

METODE ZA PROCJENU STANJA KOTRLJAJUĆIH LEŽAJA

METHODS FOR ASSESSMENT OF ROLLING ELEMENT BEARINGS

Amir Halep, dipl. inž.
Tvornica cementa Kakanj

REZIME

Dijagnostici kotrljajućih ležaja kao veoma značajnih i često korištenih mašinskih elemenata se sve više poklanja pažnja kao dijelu sveukupne dijagnostike postrojenja. Prediktivno (predviđajuće) održavanje, koje se pokazuje kao znatno superiorniji vid održavanja u poređenju sa tradicionalnim naknadnim i preventivnim održavanjima, pogotovu u pogledu smanjenja troškova i izbjegavnja iznenadnih otkaza postrojenja koji ponekada imaju nesagledive posljedice je nezamislivo bez organizacije i implementacije kvalitetne dijagnostike postrojenja. Metode ispitivanja stanja kotrljajućih ležaja se dijele u dvije grupe: metode ispitivanja koje se apliciraju nad ležajima dok mašina miruje i metode koje se apliciraju nad ležajima u pogonu. U ovom radu su predstavljene savremene metode ispitivanja stanja kotrljajućih ležaja iz obje grupe.

Ključne riječi: kotrljajući ležaj, tehnička dijagnostika, održavanje

ABSTRACT:

To diagnostics of rolling bearings as very important and commonly used machine elements is increasingly paid attention as part of an overall plant diagnostic. Predictive (predicting) the maintenance of which is shown to be significantly superior aspect of maintenance compared with traditional subsequent preventive maintenance, especially in terms of reducing costs and avoid sudden break downs of the plant, which sometimes have unforeseeable consequences is unthinkable without the organization and implementation of quality plant diagnostic. Methods of testing the condition of rolling bearings are divided into two groups: the test methods that are applied over the bearings while idle machines and methods that are applied over the bearings in the facility. This paper presents modern methods of condition assessment off rolling elements bearings in both groups.

Key words: roling element bearings, technical diagnostics, maintenance

1. UVOD

Dijagnostici kotrljajućih ležaja kao veoma značajnih i često korištenih elemenata strojeva se sve više poklanja pažnja kao dijelu sveukupne dijagnostike postrojenja. Da bi se predstavio značaj dijagnosticiranja ležaja dovoljno je napomenuti da npr. 41% svih otkaza elektromotora otpada na otkaze ležaja. Prediktivno (predviđajuće) održavanje, koje se pokazuje kao znatno superiorniji vid održavanja u poređenju sa tradicionalnim naknadnim i preventivnim održavanjima, pogotovu u pogledu smanjenja troškova i izbjegavnja iznenadnih otkaza postrojenja koji ponekada imaju nesagledive posljedice je nezamislivo bez organiziranja i implementiranja kvalitetne tehničke dijagnostike postrojenja. Metode ispitivanja stanja kotrljajućih ležaja se dijele u dvije grupe: metode ispitivanja koje se apliciraju nad ležajima

dok stroj miruje i metode koje se apliciraju nad ležajima u pogonu. U ovom radu su predstavljene savremene metode ispitivanja stanja kotrljajućih ležaja iz obje grupe. Većina defekata kotrljajućih ležaja se razvija postepeno što ostavlja korisniku dovoljno vremena za pravovremeno provođenje aktivnosti održavanja čime se izbjegavaju štete u proizvodnom procesu uslijed iznenadnog otkazivanja ležaja.

