrukcije predstavlja inicijalni korak u formiranju adekvatnog numeričkog modela konstrukcije za dalje analize u detekciji i lokali-

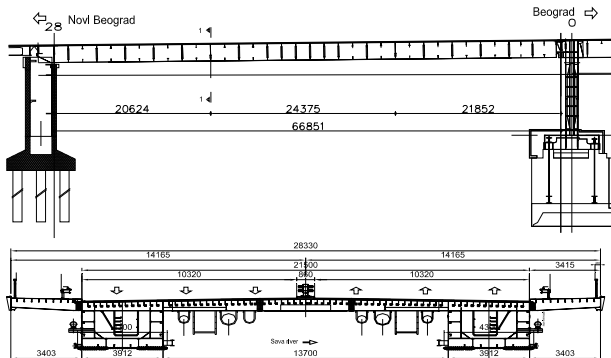
zaciji konstrukcijskih oštećenja. Modalne karakteristike ovakavog modela, u većoj ili manjoj meri odstupaju od realnih karakteristika iz razloga nemogućnosti adekvatnog modeliranja masa i krutosti, kao i usled prisustva odgovarajućih nekonstrukcijskih elemenata (prisustvo ograde na mostovima, pregradni zidovi u objektima visokogranje, i dr.), koji se najčešće ne modeliraju u numeričkom modelu.

2.2 Eksperimentalno utvrđivanje realnih konstrukcijskih parametara merenjem ambijentalnih vibracija

U cilju formiranja numeričkog modela konstrukcije koji odgovara realnim konstrukcijskim parametrima u referentnom neoštećenom ili trenutnom stanju, potrebno je sprovesti fazu-2, kako bi se utvrdili realni konstrukcijski modalni parametri, sopstvene frekvencije i oblici oscilovanja nekoliko prvih najrelevantnijih sopstvenih modova. Razvoj merne opreme, u prvom redu visokoosetljivih akcelorometara, omogućio je sprovođenje merenja tzv. ambijentalnih vibracija konstrukcija tokom upotrebe, [10]. Primenom akvizicionih sistema visoke rezolucije, sa odgovarajućim akvizicionim parametrima, moguće je dobiti kvalitetne zapise ubrzanja u ograničenom reprezentativnom skupu tačaka u terenskim uslovima. Jedno ovakvo istraživanje ambijentalnih vibracija prikazano je u [16], a sprovedeno je na prilaznoj konstrukciji mosta *GAZELA* u Beogradu na levoj obali reke Save, *slika 2*.

Testirana konstrukcija je sistema proste grede raspona $L=66.85\text{m}$, a u poprečnom preseku je formirana od dva sandučasta glavna nosača povezana jakim poprečnim nosačima u trećinama raspona, i ortotropnom kolovoznom pločom, što se može videti sa fotografije konstrukcije sa donje strane na *slici 3*.

Za konstrukciju opisanog tipa mogu se očekivati globalni modovi savijanja u podužnom pravcu, torzioni modovi i modovi savijanja u poprečnom pravcu. Tono-vi oscilovanja u podužnom pravcu konstrukcije su viši i teško se pobuđuju i komplikovano ih je registrovati, te



Slika 2. - Dispozicija prilazne konstrukcije mosta GAZELA na levoj obali reke Save u Beogradu na kojoj je sprovedeno istraživanje ambijentalnih vibracija



Slika 3. - *Izgled konstrukcije tokom registrovanja ambijentalnih vibracija*

kao takvi nisu od primarnog značaja za predmetno razmatranje.

Da bi bilo moguće registrovati sve nabrojane moguće globalne forme sopstvenih oscilacija, neophodno je vršiti registrovanje ubrzanja na oba sandučasta nosača, i to uz vertikalne limove istih kako bi se izbeglo registrovanje eventualnih lokalnih oscilacija, *slika 4*.

