

APLIKATIVNI ZNAČAJ OPTIMIZACIJE VIBRODIJAGNOSTIČKOG MODELA KOD TURBO PUMPI

Mr Miloš Milovančević
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu

Milan Cvetković
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu

Optimizacija vibrodijagnostičkog modela podrazumeva definisanje minimalnog broja vibrodijagnostičkih formata, sa kojima se može jednoznačno i nedvosmisleno dijagnostikovati širok spektar grešaka na svim tipovima rotacionih mašina, odnosno turbo pumpi u standardnoj upotrebi.

U ovom istraživanju optimizacija je više sagledana sa aspekta nove formulacije optimizacionog problema, nego sa aspekta matematičkog aparata za rešavanje problema. Optimizacija se u ovom slučaju zasniva na utvrđivanju verovatnoće pojave određenog defekta kod turbo pumpi i implementacije kauzalnih odnosa između dijagnostičkih modela i definisanih vrednosti funkcija cilja.

Ključne reči: vibro-dijagnostika, optimizacija, turbo-pumpe

UVOD

Optimizacija vibrodijagnostičkog modela podrazumeva definisanje takvog modela koji ispunjava uslov da se sa minimalnim brojem vibracionih formata ispitivanja, jednoznačno dijagnostikuje veliki spektar otkaza na svim tipovima rotacionih mašina. Nalaženje optimalnog rešaja za konkretnu strukturu definisane namene, znači izbor parametara strukture tako da funkcija postavljenog cilja dostigne maksimalnu vrednost. Vrednosne funkcije koje sačinjavaju funkciju cilja, predstavljaju komponente od kojih se formira konačna ocena. Pojedinačne vrednosti parcijalnih funkcija cilja, definišu se težinskim faktorom koji se dodeljuje pojedinanim parcijalnim funkcijama u zavisnosti od prioriteta pojedinih funkcija. Vrednosti parcijalnih funkcija cilja su neposredno zavisne od parametara optimizacije, dok su oni u sprezi sa osnovnim nezavisno promenljivim veličinama. Sve prethodno navedeno čini hijerarhijski lanac optimizacije, koji kao celina predstavlja univerzalnu formulu za traženje optimalnog rešenja.

POSTAVKA PROBLEMA OPTIMIZACIJE

Funkcija postavljenog cilja u našem konkretnom slučaju je izbor optimalnog seta formata vibro-

dijagnostike koji daje maksimalnu mogućnost detekcije, selekcije i verifikacije dinamikog problema uz ekonomsku opravdanost i jednostavnost u korišćenju. Međutim, može se zaključiti da je postojanje dinamičkog problema karakteristično za određenu grupu rotacionih mašina, gde se one mogu razvrstati u određene grupe zavisno od nominalne snage pogona, broja obrtaja, izvedbe temelja i dr. Tako, npr. po standardu ISO 10816 sve mašine su razvrstane u četiri klase i za svaku od tih klasa date su preporuke za dopušteni nivo vibracija, merna mesta vibracija, način merenja i izbor mernih parametara. Moguće je izvršiti dalje spajanje određenih klasa mašina, uzimajući u obzir verovatnoću mogućih uzroka dinamičkog problema, u dvije generalne grupe:

GRUPA 1 (G1)

- Mašine klase I shodno standardu ISO 10816, Električne mašine do 15 kW
- Mašine klase II shodno standardu ISO 10816, Srednje mašine, elektromotori snage 15 do 75 kW bez posebnog temelja i rotacione mašine sa posebnim temeljom snage do 300 kW

Osnovna karakteristika ove grupe mašina je uležištenje sa kotrljajućim ležajevima. Najčešći uzroci dinamičkog problema ove grupe mašina su: neuravnoteženost, defekti kotrljajućih leža-

eva, nesaosnost i greške oslanjanja. Ređe se javljaju greške električnog porekla, oštećenje zupčanika, greške nastale delovanjem aerodinamičkih i hidrauličnih sila defekti u remenim prenosnicima, defekti nastali usled pulzacije i dodiri rotora od stator.

GRUPA 2 (G2)

- Mašine klase III shodno standardu ISO 10816, velike mašine (iznad 300 kW sa visokofrekventnim i teškim temeljima)
- Mašine klase IV shodno standardu ISO 10816, velike mašine sa niskofrekventnim temeljima u koje spadaju turbo agregati.

