

# DIJAGNOSTIKA ČVRSTOĆE KONSTRUKCIJA U FUNKCIJI ODRŽAVANJA

**Prof.dr Taško Maneski,**  
**Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu**

**Prof.dr Dragan Ignjatović,**  
**Rudarsko-Geološki fakultet Univerziteta u Beogradu**

*Osnova dijagnostike čvrstoće noseće konstrukcije predstavlja kompjutersko modeliranje i proračun noseće strukture konstrukcije (KOMIPS) primenom numeričke metode konačnih elemenata kroz statički, dinamički i termički proračun njenih nosećih elemenata.*

*KOMIPS omogućava modeliranje i proračun kompleksnih konstrukcija i problema, određivanje stvarne slike pomeranja i napona, iznalaženje stvarnog ponašanja konstrukcije i njenih elemenata, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, dobijanje elemenata za odlučivanje (režim rada, sanacija, rekonstrukcija, revitalizacija, optimizacija, potvrđivanje izbora varijantnog rešenja i dr.), određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije. Svako poboljšanje ponašanja konstrukcije, koje se može postići ovakvim pristupom, omogućava produženje eksploatacionog veka konstrukcije i povećanje njene pouzdanosti.*

*Ključne reči: čvrstoća, konstrukcija, napon, prslina, održavanje.*

## UVOD

Dijagnostika čvrstoće konstrukcije je relativno nova naučna i inženjerska disciplina. Ona obuhvata analizu stanja, ponašanja i popuštanja konstrukcije, kao i procenu preostale čvrstoće, radnog veka, režim rada i obim revitalizacije konstrukcije. Analiza stanja, dijagnostika ponašanja i popuštanja konstrukcije podrazumeva sledeće: proračun kompjuterskim postupkom primenom numeričke metode konačnih elemenata, proračun i klasičnim postupkom i eksperimentalna merenja.

Ovakav pristup omogućava određivanje stvarnog ponašanja konstrukcije, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, dobijanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije.

Problemi nastali u eksploataciji konstrukcije prvenstveno potiču od nedovoljno dobro projektovane geometrije. Osim toga, oni su često posledica nedovoljne otpornosti materijala, a posebno zavarenih spojeva, na nastanak i rast prslina. Takođe, čest je slučaj da su oba navedena faktora prisutna.

U inženjerskoj analizi nosećih konstrukcija primena izložene metodologije nameće sa kao neminovnost. Ona ima opravdanja zbog vrlo niskih troškova primene uz vrlo visok nivo rezultata.

## ODRŽAVANJE I ČVRSTOĆA KONSTRUKCIJE

Problemi na elementima konstrukcija prouzrokuju njihovo često održavanje i zamenu. Održavanje elemenata (zamena, popravka) koji se često habaju (klizni i kotrljajni ležaji), popuštaju, dinamički zamaraju i dr. predstavlja rešavanje posledice a ne uzroka problema. Nalaženje i rešavanje uzroka problema zahteva primenu numeričko-eksperimentalnu dijagnostiku čvrstoće elemenata. Rešavanje uzroka ima za posledicu drastično smanjenje troškova održavanja.

## ANALIZA STANJA I DIJAGNOSTIKA ČVRSTOĆE KONSTRUKCIJE

Osnova dijagnostike čvrstoće noseće konstrukcije predstavlja kompjutersko modeliranje i proračun noseće strukture konstrukcije (KOMIPS) primenom numeričke metode konačnih elemenata kroz statički, dinamički i termički proračun njenih nosećih elemenata.

KOMIPS omogućava modeliranje i proračun kompleksnih konstrukcija i problema, određivanje stvarne slike pomeranja i napona, iznalaženje stvarnog ponašanja konstrukcije i njenih elemenata, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, dobijanje elemenata za odlučivanje (režim rada, sanacija, rekonstrukcija, revitalizacija, optimizacija, potvrđivanje izbora varijantnog rešenja i dr.), određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije. Svako poboljšanje ponašanja konstrukcije, koje se može postići ovakvim pristupom, omogućava produženje eksploatacionog veka konstrukcije i povećanje njene pouzdanosti.

Razvijeni sistem „KOMIPS“ poseduje i specifični proračun za bliže definisanje stanja i dijagnostike. Za sve vrste konačnih elemenata i globalne čvorove preračunava se uporedni napon po Hubber-Henki-Mizzes-voj hipotezi. Raspodele opterećenja, membranskih i savojnih napona, energije deformisanja i kinetičke i potencijalne energije omogućavaju veoma efikasnu analizu stanja i dijagnostiku čvrstoće projektovane ili izvedene konstrukcije. One se izražavaju u procentima po izabranoj grupi elemenata i grafički u vidu linija jednakih potencijala opterećenja i energija po modelu.

Težnje dobrom ponašanju konstrukcije u eksploataciji su:

- što veća razlika između najvećeg radnog napona i napona tečenja materijala,
- što ravnomernija raspodela deformacije, napona i energije,
- što manje prisustvo koncentracije napona,
- što veća otpornost materijala na nastanak i rast prslina,
- što veća duktilnost i žilavost materijala,
- što dalji dinamički odzivi od eventualne pobude,
- što viša prva frekvencija i veće rastojanje između frekvencija,
- što manji faktor dinamičkog ponašanja.

#### **Tok kretanja i raspodela opterećenja**

Određivanje toka kretanja i raspodele opterećenja po konstrukciji od mesta njegovog uvođenja do oslonaca (od izvora do ponora) predstavlja osnovu razumevanja ponašanja konstrukcije. Najprostije rečeno opterećenje

putuje tokom najmanjeg otpora (tok-linija najveće krutosti i najkraći put).

#### **Raspodela membranskih i savojnih napona, normalnih i tangencijalnih napona**

Prisutna je za konačni element ploče i grede. Iznalazimo slaba (prisutno u velikoj meri savijanje) i dobra mesta (prisutan samo membranski napon) kao i mesta sa malim nivoom napona. Takođe ukazuje kakve modifikacije treba izvesti da bi se minimizirao negativan uticaj savijanja i bolje preraspodelilo opterećenje. Ukoliko model poseduje u manjoj meri savojni napon tom modelu je moguće primeniti redukciju stepeni slobode na svega tri translacije ili primenu prostijeg konačnog elementa (npr. membrane umesto ploče, štapa umesto grede). Na taj način nalazimo slaba (prisutno u velikoj meri tangencijalnih napona) i dobra mesta (prisutan samo normalni napon).

