

# DIJAGNOSTIKA LEŽAJEVA

Biljana Branković<sup>1</sup>, Svetislav Marković<sup>2</sup>  
[biljana.brankovic@rbkolubara.rs](mailto:biljana.brankovic@rbkolubara.rs), [svetislav.markovic@vstss.com](mailto:svetislav.markovic@vstss.com)

## **REZIME**

Ležajevi su mašinski elementi čija se osnovna funkcija sastoji u obezbeđivanju uslova za relativno kretanje obrtnih delova i za prenošenje opterećenja sa pokretnih na one koji miruju, ili obrnuto. Periodična provera stanja ležajeva je presudna za održavanje njihovih radnih performansi na optimalnom nivou. Za procenu stanja ležaja, danas su u najširoj upotrebi: analiza vibracija, envelopiranje – demodulacija signala, SPM metoda, merenje akustičke emisije.

**Ključne reči:** ležaj, dijagnostika ležaja, kontrola ispravnosti ležaja, metode dijagnostike ležaja

# DIAGNOSTICS OF BEARINGS

## **ABSTRACT**

Bearings are machine elements whose basic function consists in providing conditions for the relative movement of rotating parts and for transferring loads from moving to stationary ones, or vice versa. Periodic checking of the condition of the bearings is crucial for maintaining their working performance at an optimal level. To assess the state of the bearing, the following are widely used today: vibration analysis, signal enveloping - demodulation, SPM method, acoustic emission measurement.

**Key words:** bearing, bearing diagnostics, bearing correctness control, methods of bearing diagnostics

## **1. UVOD**

Ležajevi kao mašinski elementi su danas zastupljeni u velikoj meri i čine nezaobilazne elemente različitih aplikacija. Izuzetno složena funkcija ležaja nametnula je potrebu za primenom posebnih tehnologija za izradu te ih izrađuju specijalizovani proizvođači. Takođe je razvijen i širok spektar konstrukcijskih rešenja. Međutim, često se dešava da ležaj ne doživi projektovani radni vek.

---

<sup>1</sup> AD EPS, Ogranak RB Kolubara

<sup>2</sup> Fakultet Tehničkih Nauka Čačak

Postoje brojni uzroci koji mogu da dovedu do njegovog otkaza. Najčešći su: neadekvatno i nestabilno podmazivanje, izloženost većim opterećenjima od očekivanih, nepravilna montaža, kontaminacija maziva uzrokovana lošim zaptivanjem, nedovoljan unutrašnji zazor u ležaju uzrokovan nepoštovanjem zahtevane tolerancije rukavca ili kućišta.

Svaki od pomenutih uzroka stvaraju određen tip oštećenja i ostavljaju specifičan trag na ležaju. Istraživanjem oštećenja ležaja, u velikom broju slučajeva, moguće je utvrdi uzrok oštećenja i preduzeti potrebne mere kako bi se sprečilo njegovo ponavljanje.

## 2. DIJAGNOSTIKA LEŽAJA

Ležajevi kod kojih postoje problemi u radu, obično o svom stanju daju određene prepoznatljive simptome. Tipični simptomi koji označavaju skori otkaz ležaja SU: pregrejan ležaj, buka ležaja, prečeste zamene, Vibracije, nezadovoljavajući rad opreme, labavo naleganje ležaja na osovinu, osovina se teško okreće.

### 2.1 Provera ležajeva u toku mirovanja mašina

Periodična provera stanja ležajeva je presudna za održavanje njihovih radnih performansi na optimalnom nivou. Najpogodnije vreme za proveru stanja ležajeva su regularni zastoji u toku planskog remonta mašine, bilo radi redovnog održavanja ili iz nekih drugih razloga. Značaj čistoće. Trebalo bi sprovesti sve potrebne mera da se spreči kontaminacija ležajeva i maziva različitim nečistoćama.



