

UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

mr Goran B. Šiniković

**DETEKCIJA OŠTEĆENJA LEŽAJA
U ULTRAZVUČNOM DOMENU**

Doktorska disertacija

Beograd, 2012.

University of Belgrade
Faculty of MECHANICAL ENGINEERING

Goran B. Šiniković M.Sc.ME

**BEARING DAMAGE DETECTION
IN ULTRASONIC DOMAIN**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2012

Komisija za ocenu i odbranu:

Mentor: dr Aleksandar Veg, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Članovi komisije: dr Miodrag Stoimenov, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Ljubomir Miladinović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Dragan Petrović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

dr Nenad Pavlović, redovni profesor
Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet

Datum odbrane:

Detekcija oštećenja ležajeva u ultrazvučnom domenu

Apstrakt

Svi ležajevi, ispravni ili oštećeni, novi ili korišćeni, u radu generišu određeni nivo ultrazvuka, kao posledicu kontakta kotrljajnih elemenata i kotrljajnih staza. Degradacije maziva i pojava prvih znakova zamora materijala ležaja dovodi do povećanja trenja u ležaju a samim tim i viši nivo akustičke emisije ležaja.

U doktorskoj disertaciji postavljena je originalna metodologija detekcije oštećenja kotrljajnih ležajeva u ultrazvučnom domenu. Razvijen je primenjiv model i prototipsko rešenje elektronskog bloka za kondicioniranje izvornih signala. Formulacija kriterijuma kvaliteta izvedena je na jednostavan način što govori o suštinskom sagledavanju i diferenciranju disipirane energije usled nastalog oštećenja, kako u ranoj tako i u odmakloj pojavnjoj fazi.

Detekcija oštećenja ležaja u ultrazvučnom domenu je metoda nadzora ležaja koja se razlikuje od tradicionalnih dijagnostičkih metoda. Ovom metodom analizira se visokofrekventni deo spektra, frekvencije u opsegu 100 kHz - 500 kHz. Senzori koji se koriste osetljivi su na metalni kontakt koji se pojavljuje pri prelasku kotrljajnog elementa preko kotrljajne staze bez prisustva dovoljnog sloja maziva. U tom slučaju, senzor na izlazu emituje visokofrekventni pulsirajući signal.

Razvojem nove metode detekcije oštećenja kotrljajnih ležajeva stvaraju se uslovi za precizniju procenu stanja ležaja ultrazvučnom dijagnostikom. Time se unapređuje i pojednostavljuje tehnologija održavanja rotacione opreme, što smanjuje postojeće troškove usled zastoja i omogućuje pravovremenu intervenciju. Time se ujedno i povećava pouzdanost rada ključnih energetskih sistema termo-elektrana, toplana, vodovodne infrastrukture i drugih energetskih postrojenja u rafinerijama i procesnoj industriji.

Ključne reči: Detekcija oštećenja ležaja, nadzor opreme, vibracije, ultrazvuk

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Dinamika mašina

UDK 621.822.6 (043.3)

Bearing Damage Detection in Ultrasonic Domain

Abstract

All bearings, operational or damaged, new or used, generate a certain level of ultrasound during work, as a result of contact of rolling elements and the rolling slopes. Lubricant degradation and appearance of the first signs of bearing fatigue lead to increased friction in the bearing and therefore a higher level of acoustic emission.

In doctoral dissertation, an original methodology for roller bearings damage detection in ultrasonic domain is established. The applicable model and the electronic block prototype solution for conditioning the source signals are developed. The quality criteria is formulated in a simple way, which shows the substantial comprehending and diversifying of the dissipated energy due to damage, incurred both in early and in advanced stage of manifestation.

Bearing damage detection in ultrasonic domain is the method of bearing inspection that differs from traditional diagnostic methods. This method analyzes the high-frequency part of the spectrum, the frequencies in the range of 100 kHz - 500 kHz. The used sensors are sensitive to the metal contact that occurs during rolling element passage through the rolling slopes in the absence of sufficient lubricant layer thickness. In this case, the sensor emits a high-frequency output of the pulsing signal.

By the development of the new methods for the detection of the ball bearing defects, the conditions for a more precise ultrasound assessment of bearing conditions are created. This improves and simplifies maintenance technology of rotary equipment, reducing the current costs due to the stoppage and allows timely intervention. This also increases the working reliability of the key energetic systems of the thermal power plants, heating plants, water infrastructure and other power plants in refineries and process industries.

Key words: Bearing fault detection, Condition monitoring, Vibration, Ultrasound

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific sub discipline: Machine dynamics

UDK 621.822.6 (043.3)

SADRŽAJ

1	UVOD	1
2	OSNOVNI KONCEPT KOTRLJAJNIH LEŽAJEVA	3
2.1	Kratak istorijski pregled	3
2.2	Tipovi ležaja	4
2.3	Označavanje ležaja	6
3	OŠTEĆENJA KOTRLJAJNIH LEŽAJA I NJIHOVI UZROCI	8
3.1	Tragovi oštećenja i njihovo tumačenje/interpretacija	9
3.2	Tipovi oštećenja ležaja	17
3.2.1	Habanje ležaja	17
3.2.2	Utiskivanje (Indentations)	21
3.2.3	Razmazivanje (Smearing)	23
3.2.4	Površinsko razaranje (Surface Distress)	24
3.2.5	Korozija	25
3.2.6	Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje	26
3.2.7	Oštećenja kaveza	28
4	PREGLED POSTOJEĆIH METODA DIJAGNOSTIKE LEŽAJA	29
4.1	Analiza vibracija u vremenskom domenu	29
4.2	Analiza vibracija u frekventnom domenu	30
4.3	Vremensko-frekventna analiza vibracija	32
4.4	Analiza sopstvenih frekvencija ležaja	34
4.5	Envelopa ubrzanja	35
4.6	SEE (Spectral Emitted Energy)	40
4.7	HFD (High Frequency Detection)	41
4.8	SPM (Shock Pulse Method)	41

5	DETEKCIJA OŠTEĆENJA LEŽAJA U ULTRAZVUČNOM DOMENU	44
5.1	Vibracije visokih frekvencija - ultrazvuk	44
5.2	Akustička emisija ležaja	46
5.3	Proces obrade signala	48
5.3.1	Greške u mernom lancu	50
5.3.2	Uticaj šumova i analogne obrade signala	50
5.3.3	Kolo za uzorkovanje i držanje	52
5.3.4	Izbor rezolucije i brzine uzorkovanja	53
5.4	Opis instrumenta za merenje ultrazvučne emisije	56
5.5	Kriterijumi za ocenu stanja ležaja merenjem ultrazvučne emisije	66
6	EKSPERIMENTALNI RAD – ISPITIVANJE LEŽAJA	67
6.1	Konstruisanje probnog stola za ispitivanje ležaja	67
6.2	Opis ispitivanja i definisanje procedura	72
6.3	Merni instrumenti	74
6.3.1	Microlog CMVA 60 (SKF – Švedska)	74
6.3.2	SPM 43A (SPM – Švedska)	76
6.4	Kriterijumi za ocenu stanja ležaja	78
6.4.1	Spektralna analiza	78
6.4.2	Envelopa ubrzanja	79
6.4.3	SPM (Shock Pulse Meter)	82
6.4.4	Detekcija u ultrazvučnom domenu	83
6.5	Prikaz rezultata ispitivanja	84
6.5.1	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 1	84
6.5.2	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 2	86
6.5.3	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 3	88
6.5.4	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 4	90
6.5.5	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 5	92
6.5.6	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 6	94
6.5.7	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 7	96
6.5.8	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 8	98
6.5.9	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 9	100
6.5.10	Rezultati ispitivanja na ležaju br. 10	102

6.5.11 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 11	104
6.5.12 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 12	106
6.5.13 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 13	108
6.5.14 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 14	110
6.5.15 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 15	112
6.6 Analiza rezultata ispitivanja	114
7 ZAKLJUČAK	121
8 LITERATURA	124

LISTA SIMBOLA, SLIKA I TABELA

BIOGRAFIJA

Prilog 1 – Izjava o autorstvu

Prilog 2 – Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Prilog 3 – Izjava o korišćenju

1. UVOD

Modernizacija industrijski kapaciteta iziskuje nove modele preventivnog i prediktivnog održavanja što podrazumeva razvoj i primenu novih dijagnostičkih metoda za procenu stanja ključnih delova kao što su kotrljajni ležajevi na rotacionim mašinama.