2. ISPITIVANJE STANJA LEŽAJA VAN POGONA

Procjena stanja ležaja van pogona se vrši vizuelnim pregledom ležaja i mjerenjem zazora (zračnosti) ležaja. Vizuelnim pregledom se mogu uočiti eventualna oštećenja elemenata ležaja, prisustvo korozije i nečistoća. Zazor ležaja može biti radijalni i aksijalni. Za svaki ležaj proizvođač definiira dozvoljeni zazor ležaja koji se tokom rada, usljed trošenja, uvećava. Npr. za ležaj 22228, unutarnjeg prječnika 140 mm, sa oznakom zračnosti C3 dozvoljeni radijalni zazor je $0,17 \pm 0,22$ mm. Samo mjerenje zazora se izvodi pomoću mjernih listića koji se umeću između prstena ležaja i kotrljajućeg elementa. Koriste se mjerni listići visoke rezolucije od 0,1 mm sa debljinama počev od 0,03 mm. Uvećanje zazora ležaja iznad definiranih granica pokazatelj je istrošenosti ležaja.

3. ISPITIVANJE STANJA LEŽAJA U POGONU

Danas su u primjeni sljedeće metode ispitivanja stanja kotrljajućih ležaja u pogonu:

- mjerenje temperature ležaja,
- preslušavanje šuma ležaja u audio području,
- preslušavanje šuma ležaja u ultrazvučnom području,
- mjerenje vibracija ležaja i
- specijalne metode procjene stanja ležaja.

3.1. Mjerenje temperature ležaja

Mjerenje temperature ležaja je vrlo stara metoda koja se primjenjuje praktično od kada se primjenjuju i sami ležaji. Pri radu dolazi do zagrijavanja ležajeva usljed:

- lošeg podmazivanja ležaja,
- kontaminacije (zaprljanja) maziva,
- oštećenja (defekta) ležaja i
- vanjskih izvora toplote.

Loše podmazivanje je uzrok zagrijavanja ležaja, ako je:

- aplicirano premalo maziva,
- aplicirano previše maziva ili
- aplicirano neadekvatno mazivo.

Ukoliko je aplicirana premalena količina maziva ili je u pitanju neadekvatno mazivo koje svojim performansama ne zadovoljava zahtjeve aplikacije dolazi do povišenog trenja u ležaju usljed čega se isti zagrijava. Također, ako se aplicira prevelika količina maziva unutar kućišta ležaja, posebno ako se za podmazivanje koristi mast, tada također dolazi do povećanog trenja i zagrijavanja ležaja. Iskustvo govori da usljed apliciranja prevelike količine masti ponekada dolazi do oštećenja kaveza ležaja. Mazivo može biti kontaminirano raznim nečistoćama kao što su npr. metalni opiljci, pijesak, voda itd. što opet dovodi do zagrijavanja uzrokovanog trenjem i štaviše oštećenja i ubrzanog habanja ležaja. Do zagrijavanja ležaja često dolazi od

strane vanjskih izvora toplote, a također nije rijedak slučaj da se lažaji prinudno hlade. Npr. ako se podmazivanjem vrši uljem koje cirkuliše i hladi se u hladnjaku ulja ili ako je hlađenje ležaja uzrokovano niskim temperaturama okoline što se dešava npr. u zimskom periodu. Većina defekata ležaja dovodi do povećanja trenja odnosno zagrijavanja ležaja tako da povišena temperatura ležaja predstavlja simptom defekta istog. Dakako da pri dijagnosticiranju treba eliminisati druge potencijalne uzroke zagrijavanja. Najjednostavniji, ali svakako ne i najbolji način ocjene temperature ležaja je ljudsko čulo dodira. U mnogo slučajeva je dovoljno da rukom opipamo kućište ležaja da bismo ocijenili njegovu temperaturu. Najsuvremeniji postupak mjerenja temperature ležaja se provodi pomoću beskontaktnih IR termometara ili pomoću termovizijske kamere, a također se vrše mjerenja pomoću senzora kao što su Pt100 senzori i termistorski senzori te termoelementi tipa J (Fe-Co). Potrebno je poznavati normalnu radnu temperaturu ležaja, a u slučaju odstupanja potrebno je istražiti uzrok vodeći računa da uzrok može biti i greška u mjerenju. Korisno je pratiti trend promjene temperature ručnim bilježenjem mjerenja ili pomoću elektronskih uređaja. U svakom slučaju temperaturu ležaja treba mjeriti i provjeravati da li je u zadanim granicama za dati tip ležaja, jer u slučaju odstupanja može doći do trajnog oštećenja ležaja. Ležaji opšte namjene su predviđeni za rad u temperaturnom opsegu od -20°C do 110°C.