*Slika 1. Čišćenje komponenata sklopa*

Proveru stanja bi trebalo započeti čišćenjem površine ležaja, a zatim se vrši demontaža susednih komponenata sklopa (slika 1.). Zaptivke se lako oštećuju pa zato zahtevaju pažljivo rukovanje. Nikad ne koristiti preterano velike sile. Treba pažljivo proveriti stanje zaptivki i komponenata u njihovoj blizini.

Uvek zameniti gumene zaptivke i ostale zaptivke koje su na granici dobrog radnog stanja. Neispravna zaptivka može prouzrokovati oštećenje ležaja i time izazvati duži zastoj rada opreme.

## 2.2 Šta sve treba pratiti u toku rada

Praćenje stanja predstavlja aktivnost čiji značaj raste, obzirom da se na njoj bazira koncept preventivnog održavanja. Blagovremeno saznanje o oštećenju ležaja omogućava korisniku da ležaj zameni za vreme sledećeg redovnog remonta, čime se izbegava dodatni, neplanirani i često vrlo skupi zastoj usled iznenadnog kvara ležaja. Ležajevi ugrađeni u kritičnim sklopovima mašine, ili ležajevi koji rade u teškim radnim uslovima, zahtevaju često kontrolisanje. Danas na tržištu ima mnogo sistema i uređaja za praćenje stanja ležajeva u radu. Većina se bazira na merenju vibracija (slika 2.).



Slika 2. Uređaj za merenje vibracija

Ipak, iz praktičnih razloga, ne može se očekivati da se baš svaka mašina ili funkcija neke mašine prati pomoću savremene elektronske opreme.

Zato radnik, ili stručnjak za održavanje, mora i dalje ostati „budan“ pored mašine, pažljivo prateći „znake oštećenja“, kao što su povećanje temperature i vibracije.

„Slušanje“, „dodirivanje“ i „gledanje“ su tri značajna faktora.

**Slušanje.** Najčešći i najlakši način da se uoči neka nepravilnost u radu ležaja je slušanje. Na primer, uz pomoć elektronskog stetoskopa mogu se lako otkriti nenormalni šumovi (buka), pa čak i lokalizovati deo mašine odakle se ti šumovi čuju. Ako radnik ima iskustva, onda zna da ležaj u normalnim radnom stanju proizvodi jedan neprekidan, blagi šum, kao da mašina „prede“. I obrnuto, ako ležaj nije više ispravan, on emituje nepravilne šumove koji podsećaju na mlevenje i škripanje.

**Dodirivanje.** Visoke temperature često znače da ležaj ne radi ispravno. One takođe mogu biti vrlo štetne za mazivo u ležaju. Pregrevanje može često da bude prouzrokovano mazivom. A rad pod temperaturom od 125°C, naročito ako to traje duže vreme, može da značajno skрати radni vek ležaja. Visoka temperatura ležaja najčešće je izazvana nedovoljnom ili preteranom količinom maziva, nečistoćama u mazivu, prevelikim opterećenjem ležaja, nedovoljnim unutrašnjim zazorom,

deformacijom i prevelikim trenjem zaptivki. Svaka promena temperature može biti indikacija oštećenja, ako se radni uslovi nisu menjali.

**Gledanje.** Odgovarajuće podmazani ležajevi, koji su još i dobro zaštićeni od nečistoće i vlage, ne bi trebali da pokazuju uočljive znakove habanja. Ipak, preporučljivo je vizuelno proveriti ležaj, dok je otkriven, a takođe, tako treba periodično proveravati i zaptivke.

### **3. KONTROLA ISRAVNOSTI LEŽAJA**

Preventivna kontrola ispravnosti ležaja je od velikog značaja. Ako se na vreme ne otkrije oštećenje ležaja, dolazi do oštećenja i ostalih delova na vratilu: prenosnika, spojnice itd. i samog vratila. Najjednostavniji način je svakodnevni nadzor i osluškivanje jer je oštećen ležaj bučniji.

Kada je ležaj oštećen povećava se temperatura što se proverava termometrom. Vizuelnim nadzorom može se pratiti i stanje zaptivki. U slučaju da su oštećene dolazi do curenja maziva. Ako je isurelo mazivo tamne boje, znači da je zaprljano, a ako je mutno i belikasto u mazivu je prisutna voda. Ovakva kontrola je vrlo gruba i orijentaciona.