Kako bi se postigla adekvatna prostorna predstava modova oscilovanja na osnovu merenja ambijentalnih vibracija, potrebno je registrovati ubrzanja u više poprečnih preseka konstrukcije. U prikazanom slučaju, shodno

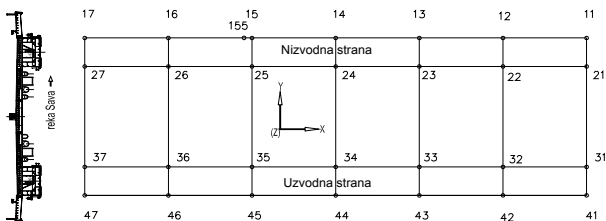


Slika 4. - *Položaj akcelerometara tokom merenja ambijentalnih vibracija testirane mostovske konstrukcije*

dispoziciji konstruktivnog sistema, sprovedeno je merenje ambijentalnih vibracija u 7 poprečnih preseka: u krajnjim poprečnim presecima, poprečnim presecima na mestima jakih poprečnih nosača postavljenih u trećinama raspona, kao i u poprečnim presecima između glavnih/jakih poprečnih nosača.

Ovakvim rasporedom mernih preseka omogućeno je registrovanje globalnih modova savijanja u vertikalnoj i horizontalnoj ravni, globalnog torzionog ponašanja konstrukcije, kao i eventualno, lokalnog nezavisnog torzionog kretanja dva sandučasta nosača između jakih/glavnih poprečnih nosača, *slika 5*.

Na svakom mernom mestu potrebno je pratiti vertikalne i poprečne horizontalne vibracije, kako bi bili re-



Slika 5. - Dispozicija mernih preseka i mernih mesta merenja ambijentalnih vibracija testirane mostovske konstrukcije

gistrovani glavni globalni modovi oscilovanja konstrukcije, kao što je i sprovedeno u istraživanju prikazanom u [16].

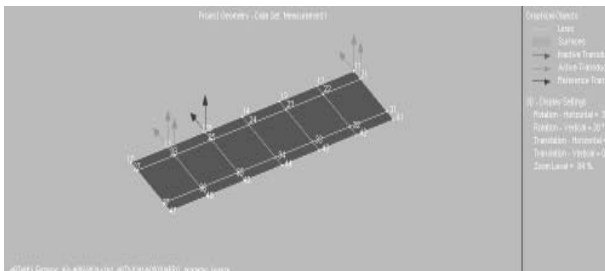
2.3 Identifikacija modalnih karakteristika na osnovu merenja ambijentalnih vibracija

Nakon sprovedenih merenja ambijentalnih vibracija, kako u fazi-2, tako i u fazi-4 procesa detekcije oštećenja na bazi promene dinamičkih karakteristika, sledi tzv. identifikacija modalnih karakteristika iz registrovanih ubrzanja konstrukcije. Razvoj numeričkih metoda identifikacije dinamičkih sistema tokom proteklih 20-tak godina, rezultirao je vrlo pouzdanim metodama identifikacije, a posebno su se izdvojile tzv. *Stochastic Subspace Identification* – *SSI* metoda i *Frequency Domain Decomposition* – *FDD* metoda, [22], [23].

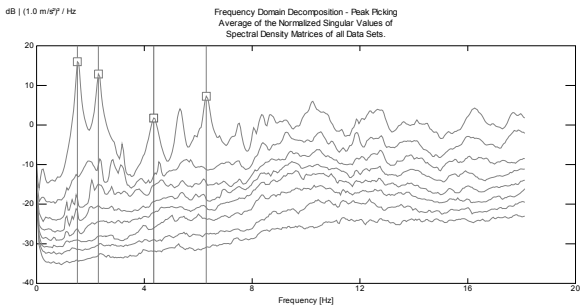
Jedna ovakva identifikacija modalnih karakteristika, sprovedena je na rezultatima merenja u istraživanju ambijentalnih vibracija prilazne konstrukcije mosta *GA-ZELA*, prikazane u [16].

Identifikaciju modalnih karakteristika moguće je sprovesti primenom različitih dostupnih metoda, a kao ilustracija načina identifikacije navodi se sprovedena identifikacija modalnih parametara tokom istraživanja [16], primenom poznatog software-a za identifikaciju parametara sistema na osnovu merenja ambijentalnih vibracija *ARTEMIS* [17].

