

# Procjena radnog stanja kotrljajnih ležajeva uz softversku podršku

Biljana Marković, Jelica Anić, Aleksandar Košarac

Mašinski fakultet Istočno Sarajevo

Univerzitet u Istočnom Sarajevu

Istočno Sarajevo, RS, BiH

[biljamarkovic@yahoo.com](mailto:biljamarkovic@yahoo.com), [jelicaanic91@gmail.com](mailto:jelicaanic91@gmail.com), [akosarac@gmail.com](mailto:akosarac@gmail.com)

**Sadržaj**—Ležajevi su mašinski elementi čiji je zadatak da omoguće relativno kretanje obrtnih dijelova uz istovremeno prenošenje opterećenja između njih i obezbjeđenje tačnosti njihovog položaja. Mogućnosti otkaza ovog elementa su veoma velike, a s obzirom na visok procenat prevremeno uništenih ležajeva, razvijene su brojne metode za detekciju, ne samo oštećenog stanja kotrljajnog ležaja, već i za identifikaciju tipa otkaza ležaja. Jedna od metoda za detekciju je vibrodijagnostika. U ovom radu prikazana je primjena savremenih vibrodijagnostičkih metoda za utvrđivanje stanja ispravnosti kotrljajnih ležajeva, sa ciljem prediktivnog održavanja tehničkih sistema, uz podršku softvera za analizu rezultata ispitivanja.

**Ključne riječi:** kotrljajni ležaj, oštećenje, vibrodijagnostika, software

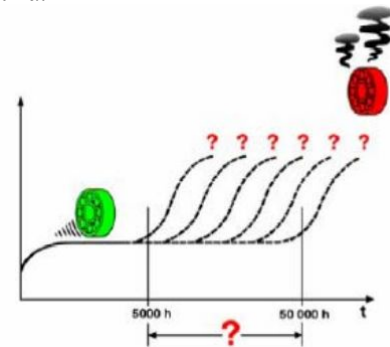
## I. UVOD

Ležajevi su mašinski elementi čiji je zadatak da omoguće relativno kretanje obrtnih dijelova uz istovremeno prenošenje opterećenja između njih i obezbjeđenje tačnosti njihovog položaja. Prvenstveno se koriste kod pokretnih veza sa kružnim kretanjem, kao na primjer u osloncima vratila i osovinama, gdje omogućuju obrtanje rukavca u odnosu na nepomični oslonac, uz istovremeno prenošenje odgovarajućeg opterećenja. Pored toga primjenjuju se i kod spojeva sa pravolinijskim i zavojnim kretanjem, kao na primjer kod vođica i navojnih parova.

Kotrljajni ležajevi se smatraju glavnim „krivcima” za otkaze na mašinama. Ovakvo mišljenje je u najmanju ruku neopravdano, jer je kotrljajni ležaj projektovan da radi dugi niz godina, ali isključivo u slučaju postojanja adekvatnih uslova njegove eksploatacije. Prema nekim analizama manje od 10% ležajeva doživi svoj projektovani vijek. Vijek eksploatacije kotrljajnog ležaja je nepredvidiv. Analize takođe pokazuju da se moguća odstupanja kreću i do 20 puta u odnosu na teorijski vijek ležaja (Sl. 1).

Mogućnosti otkaza ovog elementa su veoma velike. Oko 40% otkaza ležaja predstavlja posledicu neodgovarajućeg podmazivanja, 30% otkaza javlja se zbog nepravilne montaže, 20% otkaza se javlja kao posljedica različitih uzroka: preopterećenja, greške u proizvodnji ležaja itd., [1]. Pomenuti neplanski zastoji i havarije direktno utiču na smanjenje produktivnosti pogona, dodatne troškove održavanja, a u

ekstremnim situacijama čak mogu dovesti i do gubitka ljudskih života. Većina defekata kotrljajnih ležajeva se razvija postepeno, što ostavlja korisniku dovoljno vremena za pravovremeno sprovođenje aktivnosti održavanja, čime se izbjegavaju štete u proizvodnom procesu usljed iznenadnog otkazivanja ležaja. S obzirom na visok procenat prevremeno uništenih ležajeva, razvijene su brojne metode za detekciju, ne samo oštećenja kotrljajnog ležaja, već i za identifikaciju tipa otkaza ležaja. Jedna od metoda za detekciju, kako otkaza kotrljajnih ležaja, tako i drugih elemenata tehničkih sistema, je vibrodijagnostika.