Za tačnu i preciznu kontrolu koriste se savremeni uređaji za beskontaktno merenje temperature u ležaju i vibracije, na osnovu čega se primenom odgovarajućih softvera dobija procena stanja ležaja i prognoza koliko će još raditi bez oštećenja.

Za savremen način merenja stanja ležaja i određivanje veka trajanja koriste se metode za merenje udarnog impulsa, ili takozvana SPM Metoda (The Shock Pulse Method). Ovom metodom mogu se detektovati udarni impulsi još u prvoj fazi razvoja oštećenja ležaja, koji uglavnom potiču zbog manjeg sloja maziva ili povećane hrapavosti dodirnih površina.

Korektivne aktivnosti održavanja u ovoj fazi su od presudnog značaja za duži radni vek ležaja i uglavnom se odnose na obezbeđenje potrebnog sloja maziva u datim uslovima. Udarni impulsi se stvaraju u ležaju kao rezultat kotrljanja elemenata ležaja po stazi (prstenu).

Ako je došlo do oštećenja ležaja, sloj maziva samo umanjuje ali potpuno ne eliminiše pojavu udarnih impulsa, što omogućava da se SPM metoda koristi u toku ukupnog rada ležaja. Intenzitet i oblik signala udarnog impulsa je u direktnoj vezi sa debljinom sloja maziva između kotrljajnih elemenata i prstenova ležaja i mehaničkog stanja njihovih površina.

Razvoj oštećenja ležaja je najčešće postepen, te stalnim merenjem intenziteta udarnih impulsa, na vreme se može otkriti i nagoveštaj oštećenja ležaja.

### **4. PREGLED POSTOJEĆIH METODA DIJAGNOSTIKE LEŽAJEVA**

Za procenu stanja ležaja, danas su u najširoj upotrebi: analiza vibracija, envelopiranje – demodulacija signala, SPM metoda, merenje akustičke emisije.

Sve dijagnostičke metode mogu se podeliti u tri grupe:

- Analiza vibracija u vremenskom domenu,
- Analiza vibracija u frekventnom domenu,
- Vremensko-frekventna analiza vibracija.

#### 4.1. Analiza vibracija u vremenskom domenu

Ideja ove metode je korišćenje uredenog usrednjavanja sirovog signala pomoću broja ciklusa. Cilj ove tehnike je uklanjanje ili umanjenje šuma i drugih nepovoljnih uticaja kako bi se naglasile komponente signala koje su od interesa. Vremenski sinhronizovano usrednjavanje može se prikazati formulom:

$$s_t = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(t + nT), 0 \leq t < T$$

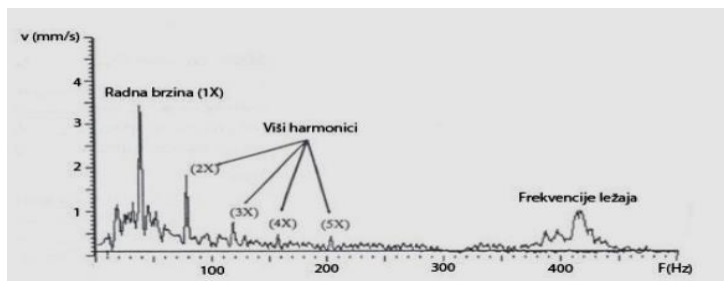
Gde je:  $s(t)$  – signal;  $T$  – period usrednjavanja;  $N$  – broj semplova za usrednjavanje

Napredne tehnike analize vremenskog signala koriste modele vremenskih serija, pri čemu je osnovna ideja podešavanje signala pomoću parametarskih modela vremenskih serija, kako bi se iz osnovnog signala izdvojile one karakteristike koje su bazirane upravo na tim parametrima. Primeri koji se susreću u savremenoj literaturi su autoregresivni model i autoregresivno usrednjavanje.