Osnovna karakteristika ove grupe mašina je uležištenje sa kliznim ležajevima. Najčešći uzroci dinamičkog problema na ovim mašinama su: neuravnoteženost, nesaosnost, defekti kliznih ležajeva, greške oslanjanja i rezonantne pojave. Ređe se javljaju greške električnog porekla, greške nastale delovanjem aerodinamičkih i hidrauličnih sila, dodiri (struganje) rotora o stator i anizotropnost rotora. Na osnovu naših istraživanja, tokom dugogodišnjeg rada ispitano je preko hiljadu turbo agregata, koristeći se i drugim literaturnim izvorima, statistički se došlo do podataka o učestalosti uzroka dinamičkog problema u realnim uslovima eksploatacije za ove dvije grupe mašina, kao što je prikazano na sledećim tabelama.

Tabela 1. Verovatnoća pojave određenog defekta kod mašina (G1)

Vrsta oštećenja	
Nesaosnost	17.5%
Greške kotrljajućih ležajeva	27.5%
Greške oslanjanja	7.5%
Neuravnoteženost	40%
Ostali defekti	7.5%

Tabela 2. Verovatnoća pojave određenog defekta kod mašina (G2)

Vrsta oštećenja	
Nesaosnost	15%
Greške kliznih ležajeva	15%
Greške oslanjanja	15%
Neuravnoteženost	25%
Rezonantne pojave	15 %
Ostali defekti	15%

Svaki od ovih defekata može se otkriti, sa određenom verovatnoćom, koristeći odgovarajući vibrodijagnostički format, karakterističan za tu vrstu defekta.

Pri izbor određenog seta formata polazi se od zahteva da to bude minimalan broj vibrodijagnostičkih formata koji jednoznačno mogu otkriti postojanje određenog uzroka dinamičkog problema u mašinskim sistemima. Minimalni set formata vibrodijagnostike, koji se smatra neophodnim, treba da sadrži: merenje ukupnog nivoa vibracija, spektralnu analizu, fazni status i vremensku sliku signala. Ostali vibrodijagno-

tički setovi su odabrani tako da sadrže minimalan broj vibrodijagnostičkih formata iz određene grupe formata.

Pregled izabranih dijagnostičkih setova je prikazan u tabeli 3.

Za traženje maksimuma funkcije postavljenog cilja, nezavisno za pomenute grupe mašina, posmatrali su se odgovarajući dijagnostički modeli. Preporučena kompozicija setova u namenske dijagnostičke modele prikazana je u tabelama 4a i 4b.

Tabela 3. Pregled izabranih vibrodijagnostičkih setova

SET A	SET B	SET C	SET D	SET E	SET F	SET G
Merenje ukupnog nivoa vibracija	HFD nivo	Envelop spektralni prikaz	Bodeov prikaz	Kaskadni spektralni prikaz	Smax	Modalni oblik oscilovanja
Spektralni prikaz					X-Y pozicija	
Polarni trend prikaz					Orbitalni prikaz	
Vremenska slika signala						

Tabela 4a. Kompozicije setova za mašine (G1)

Za mašine GRUPE 1					
Oznaka	Model I	Model II	Model III	Model IV	Model V
Kompozicija setova	A	A+B	A+B+C	A+B+C+E	A+B+C+E+G

Tabela 4b. Kompozicije setova za mašine (G2)

Za mašine GRUPE 2					
Oznaka	Model I	Model VI	Model VII	Model VIII	Model IX
Kompozicija setova	A	A+D	A+D+E	A+D+E+F	A+C+D+E+F+G

Tokom istraživanja došlo se do zaključka da se optimalni dijagnostički model, odnosno optimalni set formata vibrodijagnostike, može u potpunosti sagledati kroz četiri vrednosne funkcije:

- identifikacija uzroka dinamičkog problema
- jednostavnost primene
- rana detekcija dinamičkog problema
- ekonomski aspekt

IDENTIFIKACIJA UZROKA DINAMIČKOG PROBLEMA

Prilikom stvaranja vrednosne funkcije po ovom kriterijumu uzeta je u obzir verovatnoća dešavanja pojedinih dinamičkih problema za realne uslove eksploatacije. Takođe, svaki od vibrodijagnostičkih formata daje deo informacije o postojanju datog problema, tako da treba uzet u obzir i verovatnoću detekcije problema za određeni format.