Za potrebe analize rezultata merenja, neophodno je formirati odgovarajući model rasporeda senzora i mernih mesta. Na *slici 6* prikazan je formirani *model rasporeda mernih mesta* za ispitivanu mostovsku konstrukciju shodno rasporedu mernih mesta i senzora prikazanom na *slici 5*.



Slika 6. - Model merenja ambijentalnih vibracija testirane mostovske konstrukcije

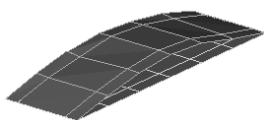


Slika 7. - Matrice spektralne gustine određene na osnovu izvršenih merenja ambijentalnih vibracija primenom ARTeMIS software-a

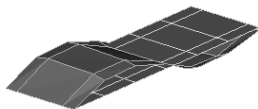
U razmatranom slučaju merenja ambijentalnih vibracija, primenom *FDD* procedure u programskom paketu *ARTEMIS*, određeni su dijagrami spektralne gustine za sva izvršena merenja. Preklopljeni dijagrami spektralne gustine prikazani su na *slici 7*.

Na osnovu prethodno prikazanih dijagrama, izvršena je identifikacija modalnih karakteristika testirane konstrukcije, sopstvene frekvencije i modovi oscilovanja. Četri identifikovana moda sopstvenih oscilacija prikazana su na *slici 8*.

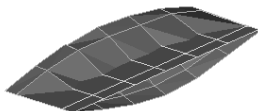
Prikazani primer ilustruje mogućnosti identifikacije modalnih karakteristika konstrukcije što je izuzetno važna faza u detekciji oštećenja. Ista se sprovodi u tzv. referentnom stanju (stanju konstrukcije bez oštećenja ili



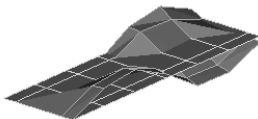
Mod-1: $f_1 = 1.514$ Hz



Mod-3: $f_3 = 4.346$ Hz



Mod-2: $f_2 = 2.295$ Hz



Mod-4: $f_4 = 6.299$ Hz

Slika 8. - *Identifikovani modovi sopstvenih oscilacija na osnovu ambijentalnog testiranja mostovske konstrukcije*

u trenutnom stanju konstrukcije), kao i tokom praćenja stanja konstrukcije u cilju detekcije eventualnih oštećenja – faza-4.

2.4 Korelacija numeričkog modela MKE konstrukcije sa eksperimentalnim rezultatima

Kako bi se formirao adekvatan numerički model za detekciju oštećenja, neophodno je sprovesti korelaciju numeričkog modela sa rezultatima eksperimentalne analize konstrukcije. U tom smislu, potrebno je sprovesti proceduru korigovanja inicijalnog modela MKE formiranog u fazi-1 shodno eksperimentalno određenim modalnim frekvencijama i oblicima sopstvenih oscilacija

određenih u fazi-2 detekcije oštećenja. Ovaj postupak je u literaturi poznat pod imenom *Finite Element Model Updating – FEM Updating*, [18], [19], a isti se može sprovesti na osnovu statičkih ili dinamičkih eksperimentalnih analiza. U detekciji oštećenja na bazi vibracija - modalnih karakteristika, naravno primenjuju se rezultati eksperimentalnog istraživanja konstrukcijskog odgovora na osnovu merenja ambijentalnih vibracija, sprovedenih u fazi-2 procesa detekcije.

Korekcija inicijalno formiranog modela MKE konstrukcije podrazumeva promenu manje/više nepouzdatih parametara u inicijalno formiranom numeričkom modelu. Pod ovim se podrazumevaju:

- Razlike u krutosti relevantnih konstrukcijskih elemenata;
- Razlike u modulima elastičnosti materijala u konstrukciji;
- Razlike između stvarnih i teorijskih raspona konstrukcije i konstrukcijskih elemenata;
- Razlike usled pojave prslina u određenim zonama konstrukcijskih elemenata;
- Razlike između realnih i teorijskih graničnih uslova, i dr.