3.2. Preslušavanje šuma ležaja u audio području

Ispitivanje stanja kotrljajućih ležaja preslušavanjem šuma ležaja u audio području učestanosti 30 Hz ÷ 15 kHz je također vrlo stara metoda. Dijagnostičari i dan danas često koriste vrlo primitivan instrument za preslušavanje – metalnu šipku. Jedan kraj šipke se prisloni na kućište ležaja, a drugi na kost lobanje iza uha. Ispravan ležaj generira tih šum u vidu šištanja, dok je ležaj sa defektom bučan. Kod ležaja sa manjim oštećenjem imamo šum u vidu "zvonjenja" dok znatnije oštećeni ležaji odaju šum u vidu udara. Bitno je napomenuti da abnormalni šumovi mogu doprijeti usljed kontaminacije maziva. Danas se preslušavanje šuma ležaja vrši pomoću elektronskih stetoskopa. Glavni nedostaci ove metode su subjektivnost rezultata i problemi sa smetnjama koje potiču od drugih izvora buke. Naime zvučni talasi niske frekvencije se lahko rasprostiru na velike udaljenosti pogotovo kroz čvrste medije kao što je metal. Intenzitet zvuka tokom njegovog rasprostiranja opada usljed apsorpcije zvuka u mediju prema *Beer-Lambertovom* zakonu:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \dots(1)$$

gdje je A_0 početni intenzitet pored izvora zvuka, α koeficijent apsorpcije i x udaljenost od izvora. Koeficijent apsorpcije α kod većine medija raste s frekvencijom po kvadratnom zakonu dok kod pojedinih medija kao što su npr. biološka tkiva raste po linearnom zakonu. Dakle sa padom frekvencije apsorpcija zvuka opada tako da se zvučni talasi niske frekvencije lahko rasprostiru na velike udaljenosti. Kako bi se eliminisao spomenuti problem konstruisani su stetoskopi za preslušavanje šuma ležaja u ultrazvučnom području.

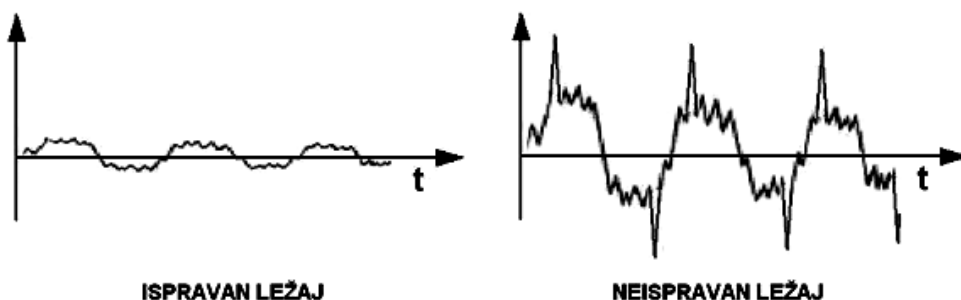
3.3. Preslušavanje šuma ležaja u ultrazvučnom području

Ultrazvuk se ne rasprostire na velike udaljenosti od izvora. Usljed ovoga izvor ultrazvuka se relativno lahko detektira, a smetnje usljed drugih izvora ultrazvuka nisu značajno izražene. Najraniji simptom defekta ležaja je pojava vibracija ležaja u ultrazvučnom području učestanosti 20÷100 kHz. Daljim procesom degradiranja ležaja vibracije u ultrazvučnom području se znatno uvećavaju. Ovom metodom se mogu uspješno dijagnosticirati oštećenja ležaja čak i na ležajevima sa niskim brojem obraja ispod 25 o/min, potrebna su umjerena ulaganja za provođenje, a postizu se veoma dobri rezultati. Glavni nedostatak ove metode je

