TERMOMEHANIČKA DIJAGNOSTIKA PONAŠANJA I POBOLJŠANJA VIJČANOG KOMPRESORSKOG AGREGATA

THERMOMECHANICAL DIAGNOSTICS OF THE SCREW COMPRESSOR UNIT'S BEHAVIOUR AND IMPROVEMENT

Prof. dr Taško Maneski, dipl. inž.,
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd

Vijčani kompresorski agregat instalisan na elektromotornom vozu radi u teškim termomehaničkim uslovima. Osnova dijagnostike ponašanja predstavlja proračun primenom metode konačnih elemenata. Ona omogućava sledeće: dobijanje realne slike ponašanja konstrukcije opreme, pouzdane prognoze reagovanja u eksploataciji, dobijanje elemenata za odlučivanje (režim rada, sanacija, rekonstrukcija, revitalizacija, optimizacija, izbor rešenja), utvrđivanje lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije i procenu čvrstoće i radnog veka.

A screw compressor unit installed in an electric motor train operates in heavy thermomechanical conditions. The basis of improvement diagnostics lies in a calculation by finite elements method. It provides the obtaining of an actual image of equipment structural behaviour, reliable prognosis of reaction in use, the obtaining of elements for decision-making (operation mode, readjustment, reconstruction, revitalization, optimization, solution choice), detection of faulty behaviour or construction weakening as well as the assessment of strength and operation life.

Ključne reči: vijčani kompresorski agregat; dijagnostika; elektromotorni voz; dinamičko ponašanje
Key words: screw compressor unit; diagnostics; electric motor train; dynamic behaviour

1. Uvod [1, 2, 3, 4]

Metodologija modeliranja i proračuna obuhvata analizu stanja, dijagnostiku ponašanja i popuštanja, procenu preostale čvrstoće i radnog veka i revitalizaciju konstrukcije. Analiza stanja i dijagnostika ponašanja konstrukcije objekta izvodi se na računaru primenom numeričke metode konačnih elemenata razvijenim sistemom kompjuterskog modeliranja i proračuna struktura KOMIPS. Ovaj pristup omogućava određivanje stvarnog ponašanja konstrukcije objekta, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije objekta, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, do-

bijanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije, procenu eksploatacionog veka i vremena pouzdanog rada konstrukcije.

Problemi nastali u eksploataciji opreme 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.

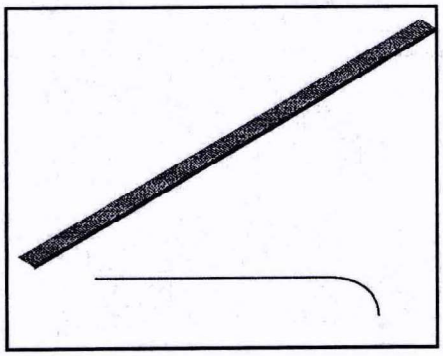
U inženjerskoj analizi nosećih konstrukcija primena izložene metodologije nameće se kao neminovnost. Ona ima opravdanje zbog vrlo niskih troškova primene, uz vrlo visok nivo rezultata.

2. Iznalaženje uzroka i eliminisanje pucanja cevi hladnjaka

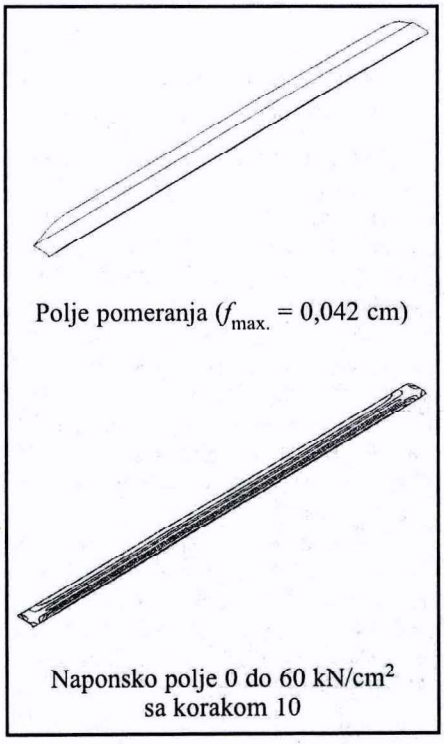
Cev dimenzija a x b = 41 x 6 mm i debljine t = 1 mm opterećena je unutrašnjim pritiskom od 0,1 kN/cm^2 (10 bara) i vezana za oba kraja za komore. Pošto su geometrija, opterećenje i oslanjanje simetrično po tri ravni simetrije, modeliranje možemo izvesti sa 1/8 cevi. Ovde smo usvojili 1/4 modela. Zbog male debljine cevi modeliranje možemo izvršiti pločastim elementima (slika 1).