Procedura korekcije inicijalnog modela MKE može se sprovesti »ručno«, primenom odgovarajuće parametarske analize uz varijaciju usvojenih relevantnih parametara u određenim intervalima, ili automatski, primenom odgovarajućih softverskih paketa za tu namenu, kao što

je *FEMtools* [19], a gde su implementirani odgovarajući algoritmi optimizacije, a u cilju pronalaženja kombinacije sa najmanjim promenama na inicijalnom modelu MKE konstrukcije koji rezultira najboljim slaganjem sa eksperimentalno utvrđenim modalnim karakteristikama.

Za meru korelacije modalnih karakteristika numeričkog modela i eksperimentalno utvrđenih modalnih karakteristika, najčešće se usvajaju modalne frekvencije i modalni oblici.

Mera saglasnosti eksperimentalno utvrđenih i numeričkih modalnih frekvencija može se izraziti preko *koficijenta frekventne saglasnosti (Frequency Assurance Criteria – FAC)*, a koji predstavlja vrlo dobru meru saglasnosti modalnih karakteristika. Ova mera se kvantifikuje, preko sume kvadrata relativnih razlika, numerički i eksperimentalno određenih vrednosti frekvencija, odnosno definisana je jednačinom (1),

$$FAC^0 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{EXP_i}^0 - f_{NUM_i}}{f_{EXP_i}^0} \right)^2 \quad (1)$$

gde $f_{EXP_i}^0$, f_{NUM_i} predstavljaju eksperimentalno i numerički određene sopstvene frekvencije, respektivno, dok je n broj modova uključenih u razmatranje. Prilikom praktičnih proračuna, za zadovoljavajući nivo usaglašenosti, smatra se nivo razlika u frekvencijama u granicama 5% – 7%, [21].

Mera saglasnosti modalnih oblika, parametar koji se definiše kao modalni kriterijum usaglašenosti, poznat

u literaturi kao *Modal Assurance Criteria* – *MAC*, predstavlja dodatni parametar mere usaglašenosti modalnog odgovora. Ova mera se kvantifikuje skalarnim proizvodom normalizovanih modalnih vektora, odnosno jednačinom (2),

$$MAC_{ij}^0 = \frac{(\bar{\phi}_{NUM_i}^T \bar{\phi}_{EXP_j})^2}{(\bar{\phi}_{NUM_i}^T \bar{\phi}_{NUM_i})(\bar{\phi}_{EXP_j}^T \bar{\phi}_{EXP_j})}, i=1\dots n, \quad j=1,\dots n \quad (2)$$

gde $\bar{\phi}_{EXP}$, $\bar{\phi}_{NUM}$, predstavljaju eksperimentalno i numerički određene modalne vektore, respektivno, dok n označava broj modova uzetih u razmatranje. *MAC* je matrica korelacije modalnih oblika, koja faktički predstavlja test ortogonalnosti modalnih oblika. Teorijski, za slučaj odgovarajućih numerički i eksperimentalno određenih modova $MAC_{ij}^0 \dots i = j$ treba da bude jednak jedinici, dok u slučaju različitih modova, $MAC_{ij}^0 \dots i \neq j$ treba da bude jednak nuli. Treba napomenuti da prilikom korekcije numeričkog modela na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja, zadovoljavajućim se smatraju vrednosti dijagonalnih koeficijenata $MAC^0 \geq 0,70 \dots i = j$, odnosno vandijagonalnih elementata $MAC^0 \leq 0,30 \dots i \neq j$. Navedene granice tolerancije su posledica nemogućnosti postizanja idealne korelacije sa eksperimentalnim rezultatima, s obzirom na neizbežno prisustvo šuma i drugih smetnji tokom sprovođenja merenja, [21].

Na osnovu sprovedene procedure u fazi-3 monitoringa stanja, formira se referentni numerički model konstrukcije sa odgovarajućim modalnim karakteristikama, $f_{NUM_j}^{ref}$, $\bar{\phi}_{NUM_i}^{ref} \dots i = 1, \dots, n$.