#### **Raspodela energije deformisanja**

Raspodela energije deformisanja po grupama elemenata (delovi strukture) veoma efikasno ukazuje na tok opterećenja i delove strukture koji prenose, odnosno nose opterećenje. Takođe, ovim se definiše osetljivost na eventualne modifikacije.

Jednačinu ravnoteže potencijalne energije deformacije i rada spoljašnjih sila dobijamo množenjem osnovne statičke jednačine sa leva transponovanim vektorom pomeranja

$$\{\delta\}^T [K] \{\delta\} = \{\delta\}^T \{F\} \equiv 2 \cdot E_d .$$

Energija deformisanja konačnog elementa  $e_d$  glasi:  $e_d = 0.5 \cdot \{\delta_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\delta_{sr}\}_e$ , gde su:  $\{\delta_{sr}\}_e$  - pripadajući globalni vektor pomeranja  $n$  i  $[k_{rs}]_e$  - globalna matrica krutosti elementa.

#### **Raspodela kinetičke i potencijalne energije na glavnim oblicima oscilovanja**

Raspodela kinetičke i potencijalne energije po glavnim oblicima oscilovanja još preciznije definiše ponašanje. Množenjem dinamičke jednačine sa leve strane sa transponovanom matricom sopstvenih vektora dobijamo jednačinu bilansa (jednakosti) potencijalne i kinetičke energije:

$$[\mu]^T \cdot [K] \cdot [\mu] = [\mu]^T \cdot [M] \cdot [\mu] \cdot \{\lambda\} .$$

Kinetička  $e_k^r$  i potencijalna  $e_p^r$  energija konačnog

elementa „e“ i cele strukture  $E^r$  na r-tom glavnom obliku glase:

$$e_k^r = \omega_r^2 \{\mu_{sr}\}_e^T [m]_e \{\mu_{sr}\}_e, \quad e_p^r = \{\mu_{sr}\}_e^T [k_{rs}]_e \{\mu_{sr}\}_e,$$

$E^r = E_k^r = E_p^r = \omega_r^2 \{\mu_r\}^T [M] \{\mu_r\} = \{\mu_r\}^T [K] \{\mu_r\}$ , gde su  $\omega_r$  - r-ta sopstvena frekvencija,  $\{\mu_r\}$  - r-ti sopstveni vektor i  $\{\mu_{sr}\}_e$  - pripadajući r-ti sopstveni vektor elementa.

Promena kvadrata sopstvene r-te frekvencije (reanaliza-bez ponovnog proračuna) glasi:

$$\frac{\Delta \omega_r^2}{\omega_r^2} = \frac{\alpha_e \cdot e_p^r - \beta_e \cdot e_k^r}{E^r}, \text{ gde } \alpha_e, \beta_e \text{ definišu}$$

modifikaciju e-tog elementa.

### POPUŠTANJE KONSTRUKCIJE

Nastanak i rast prslina, su problemi sa kojima se sreće veliki broj konstrukcija u eksploataciji. Klasični proračun mehanike loma uzima u obzir ovu pojavu analizom tzv. sila rasta prslina, čijim poređenjem sa otpornošću materijala može da se dobije procena daljeg ponašanja konstrukcije (linearan konzervativni pristup). Realnija slika ponašanja konstrukcije sa prslinom se dobija primenom plastične analize.

Ovakvim pristupom mogu se iznaći mesta u konstrukciji gde prslina (greška) može „uslovno“ da postoji. Postojanje prslina ne sme mnogo narušiti nosivost elementa, kao i da mogućnost njenog širenja bude minimalna.

Metodologija proračuna ponašanja konstrukcije sa greškom je sledeća:

1. Modeliranje i proračun cele konstrukcije bez i sa greškom,
2. Dijagnostika čvrstoće cele konstrukcije bez i sa greškom,
3. Modeliranje i proračun (linearan i nelinearan) elementa konstrukcije sa greškom,
4. Modeli proračuna za različitom pozicijom i veličinom greške i
5. Dijagnostika čvrstoće elementa konstrukcije sa greškom.

Dijagnostika čvrstoće konstrukcije sa greškom (popuštanje) obuhvata iznalaženje uticaja pozicije i veličine greške („a“) na sledeće veličine:

1. Promenu deformacije (maksimalna deformacija, veličinu maksimalnog otvaranja prslina i otvaranje vrha prslina) i njene raspodele,
2. Priraštaj popustljivosti elementa ( $dC/da$ ),

3. Promenu  $\sigma_{ekv}$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  i njihovu raspodelu po elementu,
4. Promenu procenta prisustva  $\sigma/\tau$  i  $\sigma/\tau^{mem} / \sigma/\tau^{sav}$ ,
5. Promenu energije deformacije  $E_d$ ,
6. Priraštaj energije deformacije ( $dE_d/da$ ),
7. Promenu procentualnog prisustva energije deformacije po zonama,
8. Energiju deformacije elementa na vrhu prslina i
9. Proizvod  $\sigma_y \cdot f$  (f-veličina otvaranja vrha prslina).

### EKPERIMENTALNA MERENJA

Eksperimentalna merenja u ovom slučaju imaju sledeći zadatak:

- određivanje spoljašnjeg i unutrašnjeg opterećenja konstrukcije u eksploataciji i
- merenje ugiba, napona, ubrzanja i dr. na izabranim mestima konstrukcije.

To znači da ona proračunu definišu potrebno ulazno opterećenje i verifikuju rezultate proračuna. Primena navedenog proračuna omogućava minimiziranje obima merenja. Podrazumeva se statičko i dinamičko merenje. Merenje napona podrazumeva primenu ekstenziometrijske metode (merne trake). Merenje ubrzanja se izvodi direktno primenom davača.

Utvrđivanje uticaja opterećenja na konstrukciju prvenstveno se odnosi na merenje napona i ubrzanja izabranih mesta. Takođe, imamo i merenje deformacije i brzine promene deformacije kao i razna druga merenja (debljina, tvdroća, prslina, buka i dr.).