Rezultati proračuna (polje pomeranja i napona – izonaponske linije i maksimalna deformacija i napon) prikazani su na slici 2. Vrednost napona od 60 kN/cm^2 ukazuje da na ovakvoj cevi u eksploataciji „mora" doći do pucanja. Ovako jednostavnim modelom smo odredili uzrok pucanja cevi.

Rezultati proračuna ukazuju da ukoliko se dovoljno udaljimo od oslanjanja cevi (oko oslonaca imamo manje napone), možemo primeniti uslov „ravnog stanja deformacije" (nema promene pomeranja i napona po dužini cevi). Modeliranjem poprečnog preseka cevi ravnim elementima (slika 3) dobijamo promenu



Slika 1. Modeliranje 1/4 cevi pločastim elementima



Slika 2. Rezultati proračuna

napona po debljini cevi. Rezultati proračuna (slika 3) u potpunosti potvrđuju prethodni model. Određivanje uzroka pucanja cevi sa oba modela potvrđeno.

Lokacija prskotine cevi je identična sa prskotinom cevi u eksploataciji.

Eliminisanje uzroka pucanja cevi može se izvesti „samo" usvajanjem cevi sa kružnim poprečnim presekom. Naponi u cevi sa kružnim poprečnim presekom mogu se odrediti obrascima iz teorije elastičnosti.

Naponi za $p = 0{,}1$ kN/cm^2; prečnik cevi 6, 8 i 10 mm ($R = 0{,}2$, 0,3 i 0,4 cm) i $t = 0{,}1$ cm su 0,17, 0,26 i 0,35 kN/cm^2.

Možemo primetiti da je napon u cevi sa kružnim poprečnim presekom opterećenoj zadatim unutrašnjim pritiskom veoma mali i može se zanemariti.

Izbor prečnika cevi treba izvršiti na osnovu potrebnog protoka i hlađenja fluida.

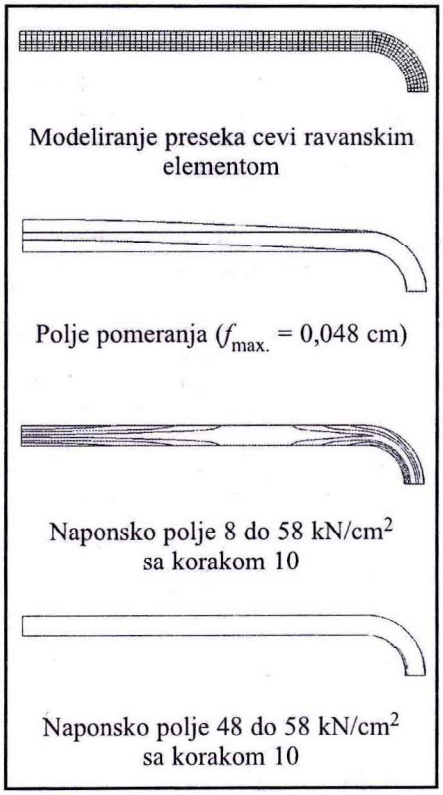
3. Analiza ponašanja postojećeg i poboljšanog oblika hladnjaka

Na osnovu dokumentacije kombinovanog uljno-vazdušnog hladnjaka, prišlo se njegovom modeliranju. Cevi su modelirane konačnim elementom grede, a komore i oslanjanje hladnjaka konačnim elementom ploče.