3. PROCEDURE DETEKCIJE, LOKALIZACIJE I PROCENE INTEZNIZITETA OŠTEĆENJA

Tokom eksploatacije konstrukcija, a u cilju detektovanja eventualnih oštećenja vrši se, permanentno ili u odgovarajući vremenskim intervalima, osmatranje modalnih karakteristika, faza-4 i faza-5 monitoringa stanja konstrukcija, a kako je prikazano na *slici 2*. U ovim fazama, pored eksperimentalnog registrovanja ambijentalnih vibracija, sprovodi se i identifikacija prisustva eventualnog oštećenja sa odgovarajućom identifikacijom modalnih karakteristika. Ovi postupci se sprovode poređenjem modalnih karakteristika u aktuelnom stanju sa odgovarajućim vrednostima identifikovanim u referentnom stanju tokom faze-2.

3.1 Parametri za detekciju oštećenja

Prisustvo oštećenja u konstrukcijama može se identifikovati primenom različitih kriterijuma. Identifikacija konstrukcijskog odgovora može se sprovesti na osnovu rezultata statičkog ili dinamičkog ispitivanja, mada su najčešće primenjivane metode koje baziraju na vibracijama – poređenju modalnih parametara. Ako se razmatra samo problem detekcije prisustva eventualnih oštećenja, jedan od najpouzdanijih inicijalnih znakova ovakve promene je promena sopstvenih frekvencija konstrukcije. Za indikator ovakve promene, slično kao i prilikom korelacije modalnih parametara u fazi-3 monitoringa stanja

konstrukcija, usvaja se *koeficijent frekventne saglasnosti* (*Frequency Assurance Criterion – FAC*). Za otkrivanje prisustva oštećenja, ovaj parametar treba da uključiti odgovarajuće eksperimentalno određene vrednosti u referentnom i aktuelnom stanju, i definisan je jednačinom (3).

$$FAC^{EXP} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{EXP_i}^{CURT} - f_{EXP_i}^0}{f_{EXP_i}^0} \right)^2 \quad (3)$$

U jednačini (3), modalne frekvencije $f_{EXP_i}^0, f_{EXP_i}^{CURT} \dots i = 1, \dots, n$, odgovaraju utvrđenom modalnim frekvencijama prvih n sopstvenih modova konstrukcije u referentnom i aktuelnom stanju, respektivno. Treba napomenuti da, iz razloga pouzdanosti, eksperimentalno utvrđene vrednosti treba da budu određene na adekvatan način, tj. sa identičnim rasporedom mernih mesta, brzinom uzorkovanja, primenom odgovarajuće opreme za izvršenje merenja, a takođe treba da bude primenjena i adekvatna metoda identifikacije modalnih karakteristika. Ispunjenjem prethodno navedenih uslova, granica greške koja se može očekivati za slučaj neoštećene konstrukcije, je 3% . Ove razlike mogu biti posledica različitih uticaja, napajanja električnom energijom tokom izvršenja merenja, kao i drugih faktora.

Ukoliko se želi postići preciznija procena prisustva eventualnog oštećenja, moguće je uključiti i poređenje eksperimentalnih modalnih oblika u referentnom i aktuelnom stanju. Isto se postiže, analogno kao i prilikom ko-

relacije numeričkih i eksperimentalnih modova u fazi-3 monitoringa stanja konstrukcija, primenom *modalnog kriterijuma usaglašenosti*, definisanog jednačinom (4).

$$MAC_{ij}^{EXP} = \frac{\left(\bar{\phi}_{EXP^{CURR}i}^T \bar{\phi}_{EXP^0j}\right)^2}{\left(\bar{\phi}_{EXP^{CURR}i}^T \bar{\phi}_{EXP^{CURR}i}\right)\left(\bar{\phi}_{EXP^0j}^T \bar{\phi}_{EXP^0j}\right)}, i=1..n, j=1,..n \quad (4)$$

Treba napomenuti da se u ovom koraku procena vrši na osnovu eksperimentalno određenih vektora modalnih oblika, tj. u jednačini (4) $\bar{\phi}_{EXP^0j}$, $\bar{\phi}_{EXP^{CURR}i}$, odgovaraju referentnom i aktuelnom stanju tokom monitoringa stanja konstrukcija. MAC_{ij}^{EXP} koeficijenti imaju vrednosti adekvatne prethodno komentarisanim, a ukoliko iste odstupaju od navedenih isto ukazuje na prisustvo oštećenja. Napomene po pitanju izvršenja eksperimentalne provere za slučaj razmatranja modalnih frekvencija, važe i za slučaj uključivanja modalnih oblika u razmatranje.