Ova merenja uglavnom omogućavaju utvrđivanje posledice dejstva opterećenja i lošeg ponašanja konstrukcije a ne uzrok. Na nivou jednog mašinskog elementa (ležaj, zupčanik, spojnica i dr) merenje može navesti na uzrok lošeg ponašanja, jer njihovo ponašanje unapred znamo. Ukoliko unapred poznajemo ponašanje konstrukcije (npr. kompjuterski proračun) onda ova merenja idu ka iznalaženju uzroka.

Pravilan izbor mesta za merenje napona je praktično nemoguć bez kompjuterskog proračuna. Ukoliko imamo kompjuterski proračun napona onda se broj mesta merenja napona minimizira. Merenja napona u tom slučaju verifikuju kompjuterski proračun.

Merenje brzine promene deformacije se veoma mnogo koristi u vibro-dijagnostici.

Merenje ubrzanja pojedinih mesta na konstrukciji i kompjuterski dinamički proračun konstrukcije omogućavaju definisanje uzroka lošeg ponašanja konstrukcije. Rešavanje uzroka se dalje obavlja kompjuterskim proračunom.

### **PROCENA PREOSTALE ČVRSTOĆE I RADNOG VEKA**

Preostala čvrstoća i radni vek konstrukcije bez prsline određuje se na osnovu ponašanja konstrukcije. Sanaciju i revitalizaciju treba obavljati samo kada konstrukcija ima loše lokalno ponašanje. U slučaju lošeg globalnog ponašanja konstrukciju treba zameniti. Pri tome je potrebno eliminisati loše ponašanje („lečiti“ uzrok, a ne posledicu) pogodnom rekonstrukcijom. Preostala čvrstoća i radni vek konstrukcije sa stvarnom ili simuliranom prslinom, određuje se na osnovu ponašanja konstrukcije, uzimajući u obzir veličinu i položaj prsline, odnosno silu rasta prsline, koja se poredi sa otpornošću materijala na rast prsline.

Rast prsline zamorom je veoma bitna pojava kod konstrukcija opterećenih promenljivom dinamičkom silom, jer je često uzrok njihovog loma. Osnovni parametri kojim se prati ova pojava su brzina rasta prsline ( $da/dN$ ) i broj ciklusa opterećenja-rasterećenja ( $N_p$ ) potrebnih da prsline poraste od početne dužine ( $a_0$ ) do krajnje dužine ( $a_k$ ). Ovi parametri se određuju sledećim izrazima:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m, \quad N_p = \frac{1}{C \cdot \Delta \sigma^m} \int_{a_0}^{a_k} \frac{da}{(K/\sigma)^m},$$

gde su:  $da$  i  $dN$  porast prsline i broja ciklusa,  $C$  i  $m$  koeficijenti materijala,  $K$  i  $\Delta K$  faktora intenziteta napona i njegov priraštaj,  $\sigma$  i  $\Delta \sigma$  udaljeni napon i njegov priraštaj.

### **PARAMETRI IZBORA I ODLUKE**

Kvalitetni parametri proistekli iz analize stanja i dijagnostike čvrstoće efikasno se koriste u sledećim aktivnostima:

- projektovanje, izrada ili nabavka konstrukcije,
- rekonstrukcija ili sanacija konstrukcije,
- produženja preostalog veka,
- promena režima rada
- revitalizacija konstrukcije.

Za donošenje ispravne i precizne odluke u navedenim aktivnostima neophodno posedovati kvalitetnu analizu stanja i dijagnostiku čvrstoće konstrukcije.

### **REVITALIZACIJA KONSTRUKCIJE**

Revitalizacija konstrukcije podrazumeva izradu nove cele ili delimične konstrukcije sa ili bez njene rekonstrukcije. Rekonstrukcija podrazumeva prvenstveno promenu geometrije, a često su potrebne intervencije na materijalu (posebno na zavarenim spojevima). Revitalizacija konstrukcije zahteva prethodnu analizu stanja i dijagnostike čvrstoće konstrukcije, odnosno procene preostale čvrstoće i veka.

#### **PRIMERI**

Realni problemi koji su razmatrani ovakvim pristupom su:

#### **FC Beočin**

- Utvrđivanje uticaja postojanja pukotina u zupcu i bočne ploče preko tri zupca
- Dijagnostika ponašanja i projektovanje rekonstrukcije obrtnog postolja bagera SH400
- Rekonstrukcije veze dvodelnog držača kliznog oslonca satelita rotacione peći br.3
- Izbor varijanti zupčastog venca mlina cementa  $\varnothing 4400 \times 16100$
- Sanacija polomljenog zupca venca mlina br.5 koji u sebi ima prsline
- Uzrok pucanja oslonog prstena i dalji rad rotacione peći br.3
- Rekonstrukcija rukavca mlina krečnjaka Unidian
- Eliminisanje rezonantnog ponašanja ventilatora
- Sanacija cilindrične cevi rotacione peći br.3
- Poboljšanje dinamičkog ponašanja oslonca mlina sirovine

#### **FC Popovac**

- Sanacija i rekonstrukcija trećeg oslonca peći 1000 t/dan
- Rekonstrukcija čela i rukavca mlina cementa  $\varnothing 2200 \times 12000$

#### **Kolubara Metal Vreoci**

- Utvrđivanje havarije radiaksijalnog ležaja rotornog bagera C700S

- Utvrđivanje popuštanja i sanacija platforme odlagača ARS Kopel
- Sanacija i rekonstrukcija radnog točka sprave C700S
- Rekonstrukcija otvora konstrukcije br.151240

#### **Kopovi Kolubara Lazarevac**

- Sanacija havarije i rekonstrukcija donje gradnje transportera ARs/BRs 1600/(28+50)x17 O&K
- Sanacija havarije i rekonstrukcija donje gradnje odlagača ARs 1400/ 22+60+21 O&K
- Rekonstrukcija stuba odlagača ARs 1400/ 22+60+21 O&K
- Sanacija i rekonstrukcija donje i gornje gradnje rotornog bagera C700S
- Rekonstrukcija odložne strele rotornog bagera C700S