#### 4.2. Analiza vibracija u frekventnom domenu

Analiza u frekventnom domenu bazira se na signalu koji je iz vremenskog domena transformisan u frekventni. Tehnika koja je danas najšire zastupljena je brza Furijeova transformacija (Fast Fourier Transform – FFT). Razlog za najširu upotrebu je njena jednostavnost.

Pri određivanju uzroka vibracija koristi se činjenica da specifični mašinski problemi generišu specifične frekvencije. Problemi sa ležajevima detektuju se na višim frekvencijama (slika 4.).



Slika 4. Karakterističan spektar vibracija [5]

Senzori vibracija, postavljeni na mašinama, pretvaraju mehaničke pomeraje u električne signale. Ti signali obuhvataju širok spektar frekvencija, od niskih do vrlo visokih i mogu se podeliti u tri grupe: Signali niskih frekvencija (0 – 2 kHz); Signali visokih frekvencija (2 – 50 kHz); Signali vrlo visokih frekvencija (preko 50 kHz).

Niskofrekventne vibracije (0 Hz – 2 kHz) nastaju usled strukturnih vibracija delova mašina, neuravnoteženosti, nesaosnosti, labavosti, grešaka u montaži kao i usled prelaska kotrljajnog tela preko oštećenog mesta na kotrljajnoj stazi.

Visoko frekventne vibracije (2–50 kHz) javljaju se prilikom prelaza kotrljajnog elementa preko oštećenja na stazi kotrljanja. Taj prelaz generiše male impulse koji energiju prenose na kućište, koje na njih odgovara svojim oscilovanjem na sopstvenoj frekvenciji, koja se postepeno gubi zbog prigušenja u mehaničkoj strukturi mašine.

Signali vrlo visokih efrekvencija koji se nalaze u oblasti akustičke emisije (iznad 50 kHz) potiču isključivo od prelaza kotrljajnog elementa preko oštećenja na kotrljajnoj stazi i vibracija koje su posledica metalnog kontakta. Signali u tom frekventnom domenu mogu se registrovati pomoću vrlo osetljivih senzora.

### **4.3. Vremensko - frekventna analiza vibracija**

Kod vremenskofrekventne analize koristi se vremensko frekventna distribucija, koja reprezentuje energiju vibracijskog signala predstavljenog u dvodimenzionalnoj formi, vremenskoj i frekventnoj. Tehnike koje se često koriste su kratko vremenska Furijeova transformacija (Short-Time Fourier Transform – STFT) ili spektrogram i Vigner-vile-ova distribucija. Osnovna ideja STFT je da se ceo vibracijski signal подели u segmente sa kratkim vremenskim intervalima a zatim primeni Furijeova transformacija nad svakim segmentom. Da bi se saznalo koje sve frekventne komponente postoje u signalu u svakom vremenskom trenutku, potrebno je taj signal seći Dirac–ovim impulsom. Međutim, pri ovom procesu, odsecanje signala odgovara konvoluciji između korisnog signala i signala za odsecanje tj. Dirač-ovog impulsa. Pošto je konvolucija u vremenskom domenu isto što i množenje u frekventnom, i pošto Furijeova transformacija Dirač-ovog impulsa sadrži sve moguće frekvencije, frekventne komponente signala će biti razlivene svuda po frekventnoj osi. Dakle, u ovom slučaju imamo drugi krajni slučaj: količina informacija o vremenu je odlična, tj. sa visokim nivoom detalja, , ali nemamo nikakvu frekventnu rezoluciju, što je suprotno od Furijeovoj transformaciji. Ovaj problem je poznat kao Heisenberg-ov princip neodređenosti, koji govori o nemogućnosti da se u isto vreme znaju tačne frekvencije i tačan trenutak vremena kada se ove frekvencije javljaju.