Slika 1. Vijek trajanja ležaja – odstupanja

## II. MEHANIZMI NASTANKA OŠTEĆENJA U LEŽAJU

Pojava prevremenog oštećenja kotrljajnih ležajeva može nastati usljed velikog broja faktora, pri čemu su najčešći: zamorni lom, habanje, plastična deformacija komponenti ležaja, korozija, loše podmazivanje, nepravilna montaža, neadekvatan izbor. Često se gore pomenuti uzroci preklapaju, a nije rijedak slučaj i da jedan tip uzroka inicira oštećenje, a da kasnije drugi mehanizam stradanja izazove potpuno uništenje ležaja [1].

U cilju otkrivanja navedenih faktora vrši se ispitivanje ležaja. Oštećenje ležaja utiče na smanjenje produktivnosti mašine, kao i na dodatne troškove održavanja. Iz tog razloga razvijen je veliki broj metoda za procjenu stanja kotrljajnih ležajeva.

Sveobuhvatnost vibrodijagnostike je najbolje ilustrovana u Tabeli I gdje su prikazani neki od najčešćih tehničkih otkaza cijelog sistema i naznačeno koje su od metoda tehničke dijagnostike u stanju da identifikuju pomenuta oštećenja.

TABELA I. NAJČEŠĆI OTKAZI TEHNIČKIH SISTEMA I METODE ZA IDENTIFIKACIJU

Otkaz	Metoda tehničke dijagnostike			
	Temperatura	Pritisak i protok	Analiza ulja	Vibracije
Debalans	✓			✓
Nesaosnost vratila	✓			✓
Oštećenja kotrljajnih ležajeva	✓		✓	✓
Oštećenja kliznih ležajeva	✓	✓	✓	✓
Oštećenja zupčanika			✓	✓
Oštećenja kaišnih prenosnika				✓
Lom				✓

Na osnovu podataka iz Tabele I može se zaključiti da su najčešći otkazi tehničkih sistema: debalans, nesaosnost vratila, oštećenje kotrljajnih i kliznih ležajeva, oštećenje zupčanika, oštećenje kaišnih prenosnika i lom. Vibrodijagnostika, kao jedna od metoda tehničke dijagnostike, omogućava detekciju svih navedenih otkaza.

Vibrodijagnostici kotrljajnih ležaja, se sve više poklanja pažnja kao dijelu sveukupne dijagnostike postrojenja. U ovom radu prikazana je primjena savremenih vibrodijagnostičkih metoda za utvrđivanje stanja ispravnosti kotrljajnih ležajeva, kao veoma značajnih mašinskih elemenata, sa ciljem prediktivnog održavanja tehničkih sistema. Izvršeno je mjerenje vibracija kotrljajnih ležajeva na radnom stolu za dinamička ispitivanja, dostupnom u Laboratoriji za primjenjenu mehaniku na Mašinskom fakultetu u Istočnom Sarajevu, primjenom savremene opreme za vibrodijagnostiku.

### III. MJERENJE FREKVENCIJE VIBRACIJA LEŽAJA

Objektivna metoda ispitivanja stanja ležaja je mjerenje frekvencije vibracija ležaja. Usljed defekta, vibracije na kućištu ležaja značajno porastu. Mjerenje karakteristika vibracija je u tehničku praksu uvedeno 60.-tih godina prošlog vijeka, a 80.-tih godina je uvedeno snimanje vremenskog spektra vibracija, čime su znatno prošireni dometi ove metode. Naime, snimanjem vremenskog spektra, odakle se dobija frekventni spektar, mogu se, u ukupnom signalu vibracija, uočiti komponente vibracija ležaja i time ih izdvojiti iz ukupnih vibracija mašine, te na taj način eliminisati ometajuće signale [2].