#### **Kop Kostolac Drmno**

- Sanacija i rekonstrukcija gornje gradnje bagera SchRs800 O&K
- Optimizacija vedrice SchRs800 O&K
- Eliminisanje popuštanja ležaja na dva ulazna vratila reduktora kopanja bagera SRs2000
- Projekat zamene reduktora kopanja bagera SRs2000 i uvođenje pomoćnog oslonca
- Dijagnostika čvrstoće konstrukcije bagera SRs1300
- Rekonstrukcija odložne trake samohodnog transportera Metalna
- Eliminisanje rezonantnog ponašanja pogonske stanice JII5
- Projekat sistema za kopanje bagera SRs1300
- Projekat kontrole čelične konstrukcije bagera SRs1300

#### **EPS**

- Optimizacija vedrice bagera SRs630
- Metodologija revitalizacije bagera

#### **ŽTP Beograd**

- Dijagnostika čvrstoće obrtnog postolja elektolokomotive 461, 441 i 412-416 i monoblok točka
- Sanacija pucanja u obrtnom postolju elektrolokomotive 412-416
- Termomehanička dijagnostika i poboljšanje vijčanog kompresora

#### **FV Kraljevo**

- Gredni modeli vagona Ea, Rgs, Gabs, Tadns, Lgms
- Obrtna postolja vagona Y25Cst i Y1.0 Burma
- Unifikacija donjeg postolja vagona cisterni
- Vagon cisterna

#### **HIP Bukulja Beograd**

- Rekonstrukcija nosača noža, noža i uležištenja vratila aglomeratora

#### **NIS Pančevo**

- Popuštanje naftovoda, Sanacija reaktora, Sanacija pregrejača pare

#### **Kolubara Prerada**

- Naponsko polje i rekonstrukcija bidona, Mišljenje realizacije bidona

#### **Želvoz Smederevo**

- Istraživanje sudara vagona cisterne za prevoz fosforne kiseline

#### **BBP Beograd**

- Utvrđivanje havarije veznog transportera VT 3-47-12

#### **Azorata Pančevo**

- Analiza loma vratila vazdušnog kompresora 3.1k-1

#### **Kopaonik, Brzovica**

- Metodologija modeliranja i proračuna ski lifta i žičare

#### **UTVA Kačarevo**

- Napon i deformacije industrijske centrifuge

#### **Brodogradilšte Bgd**

- Proračun produženja putničkog broda

#### **Prva Iskra Barič**

- Promena debljine visećeg rezervoara

#### **Tipo Beograd**

- Proračun parnih kotlova ptk55 i 25

#### **Elemir Zrenjanin**

- Eliminisanje rezonantnog ponašanja i rekonstrukcija rashlad.toranja

#### **HIP Pančevo**

- Sanacija rezervoara d,h=20m

### HE Bajna Bašta

- Prsline na otočnom cevovodu

### HE Peručica

- Koncentracija napona u račvi

### GOŠA Smed.Palanka

- Optimizacija aluminijumske cisterne i poluprikolice FPPC i FPP33

### UTVA Pančevo

- Optimizacija cisterne i poluprikolice

### Žitomlin Beograd

- Izmeštanje i modernizacija konzolne dizalice od 2t

Održane škole konačnih elemenata KOMIPS:

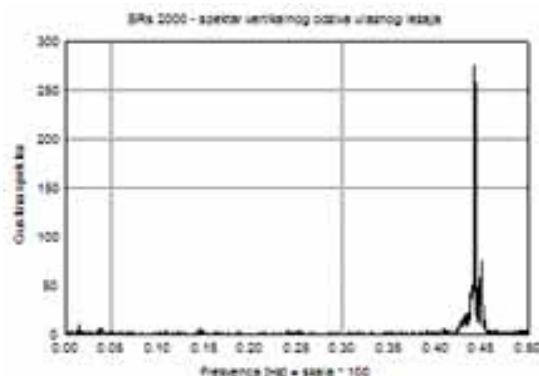
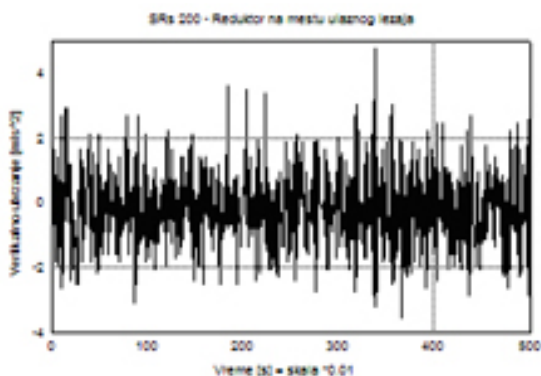
- Kolubara Metal Vreoci
- Mašinski fakultet Beograd – četiri
- Fabrika cementa Beočin – dve
- Brodogradilište Beograd
- TENT Obrenovac – dve
- Kop Tamnava Zapadno polje
- Mašinski fakultet Mostar

### Primer 1:

Analiza i predlog rešenja problema popuštanja ležaja ulaznog vratila reduktora radnog točka bagera Srs2000 Drmno, Kostolac

Zapažanja ponašanja pogona do dana 10.04.2003.god.:

- rad bagera pri procesu kopanja i bez kopanja praćen je u tri navrata i pri tome su merena ubrzanja ležaja reduktora i motora kao i noseće konstrukcije u sva tri pravca.
- vizuelnim pregledom ustanovljeno je da je veza noseće konstrukcije pogonskih motora i reduktora bila olabavljena, kao i da postoji poveći zazor u osovini sfernog oslonca reduktora za noseću konstrukciju strele bagera.
- na narednoj slici prikazana je samo vertikalno ubrzanje ulaznog ležaja reduktora u vremenskom i frekventnom domenu. Vidimo da su ubrzanja na granici dozvoljenog, a da je oscilovanje oba ležaja na oko 44 Hz jako nepovoljno. Radni broj obrtaja motora izaziva osnovnu pobudnu frekvencu u iznosu od 24.6 Hz ( $1480 \text{ }^{\circ}/\text{min} / 60\text{s}$ ) i narednu  $2 \cdot 24.6 = 49.2$  Hz.
- bliskost druge pobudne frekvence motora i frekvence ulaznog vratila nam govori da ulazno vratilo ima lošu dinamičku karakteristiku (mora imati prvu sopstvenu frekvencu veću od 50 Hz). Smanjenje frekvence izazvano je ugradnjom teže spojnice i pomeranjem njenog težišta od ulaznog ležaja za oko 150 mm.
- problemi (zazori, ovalnost otvora u kućištu i dr.) koje je ustanovljeno znatno utiču na pogoršanje već nepovoljnog ponašanja ulaznog vratila.
- nepoznavanje kvaliteta ležaja još više dovodi do komplikovanja problema oscilovanja, odnosno otežava iznalaženje uzroka.