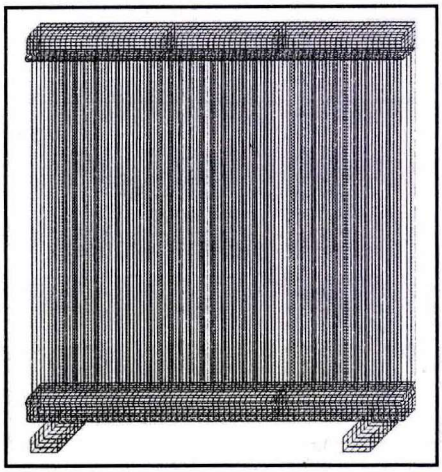
Pošto su geometrija, opterećenje (toplotno i unutrašnji pritisak) i oslanjanje simetrični po jednoj ravni, modeliranje hladnjaka izvodimo sa jednom polovinom. Raspored cevi uzet je naizmenično „pet–četiri" (44 reda za uljni deo i 22 reda za vazdušni).

Unutrašnji pritisak iznosi 0,1 kN/cm^2. Toplotno opterećenje je uzeto kroz linearnu raspodelu temperatura po hladnjaku, a na osnovu ulaznih i izlaznih temperatura za uljni i vazdušni deo uzetih iz dobijene dokumentacije.

Model polovine modela hladnjaka prikazan na slici 4 ima 3493 čvorne tačke, 2842 ploče i 1024 linija. Svim oslo-



Slika 3. Model poprečnog preseka cevi i rezultati proračuna



Slika 4. Model polovine hladnjaka

Tabela 1. Rezultati proračuna hladnjaka kompresora

Opterećenje	Pritisak	Temperatura	Prit. + temp.
$f_{max.}$ [cm]	0,034	0,072	0,091
σ [kN/cm^2]	11	10,7	14,4
Mem./sav. [%]	20/80	40/60	23/77
σ/τ [%]	92/8	83/17	90/10

nim tačkama, sem jedne, dozvoljeno je termičko širenje u uzdužnom i poprečnom pravcu (vertikalni pravac je fiksiran).

Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 1 i na slici 5.

Zaključak analize ponašanja hladnjaka vijčanog kompresora glasi:

1) dosta visok nivo napona;

2) nepovoljno naponsko polje uz prisustvo koncentracije napona;

3) procentualno učešće membranskog (M) u odnosu na savojni (S) napon veoma je nepovoljno.

Nedostatak koji se javlja pri opterećenju pritiska može se uspešno rešiti promenom oblika vazdušne i uljne komore. Minimiziranje napona usled toplotnog opterećenja može se uspešno izvesti razdvajanjem uljne (T = 85°C) i vazdušne (T = 25°C) komore. Ispitivanje ovog uticaja ovde nije urađeno pošto je on očigledan.

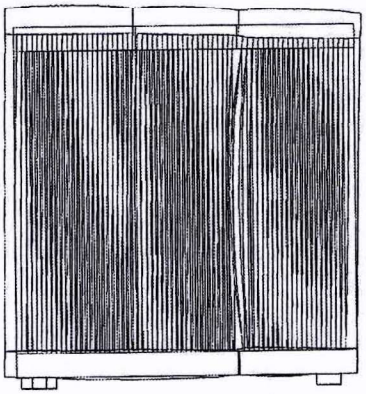
Novi oblik hladnjaka glasi:

– raspored i broj cevi identičan sa postojećim oblikom hladnjaka;

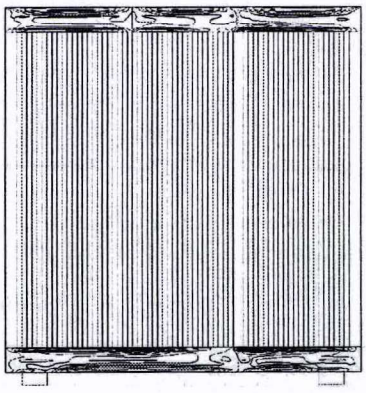
– komore imaju oblik polucevi sa srednjim radijusom od 33,5 mm i debljinm 3 mm i ravnim dancima debljine 3 mm; i

– komore su zavarene za ravnu ploču širine 67 mm + 2 x 1,5 mm + 2 x širina zavara i debljine 10 mm za koju su vezane cevi.