Poređenje frekventnih spektara (amplituda) u frekventnom domenu ležaja, koji se ispituje sa referentnim snimkom dobrog (ispravnog, neoštećenog) ležaja, donosi se zaključak da li je ležaj dobar. Vibracioni signal u sebi sadrži informaciju o postojećem oštećenju na kotrljajnom ležaju. Korišćenje energije sadržane u pojedinim frekventnim opsezima spektara se koristi kao metoda za monitoring ležajeva.

Spektralna analiza, odnosno analiza signala u frekventnom domenu, je najčešće korišćeni pristup problemima detekcije oštećenja ležajeva, na bazi mjerenja i analize vibracija. Tome je

doprinio i razvoj FFT-a. (Fast Fourier transform). U ocjeni stanja kotrljajnog ležaja, od jednakog interesa su analiza u niskofrekventnom domenu, kao i analiza u visokofrekventnom domenu. Interakcija oštećenih komponenti u ležaju, kao posljedicu ima kratkotrajne impulse koji, ukoliko su dovoljnog intenziteta, mogu pobuditi sopstvene frekvencije ležaja i kućišta, odnosno mogu dovesti do pojačanja amplituda u visokofrekventnom domenu.

Kod lokalizovanih oštećenja kotrljajnih ležajeva, oštećenje može nastati na spoljašnjoj stazi, unutrašnjoj stazi, kotrljajnom tijelu i kavezu. Za dati broj obrtaja, ove se karakteristične frekvencije mogu izračunati na osnovu geometrijskih karakteristika ležaja i broja kotrljajnih tijela i iste, za većinu rotirajućih mašina (ne uključujući turbogeneratore) leže u frekventnom opsegu ispod 800 Hz.

U praksi, usljed činjenice da je pri prenosu kretanja unutar kotrljajnog ležaja, osim kotrljanja prisutno i klizanje, kao i usljed često poremećenog kontaktnog ugla zbog nepravilne montaže, snimljene karakteristične frekvencije oštećenja ležaja se mogu u manjoj mjeri razlikovati u odnosu na izračunate.

Detekcijom postojećih komponenti karakterističnih frekvencija ležaja u frekventnom spektru, njihove amplitude, prisustva njihovih harmonika (cjelobrojnih umnožaka) i komponenti modulacije, iskusni vibrodijagnostičar ima dovoljno podataka ne samo da zaključi da je kotrljajni ležaj oštećen, već i da identifikuje komponente u njemu koje su oštećene.

Oznake karakterističnih frekvencija oštećenja, prema skraćenicama izvedenim iz engleskog jezika su prikazane u tabeli II [3].

TABELA II. OZNAKE KARAKTERISTIČNIH FREKVENCIJA OŠTEĆENJA KOMPONENTI LEŽAJA [3]

Oz.	Engleski	Opis
BPFI	Bearing Predominant Frequency Inner	Frekvencija oštećenja unutrašnje staze
BPFO	Bearing Predominant Frequency Outer	Frekvencija oštećenja spoljašnje staze
BSF	Ball Spin Frequency	Frekvencija oštećenja kotrljajućeg elementa - kuglice
FTF	Fundamental Train Frequency	Frekvencija oštećenja kaveza

Navedene frekvencije mogu se izračunati sa dovoljnom tačnošću korištenjem sljedećih obrazaca [3]:

$$BPFI = 0,01 \cdot n \cdot z \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$BPFO = 0,0067 \cdot n \cdot z \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

$$FTF = 0,0067 \cdot n \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

pri čemu je: n broj obrtaja, a z broj kuglica.

Ukoliko nije poznat broj kuglica, tada se, s obzirom da većina ležaja ima 7-14 kuglica, gornji obrasci mogu napisati kao:

$$BPFI = (0,07-0,14) \cdot n \text{ [Hz]} \quad (4)$$

$$BPFO = (0,0047-0,0094) \cdot n \text{ [Hz]} \quad (5)$$

Može se uočiti da se frekvencije ležajeva mogu očekivati u rasponu  $(0,047-0,14) \cdot n$ . Ove frekvencije generišu i potpuno ispravni ležajevi, ali su male amplitude, dok pri pojavi defekta amplitude značajno rastu. Važno je primjetiti da frekvencije otkaza komponenti ležaja nisu sinhronne sa brojem obrtaja, odnosno ne predstavljaju proizvod frekvencije obrtanja i cijelog broja. Dakle u FFT spektru istaknute spektralne linije, a koje ne pripadaju frekvenciji obrtanja, su frekvencije uzrokovane otkazom ležaja [3].