Slika 1.

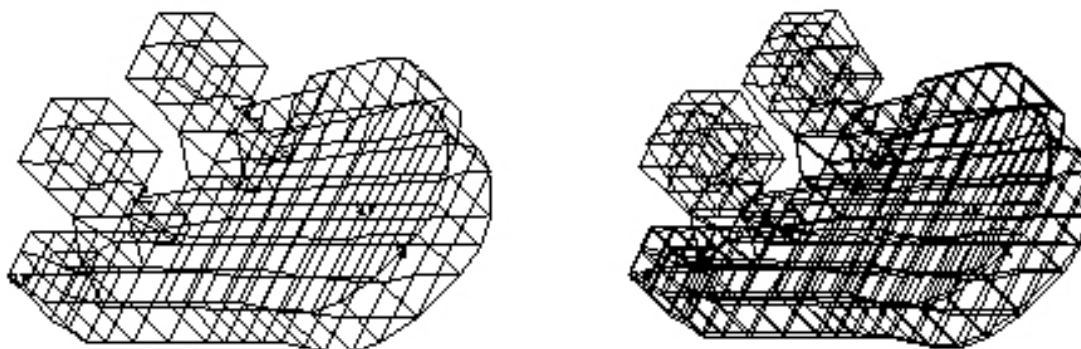
Računski dinamički model ulaznog vratila i prvi oblik oscilovanja sa uticajem težine spojnice na njegovu sopstvenu frekvencu dati si na slici 3. Težina spojnice jako nepovoljno utiče na prvu sopstvenu frekvencu.



Slika 2. Dinamički model ulaznog vratila reduktora radnog točka i prvi oblik oscilovanja za sledeće težine spojnice:

a)  $f_{01}=45$  Hz za  $G=500$  kg, b)  $f_{01}=50$  Hz za  $G=400$  kg, c)  $f_{01}=57$  Hz za  $G=300$  kg

Redukovani računski dinamički model celog reduktora sa motorima kao i drugi oblik oscilovanja prikazani su na narednoj slici. Model potvrđuje nepovoljan uticaj vertikalnog oscilovanja motora koje se javlja na još dosta frekvenci.



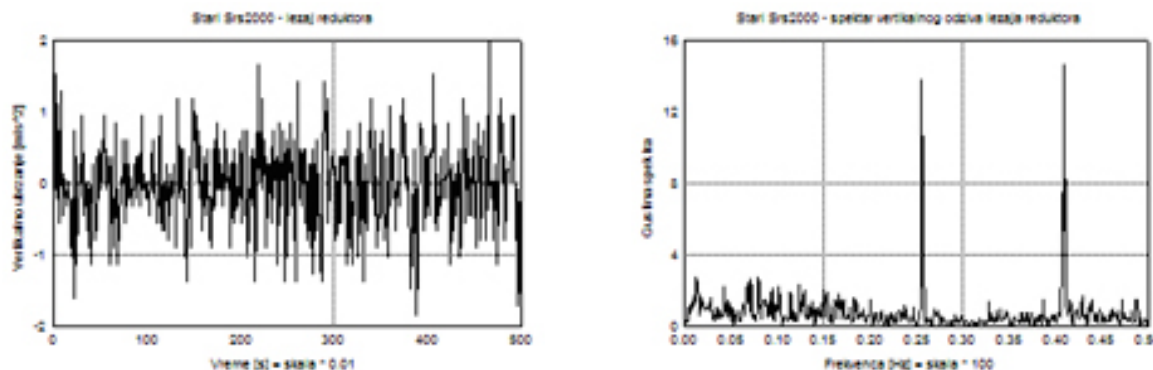
Slika 3. Dinamički model reduktora sa motorima i drugi oblik oscilovanja na  $f_{02}=6.5$  Hz

Izvedene aktivnosti za eliminisanje mogućih uzroka popuštanja ležaja oba ulazna vratila kod zadnje zamene ležaja navedene redosledno po značaju su:

- ugrađeni su kosnici ispod svakog oslonca motora (zbog kratkoće vremena i nemanja većih ugrađeni su profili U180, ukoliko se pokaže da su nedovoljno doprineli potrebno ih je zameniti većim),
- geometrija uležištenja ulaznog vratila (bez zazora i nategnutosti) dovedena je u korektno i ispravno stanje,

- veza motora i reduktora dovedena je u korektno stanje,
- prvom sledećom prilikom dovesti u korektno stanje zazora u osovinu sfernog oslonca reduktora za noseću konstrukciju strele.

Ugradnja navedenih elemenata obezbedila je zadovoljavajući rad reduktora u periodu od tri meseca do planiranog remonta. Pred kraj ovog perioda obavljeno je merenje dana 02.07.2003 i deo tih merenja je u nastavku prikazano.



Slika 4.

Možemo primetiti da je oscilovanje lezaja reduktora značajno minimizirano.