Životni vek kotrljajnih ležajeva je ograničen. Čak i ako su opterećenja kojim su izloženi u projektovanim granicama, pre ili kasnije doći će do zamora materijala i otkaza ležaja. Vremenski period do pojave prvih znakova zamora je u funkciji broja ciklusa i magnitude opterećenja. Vek kotrljajnih ležajeva je definisan ukupnim brojem ciklusa koje ležaj može da ostvari pre pojave prvih znakova oštećenja. To ne znači da je ležaj neupotrebljiv posle tog trenutka. Po pravilu, od nastanka prvih znakova oštećenja do konačnog zaustavljanja, postoji dovoljno dug vremenski period za planiranje i pripremu zamene ležaja.

Iskustva nam govore da veoma često ležaj ne postigne proračunski životni vek što dovodi do zastoja rotacione opreme.

Postoji mnogo mogućih uzroka koji dovode do njegovog preranog otkaza a među njima su najčešći: preopterećenje, neodgovarajuće i nestabilno podmazivanje, nepravilno rukovanje, loše zaptivanje, nepoštovanje zahtevanih tolerancija – smanjenje unutrašnjeg zazora.

Ranom detekcijom oštećenja ležaja mogu se sprečiti katastrofalni otkazi, izbeći proizvodni gubici i povećati raspoloživost opreme smanjenjem vremena zastoja zbog servisa.

Da bi se pravovremeno dijagnostikovalo realno stanje kotrljajnih ležajeva potrebno je imati adekvatnu metodu koja će precizno odrediti trenutno stanje ležaja i dati odgovor o preostalom veku trajanja i neophodnosti njegove zamene.

Trenutno na tržištu postoje metode i komercijalni programski paketi koji svojim performansama pokrivaju i ovaj segment, ali su zbog veličine i visoko postavljenih zahteva primene potpuno nedostupni domaćem tržištu, pa je jasna potreba za formiranjem inovativne metode koja bi omogućila korišćenje savremenih tehnologija i dala kompetentne rezultate.

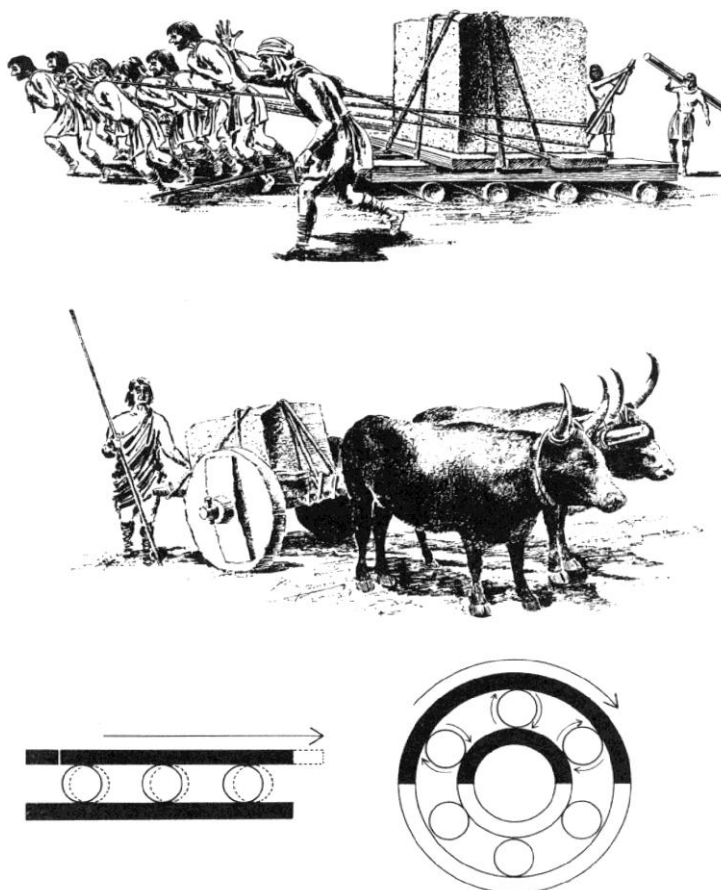
Osnovni cilj disertacije je dobijanje postupka kojim bi se omogućilo praćenje stanja kotrljajnih ležajeva na rotacionim mašinama, brza i efikasna procena stanja i otkrivanje ranih defekata čime bi se postiglo optimalno iskorišćenje kapaciteta svakog ležaja i produžio radni vek mašine uz adekvatno smanjenje materijalnih troškova.

2. OSNOVNI KONCEPT KOTRLJAJNOG LEŽAJA

2.1 Kratak istorijski pregled

Prvi koncept kotrljajnog ležaja datira još iz vremena Rimljana, oko 50. godine nove ere. Pronalaskom točka ustanovljeno je da je za pomeranje tereta potrebna manja snaga (sila) ukoliko se koriste točkovi tj. ukoliko se pomeranje obavlja kotrljanjem a ne klizanjem tela po podlozi. Pronalaskom maziva, otpor trenja je umanjen ali je i dalje znatno veći u poređenju sa otporom kotrljanja.

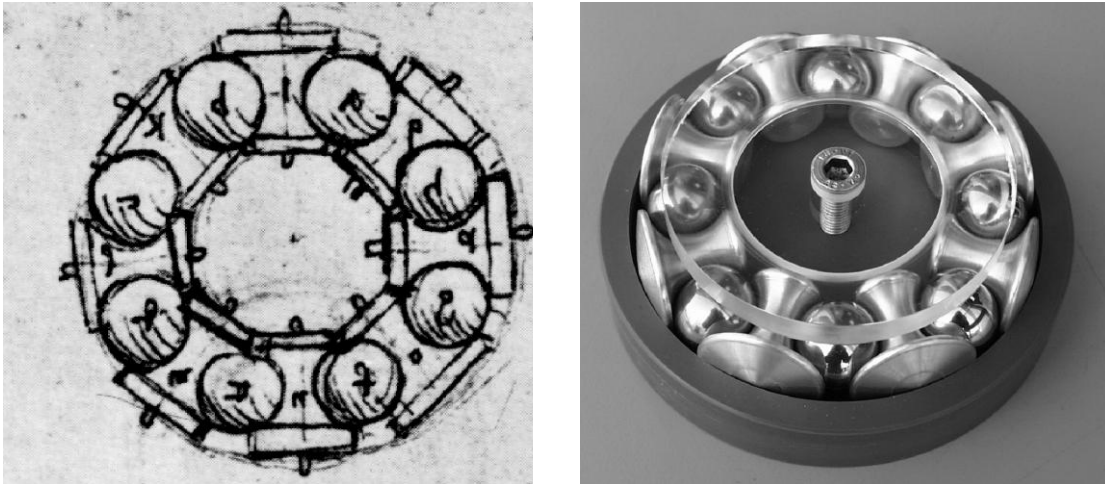
Najefikasniji način prenosa opterećenja između dva elementa koji se nalaze u relativnom kretanju je da se između njih umetnu kotrljajni elementi. Otpor klizanja dve kontaktne površine daleko je veći od otpora kotrljanja. Slika 2.1 na jednostavan način prikazuje evoluciju kotrljajućih ležajeva [1].