subjektivnost rezultata. Metoda je uvedena u upotrebu sredinom 60.-tih godina prošlog stoljeća za otkrivanje pukotina na bocama pod pritiskom. Slušanje ultrazvuka se vrši pomoću elektronskog stetoskopa koji sadrži piezoelektrični ultrazvučni mikrofoni. Signal sa ultrazvučnog mikrofona se pojačava, a zatim se pomoću heterodinskog elektroničkog sklopa, prevodi u audio područje. Frekvencija heterodinskog oscilatora je približno 40 kHz tako da se ultrazvuk iz opsega 40-60 kHz prevodi u audio područje. Signal preveden u audio područje se sluša slušalicama, a njegovi dijagrami u vremenskom i frekventnom domenu se snimaju pomoću osciloskopa i spektralnog analizatora. Ispravan ležaj generira šum u vidu šuštanja koji je slabog intenziteta dok je šum neispravnog ležaja vrlo jak i čuje se “pucketanje” uzrokovano oštećenjima kotrljajnih staza.

3.4. Mjerenje vibracija ležaja

Objektivna metoda ispitivanja stanja ležaja je mjerenje brzine vibracija ležaja. Tipične vremenski dijagrami vibracija ispravnog i neispravnog ležaja su date na slici 1.

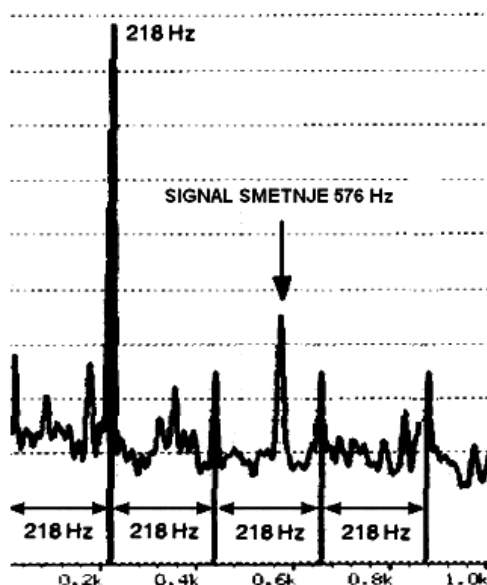


Sl. 1. Vremenski dijagrami brzine vibracija ispravnog i neispravnog ležaja

Oštri vrhovi vidljivi na vremenskom dijagramu neispravnog ležaja su uzrokovani udarima kotrljajućih elemenata u oštećenja na kotrljajućoj stazi. Također je vidljivo da je amplituda vibracija ispravnog ležaja daleko manja. Dakle, usljed defekta vibracija na kućištu ležaja značajno porastu. Mjerenje vibracija je u tehničku praksu uvedeno 60.-tih godina prošlog stoljeća, a 80.-tih godina je uvedeno snimanje frekventnog spektra brzine vibracija čime su znatno prošireni dometi ove metode. Naime, snimanjem frekventnog spektra možemo u ukupnom signalu vibracija uočiti komponente vibracija ležaja i time ih izdvojiti iz ukupnih vibracija mašine te na taj način eliminirati ometajuće signale. Dijelovi kotrljajućeg ležaja su: vanjski prsten, unutarnji prsten, kotrljajući ležaj, kotrljajući elementi i kavez. Pri rotaciji, svaki od navedena četiri dijela generira vibracije vlastite frekvencije. Njihove uobičajene oznake prema anglosaksonskoj terminologiji su:

- BPFI – Bearing Predominant Frequency Inner Race
- BPFO – Bearing Predominant Frequency Outer Race
- BSF – Ball Spin Frequency
- FTF – Fundamental Train Frequency.