Ako nam je poznat proizvođač ležaja, te broj kuglica, frekvencije oštećenja se mogu odrediti pomoću računara, tj. modalnom analizom i primjenom MKE (Metoda konačnih elemenata) mogu da se odrede sopstvene frekvencije komponenti, a takođe se mogu izračunati i preko formula [4]:

$$BPFI = N/2 \cdot f \cdot (1+d/D \cdot \cos\beta) \quad (6)$$

$$BPFO = N/2 \cdot f \cdot (1-d/D \cdot \cos\beta) \quad (7)$$

$$\text{Error! Reference source not found. BSF} = D/d \cdot f \cdot [1 - (d/D \cdot \cos\beta)^2] \quad (8)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot f \cdot (1-d/D \cdot \cos\beta) \quad (9)$$

gdje je:

N – broj kuglica

D =  $(D_1+D_2)/2$  – srednji prečnik kugličnog prstena

f – frekvencija obrtanja vratila

d – prečnik kuglice

$\beta$  – kontakti ugao

Prema opšte prihvaćenim principima postoje četiri stadijuma otkaza ležaja. čiji su simptomi prikazani u sljedećoj tabeli.

TABELA III. STADIJUMI OTKAZA LEŽAJA [2]

Stadijum	Simptomi
1.	- temperatura ležaja normalna - ležaj tih - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektuju abnormalni šumovi
2.	- temperatura ležaja normalna - ležaj "zvoni" - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektuju abnormalni šumovi
3.	- temperatura ležaja blago uvećana - ležaj bučan - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektuju veoma jaki abnormalni šumovi
4.	- temperatura ležaja vrlo visoka - ležaj vrlo bučan - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektuju izuzetno jaki abnormalni šumovi

Navedene metode za procjenu stanja kotrljajnih ležajeva koriste se za detekciju otkaza ležajeva u različitim stadijumima.

U tabeli IV je dat prikaz ovih metoda i stadijuma u kojima se mogu koristiti.

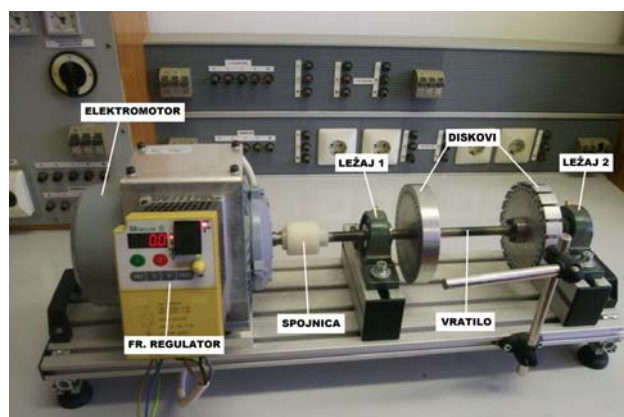
TABELA IV. STADIJUMI OTKAZA LEŽAJA I METODE ZA PROCJENU [3]

Stadijum	Temperatura	Vibracije i buka	ultrazvuk	Specijalne metode
1.				DA
2.			DA	DA
3.		DA	DA	DA
4.	DA	DA	DA	DA

Na osnovu prikazanog u Tabeli IV može se primjetiti da se u prvom stadijumu otkaza samo specijalnim metodama mogu uočiti simptomi defekta. U četvrtom (završnom) stadijumu otkaza svim metodama je moguće identifikovati isti. Uočava se da je temperatura ležaja uvećana tek u ovom završnom stadijumu, odnosno mjerenjem temperature nije moguće vršiti ranu detekciju otkaza ležaja. Očigledno je da se vibracije i buka mogu detektovati tek u trećem stadijumu otkaza. U kom stadijumu otkaza će se zamijeniti ležaj, zavisi od značaja pogona, ali ako ležaj dospije u četvrti stadijumu otkaza obavezno ga treba zamijeniti, jer prijeti opasnost od otkaza cijele mašine [3].