Slika 2.1 – Evolucija kotrljajnih ležajeva [1]

Iako je koncept kotrljajućih pokreta poznat i koristi se hiljadama godina, do upotrebe kotrljajnih ležajeva došlo je tek tokom industrijske revolucije.

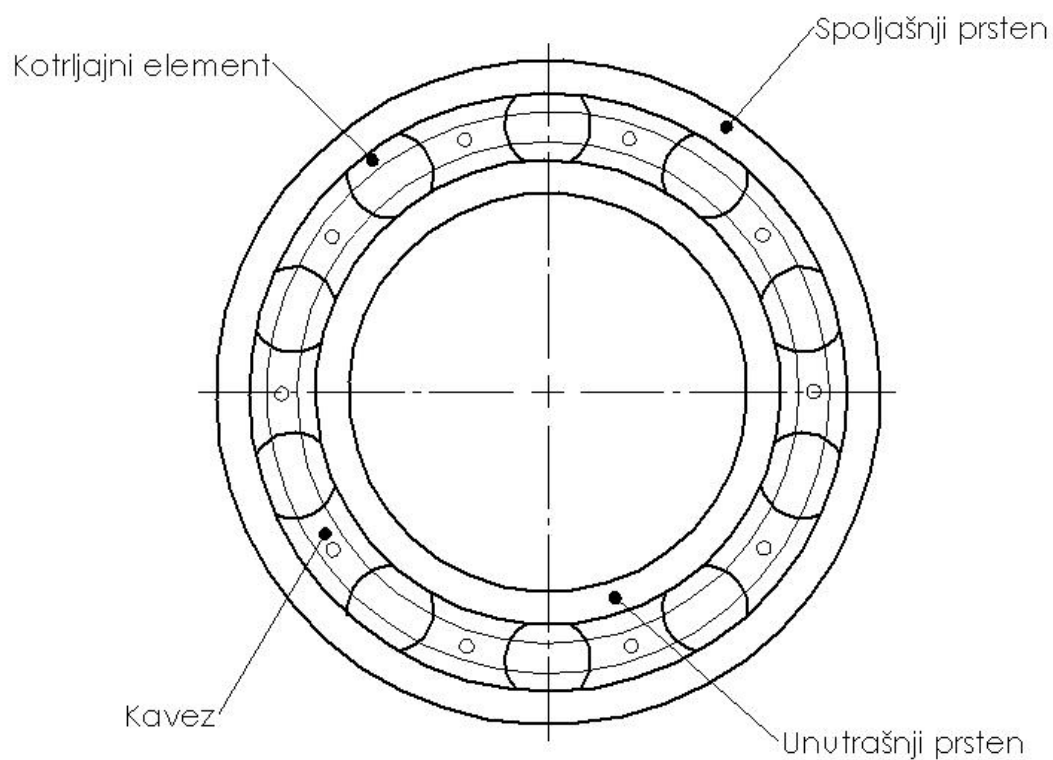
Začetnik osnovne konstrukcije modernih kotrljajnih ležajeva je Leonardo da Vinči (1452.- 1519.). Dizajn njegovog kugličnog ležaja prikazan je na slici 2.2.



Slika 2.2 – Da Vinčijev koncept kotrljajnog ležaja [1]

Osnovni zadatak ležaja je da obezbedi rotaciju, tačnu poziciju i prenos opterećenje između dva mašinska dela, najčešće vratila i kućišta.

Konstrukcija kotrljajnih ležaja je jednostavna, sastoje se od četiri elementa: spoljašne i unutrašnje kotrljajne straze, kotrljajnih elemenata i kaveza (slika 2.3). Tri elementa učestvuju u prenosu opterećenja, dok četvrti obezbeđuje pravilnu međusobnu poziciju kotrljajnih elemenata.



Slika 2.3 – Konstrukcija kotrljajnog ležaja

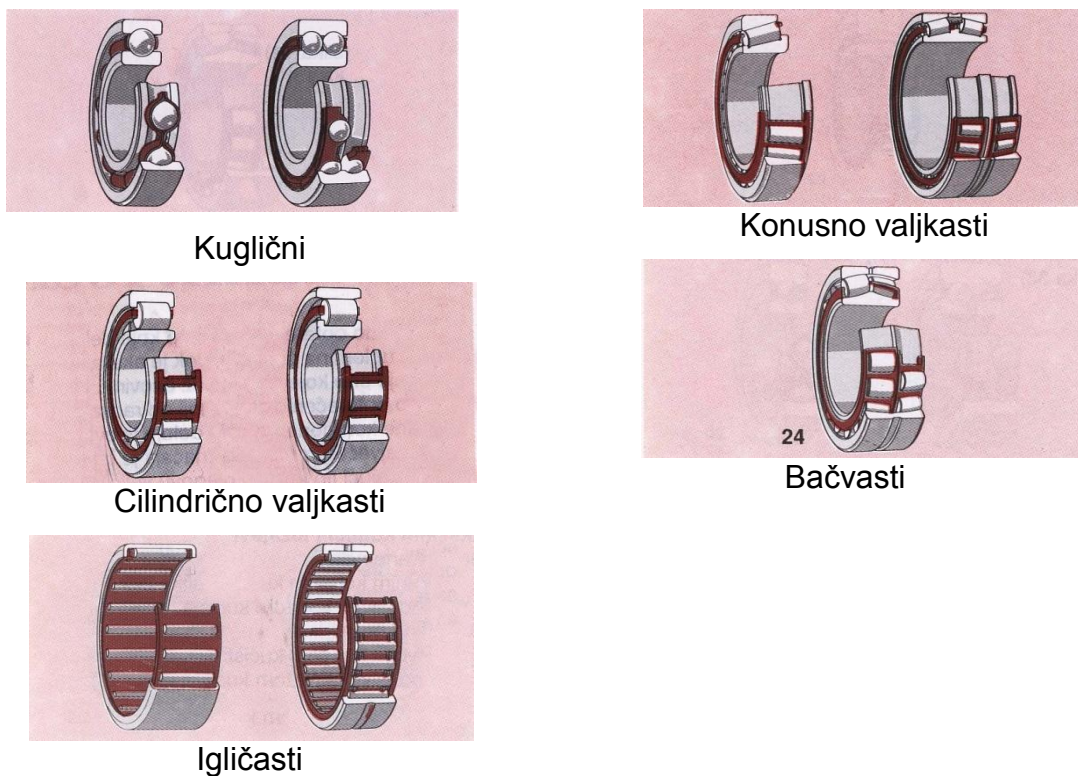
2.2 Tipovi ležaja

Postoji nekoliko podela kotrljajnih ležajeva.

Prvu možemo napraviti prema obliku kotrljajnih elemenata.