Model novog oblika hladnjaka vidi se na slici 6.



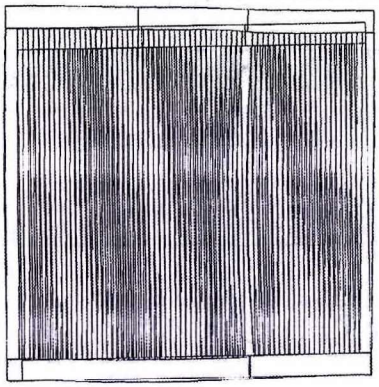
Polje pomeranja od opterećenja pritiska 0,1 kN/cm^2 i temperature ($f_{max.}$ = 0,091 cm)



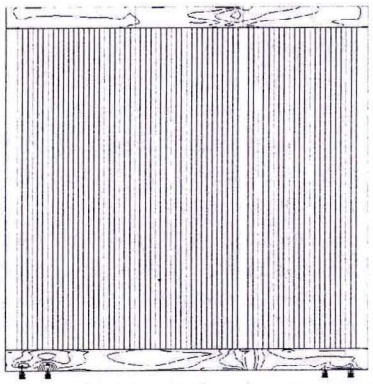
Naponsko polje od opterećenja pritiska 0,1 kN/cm^2 i temperature u rasponu 0,4 do 14,4 kN/cm^2 sa korakom 1

Slika 5

Slika 6. Model novog oblika hladnjaka.



Polje pomeranja od opterećenja pritiska 0,1 kN/cm^2 i temperature ($f_{max.}$ = 0,065 cm)



Naponsko polje od opterećenja pritiska 0,1 kN/cm^2 i temperature u rasponu 0 do 8 kN/cm^2 sa korakom 1

Slika 7

Rezultati proračuna novog oblika hladnjaka prikazani su na slici 7 i u tabeli 2.

Zaključak analize ponašanja novog oblika hladnjaka vijčanog kompresora glasi:

1) napon pri opterećenju pritiska je četiri puta manji uz eliminisanje njegove koncentracije;

2) temperaturni napon ostao je dosta visok, što potvrđuje potrebu razdvajanja komora;

3) procentualno učešće membranskog u odnosu na savojni napon pri opterećenju pritiska je veoma poboljšan u korist membranskog napona, što govori da smo poboljšali ponašanje.

Ovde smo pokazali da je novi oblik komora hladnjaka neophodan, kao i njihovo razdvajanje. Novi oblik hladnjaka ujedno je i poboljšan.

Tabela 2. Rezultati proračuna novog hladnjaka

Opterećenje	Pritisak	Temperatura	Prit. + temp.
$f_{max.}$ [cm]	0,006	0,063	0,065
σ [kN/cm^2]	2,7	8	8
Mem./sav. [%]	47/53	43/57	44/56
σ/τ [%]	91/98	83/17	84/16

4. Dinamičko ponašanje postojećeg i poboljšanog oblika hladnjaka

Dinamički proračun obuhvata samo slobodne neprigušene oscilacije, odnosno iznalaženje slobodnih (sopstvenih) oscilacija i glavnih (sopstvenih) oblika oscilovanja.

Proračun je urađen za postojeći i poboljšani model, sa ciljem da se odrede vrednosti slobodnih frekvenci oscilovanja i da se utvrdi da li poboljšani oblik ima pored statičkog i bolje dinamičko ponašanje u odnosu na postojeći. Model koji ima više frekvence i veća rastojanja između njih ima bolje dinamičko ponašanje.