Wavelet transformacija ili wavelet analiza je možda najskorije rešenje da se prevaziđu negativne osobine Furijeove transformacije. U Wavelet analizi koriste se potpuno promenljive (skalabilne) funkcije kao prozor za odsecanje što rešava problem odsecanja signala. Prozor se pomera po signalu i za svaku poziciju se izračunava konvolucija. Zatim se ovaj proces ponavlja više puta sa malo kraćim (ili dužim) prozorom za svaki nov ciklus. Razlog zbog koga se koriste različiti prozori

je nastojanje da se različite frekventne komponente signala različito i tretiraju. Naime, kada je prozor za odsecanje mali, posmatraju se visoke frekventne komponente signala (jer imaju manju periodu pa se mogu obuhvatiti prozorom), pri čemu je ostvaruje visoka rezolucija u vremenu. A kada se poveća širina prozora, od značaja su niže frekventne komponente (jer one imaju veću periodu), i naravno pri tome je viša frekventna rezolucija. Na kraju, kao konačan rezultat dobija se kolekcija vremensko-frekventnih reprezentacija signala sa različitim rezolucijama. Zbog toga se ovaj pristup zove više rezolucijska analiza (Multiresolution Analysis). Treba reći da se kod ove transformacije obično ne govori o vremensko-frekventnoj reprezentaciji, već o reprezentaciji vreme - skala (time-scale).

Skala je recipročno od frekvencije i zbog toga ima jedinicu vremena. Skala se koristi zato što je naziv frekvencija zadržan za Furijeovu transformaciju. Parametar skala u wavelet transformaciji je sličan upotrebi skale u mapama. Kao i u slučaju mapa, vrednost velikih skala odgovara globalnom ne detaljnom pogledu na signal, dok male skale odgovaraju detaljnom pogledu. Slično, kada je reč o frekvenciji, niske frekvencije (velike skale) odgovaraju globalnoj informaciji signala, informaciji koja je obično prožeta kroz ceo signal, dok visoke frekvencije (male skale) odgovaraju detaljnijoj informaciji o signalu, obično o nekoj sakrivenoj strukturi koja traje relativno kratko. Tako idući od velikih skala prema manjim isto je što i zumiranje. Prednost Wavelet transformacije je u tome što postoji mogućnost da signal predstavi na verodostojniji način, u vremensko-frekventnom domenu tj. u domenu vreme – skala.

#### 4.4 Analiza sopstvenih frekvencija ležaja

Ova metoda detekcije oštećenja ležaja zasnovana je na činjenici da svaki konstrukcioni element ima svoju sopstvenu frekvenciju. Prilikom svakog prelaska kotrljajnog elementa preko oštećenja, u mernom signalu pojavljuju se impulsi. Frekvencija tih impulsa uslovljena je lokacijom oštećenja (spoljašna kotrljajna staza, unutrašnja kotrljajna staza, kotrljajni element ili kavez), geometrijom ležaja i brojem obrtaja na kome radi posmatrani ležaj. Sopstvene frekvencije ležaja se mogu izračunati pomoću odgovarajućih obrazaca (1.1.). Za njihovu primenu potrebni su podaci o broju obrtaja, broju kotrljajnih elemenata, prečniku kotrljajnih elemenata, podeonom prečniku ležaja i uglu dodira.

$$\begin{aligned}
 BPF I &= \frac{z}{2} \left( \frac{N}{60} \right) \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\
 BPF O &= \frac{z}{2} \left( \frac{N}{60} \right) \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\
 BSF &= \frac{1}{2} \frac{P_d}{B_d} \left( \frac{N}{60} \right) \left( 1 + \left( \frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2 \beta \right) \\
 FTF &= \frac{1}{2} \left( \frac{N}{60} \right) \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