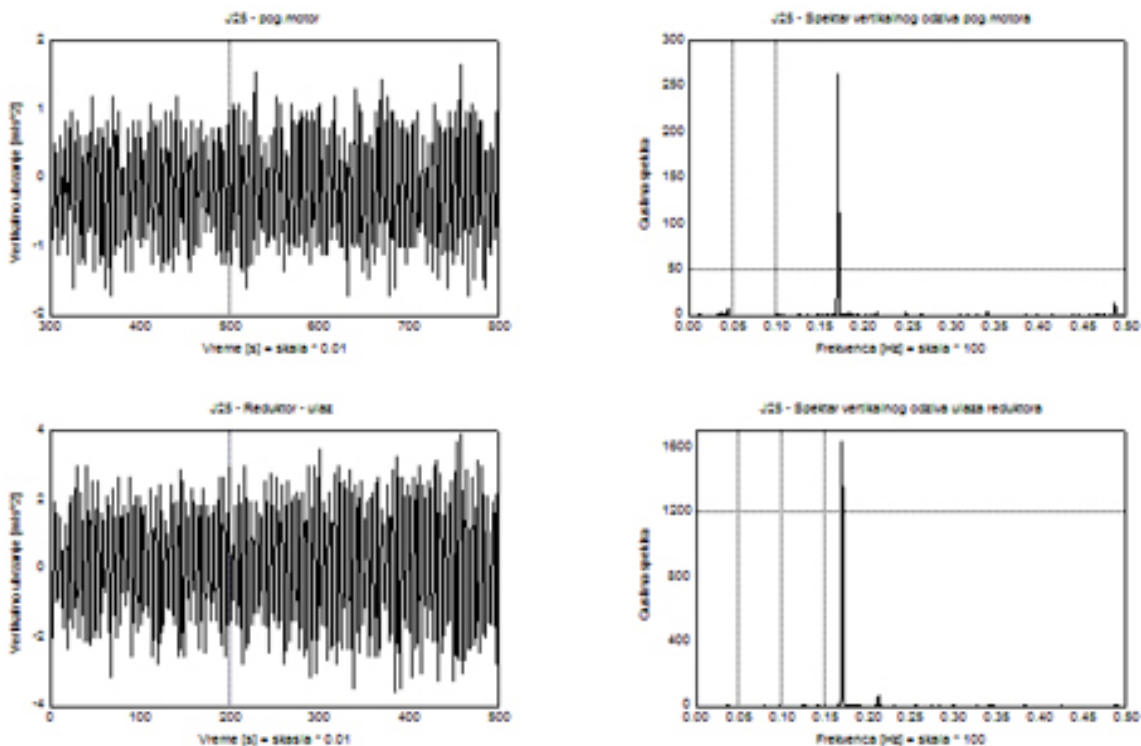
### Primer 2:

Pogonska stanica JIIP – Drmno, Kostolac /3/

Zapažanja ponašanja pogonske stanice do dana 10.04.2003.god.:

- za vreme rada stanice primećene su pojačane vibracije konzolnog dela noseće strukture stanice, pogonskog motora i reduktora na konzolnom delu, kao i pojačane vibracije donjih pogonskih motora i njegove noseće strukture,
- merenjem ubrzanja na raznim mestima konstrukcije i u svim pravcima konstatovano je da reduktor imaju veća ubrzanja od dozvoljenog. Prikaz merenja samo dva ubrzanja u vremenskom domenu i njihov spaktar u frekventnom domenu dat je na narednoj slici. Vidimo da motor i reduktor imaju izražen odziv na frekvenci oko 17 Hz koja je veoma blizu prvoj pobudnoj frekvenci ( $980 \text{ }^\circ/\text{min} / 60 \text{ sec} = 16.3\text{Hz}$ ),

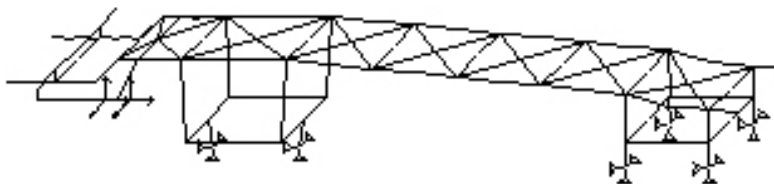
- odnosno noseća struktura motora i reduktora ulaze u rezonansu sa pobudom. Takođe vidimo da je gustina spektra (moguća amplituda dinamičkog pojačanja) kod reduktora mnogostruko veća od motora. Ovaj zaključak se u potpunosti poklapa sa realnim dešavanjem na nosećoj konstrukcije reduktora koja je u svojoj eksploataciji doživela havariju (vidi se zavarivanje donjeg dela reduktora po celoj širini i visini do ležaja sa unutrašnje strane i oko 20 cm po visini sa spoljašnje strane),
- detaljnim pregledom primećeno je da je veza noseće strukture gornjeg motora i reduktora (vertikalna poprečna ploča) proradila u donjem delu (zona zatezanja). Takođe primećeno je da je i veza jednog donjeg motora i reduktora proradila,
- navedena zapažanja nedvosmisleno govore da su ona uzrok oštećenja motora.



Slika 5

Redukovan računski dinamički model pogonske stanice i osmi spostveni oblik oscilovanja (izabran je zbog frekvence koja je jako blizu pobudnoj) prikazani su na narednoj slici. Sa slike vidimo da se noseća struktura motora u odnosu na reduktor lomi u vertikalnoj ravni na frekvenci od 16.3 Hz, odnosno one ulaze u rezonansu sa pobudom. Ovim su računski i mereni rezultati potpuno saglasni i potvrđeni.