Analizirajući prethodne činjenice može se doći do obrasca za izračunavanje vrednosne funkcije za pojedine vibrodijagnostičke formate, odnosno setove vibrodijagnostičkih formata, po ovom

$$\text{kriterijumu: } \Gamma = \frac{\sum_{i=1}^n I \cdot \Pi}{100}$$

- Γ -identifikacija uzroka dinamičkog problema,

- I-parcijalna verovatnoća pojave određenog defekta,
- Π -verovatnoća detekcije uzroka dinamičkog problema,
- n-broj selektovanih grupa uzoraka, za (G1) $n=350$, za (G2) $n=400$

Vrednosna funkcija po ovom kriterijumu za pojedine od izabranih modela (setova vibrodijagnostičkih formata) za mašine (G1) je prikazana u tabeli 5a i 5b.

Tabela 5a. Vrednost funkcije po kriterijumu identifikacije uzroka dinamičkog problema za (G1)

Tip analizatora	Γ
Model I	80.5%
Model II	85.5%
Model III	89%
Model IV	90.5%
Model V	91%

Tabela 5b. Vrednost funkcije po kriterijumu identifikacije uzroka dinamičkog problema za (G1)

Tip analizatora	Γ
Model I	81%
Model VI	87%
Model VII	90%
Model VIII	92.3%
Model IX	93.7%

Jednostavnost u korišćenju i izvođenju

Vrednosna funkcija po ovom kriterijumu će se formirati uzimajući u obzir sledeće parametre, sa određenim koeficijentom značaja (χ):

1. setovanje i podešavanje instrumenta, $\chi=0,3$
2. prepoznatljivost uzroka dinamičkog problema, $\chi=0,3$
3. postavljanje mernih senzora, $\chi=0,2$
4. memorisanje i prenos rezultata, $\chi=0,2$

Jednostavnost u korišćenju i izvođenju definiemo:

$$\xi = \lambda \cdot N$$

λ -koeficijent značaja

N- vrednost pojedinih parametara

Tabela 6. Jednostavnost u korišćenju i izvođenju

Tip analizatora	
Model I	100
Model II	100
Model III	87,5
Model IV	62,5
Tip analizatora	
Model V	40
Model VI	75
Model VII	52,5
Model VIII	37,5
Model IX	12,5

RANA DETEKCIJA UZROKA DINAMIČKOG PROBLEMA

Pri stvaranju vrednosne funkcije po ovom kriterijumu, slično kao po kriterijumu jedan, uzeta je u obzir verovatnoća dešavanja pojedinih dinamičkih problema za realne uslove eksploatacije i verovatnoća rane detekcije problema za određeni set izabranih formata. Analizirajući prethodne činjenice može se doći do obrasca za izračunavanje vrednosne funkcije za određeni set vibrodijagnostičkih formata.

$$\Psi = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot \Lambda_i}{100}$$

Ψ - vrednosna funkcija po kriterijumu rana detekcija uzroka dinamičkog problema

g_i - parcijalna verovatnoća pojave određenog defekta

Λ - verovatnoća detekcije uzroka dinamičkog problema u ranoj fazi nastajanja

n-broj selektovanih grupa uzoraka

Vrednosna funkcija po ovom kriterijumu za pojedine od izabranih modela (skupa vibrodijagnostičkih formata), za različite grupe mašina, prikazana u sledećim tabelama.

Tabela 7a. Vrednosna funkcija za mašine G1

Tip analizatora	Ψ
Model I	37,5
Model II	60
Model III	62
Model IV	74
Model V	76

Tabela 7b. Vrednosna funkcija za mašine G2

Tip analizatora	Ψ
Model I	50
Model VI	72
Model VII	81
Model VIII	88,5
Model IX	90

EKONOMSKI ASPEKT

Pri stvaranju vrednosne funkcije po ovom kriterijumu uzećemo u obzir sledeće parametre, sa određenim koeficijentom značajnosti:

- cena instrumenta, $\delta=0,3$
- cena programske podrške, $\delta=0,3$
- troškovi održavanja, $\delta=0,3$
- troškovi operatorske obuke i potrebnih stručnih saveta, $\delta=0,1$

Pojedini od parametara vrednosne funkcije mogu imati jednu od vrednosti: 25, 50, 75 ili 100. Vrednost pojedinih parametara za pojedine modele data je u sledećoj tabeli.