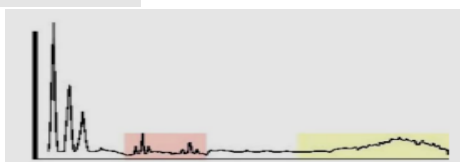
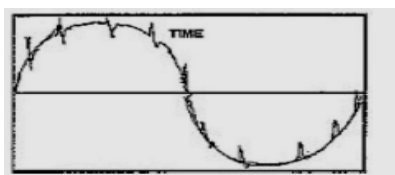
BPFI – Frekvencija oštećenja unutrašnje kotrljajne staze; BPFO – Frekvencija oštećenja spoljne kotrljajne staze; BSF – Frekvencija oštećenja kotrljajnih tela; FTF – Frekvencija oštećenja kaveza; N – Broj obrtaja (min-1); z – Broj kotrljajnih elemenata; Bd – prečnik kotrljajnog elementa; Pd – podeoni prečnik ležaja;  $\beta$  – ugao kontakta kuglice i staze kotrljanja ( $^{\circ}$ )

Savremeni uređaji i softveri za dijagnostiku stanja ležajeva sadrže gotove baze podataka za sve tipove ležajeva velikog broja svetskih proizvođača ležajeva. U tom slučaju potrebno je znati tip ležaja koji merimo i proizvođača ležaja.

#### 4.5. Envelopa ubrzanja

Otkaz ležaja je uvek praćen pojavom buke, vibracija i povećanjem temperature ležaja. Prilikom svakog prolaska kotrljajnog elementa preko oštećenja na kotrljajnoj stazi, pojaviće se udar. Intenzitet tih udara je prilično mali u poređenju sa ostalim vibracijama koje su prisutne na ležaju. U zavisnosti od unutrašnje geometrije ležaja i broja kotrljajnih tela pojaviće se od 6 do 10 udara za jedan obrt. Ti mali impulsi izazivaju pobudu strukturne rezonancije ležaja i kućišta.

Vremenski signal koji dobijamo sa senzora (slika 5.) sastoji se od periodičnih signala visokih frekvencija nastalih udarom kotrljajnih elemenata u oštećenje i niskofrekventnih signala koji su posledica neuravnoteženosti, nesaosnosti ili drugih problema. Frekventni prikaz originalnog signala prikazanje na slici 6.



Slika 5. Vremenski signal [5]

Slika 6. Frekventni signal [5]

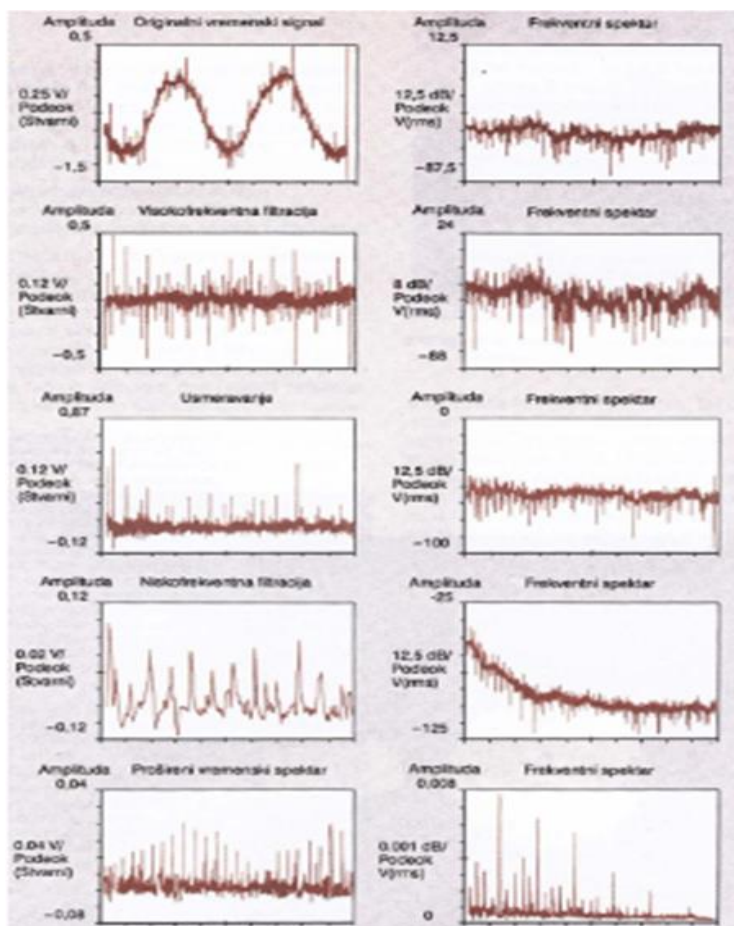
Na spektru se jasno uočava prvi i drugi harmonik koji su posledica neuravnoteženosti i nesaosnosti. U središnjem delu spektra nalaze se harmonici koji su posledica rezonancije strukturalnih elemenata pobuđenih malim impulsima, dok se u zoni visokih vibracija (desni deo spektra) prisutne vibracije koje potiču od samih udara kotrljajnih tela po oštećenjima.