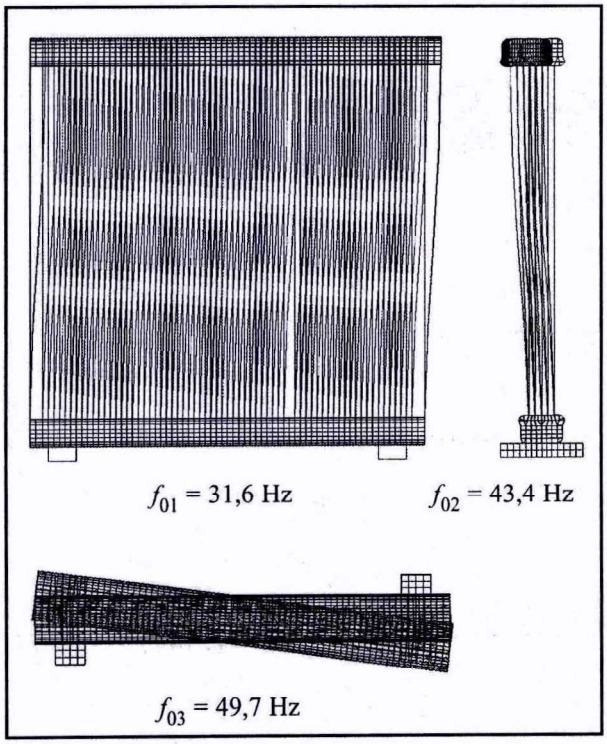
Dinamički proračun mora se izvesti sa celim modelom hladnjaka.

Model i prva tri glavna oblika oscilovanja postojećeg oblika hladnjaka sa vrednostima slobodnih frekvenci prikazani su na slici 8.

Dosta visoke frekvence ukazuju da konstrukcija hladnjaka ima dosta veliku krutost. Nedostatak ovog rešenja je bliskost frekvenci.

Ovako visoke frekvence nam govore da hladnjak ne može doći u korelaciju sa oscilovanjem voza, jer on ima niske frekvence oscilovanja (do 10 Hz).

Model i prva tri glavna oblika oscilovanja poboljšanog modela hladnjaka sa vrednostima slobodnih frekvenci vide se na slici 9.



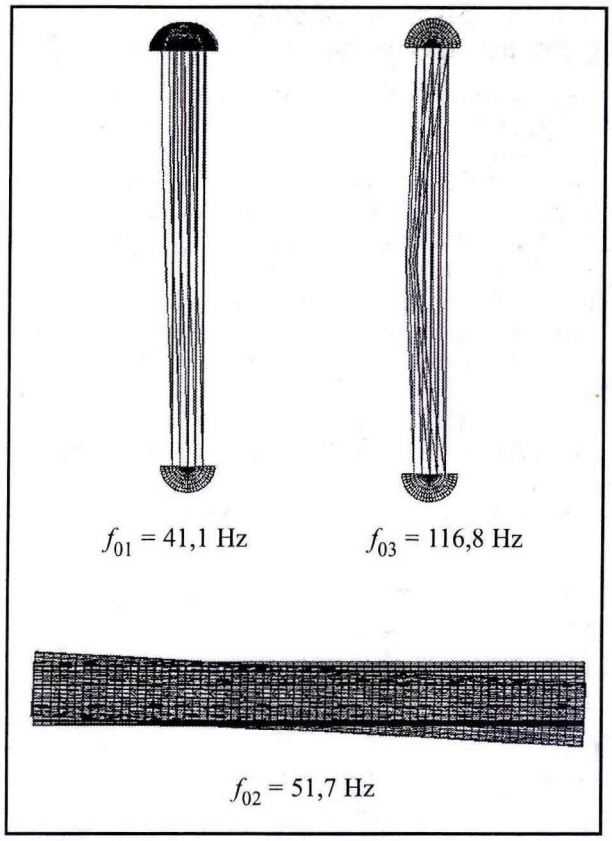
Slika 8. Prva tri glavna oblika oscilovanja postojećeg oblika hladnjaka

Novi blik hladnjaka doveo je do eliminisanja prvog oblika oscilovanja (veoma bitno poboljšanje), tako da su ostala važna samo prva dva oblika oscilovanja. Oscilovanje cevi (treći oblik) ima visoku vrednost frekvence i ono nije prisutno jer su cevi učvršćene horizontalnim perforiranim pločama koje ovde nisu modelirane.