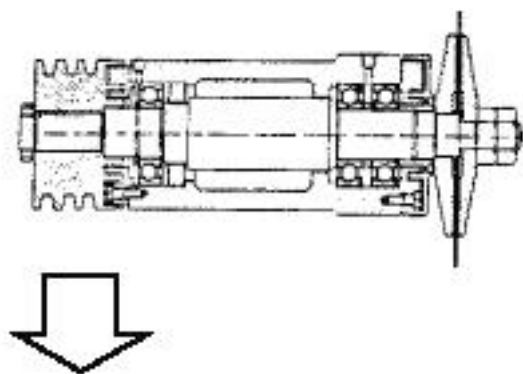
Prema toj podeli ležajevi se dele na:

- Kuglične
- Cilindrično valjkaste
- Igličaste
- Konusno valjkaste
- Bačvaste

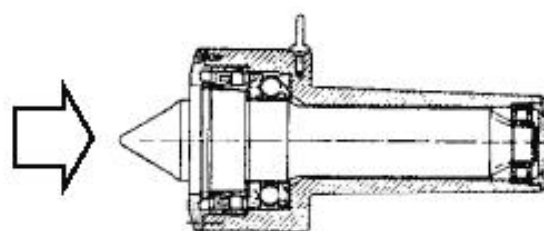


Slika 2.4 – Tipovi ležaja prema obliku kotrljajnih tela [3]

Druga podela ležajeva može se napraviti prema pravcu opterećenju koje prenose. Na taj način ležajevi se dele na radijalne i aksijalne. Radijalni ležajevi su projektovani tako da primarno prenose radijalna opterećenja (sl. 2.5), dok je konstrukcija aksijalnih ležajeva takva da omogućava prenos aksijalnih opterećenja (sl. 2.6).



Slika 2.5 – Radijalno opterećen ležaj



Slika 2.6 – Aksijalno opterećen ležaj

2.3 Označavanje ležajeva

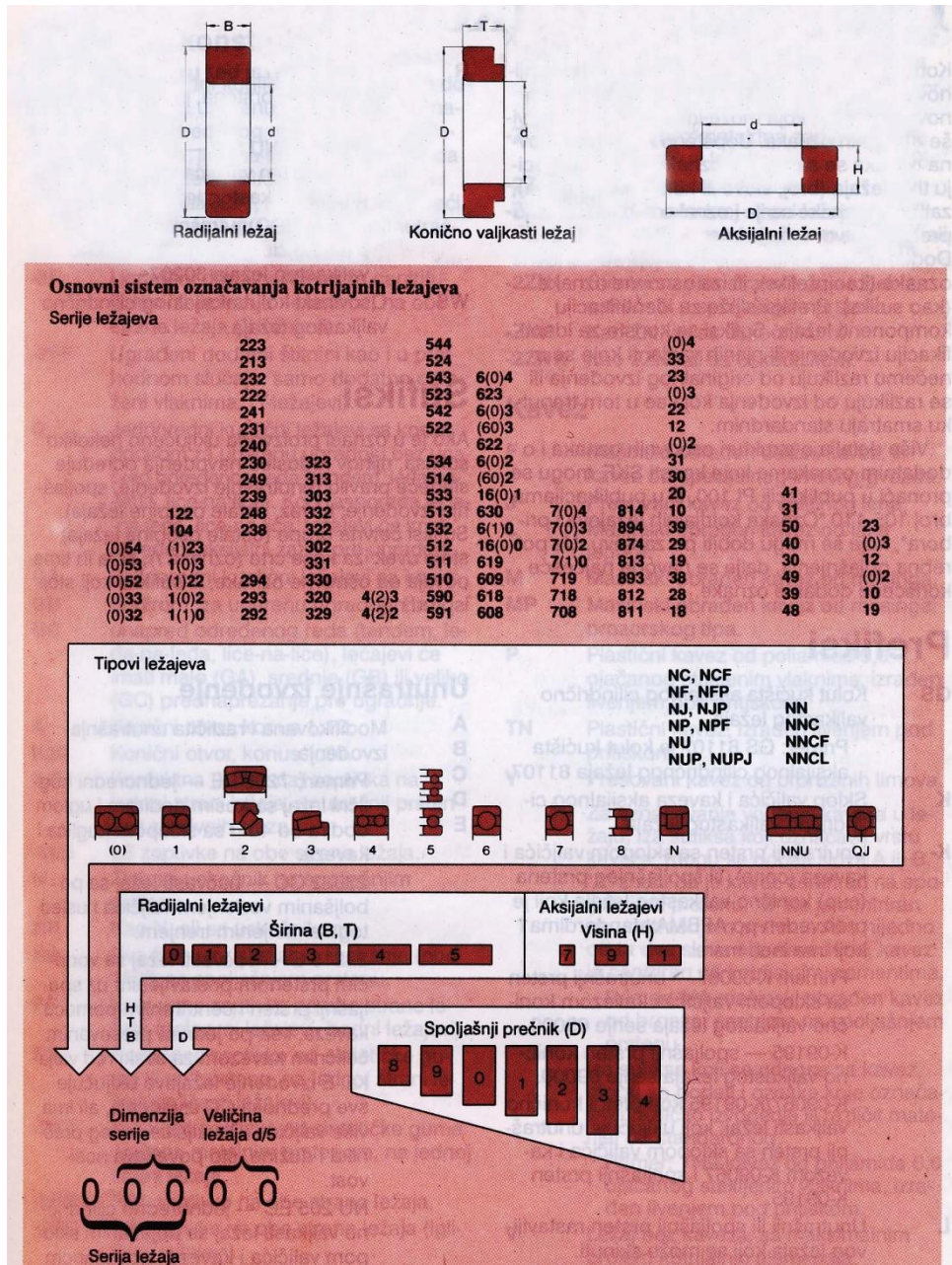
Svi ležajevi u metričkom izvođenju nose osnovnu oznaku, koja se sastoji od tri, četiri ili pet brojeva ili kombinacije slova i brojeva. Brojevi (ili slova i brojevi) imaju značenje po redu kojim su navedeni [3]:

- Prvi broj u osnovnoj oznaci ležaja (ili prvo slovo) označava tip ležaja
- Drugi i treći broj označavaju dimenziju serije, a sledeći označava prečnik serije (D)
- Dva poslednja broja pomnožena sa pet daju prečnik otvora (d)

U određenim slučajevima, broj koji označava tip ležaja ili prvi broj dimenzije serije mogu biti izostavljeni. Na slici 2.7, ti brojevi dati su u zagradama.

Oznake tipa ležaja

- 0** – Dvoredni kuglični sa kosim dodirom
- 1** – Samopodesivi kuglični
- 2** – Bačvasti i aksijalni bačvasti
- 3** – Konusno valjkasti
- 4** – Dvoredni radijalni kuglični
- 5** – Aksijalni kuglični
- 6** – Jednoredni radijalni kuglični
- 7** – Jednoredni kuglični sa kosim dodirom
- 8** – Aksijalni cilindrično valjkasti
- N** – Cilindrično valjkasti
- QJ** – Kuglični sa dodirom u četiri tačke
- T** – Konusno valjkasti



Slika 2.7 – Označavanje ležaja [3]

3. OŠTEĆENJA LEŽAJEVA I NJIHOVI UZROCI

Često se dešava da ležaj ne doživi projektovani radni vek. 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.