Oštećenja ležaja ili zubaca zupčanika generišu vibracijski signale vrlo male amplitude i frekvencije veće od radne frekvencije mašine. Standardnim metodama analize signala, signali generisani malim oštećenjima ležajeva i zupčanika teško se prepoznaju, jer su višestruko slabiji od ostalih signala (signal od neuravnoteženosti, nesaosnosti...). Metodologija envelopiranja signala ubrzanja podrazumeva filtriranje nižih frekvencija čime se eliminišu signali koji potiču od



neuravnoteženosti, nesaosnosti i drugih mehaničkih problema. Energija signala je na ovaj način umanjena ali je njen karakter nepromenjen. U takvom filtriranom signalu, impulsi se pojavljuju u jednakim vremenskim intervalima, upravo onako kako se odvija fizički proces prelaska kotrljajnih elemenata preko oštećenja.

Rezultat se prikazuje u numeričkoj vrednosti izraženoj kroz gE.



Slika 7. Envelopa ubrzanja [5]

U novije vreme ova merna metoda se pokazala kao pouzdan alat za detekciju oštećenja kotrljajnih ležajeva i zubaca zupčastih prenosnika.

## 5. ZAKLJUČAK

Gotovo da je nezamisliv bilo kakav rotacioni mašinski sistem koji ne sadrži kotrljajni ležaj, kao jedan od kritičnih vitalnih delova. Masovna primena kotrljajnih ležajeva dovela je do neophodnosti postizanja visoke preciznosti njihove izrade i

montaže, mogućnosti obezbeđenja velikih eksploatacionih performansi, ali i posebnog tretmana u održavanju. Oštećenja ležajeva najčešće izazivaju zastoje u proizvodnji, što neminovno prouzrokuje velike troškove i gubitke, posebno u visoko vrednim postrojenjima.

S obzirom da kotrljajni ležajevi češće izlaze iz eksploatacije od drugih elemenata pripadajućeg sistema, neophodno je stalno praćenje njihovog tehničkog stanja. Određivanje stanja ležajeva se vrši: vibroakustičnim, vizuelnim i metodom tehničkih merenja. Veći proizvođači kotrljajnih ležajeva (SKF, FAG i dr.) su projektovali i proizveli niz pribora i uređaja za montažu i demontažu ležajeva, kao i njihovu dijagnostiku.

Permanentnim praćenjem stanja kotrljajnih ležajeva i preduzimanjem odgovarajućih mera u mnogome se sprečavaju havarijski prekidi rada mnogih mašinskih sistema. Ako su ugrađeni i održavani kako treba, kotrljajni ležajevi su pouzdani mašinski elementi sa dugim radnim vekom.

## 6. LITERATURA

[1] S. Marković: *Osnovi mašinstva*, Visoka škola tehničkih strukovnih studija, Čačak, 2008

[2] H. A. Tedric: *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley & Sons, INC., 4 th edition 2001

[3] H. A. Tedric, M. Kotalas: *Essential Concepts of Bearing Technology (Rolling Bearing Analysis, Fifth Edition)*, CRC Press, 2006

[4] P. Todorović, B. Jeremić, I. Mačužić: *Tehnička dijagnostika, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2010*

[5] *SKF Priručnik za održavanje kotrljajnih ležajeva*, SKF 1998

[6] <http://www.skf.com/>

[7] <http://www.mapro.skf.com/>