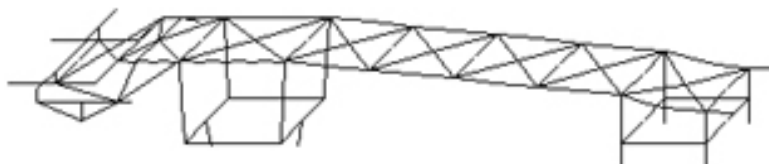
Dinamički model pogonske stanice J115



Osmi sopstveni oblik oscilovanja  $f_{08}=16.3$  Hz

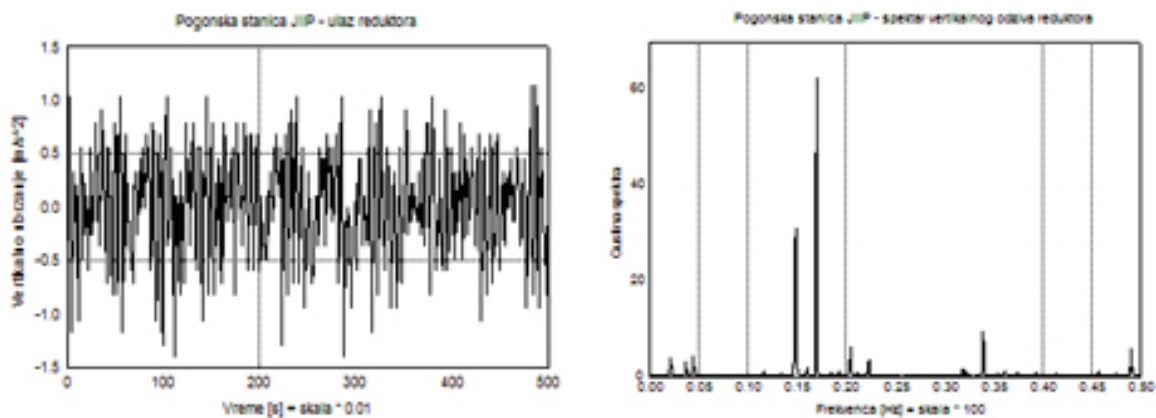
Slika 6

Predlog privremene rekonstrukcije prikazan je na narednoj slici. Ona se zove privremena jer je iznuđena zbog kratkoće vremena za rekonstrukciju i nemanja potrebnog profila (ugrađen je profil U18 a potreban je veći), kao i to da će biti izvedena sama na jednoj strani.



Slika 7. Predlog rekonstrukcije pogonske stanice

Privremena rekonstrukcija pogonskog sistema izvedena je samo na gornjem pogonu. Pogonska stanica sa izvedenom privremenom rekonstrukcijom radila je uspešno (minimiziranje oscilovanja) tri meseca (do planiranog remonta). Pred kraj rada stanice sa ovom privremenom rekonstrukcijom izvedeno je ponovno merenje ubrzanja (02.07.2003), sada, na gornjem i donjem pogonskom sistemu.

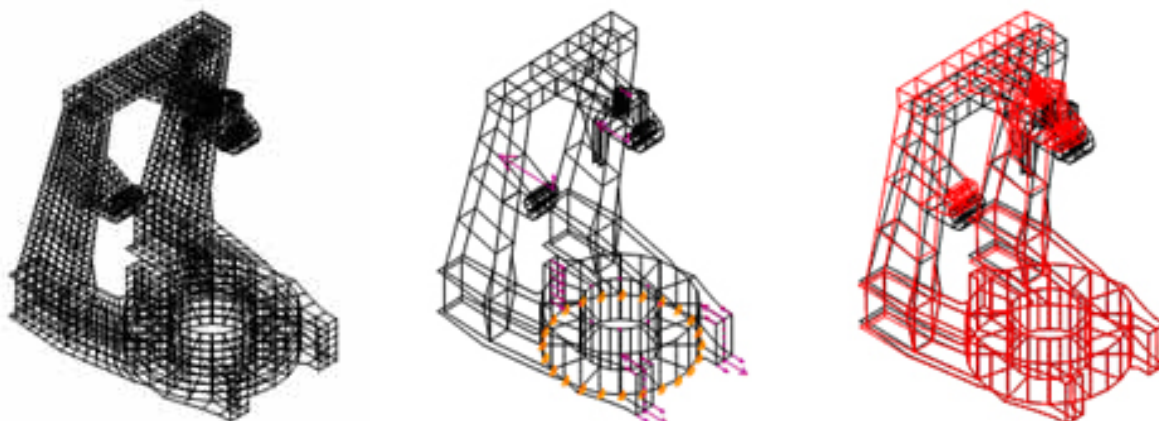


Slika 8

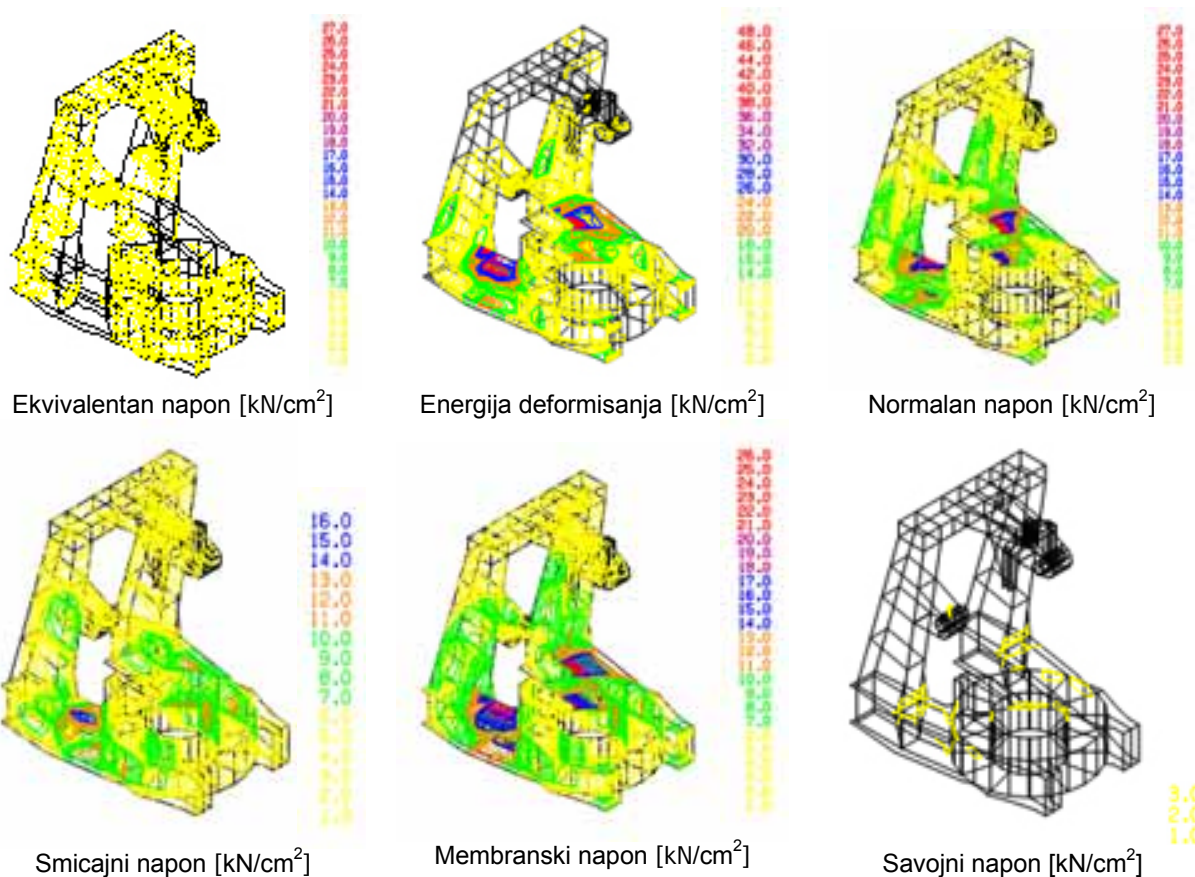
Vidimo da je oscilovanje gornjeg pogonskog sistema minimizirano sa komentaram da se ono može još smanjiti.