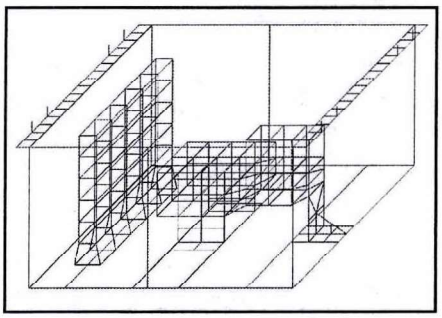
Novi oblik hladnjaka ima bolje i dinamičko ponašanje u odnosu na postojeće.

5. Dinamičko ponašanje postojećeg i poboljšanog oblika nosećeg rama vijčanog kompresora

Na osnovu dobijene originalne dokumentacije nosećeg rama prišlo se



Slika 9. Oblici oscilovanja poboljšanog modela



Slika 10. Model nosećeg rama

njegovom modeliranju. Osnova nosećeg rama modelirana je konačnim elementom grede. Oslanjanje rama, motora i vijčanog kompresora modelirano je konačnim elementom ploče. Motor, kompresor i hladnjak modelirani su zapreminama koje imaju ekvivalentnu krutost i masu.

Model nosećeg rama prikazan na slici 10 ima 503 čvorne tačke, 308 linijska elementa, 57 ploča i 55 zapremina. Analizom je obuhvaćena krutost – elastičnost oslanjanja rama za voz.

Ona je uzeta veoma kruta i elastična (dve krajnosti).

Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 3 i na slici 11.

Zaključak analize dinamičkog ponašanja nosećeg rama vijčanog kompresora glasi:

1) dosta niske prve tri frekvence i veoma malo rastojanje između njih;

2) elastično oslanjanje malo smanjuje frekvence i dovodi do zamene prve dve frekvence;

3) dominantan uticaj na ponašanje rama imaju četiri vertikalna „L" nosača.

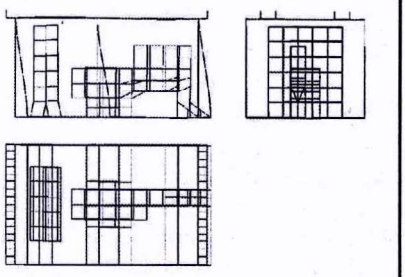
Ova analiza ukazuje na loše dimaničko ponašanje nosećeg rama.

Poboljšani model nosećeg rama treba da eliminiše identifikovanu nedovoljnu uzdužnu i poprečnu krutost nosećeg rama.

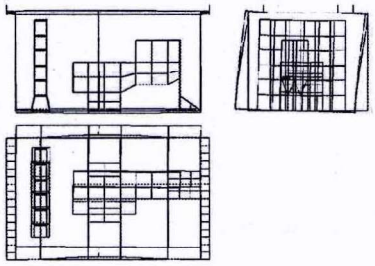
Efikasno povećanje krutosti možemo izvesti uvođenjem kosnika (dijagonale u ravni) u uzdužnom i poprečnom ramu. Pošto poprečni ram ima jedno polje, postavljanje dijagonale je jednoznačno određeno. Postavljanje dijagonale u uzdužnom ramu