Generalno, kotrljajni ležajevi ne mogu da traju zauvek. Čak i ako su opterećenja kojim su izloženi u projektovanim granicama, pre ili kasnije doći će do zamora materijala i zaustavljanja ležaja. Vremenski period do pojave prvih znakova zamora je u funkciji broja obraja/ciklusa i magnitude opterećenja. Zamor je rezultat cikličnog naprezanja materijala pod dejstvom opterećenja. Vremenom, naprezanja uzrokuju naprsline koje se postepeno povećavaju. Kako u radu ležaja kotrljajni elementi prelaze preko naprslina, one se vremenom povećavaju što dovodi i do odvajanja materijala (ljuspice). Ta pojava se naziva ljuspanje.

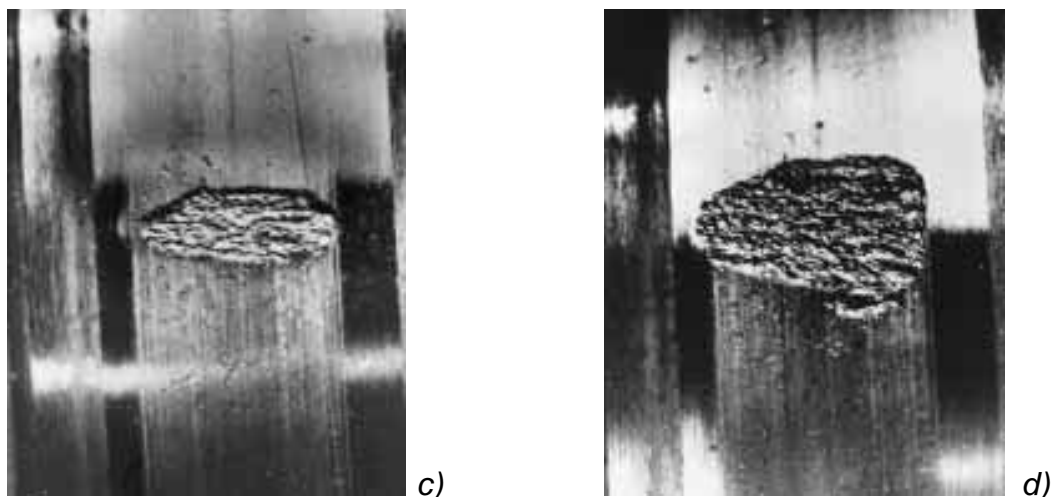
Ljuspanje se progresivno povećava (slika 2.1a – 2.1d) i konačno dovodi do zaustavljanja ležaja.



a)



b)



Slika 3.1 – Faze oštećenja ležaja [4]

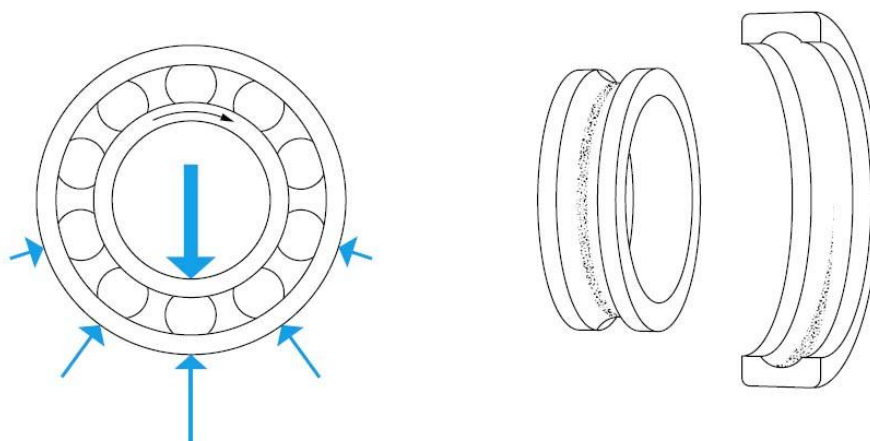
3.1 Tragovi na kotrljajnoj stazi i njihovo tumačenje/interpretacija

U radu kotrljajnih ležaja, pod dejstvom opterećenja, dolazi do deformacija kontaktnih površina kotrljajnih elemenata i staze kotrljanja, što ostavlja vidljive tragove. Tragovi na kotrljajnoj stazi nastaju i pri „normalnoj“ eksploataciji ležaja, tako da sama pojava ne predstavlja indikaciju habanja. Analizom tragova mogu se odrediti uslovi u kojima je ležaj radio kao i opterećenja kojima je bio izložen.

Na slikama koje slede od slike 2.2 do 2.8 prikazan je normalan trag za različite slučajeve opterećenja, dok je na slikama 2.9 – 2.15 prikazan trag u abnormalnim radnim uslovima.

Izgled i pozicija traga mogu da budu od pomoći prilikom otkrivanja uzroka oštećenja.

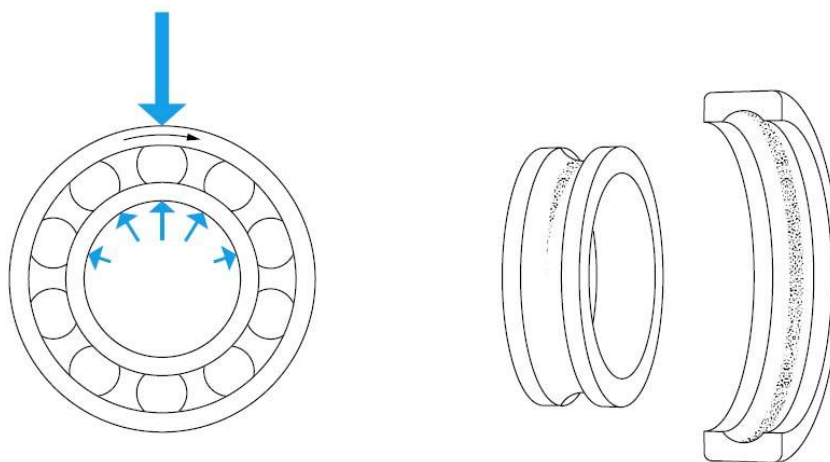
Na prikazanim slikama dati su kuglični radijalni i aksijalni ležajevi. Iste slike, sa manjim modifikacijama, su primenjive i na druge tipove ležaja.



Slika 3.2 – Radijalno jednosmerno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena, fiksiran spoljašnji prsten [4]

Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.

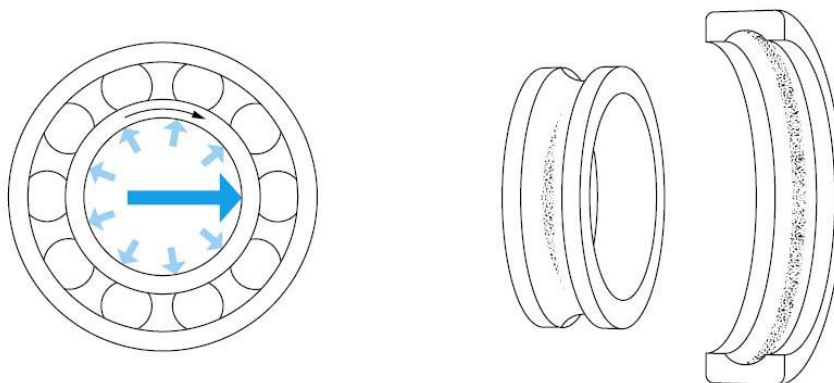
Spoljašnji prsten: Trag najširi u pravcu opterećenja, sužava se pri krajevima. Za normalna naleganja i normalne unutrašnje zazore, trag se prostire na nešto manje od pola obima kotrljajne staze.