#### IV. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Eksperimentalni dio ovog rada je izveden na probnom stolu za dinamička ispitivanja, koji je prikazan na Sl. 2. Probni sto se sastoji od asinhronog frekventno regulisanog motora, čije je izlazno vratilo preko spojnice povezano sa vratilom koji nosi dva rotirajuća diska. Oslonjen je preko dva kotrljajna ležaja tipa SKF YAR 203/12-2F.



Slika 2. Probni sto korišćen u eksperimentu

Cilj ekperimenta je mjerenje vibracija oba ležaja SKF YAR 203/12-2F koji su ugrađeni na probnom stolu. Za mjerenje vibracija korišćena su dva akcelerometra i to jednoosni, METRIX Instruments SA6200A, i troosni DYTRAN 3023A1T 8417. Akcelerometri su postavljeni na kućišta oba ležaja i vršeno je mjerenje vibracija na frekvencijama obrtanja od 25Hz i 50Hz .

Za akviziciju podataka i njihovu obradu korištena je instrumentacija National Instruments, pri čemu je parametar vibracija koji se direktno mjeri kontaktnom metodom ubrzanje.

Instrumentacija se sastoji od šasijske National Instruments cDAQ 9172, (Sl. 3.a) i analogne kartice NI 9233 sa četiri analogna ulaza, opsega napona  $\pm 5$  V i maksimalne brzine odabiranja signala po kanalu 50 kS/s (kilosamples per secon), (Sl. 3.b). Vidi se da se ova analogna kartica sastoji od I/O modula koji obavljaju različite funkcije i koje možemo dodavati i uklanjati, u zavisnosti koji su moduli potrebni. Na nju je moguće spojiti do osam modula. Kartica za akviziciju podataka omogućava akviziciju i generisanje signala, a koja će se akvizicijska kartica upotrijebiti zavisi od problema koji se rješava. Kartica ima priključak za napajanje, te USB priključak pomoću kojeg se spaja sa računarom, na kojem se nalazi odgovarajući softver.



Slika 3. a) i b) NI cDAQ 9172

Kao softverska podrška eksperimentu korišćeni su sljedeći programi:

1. LabVIEW
2. MatLab
3. OriginPro

Pri akviziciji (prikupljanju) podataka korišćen je grafički programski jezik za pravljenje akvizicionih sistema LabVIEW, a pri obradi podataka (FFT) MatLab i OriginPro softveri. U nastavku teksta je dat kratki prikaz razloga korišćenja pomenutih programa, u ovom istraživanju.

LabVIEW je grafičko razvojno okruženje za akviziciju signala, analizu signala i prezentaciju podataka, koje ima fleksibilnost programskog jezika bez kompleksnosti tradicionalnih razvojnih alata. Modul koji je korišćen u ovom radu je LabVIEW Signal Express modul. Razvijen je za inženjere koji su zahtjevali softver virtualne instrumentacije sa kojim mogu da interaktivno mjere i analiziraju podatke [5].

MatLab je programski jezik visokog nivoa i interaktivna je okolina za numeričko i matricno računanje, te za vizualizaciju i programiranje. MatLab se može koristiti za niz aplikacija, uključujući obradu signala, obradu sistema kontrole, ispitivanja i mjerenja.

Profesionalna verzija Origin, OriginPro, nudi sve funkcije porijekla, plus dodatnih alata analize i sposobnosti u specifičnim područjima za statistiku, obradu signala, obradu slike i 3D površina za ugradnju.

U predmetnom istraživanju MatLab i OriginPro programi su korišćeni da bi se uradila brza Furijerovu transformacija za pretvaranje vremenskog u frekventni domen. U MatLabu je pisan algoritam za transformaciju, dok je OriginPro korišćen kao provjera za pomenuti algoritam.