Pored navedenih parametara moguće je uključivanje i drugih parametara koji predstavljaju indikatore eventualnih konstrukcijskih oštećenja, kao i formiranje kompleksnog indikatora koji uključuje više navedenih osnovnih indikatora prisustva eventualnog oštećenja. Treba napomenuti da se različiti parametri mogu težinski ponderisati preko odgovarajućih *težinskih koeficijenata (weighting coefficients)*.

3.2 Lokalizacija i procena nivoa oštećenja

Nakon ustanovljene egzistencije oštećenja, sprovodi se procedura identifikacije lokacije i ozbiljnosti ošteće-

nja. S obzirom na veliki broj parametara koji evidentno utiču na navedeno, ova procedura podrazumeva primenu metoda optimizacije. Optimizacija podrazumeva korekciju referentnog numeričkog modela konstrukcije, sa modalnim karakteristikama $f_{NUM_i}^{ref}$, $\bar{\phi}_{NUM_i}^{ref}$... $i = 1, \dots, n$, u cilju postizanja korelacije sa aktuelnim eksperimentalno utvrđenim modalnim karakteristikama u oštećenom stanju, $f_{EXP_i}^{CURR}$, $\phi_{EXP_i}^{CURR}$... $i = 1, \dots, n$. U cilju formiranja adekvatnog modela MKE konstrukcije koji odgovara stanju konstrukcije u aktuelnom stanju sa oštećenjem, neophodno je izvršiti korekciju referentnog numeričkog modela konstrukcije formiranog u inicijalnoj, fazi-3 detekcije oštećenja. Ova procedura podrazumeva numeričku simulaciju pozicije/lokaliteta i inteziteta oštećenja, tzv. mogući scenario oštećenja, uz poređenje odgovarajućih modalnih parametara. Faktički, zadatak se svodi na primenu metoda kombinatorne optimizacije, sa ciljem određivanja scenarija oštećenja koji rezultira numerički određenim modalnim karakteristikama koje koreliraju sa eksperimentalno određenim modalnim karakteristikama oštećene konstrukcije.

Jedan od najvažnijih elemenata za uspešno rešenje zadatka je formiranje odgovarajuće *funkcije cilja* (*objective function* ili *fitness function*) koja reprezentuje korelaciju odgovarajućih modalnih karakteristika. Kao i u prethodnom, i u ovom koraku, od suštinskog značaja su modalne frekvencije, čiji uticaj u funkciji cilja se može uzeti u obzir na različite načine, pri čemu je jedan od mogućih oblika dat jednačinom (5).

$$Freq = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{NUM_i}^* - f_{EXP_i}^{curr}}{f_{EXP_i}^{curr}} \right)^2 \quad (5)$$

U jednačini (5) *Freq* predstavlja funkciju cilja koja uzima u obzir uticaj modalnih frekvencija, dok su $f_{NUM_i}^* \dots i = 1, \dots, n$ numerički određene modalne frekvencije za simulirani scenario oštećenja. Za ovako definisanu funkciju cilja, zadatak optimizacije je minimizacija funkcije cilja, a ciljna vrednost je nula.

Pored frekvencija, moguće je, što se često i čini, u razmatranje uključiti i modalne vektore za korelaciju odgovarajućih modalnih odgovora. S obzirom da vrednost funkcije cilja treba da bude skalarna veličina, umesto originalne *MAC* matrice koeficijenata, za meru korelacije modalnih oblika može se uvesti norma ove matrice, tj. izrazom (6).

$$ModeShape = \left\| MAC_{ij}^* \right\| = \left\| \frac{\left(\bar{\phi}_{NUM_i}^T \bar{\phi}_{EXP^{curr} j} \right)^2}{\left(\bar{\phi}_{NUM_i}^T \bar{\phi}_{NUM_i} \right) \left(\bar{\phi}_{EXP^{curr} j}^T \bar{\phi}_{EXP^{curr} j} \right)} \right\|, \quad \begin{matrix} i = 1..n \\ j = 1..n \end{matrix} \quad (6)$$