Tabela 8. Vrednosni parametri ekonomske funkcije

Tip analizatora	Cena hardvera	Cena softvera	Troškovi održavanja	Troškovi obuke
Model I	100	100	100	100
Model II	75	75	100	100
Model III	75	50	75	75
Model IV	75	25	50	50
Model V	25	0	25	25
Model VI	100	75	75	75
Model VII	100	50	50	50
Model VIII	25	25	0	25
Model IX	0	0	25	25

Tabela 9. Ekonomski aspekt posmatranih modela analizatora

Tip analizatora	Ekonomski aspekt
Model I	100
Model II	92,5
Model III	82,5
Model IV	65
Model V	17,5
Model VI	82,5
Model VII	65
Model VIII	42,5
Model IX	10

Sada možemo izračunati vrednosne funkcije za pojedine izabrane modele po postavljenom kriterijumu, koristeći sledeće obrazac.

Ekonomski aspekti - $E = k_z \cdot n$

Gde je:

k_z - koeficijent značajnosti parametra

n - vrednost pojedinih parametara

Vrednosna funkcija za pojedine modele prikazana je u sledećoj tabeli.

VREDNOST FUNKCIJE POSTAVLJENOG CILJA

U narednim tabelama su prikazane vrednosne funkcije za posmatrane analizatora, za posmatrane grupe mašina.

Tabela 10a. Vrednosne funkcije posmatranih modela analizatora za mašine (G1)

GRUPA 1				
Tip analizatora	Identifikacija uzroka dinamičkog problema	Jednostavnost u korišćenju i izvođenju	Rana detekcija uzroka dinamičkog problema	Ekonomski aspekt
Model I	80,5	100	37,5	100
Model II	85,5	100	60	92,5
Model III	89	87,5	62	82,5
Model IV	90,5	62,5	74	65
Model V	91	40	76	17,5

Zaokruživši proračun vrednosti funkcija, sada smo u situaciji da damo konačnu sliku o optimalnom setu vibrodijagnostičkih formata za posmatrane grupe mašina. Pojedinačne vrednosti stepena značajnosti za odgovarajuće vrednosne funkcije su

uzete:

- Identifikacija uzroku dinamičkog problema $y=0,5$
- Jednostavnost u korišćenju i izvođenju $y=0,2$
- Rana detekcija uzroka dinamičkog problema $y=0,2$
- Ekonomski aspekt $y=0,2$

Funkcija cilja se formira od već definisanih vrednosnih funkcija uzetih sa pripadajućim stepenom značajnosti. Tako da vrednost funkcije cilja možemo izračunati koristeći obrazac:

Vrednost funkcije cilja $\Delta = \sum y_i \cdot V_i$

gde je:

V_i - vrednost odgovarajuće vrednosne funkcije

y_i - odgovarajući stepen značajnosti pripadajuće vrednosne funkcije

Izračunate vrednosti funkcije cilja za pojedine modele date su u sledećim tabelama

Tabela 11a. Vrednost funkcije cilja posmatranih mode za mašine (G1)

Tip analizatora	Vrednost funkcije cilja (Δ)
Model I	78,75
Model II	84,00
Model III	82,65
Model IV	79,05
Model V	70,45

Tabela 11b. Vrednost funkcije cilja posmatranog modela za mašine (G1)

Tip analizatora	Vrednost funkcije cilja (Δ)
Model I	80,5
Model VI	81,2
Model VII	78,2
Model VIII	75,6
Model IX	67,4

Iz prethodnih analiza može se zaključiti, da je optimalna kompozicija setova vibrodijagnostičkih formata, koji imaju maksimalnu mogućnost identifikacije uzroka dinamičkog problema sa mogućnošću ranog otkrivanja defekta uz jednostavnost u korišćenju i izvođenju, uzimajući u obzir i ekonomski aspekt, sledeći modeli:

Za mašine GRUPE 1 (G1), optimalni vibrodijagnostički model je Model II. Njegova programska struktura sadrži: osnovni set formata i prikaz HFD nivoa.