Algoritam korišćen u ovom radu:

```

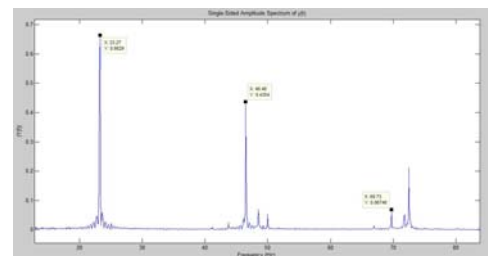
unnamed2=y; %Definisanje vektora odabiraka
N = length(unnamed2); %Određivanje dužine vektora odabiraka
Fs=5000; %Frekvencija odabiranja
NFFT = 2^nextpow2(N);
Y = fft(unnamed2,NFFT)/N; %Računanje FFT
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
% Plot single-sided amplitude spectrum.
%Crtnanje signala
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Crtnanje signala')
xlabel(' Frekvencija (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

```

Algoritam je napisan za skriptu u MatLab-u, čijim izvršavanjem treba da se uradi FFT.

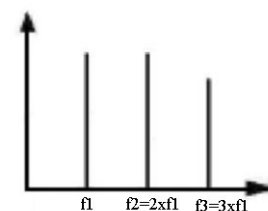
### A. Mjerenje vibracija

Prva frekvencija na kojoj je vršeno mjerenje je  $f=25$  Hz. Mjerenje je vršeno troosnim akcelerometrom na ležaju 1. Rezultati mjerenja obrađeni su u MatLab programu. Tokom istraživanja, za svaku osu mjerenja urađena je tabela sa podacima o frekvenciji i amplitudi, koji se odnose na prva tri moda frekvencije obrtanja ( $f_1$ ,  $f_2=2 \cdot f_1$ ,  $f_3=3 \cdot f_1$ ), ali je ovdje dat primjer samo za osu x (Sl. 4). S obzirom da je mjerenje vršeno troosnim akcelerometrom, dobijen je signal ubrzanja po osi z (osa vratila), osi x (horizontalna osa, upravna na osu vratila) i osi y (vertikalna osa upravna na osu vratila).



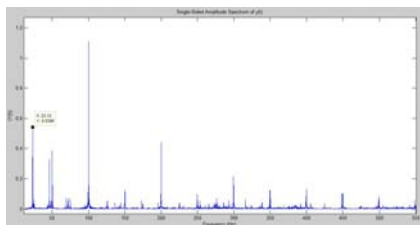
Slika 4. Primjer FFT signala za osu x

Primjenom FFT signala za ose x, y i z, može se identifikovati nesaosnost osa ležaja i vratila. Na Sl.5. dat je izgled spektra pri ovom defektu. S obzirom da su amplitude prva tri oblika oscilovanja, za osu x (Sl. 4) značajno različite, može se zaključiti da ležajevi ugrađeni u ovaj radni sto nemaju ovu vrstu defekta.

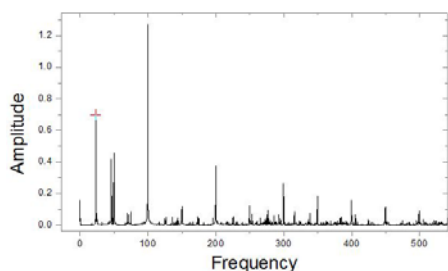


Slika 5. FFT spektra pri nesaosnosti osa ležaja i vratila [5]

U cilju provjere algoritma korišćenog u MatLab-u, podaci dobijeni mjerenjem nezavisno su obrađeni i primjenom drugog softverskog paketa OriginPro. Frekvencija obrtanja je  $f=25$  Hz, a uređaj za mjerenje jednoosni akcelerometar. Na Sl.6 su prikazani rezultati dobijeni u MatLab-u, a na Sl.7 rezultati dobijeni u OriginPro-u.



Slika 6. Rezultati dobijeni u MatLab-u



Slika 7. Rezultati dobijeni u OriginPro-u

Poređenjem podataka prikazanih na prethodnim slikama može se vidjeti da je izgled FFT signala dobijen obradom podataka u dva različita programa identičan, a da se vrijednosti amplituda relativno razlikuju. U tabeli V navedene su vrijednosti frekvencija i amplituda za 3 moda.