Slika 3.3 – Radijalno jednosmerno opterećenje, fiksiran unutrašnji prsten, rotacija spoljašnjeg prstena [4]

Unutrašnji prsten: Trag najširi u pravcu opterećenja, sužava se pri krajevima. Za normalna naleganja i normalne unutrašnje zazore, trag se prostire na nešto manje od pola obima kotrljajne staze.

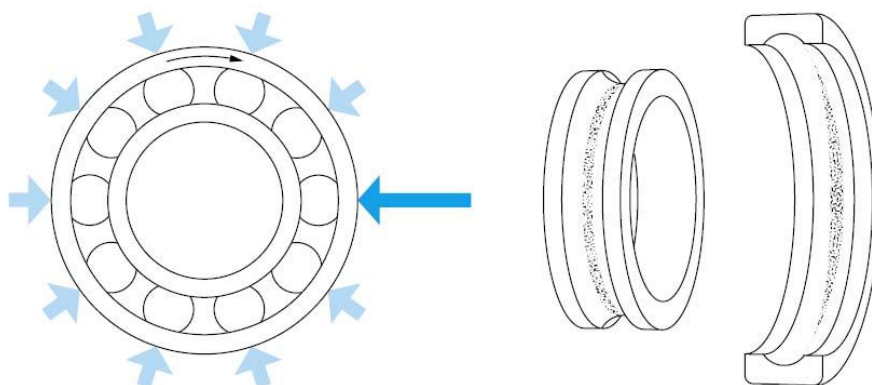
Spoljašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.



Slika 3.4 – Radijalno opterećenje rotira u fazi sa unutr. prstenom, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran [4]

Unutrašnji prsten: Trag najširi u pravcu opterećenja, sužava se pri krajevima. Za normalna naleganja i normalne unutrašnje zazor, trag se prostire na nešto manje od pola obima kotrljajne staze.

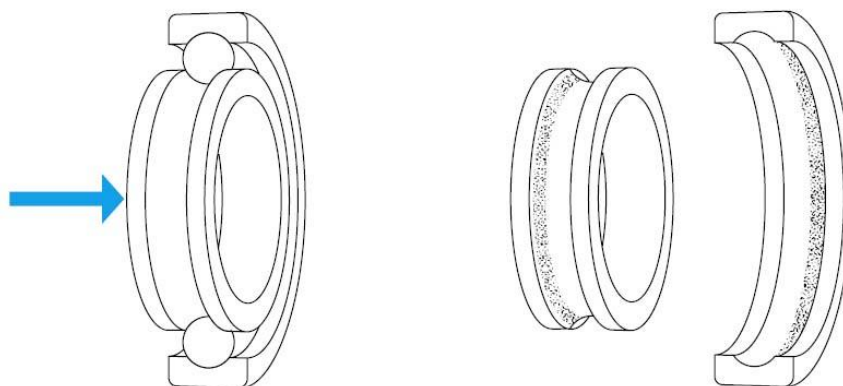
Spoljašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.



Slika 3.5 – Radijalno opterećenje rotira u fazi sa spolj. prstenom, fiksiran unutrašnjeg prstena, rotacija spoljašni prsten [4]

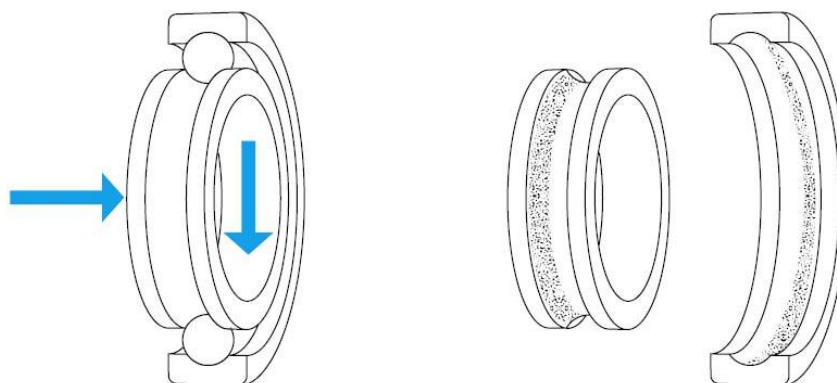
Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.

Spoljašnji prsten: Trag najširi u pravcu opterećenja, sužava se pri krajevima. Za normalna naleganja i normalne unutrašnje zazor, trag se prostire na nešto manje od pola obima kotrljajne staze.



Slika 3.6 – Aksijalno jednosmerno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena ili spoljašnjeg prstena [4]

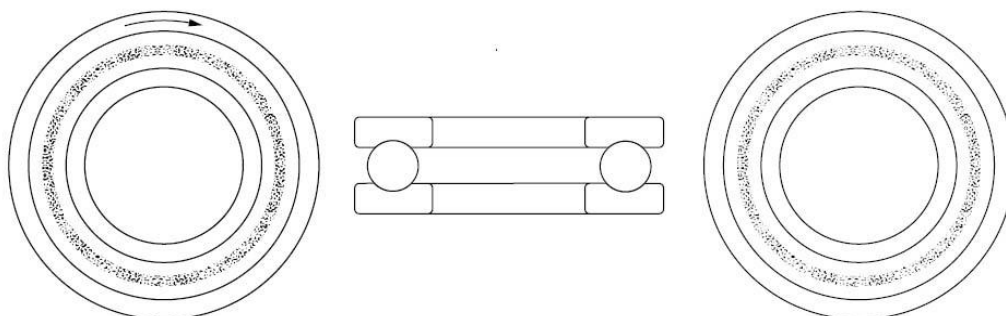
Unutrašnji i spoljašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, bočno pozicioniran po celom obimu kotrljajne staze na oba prstena.



Slika 3.7 – Kombinacija jednosmernog radijalnog i aksijalnog opterećenja, rotacija unutrašnjeg prstena, fiksiran spoljašnji prsten

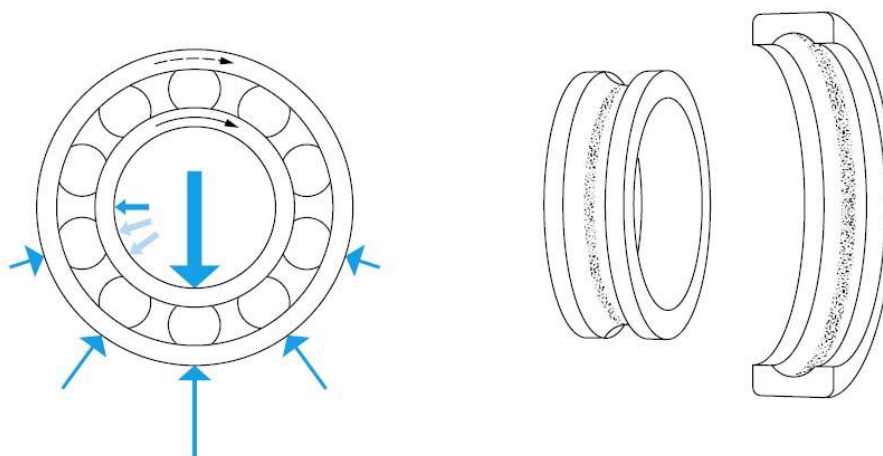
Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, bočno pozicioniran po celom obimu kotrljajne staze.

Spoljašnji prsten: Trag bočno pozicioniran po celom obimu kotrljajne staze, najširi u pravcu opterećenja.