Za mašine GRUPE 2(G1), optimalni vibrodijagnostički model je Model VI. Njegova programska struktura sadrži: osnovni set formata i Bode-ov prikaz

APLIKATIVNI PRISTUP ANALIZI

GRUPE MAŠINA G1

Crpna stanica "Ljuberađa"

- BP 250–5 agregat sa rednim brojem 1-

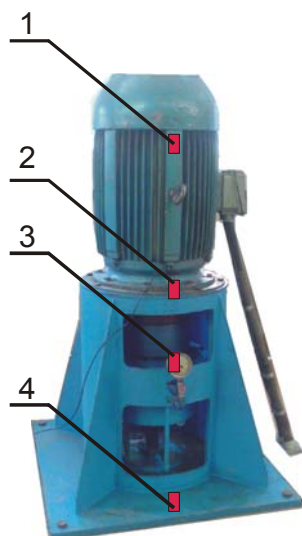
Tehnički podaci agregata:

Redni broj agregata:	1
Serijski broj agregata:	6539
Tip elektromotora:	ZKT 315 M4
Tip pumpe:	250-5
Broj obrtaja:	1485 o/min
Snaga elektromotora:	132 KW

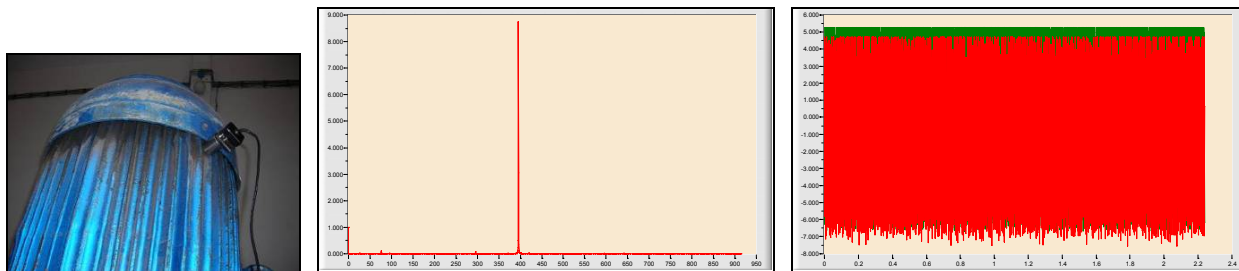


Bunarske pumpe za transport sirove vode imaju značajnu ulogu u transportovanju neprerađene vode. Ova uloga bunarskih pumpi definiše i značaj obezbeđivanja bezotkaznog rada. Elektro motori bunarskih pumpi su izuzetno opterećeni sa aspekta kontinualne eksploatacije u cilju održanja neprekidnosti radnog procesa. Pravilan izbor mernih mesta na pumpnom agregatu bunarske pumpe može da ukaže na stanje radne ispravnosti ležaja i rotora elektro-motora takođe ležaja i spojnice pumpnog agregata kao i kompletne konstrukcije agregata. Izabrana su sledeća merna mesta:

- Prva merna pozicija izabrana u cilju utvrđivanja stanja radne ispravnosti ležaja na gornjem delu elektro-motora
- Drugo merno mesto definisano je tako da se utvrdi stanje donjeg ležaja pogonskog elektromotora
- Treća merna pozicija određena je tako da je moguće utvrditi stanje ležaja pumpe ali i elastične spojnice.
- Četvrto merno mesto je definisano tako da je moguće utvrditi vibracije koje se javljaju usled nelinearnog oscilovanja kompletnog pumpnog agregata.