Prilikom rešavanja praktičnih problema, korelacija se gotovo nikada ne sprovodi samo na osnovu modalnih oblika, funkcijom cilja *ModeShape*, već u kombinaciji sa modalnim frekvencijama, uz primenu odgovarajućih težinskih faktora, tj. u formi (7),

$$ObjFunct = W_{Freq} Freq + W_{ModeShape} ModeShape \quad (7)$$

što je generalni oblik najčešće primenjivanog oblika funkcije cilja. Težinski faktori W_{Freq} , $W_{ModeShape}$ ponderišu uticaj frekvencija i modalnih oblika, respektivno, na vrednost funkcije cilja, pri čemu se obično usvaja $W_{Freq} \gg W_{ModeShape}$. U literaturi postoji mnogo varijacija ovog oblika, a iste su prilagođene zadatku koji se rešava, npr. tipu konstrukcije na koje se primenjuje, i dr. U ovom smislu, na primer moguće je vršiti poređenje modalnih oblika uzimajući samo translatorne komponente modalnih vektora (isključivanje rotacija), čime se izbegavaju numeričke teškoće koje su posledica različitog reda veličina komponenti modalnih vektora.

Prethodno definisani zadatak optimizacije za lokalizaciju i procenu nivoa/intenziteta oštećenja, s obzirom na kompleksnost i nelinearnost funkcije cilja, spada u tzv. »teške« probleme optimizacije. Za rešavanje ovakvih zadataka najčešće se primenjuju tzv. *heurističke metode optimizacije*, savremene metode kojima se obezbeđuje pretraživanje cele oblasti mogućih rešenja i izbegava zarobljavanje u oblastima lokalnih minimuma. Najčešće primenjivane metode su *genetski algoritmi (Genetic Algorithms - GA)* [8], *veštaške neuronske mreže (Artificial Neural Networks - ANN)* [5], *simulirano kaljenje (Simulated Annealing - SA)* [11], *tabu-pretraživanje (Tabu Search - TS)* [13], *optimizacija primenom roja jedinki (Particle Swarm Optimization - PSO)* [14], i dr. Sve navedene metode omogućuju otkrivanje globalnog minimuma, ili približnog globalnog minimuma (*near optimal solution*).

4. ZAKLJUČAK

Prikazani pregled metoda detekcije oštećenja na bazi promene dinamičkih karakteristika je bitan deo monitoringa stanja konstrukcija koji je postao deo savremene prakse praćenja i održavanja značajnih objekata. Za uspešno detektovanje, lokalizaciju i kvantifikaciju konstrukcijskog oštećenja neophodno je sprovesti sve navedene faze, koje su kombinacija numeričkog modeliranja, merenja ambijentalnih vibracija sa identifikacijom modalnih parametara i primena savremenih metoda optimizacije. Svi ovi postupci spadaju u savremene inženjerske multidisciplinarne zadatke, i deo su savremene građevinske prakse. Benefiti detekcije oštećenja su veliki jer omogućavaju rano otkrivanje oštećenja i značajno utiču i unapređuju održavanje kapitalnih građevinskih konstrukcija. Širok spektar mogućih varijacija definisanja funkcije cilja i primene metoda optimizacije ukazuju na mogućnost za dalja unapređenja u ovoj oblasti.

ZAHVALNOST

Rad je urađen u okviru istraživanja projekta tehnološkog razvoja TR-36048: *Istraživanje stanja i metoda unapređenja građevinskih konstrukcija sa aspekta upotrebljivosti, nosivosti, ekonomičnosti i održavanja.*

Autori zahvaljuju Ministarstvu obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansijsku pomoć realizovanu kroz navedeni tehnološki projekat i

Ministarstvu visokog obrazovanja i naučnog istraživanja Republike Irak za stipendije za doktorske studije.