TABELA V. REZULTATI DOBIJENI U MATLAB-U I ORIGINPRO-U

Mod	MatLab		OriginPro	
	Frekvencija	Amplituda	Frekvencija	Amplituda
1	23,12	0,6749	23,091	0,662
2	46,31	0,4088	46,245	0,343
3	69,31	0,09033	69,383	0,082

Podaci prikazani u tabeli pokazuju da se odstupanje amplituda/frekvencija kreće od (1-2)%, što potvrđuje tačnost algoritma korišćenog u MatLab-u.

Sljedeće mjerenje vršeno je na ležaju 2, na frekvenciji obrtanja  $f=25$  Hz, jednoosnim akcelerometrom, za prva tri moda frekvencije obrtanja, i to:

$$f_1=23,02 \text{ Hz}$$

$$f_2=2 \cdot f_1=2 \cdot 23,02=46,04 \text{ Hz}$$

$$f_3=3 \cdot f_1=3 \cdot 23,02=69,06 \text{ Hz}$$

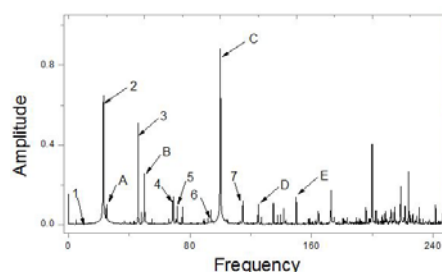
U tabeli VI prikazane su izračunate karakteristične frekvencije oštećenja komponenti ležaja za prvi mod frekvencije obrtanja  $f_1=23,02$  Hz, prema obrascima (6) – (9).

TABELA VI. KARAKTERISTIČNE FREKVENCije OŠTEĆENJA KOMPONENTI LEŽAJA

Oznaka	Frekvencije [Hz]
BPFI	113,88 Hz
BPFO	Error! Reference source not found.70,27 Hz
BSF	Error! Reference source not found.91,74 Hz
FTF	Error! Reference source not found.8,78 Hz

Na osnovu podataka iz tabele VI može se uočiti da je karakteristična frekvencija oštećenja spoljašnje staze (BPFO) znatno blizu trećeg moda frekvencija obrtanja  $f_3 = 69,06$  Hz. Takođe, poređenjem izmjerenih frekvencija sa vrijednostima koje su dobijene analitički, mogu se odrediti njihova odstupanja.

Ako se pogledaju FFT signali, prikazani na Sl.8. mogu se uočiti istaknute spektralne linije na sljedećim frekvencijama:



Slika 8. FFT signala u OriginPro-u

1. Frekv. 8,69 Hz odgovara frekvenciji oštećenja kaveza;
2. Frekv. 23,02 Hz odgovara prvom modu frekvencije obrtanja;
3. Frekv. 45,87 Hz odgovara drugom modu frekvencije obrtanja;
4. Frekv. 68,89 Hz odgovara trećem modu frekvencije obrtanja;
5. Frekv. 71,6 Hz odgovara frekvenciji oštećenja spoljašnjeg prstena;
6. Frekv. 91,74 Hz odgovara frekvenciji oštećenja kuglice
7. Frekv. 114,76 Hz odgovara frekvenciji oštećenja unutrašnjeg prstena
8. Frekv. A 25,05 Hz sopstvena frekvencija stola
9. Frekv. B 49,94 Hz n-ti mod sopstvene frekvencije stola
10. Frekv. C 100,03 Hz n-ti mod sopstvene frekvencije stola
11. Frekv. D 124,91 Hz n-ti mod sopstvene frekvencije stola
12. Frekv. E 149,97 Hz n-ti mod sopstvene frekvencije stola

S obzirom da amplitude na karakterističnim frekvencijama oštećenja komponenti ležaja nisu izražene u odnosu na

amplitudu prvog moda frekvencije obrtanja, može se zaključiti da ne postoji oštećenje neke od komponenti ležaja, odnosno može se potvrditi ispravnost ležaja 1 u niskofrekventnom području.