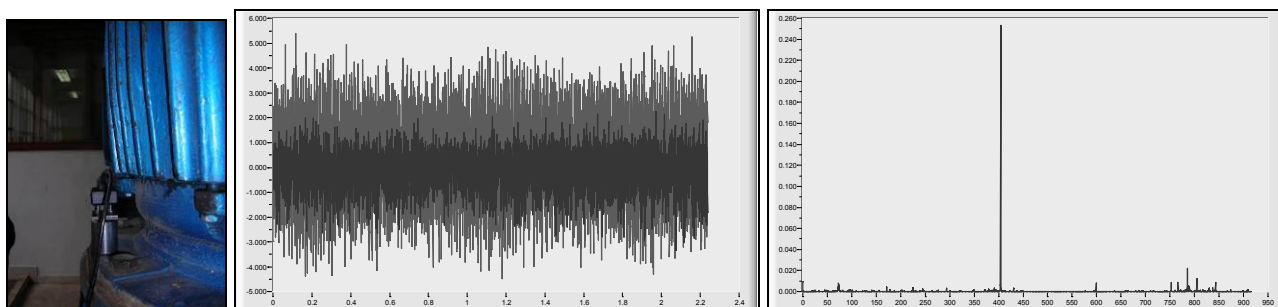


Slika 1. Merna mesta na bunarskom pumpnom agregatu



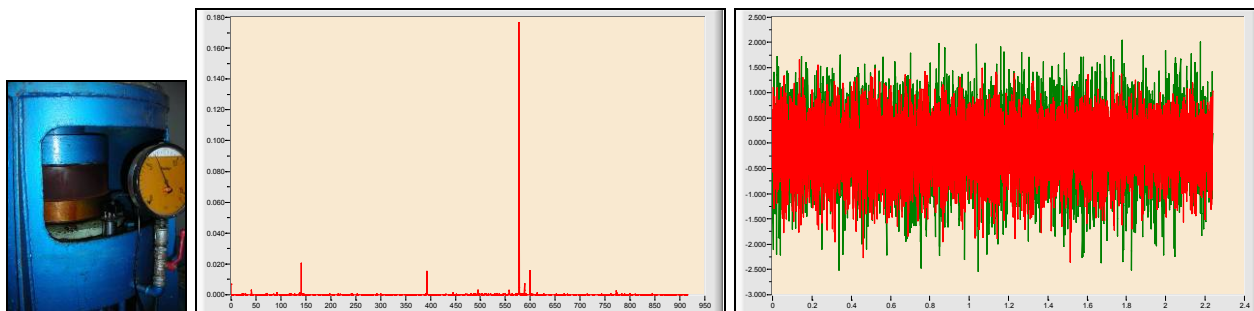
Slika 2. Prvo merno mesto

Na prvom mernom mestu javlja se veliko horizontalno i vertikalno ubrzanje koje ide i do 6 m/s^2 . Ubrzanje na ovom mernom mestu ne bi smelo da bude preko $2 \text{ m/s}^2 - 2,5 \text{ m/s}^2$. Takođe uočavamo veliku amplitudu na frekvenci od 400 Hz.



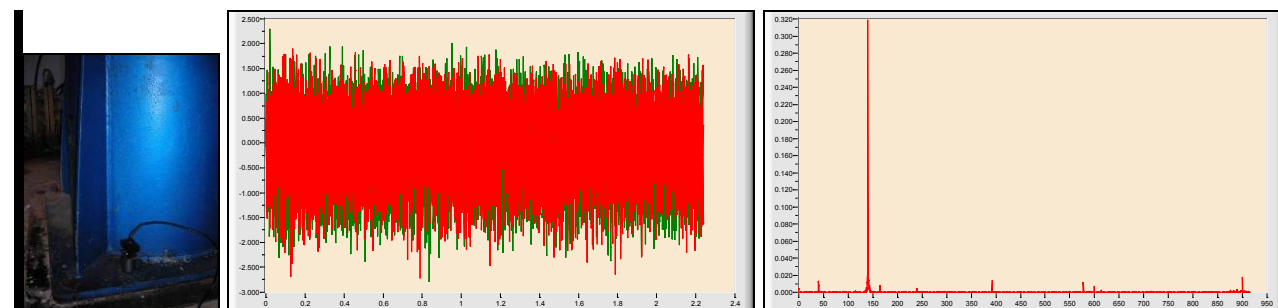
Slika 3. Drugo merno mesto

Na drugoj mernoj poziciji se takođe javlja visoka amplituda na identičnoj frekvenci (400 Hz) pa na osnovu toga zaključujemo da vibracije potiču od samog poklopca elektromotora. Takođe je moguća pojava debalansa vratila. Sto se tiče gornjeg i donjeg ležaja samog pogonskog agregata oni su u dobrom stanju. Takođe zaključujemo da je vratilo dobro izbalansirano.