Ako nam je poznat proizvođač i oznaka ležaja te broj obrtaja vibracijske frekvencije se mogu odrediti pomoću računara, a također se mogu izračunati i preko formula. Vibracije opisanih frekvencija ležaji generiraju i kada su potpuno ispravni, ali su vrlo male amplitude. Sa pojavom defekta amplitude znatno porastu. Na slici 2. je prikazan primjer frekventnog spektra vibracija ležaja. Kao što vidimo, na dijagramu, možemo uočiti ležajnu frekvenciju 218 Hz, a također i signale smetnji te strukturalni šum mašine.



Sl. 2. Primjer frekventnog spektra vibracija

4. SPECIJALNE METODE PROCJENE STANJA LEŽAJA

Razvijeno je mnogo specijalnih metoda ispitivanja ležaja kao što su npr. SPM[®] – Shock Pulse Method, HFD[®] – High Frequency Detection, SEE[®] – Spectral Emitted Energy, CPB – Constant Percentage Bandwith, Cepstrum metoda, metod krest faktora, metoda defekt faktora, metoda Distress[®] faktora i druge. Većina ovih metoda je patentirana i u vlasništvu je raznih proizvođača dijagnostičkih uređaja. Ove metode omogućavaju vrlo ranu detekciju otkaza ležaja.

5. STADIJI OTKAZA LEŽAJA

Pojedini istraživači definiraju devet stadija otkaza, međutim prema opće prihvaćenom stanovištu postoje četiri stadija otkaza ležaja. Simptomi defekta u pojedinim stadijima su dati u tabeli 1.

Tabela 1. Stadiji otkaza ležaja

| STADIJ | SIMPTOMI |
|--------|--|
| 1. | - temperatura ležaja normalna - ležaj tih - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektiraju abnormalni šumovi |
| 2. | - temperatura ležaja normalna - ležaj "zvoni" - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektiraju jaki abnormalni šumovi |
| 3. | - temperatura ležaja blago uvećana - ležaj bučan - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektiraju veoma jaki abnormalni šumovi |
| 4. | - temperatura ležaja vrlo visoka - ležaj vrlo bučan - preslušavanjem ultrazvučnim stetoskopom se detektiraju izuzetno jaki abnormalni šumovi |

U kom stadiju otkaza ćemo zamijeniti ležaj ovisi o značaju pogona, ali ako ležaj dospije u četvrti stadij otkaza obavezno ga treba zamijeniti, jer prijete opasnost od uništenja cijele mašine.

6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rečenog mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- procjena stanja ležaja je imperativ u suvremenom održavanju postrojenja i mašina,
- prilikom procjene stanja ležaja neophodno je izmjeriti temperaturu kućišta ležaja, preslušati šum ležaja u ultrazvučnom području, izmjeriti vibracije na kućištu ležaja te po mogućnosti primjeniti jednu od specijalnih metoda procjene,
- potrebno je izvršiti minimalno 3 mjerenja tokom 2 sata rada mašine, a kod značajnijih procjena minimalno 6 mjerenja tokom 3 dana (navedeno dakako ne važi ukoliko imamo simptome četvrtog stadija otkaza ležaja, jer tada dijagnozu možemo donijeti odmah),
- procjena stanja ležaja ovisi o značaju pogona - kod izuzetno značajnih pogona ležaj ćemo smatrati defektnim već pri pojavi simptoma prvog stadija otkaza dok kod manje značajnih pogona možemo dopustiti da ležaj dospije u četvrti stadij otkaza.

7. LITERATURA

- [1] R. Keith Mobley: An Introduction to Predictive Maintenance; Butterworth- Heinemann, New York, 2002.,
- [2] Torbjörn Idhammar, Oli Håkansson, Condition Monitoring Standards; IDCON INC., Raleigh 1999.,
- [3] Tedric A. Harris: Rolling Bearing Analysis, Pennsylvania State University, University Park, 2006.,
- [4] Amir Halep: Procjena stanja valjnih ležaja; Zbornik radova simpozija Održavanje 2006, Rovinj.