I u ovom primjeru, u poređenju sa podacima prikazanim na Sl.5. može se zaključiti da ne postoji nesaosnost osa ležaja i vratila. Apsolutna greška frekvencije dobijene analitički i mjerenjem za unutrašnji prsten 0,77%, za spoljašnji prsten 1,8%, za kuglicu 0% i za kavez -1%. Mala odstupanja govore o tome da su rezultati dobijeni eksperimentalnim mjerenjem veoma blizu analitičkim, a to je pokazatelj da su mjerenja i obrada rezultata odgovarajući.

U toku eksperimentalnog istraživanja vršena su i druga ispitivanja, koja, zbog raspoloživog prostora, neće biti razmatrana u ovom radu.

## V. ZAKLJUČAK

Praćenje i dijagnostika stanja kotrljajnih ležajeva je uvijek aktuelna tema i zbog toga se stalno razvijaju i predlažu nove metode. Metoda ispitivanja vibracija kod ležajeva je svakako jedna od najčešće korišćenih metoda za procjenu stanja kotrljajnih ležajeva. Ovom metodom dobijaju se veoma pouzdani podaci o stanju kotrljajnog ležaja i to je jedan od razloga zbog čega bi svaki pogon u ozbiljnim fabrikama trebao posjedovati odgovarajuću opremu, hardver i softver, potreban za izvođenje ove metode.

U ovom radu objašnjen je jedan od postupaka kojim se može omogućiti praćenje stanja kotrljajnih ležajeva na rotacionim mašinama, te brza i efikasna procjena stanja i otkrivanje defekata u trećem i četvrtom stadijumu otkaza ležaja. Blagovremenom detekcijom defekta ležaja mogu se izbjeći neželjena stanja, prije svega usljed zastoja u radu mašinskih sistema, te direktnih i indirektnih troškova s tim u vezi.

Sa ciljem verifikacije analitičkih modela za određivanje frekvencija oštećenja izvršena su eksperimentalna ispitivanja na probnom stolu na Mašinskom fakultetu u Istočnom Sarajevu, uz korišćenje savremene vibrodijagnostičke opreme i savremenih softvera. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja su pokazali podudaranje sa analitičkim rezultatima, a na osnovu dobijenih rezultata doneseni su zaključci o stanju ispravnosti

kotrljajnog ležaja, odnosno komponenti ležaja, kao i saosnosti ose ležaja i ose vratila, odnosno osovine.

Naredna istraživanja mogu ići u pravcu određivanja i nekih drugih defekata koji se mogu javiti u mašinskom sistemu, u ovom slučaju probnom stolu na kom je rađen eksperiment, kao što su napr. nesaosnost ili neuravnoteženost masa, pri čemu će se vršiti poređenje rezultata istraživanja dobijenih analitičkim putem i rezultata eksperimentalnih ispitivanja.

## LITERATURA

- [1] N. Zuber, R. Bajrić, "Pregled vibrodijagnostičkih metoda za praćenje stanja kotrljajnih ležaja", Zbornik radova sa konferencije COMETA 2014, str. 197
- [2] A. Halep, "Metode za procjenu stanja kotrljajućih ležaja", Zbornik radova sa konferencije "ODRŽAVANJE" jun, 2010. str. 92, 93
- [3] A. Halep, "Dijagnostika kotrljajućih ležajeva", jul 2013, www.scribd.com, str. 2,3,11,12
- [4] R. Antunović, "Nadzor i dijagnostika tehničkih sistema", Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Trebinje 2009. Monografija, str.85.
- [5] J. Tomić, M. Milovanović, "Virtualna instrumentizacija primjenom LabVIEW programa", Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad 2010., str. 10.

## ABSTRACT

Bearings are mechanical elements with basic task to provide relative movement of rotating parts and, at same time, loading transmission between them.. Also, they need to provide precision of rotating parts position. Possibility of failure of these elements is very big. Regarding to very high percentage of prematurely destroyed bearings many methods for failure detection, not only for destroying condition of bearings, but also for failure type identification have been developed. One method for failure detection is vibro -diagnostics . In this paper is shown application of modern vibro-diagnostics methods for defining bearing working condition, regarding to predicting maintenance of technical systems, supported by adequate softwares for testing results analysis.

## ESTIMATION OF BEARING WORKING CONDITION SUPPORTED BY SOFTWARES

Biljana Marković, Jelica Anić, Aleksandar Košarac