Slika 4. Treće merno mesto

Treće merno mesto karakteriše ubrzanje koje je u granicama normale tako da zaključujemo da je ležaj na tom mestu u ispravnom stanju. Niska amplituda na frekvenci od 580 Hz pokazuje da je spojnica u ispravnom stanju. Sam ležaj na pumpi je u korektnom stanju.



Slika 5. Četvrto merno mesto

Četvrto merno mesto je na samom postolju. Oдавde konstatujemo da je pumpni agregat dobro pričvršćen za podlogu (dobro ankerisan) jer se javljaju ubrzanja do 2 m/s^2 što je ispod dozvoljene granice. Ravnomerne horizontalne i vertikalne vibracije postolja ukazuju na to da su svi zavrtnji jednako stegnuti.

ZAKLJUČAK

Optimizacija metoda vibrodijagnostike, odnosno izbor optimalnog modela analizatora, koji u programskoj strukturi sadrže potrebne setove vibrodijagnostičkih formata predstavlja složen postupak koji se zasniva kako na teorijskim tako i na empirijskim podacima.

U toku merenja praćena je radna ispravnost ležajeva elektromotora i pumpi, kao i nivo vibracija koje se javljaju usled nelinearnog oscilovanja kompletnih pumpnih agregata: višestepenih bunarskih pumpi. Merna mesta određivana su shodno konstrukciji i mogućem pristupu samo pumpnom postrojenju.

Na osnovu izvršenih merenja može se reći da ovakav pristup praćenja rada pumpnih postrojenja omogućava utvrđivanje radne ispravnosti vitalnih organa pumpnih agregata i njihov nadzor u cilju sprečavanja velikih otkaza i kontinualnog snabdevanja vodom velikog broja potrošača.

LITERATURA

- /1/ N. Matić, D. Andrić, 2000 PIC mikrokontroleri, Mikroelektronika Beograd.
- /2/ Grjanko L. P., Papir A N. 1975 Lopastnie nososi, Mašinstroenie Leningrad
- /3/ D. Cvetković, D. Milenković, 1995 Vibrations of centrifugal pump aggregates, Proceedings Mechanical system and elements research and development, IRMES
- /4/ Goldam P. Muszynska A. 1999 Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics, Orbit
- /5/ Pejović S., Gajić A., Stojanović Z., 1995 Hidraulične prelazne pojave i ekonomičnost pumpnih sistema, 21 jugoslo-

venski kongres teorijske i primenjene mehanike, Niš.

- /7/ Milenković D. 1988 Nestabilno strujanje kroz kola turbomašina izazvano globalnim gubitkom stabilnosti, 18. jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike, Vrnjačka Banja.
- /8/ Milovančević, M., Miltenović, A.: Virtualna ispitivanja železničkih vozila. Naučno-stručni časopis „Istraživanja i projektovanja za privredu”. Br.16. 2007. st.7-14.
- /9/ Milovančević, M.: Dijagnostika dinamičkog ponašanja železničkih vozila, „Istraživanje i projektovanje za privredu“ Naučno-stručni časopis “Istraživanja i projektovanja za privredu”, br. 15. 2007 god. V.,st. 67-72

APPLICATIVE APPROACH TO VIBRO-DIAGNOSTIC MODEL OPTIMIZATION FOR TURBO PUMPS

Optimization of vibrodiagnostic model implies defining of the minimal number of vibrodiagnostic formats, which could be used for precise and definite, diagnose of broad spectar of errors with all types of rotational machines, i.e. turbo pumps in standard use.

Optimization in this research is analyzed more from the aspect of the optimization problem new formulation, then from the aspect of mathematical apparatus for solving the problem. In this case, the optimization is based on establishing the possibility of certain defect appearance at turbo pumps and implementation of causal relations between diagnostic model and defined goal functions values.

Key words: vibro-diagnostics, optimization, turbo-pumps

Rad poslat na recenziju: 12.06.2009. godine

Rad spreman za objavu: 07.07.2009. godine