**Primer 3:**

Uzrok lošeg ponašanja gornje gradnje bagera C700S /4/ Konstrukcija gornje gradnje ovog bagera imala je prsline, pored ostalog, na mestu spoja stuba sa cilindrom. Sledi prikaz računskog modela gornje gradnje primenom konačnih elemenata i rezultata proračuna.



Slika 9. Računski model gornje gradnje, opterećenje i deformacija ( $f_{max\ opt\ 1} = 5.244\ cm$ )



Slika 10. Analiza ponašanja postojeće gornje gradnje (tabela 1)

Tabela 1. Analiza ponašanja postojeće gornje gradnje bagera C700S

Raspodela [%]		Postojeći model $\delta_g=2.4$ cm, $\delta_d=2.4$ cm
$f_{max}$ [mm]		5.244
$\sigma_{max}^{ekv}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]		<b>27.3</b>
$\sigma_{max}$	Stub	14
	Elementi ispod stuba	16
	Elementi veze stuba i cilindara	<b>27.3</b>
	Elementi veze stuba i radne strele	9
	Jaram i elementi veze stuba sa odložnom strelom	6
	Cilindri, dijafragme i elementi kontra tega	13
mem / sav	Stub	31.3 / 1.3
	Elementi ispod stuba	11.6 / 0.4
	Elementi veze stuba i cilindara	<b>20.4 / 1.2</b>
	Elementi veze stuba i radne strele	5.0 / 0.5
	Jaram i elementi veze stuba sa odložnom strelom	6.7 / 0.6
	Cilindri, dijafragme i elementi kontra tega	19.5 / 1.5
	Suma	94.5 / 5.5
$\sigma / \tau$	Stub	17.1 / 15.7
	Elementi ispod stuba	6.0 / 6.2
	Elementi veze stuba i cilindara	12.7 / 9.4
	Elementi veze stuba i radne strele	3.8 / 1.6
	Jaram i elementi veze stuba sa odložnom strelom	3.8 / 3.5
	Cilindri, dijafragme i elementi kontra tega	6.3 / 13.8
	Suma	49.7 / 50.3
$E_d$ [kNcm]		13274
$E_d$ relativ / apsolut	Stub	<b>24.6 / 27.3</b>
	Elementi ispod stuba	16.1 / 10.9
	Elementi veze stuba i cilindara	<b>34.3 / 39.3</b>
	Elementi veze stuba i radne strele	1.9 / 3.6
	Jaram i elementi veze stuba sa odložnom strelom	1.6 / 2.5
	Cilindri, dijafragme i elementi kontra tega	21.5 / 16.4

Zaključak analize glasi:

- najveći napon, njegovu koncentraciju i energiju deformisanja poseduju elementi veze stuba i cilindara
- stub i cilindri imaju nizak nivo napona na velikoj površini uz visok procentualni udeo u naponu i energiji
- jaram ima najmanji uticaj na ponašanje.

Na osnovu proračuna i analize proizilazi zaključak da loše ponašanje gornje gradnje možemo popraviti povećanjem debljine gornje i donje horizontalne ploče (zamena postojeće i povećanje njene debljine nije tehnički opravdano) elementa veze stuba i cilindra. Uvođenje novih ploča dovodi do značajnog poboljšanja ponašanja gornje gradnje kroz: smanjenje maksimalne deformacije za 10,96 %, smanjenje maksimalnog napona za 34 %, smanjenje energije deformisanja za 10.3 %, nivo koncentracije napona i energije deformisanja su značajno smanjeni. Izvedeni proračun i analiza nedvosmisleno ukazuju na potrebu povećanja debljine horizontalnih ploča. Ova rekonstrukcija je izvedena i bager uspešno radi.

### **ZAKLJUČAK**

Izloženi pristup rešavanja uzroka lošeg ponašanja elemenata konstrukcije i veliki broj rešenih problema ukazuje na neophodnost njegove primene. Održavanje konstrukcije i opreme na taj način postaje efikasnije uz znatno nižu cenu. Primena dijagnostike čvrstoće konstrukcije numeričko-eksperimentalnim pristupom je u potpunosti opravdan.

### **LITERATURA**

/1/ Maneski T., Kompjutersko modeliranje i proračun struktura, Monografija, Mašinski fakultet, Beograd (1998)

/2/ Maneski T., Rešeni problemi čvrstoće konstrukcija, Mašinski fakultet Beograd, (2002)

/3/ Ignjatović D., Maneski T., i dr., Projekti za PK Drmno-Kostolac, Beograd (2002-2004)

/4/ Ignjatović D., Maneski T., i dr., Projekti za PK Kolubara-Lazarevac, Beograd (2002-2004)

### **DIAGNOSTIC OF CONSTRUCTION SOLIDITY IN MAINTENANCE FUNCTION**

Basic diagnostic of carrier construction are actually computer mould and computation of carrier structure construction (KOMPIS) using numerical method of final elements.

KOMPIS manage mould and computation complex constructions and tasks, manage actual pictures deflection and stress, discover actual constructions bearing and construction elements, reliability prognosis of construction reaction in exploit, elements derivation of ( operation level, recovery, reconstruction, revitalization, optimization, affirmation of variation selection of solution and other), determining reason of poorly conduct or construction deterioration, rating of exploit duration (lifetime) and time of reliability construction work. Every bearing upgrade of construction which is possible to make with this approach, enable exploit prolongation of construction and raise construction reliability.

Key words: construction, stress, rent, maintenance