Tabela 3. Rezultati proračuna hladnjaka kompresora

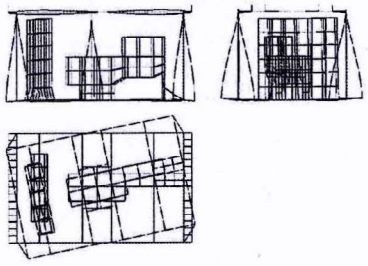
Oslanjanje	Kruto	Elastično
f_{01} [Hz]	7,6	6,94
f_{02} [Hz]	8,04	7,19
f_{03} [Hz]	13,8	13,16



f_{01} = 7,6/6,94 Hz – kruto/elastično oslanjanje

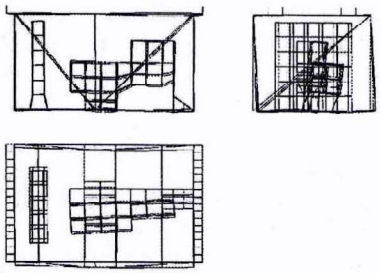


f_{02} = 8,04/9,19 Hz – kruto/elastično oslanjanje

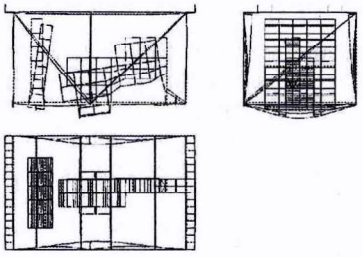


f_{03} = 13,8/13,16 – kruto/elastično oslanjanje

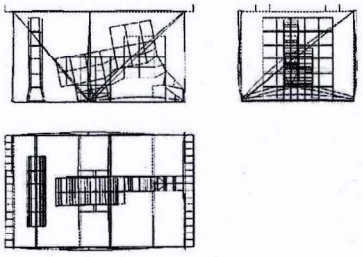
Slika 11. Glavni oblici oscilovanja za kruto i elastično oslanjanje rama



f_{01} = 32,65/18,7 Hz – kruto/elastično oslanjanje



f_{02} = 40,23/24,4 Hz – kruto/elastično oslanjanje



f_{03} = 43,48/31 Hz – kruto/elastično oslanjanje

Slika 12. Glavni oblici oscilovanja za kruto i elastično oslanjanje poboljšanog rama

koji ima dva polja moguće je na dva načina. Za ovu potrebu je pored postojećeg rama urađen statički proračun za obe varijante postavljanja dijagonala.

Rezultati ponašanja poboljšanja modela sa krutim i elastičnim oslanjanjem vide se na slici 12.

Povećanjem uzdužne i poprečne krutosti rama dobili smo značajno povećanje sopstvenih frekvenci, posebno kod modela sa krutim oslanjanjem. Uticaj elastičnog oslanjanja kod ovog modela je značajan. Sopstvene frekvence modela sa elastičnim oslanjanjem su takođe značajno veće u odnosu na postojeći model rama.

Usvajanje poboljšanog oblika nosećeg rama je neizbežno. Na osnovu ovog proračuna možemo zaključiti da oslanjanje rama treba da ima što veću krutost, uz sposobnost značajnog prigušenja oscilacija do 10 Hz (frekvence voza).

6. Zaključak

Analiza stanja i dijagnostika ponašanja konstrukcije objekta izvodi se na računaru primenom numeričke metode konačnih elemenata razvijenim sistemom kompjuterskog modeliranja i proračuna struktura KOMIPS. Ovaj pristup omogućava određivanje stvarnog ponašanja konstrukcije opreme, pouzdanu prognozu reagovanja konstrukcije u eksploataciji, dobijanje parametara izbora i odluka, određivanje uzroka lošeg ponašanja ili popuštanja konstrukcije i procenu eksploatacionog veka i vremena rada.

Literatura

[1] **Maneski, T., R. Čukić:** *Termomehanička analiza ponašanja energetske i procesne opreme numeričkim postupkom,* KGH 2000, SMEITS, Beograd, 2000.

[2] **Maneski, T.:** *Kompjutersko modeliranje i proračun struktura – KOMIPS,* monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.

[3] **Maneski, T.:** *Dijagnostika ponašanja i popuštanja konstrukcije pomoću KOMIPS-a,* V CAD forum, Novi Sad, 1999.

[4] ***: *Projekti i radovi iz ove oblasti,* Beograd, 1980–2000.