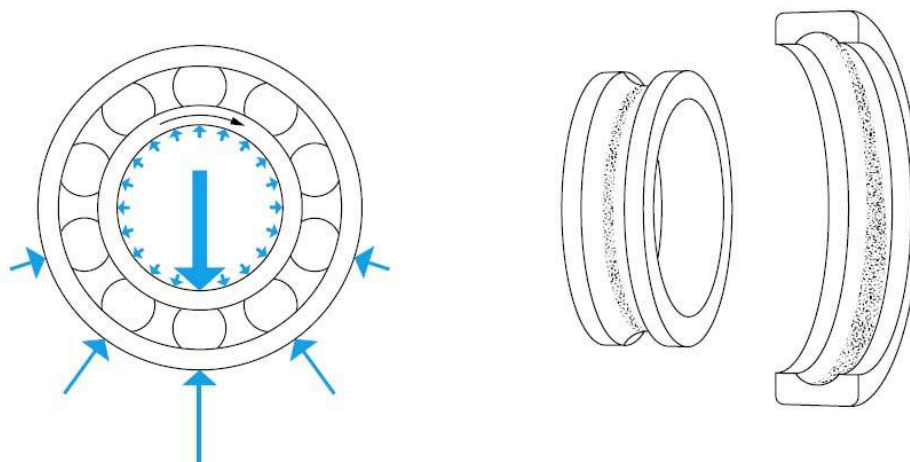
Slika 3.8 – Aksijalno opterećenje [4]

Oba prstena: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze na oba prstena.



Slika 3.9 – Radijalno jednosmerno opterećenje+neuravnoteženost, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten proklizava [4]

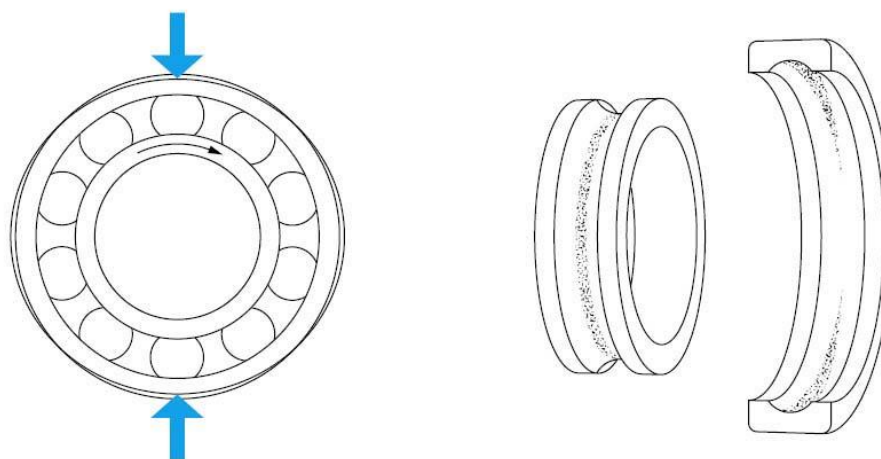
Unutrašnji i spoljašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze na oba prstena.



Slika 3.10 – Uske tolerancije-veliki preklop, radialno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašnji prsten fiksiran [4]

Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.

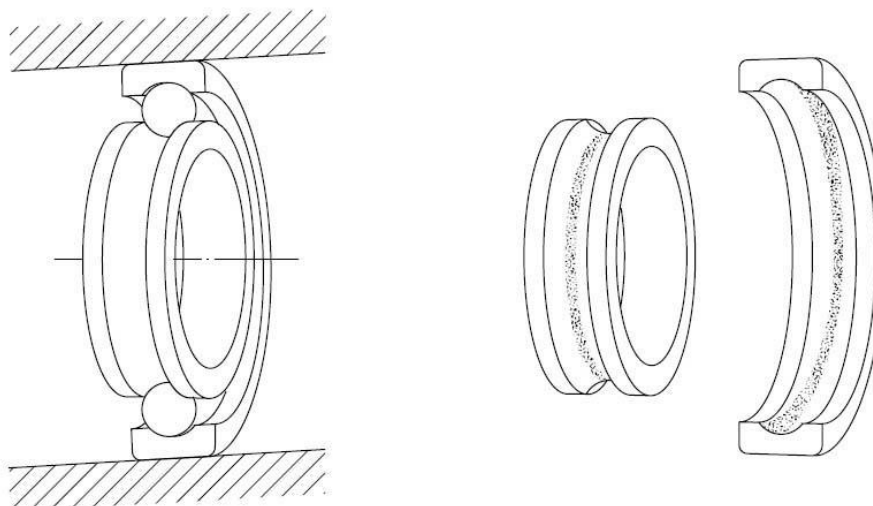
Spoljašnji prsten: Trag je pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze, najširi u pravcu opterećenja.



Slika 3.11 – Ovalno kućište, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašnji prsten fiksiran [4]

Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.

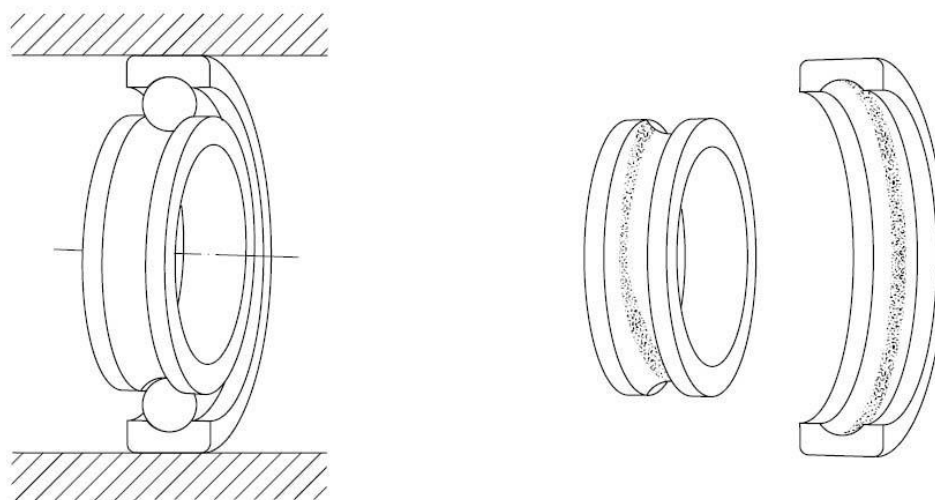
Spoljašnji prsten: Trag je pozicioniran u dva dijametralno suprotna dela staze kotrljanja, najširi na mestu gde je stezanje najveće.



Slika 3.12 – Nesnost spoljašnjeg prstena, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran [4]

Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, pozicioniran u centru i oko centra, po celom obimu kotrljajne staze.

Spoljašnji prsten: Trag je pozicioniran u dva dijametralno suprotna dela staze kotrljanja, dijagonalno postavljena jedan u odnosu na drugi.