LITERATURA

- [1] Aktan AE, Catbas FN., Grimmelsman KA., Pervizpour M., Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges, Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute, 2003.
- [2] Guidelines for Structural Health Monitoring, Design Manual no.2. ISIS Canada, 2001.
- [3] ISO 18649:2004: Mechanical vibration - Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges, 2004.
- [4] Rucker W., Hille F., Rohrman R., F08b: Guideline for Structural Health Monitoring – Report, *SAMCO*, 2006.
- [5] Sahin M, Sheno R. Quantification and Localization of Damage in Beam-like Structures by Using Artificial Neural Networks with Experimental Validation, *Engineering Structural Journal*, Vol.25, No.14, pp. 1785–1802, 2003.
- [6] Kourehli S. et al. Structural Damage Detection Using Incomplete Modal Data and Incomplete Static Response, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, No.1, pp 216-223, 2014.

- [7] Kim J. et al.: V. GA-based Damage Detection in Structures Using Frequency and Modal Strain-Energy, *In: Proceedings of IMAC-XXV: Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 11 pages, 2007.
- [8] Meruane V., Heylen W., An hybrid real genetic algorithm to detect structural damage using modal properties, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, Vol. 25, No.5, 2011, pp. 1559–1573
- [9] Au FT, Cheng YS, Tham LG, Bai ZZ, Structural damage detection based on a micro-genetic algorithm using incomplete and noisy modal test data, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 259(5), pp. 1081 - 1094, 2003
- [10] Wnzel H, Pichler D., *Ambient Vibration Monitoring, 2nd ed. Chichester - England: John Wiley & Sons Ltd*; 2005.
- [11] He Rong-Song. Hwang Shun-Fa, Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing genetic algorithm, *Journal of computers and structures*, Vol. 84, No. 31-32, pp. 2231-2243. 2006.
- [12] Mosavi KH. *Vibration-based Damage Detection and Health Monitoring of Bridges*. PhD thesis, *North Carolina state university*, Raleigh, North Carolina, USA., 2010.

- [13] Liszkai TR. Modern Heuristics in Structural Damage Detection using Frequency Response Functions, PhD thesis, *Texas A&M University*, College Station, Texas, United States, 2010.
- [14] Fei K, Jun-jie Li, Qing Xu Damage detection based on improved particle swarm optimization using vibration data, *Applied Soft Computing*, Vol.12, No.8, pp. 2329–2335, 2012.
- [15] Wang L., Chan T.H.T., Review of vibration-based damage detection and condition assessment of bridge structures using structural health monitoring, *In: The Second Infrastructure Theme Postgraduate Conference: Rethinking Sustainable Development: Planning, Engineering, Design and Managing Urban Infrastructure*, Queensland University, 2009.
- [16] Mišković Z., Alalikhhan A., Al-Wazni S., Salatić M., Mišković Lj., Merenje ambijentalnih vibracija prilazne konstrukcije mosta GAZELA u Beogradu, *Zbornik radova 5-tog međunarodnog naučnog skupa: Građevinarstvo Nauka i Praksa – GNP-2014*, 17.-21. februar 2014., Univerzitet Crne Gore, Žabljak, 2014.
- [17] ARTeMIS Extractor Pro, Release 3.41, *Structural Vibration Solution A/S*, NOVI Science Park, Niles Jernes Vej 10, DK-9229 Aalborg East, Denmark, 2004.

- [18] Friswell M., Mottershead J.E., Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, *Kluwer Academic Publisher*, The Netherlands, ISBN 0-7923-3431-0, 1995.
- [19] FEMtools - Integrating Test and Analysis, Version 1.0., *Dynamic Design Solutions*, Leuven, Belgium: FEMtools, 1995.
- [20] Pavić A., Mišković Z., Reznolds P., Modal Testing and Finite-Element Model Updating of a Lively Open-Plan Composite Building Floor, *ASCE – Journal of Structural Engineering*, Vol.133, No-4 , pp.550-558., 2007.
- [21] Brincker R., Zhang L., Andersen P., Output-Only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition, *Proceedings of the 25th International Seminar on Modal Analysis (ISMA)*, Leuven, 2000.
- [22] Döhler M., Andersen P., Mevel L., Operational Modal Analysis using a Fast Stochastic Subspace Identification Method, *Proceedings of the 30th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Jacksonville, Florida, 2012.