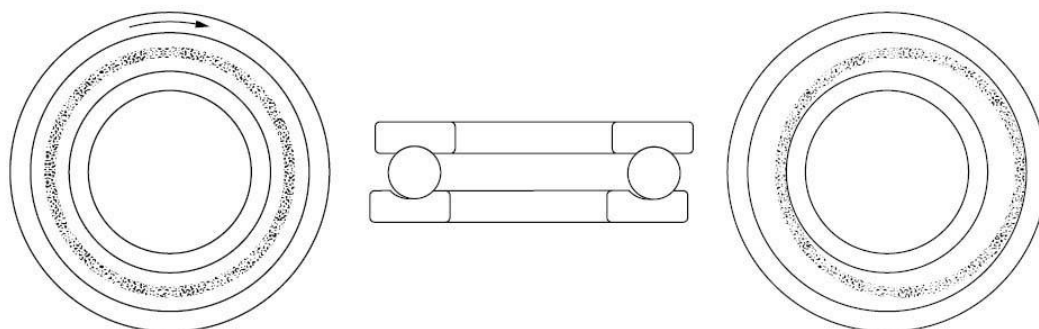


Slika 3.13 – Nesaosnost unutrašnjeg prstena, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran [4]

Unutrašnji prsten: Trag je pozicioniran u dva dijametralno suprotna dela staze kotrljanja, dijagonalno postavljena jedan u odnosu na drugi.

Spoljašnji prsten: Trag je naširi u pravcu opterećenja, sužava se pri krajevima.

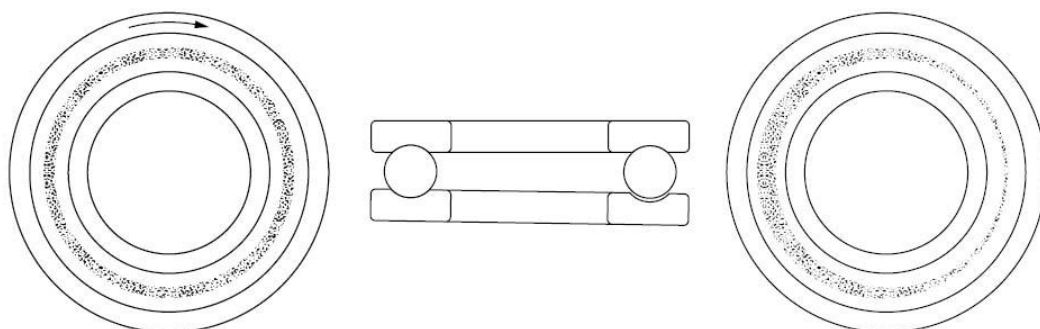
Unutrašnji zazor u ležaju je redukovan usled nesaosnosti.



Slika 3.14 – Prsten vratila i prsten kućišta ekscentrično pomereni, prsten vratila pokretan [4]

Prsten vratila: Trag ravnomeran po širini, po celom obimu kotrljajne staze.

Prsten kućišta: Trag ravnomeran po širini, po celom obimu kotrljajne staze, ekscentrično pomeren od ose prstena.



Slika 3.15 – Prsten kućišta zakošen, prsten vratila pokretan [4]

Unutrašnji prsten: Trag ravnomeran po širini, po celom obimu kotrljajne staze.

Spoljašnji prsten: Trag se nalazi u centru kotrljajne staze ali je neravnomerne širine.

3.2 Tipovi oštećenja ležaja

Svi uzroci otkaza ležaja proizvode karakteristična oštećenja. Takva oštećenja, poznata kao primarna, dovode do sekundarnih oštećenja kao što su ljušpanje i lom ležaja. Čak i primarna oštećenja mogu zahtevati zamenu zamenu ležaja zbog povećanja unutrašnjeg zazora, vibracija, buke i slično. Oštećen ležaj često pokazuje kombinaciju primarnog i sekundarnog oštećenja.

Sva oštećenja ležaja mogu se podeliti u dve grupe:

Primarna oštećenja

- Habanje
- Utiskivanje
- Razmazivanje (Smearing)
- Površinska oštećenja
- Korozija
- Oštećenja izazvana strujom

Sekundarna oštećenja

- Ljušpanje
- Prsline

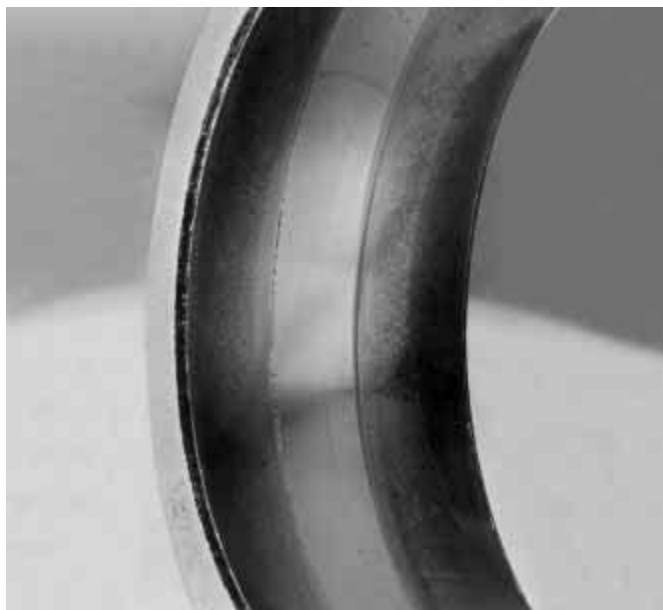
3.2.1 Habanje ležaja

U normalnim slučajevima korišćenja kotrljajnih ležajeva ne postoji merljivo habanje. Ipak, ukoliko unutar ležaja dođe do kontaminacije ili gubitka maziva habanje se može pojaviti. Prekomerne vibracije takođe mogu uzrokovati habanje.

Habanje izazvano abrazivnim česticama

Najčešći vid habanja ležaja uzrokuju dešava se kada male abrazivne čestice peska ili strugotine prodru u ležaj. One uzrokuju habanje kotrljajne steze, kotrljajnih elemenata i kaveza (sl. 2.16). Step en oštećenja površine zavisi od tvrdoće, količine i prirode čestica. Ponekad, istrošene mesingane čestice kaveza prelaze u bazni acetat bakra i daju mazivu zelenkastu boju. Količina abrazivnih čestica vremenom se povećava što ceo proces habanja ubrzava a kao krajni rezultat dolazi do habanja kontaktnih površina do mere kod koje ležaj postaje neupotrebljiv. Ponekad, ukoliko je na ležaju prisutna samo blaga pohabanost, on se može očistiti i dalje koristiti.

Abrazivne čestice mogu da prodru u ležaj usled lošeg zaptivanja, ukoliko je samo mazivo zaprljano ili u toku montaže.



Slika 3.16 – Habanje ležaja izazvano abrazivnim česticama [4]

Habanje usled neadekvatnog podmazivanja

Ova vrsta habanja nastaje u slučaju kada ležaj nema dovoljnu količinu maziva ili ukoliko je mazivo izgubilo svojstva podmazivanja. U tom slučaju ne postoje uslovi za formiranje uljnog filma koji bi obezbedio dovoljnu moć nošenja i sprečio kontakt metalnih površina kotrljajnih staza i kotrljajnih elemenata. U početnoj fazi, rezultat habanja je sličan kao i kod „preklapanja“- (lapping). Vrhovi mikroskopskih neravnina, zaostalih nakon procesa izrade, ovim se izravnavaju što daje efekat poliranja površine (sl. 2.17). U ovoj fazi dolazi i do povećanog površinskog naprezanja.

Ukoliko je mazivo potpuno potrošeno, dolazi i do brzog porasta temperature, okaljeni materijal omekšava a površina menja boju od plavih do smeđih nijansi. Temperatura može postati toliko visoka da izazove i stapanje materijala.



Slika 3.17 – Habanje ležaja usled neadekvatnog podmazivanja [4]

Habanje ležaja usled dejstva prekomernih vibracija

Ležajevi sa ovom vrstom oštećenja obično se susreću na mašinama koje nisu u pokretu a nalaze se u neposrednoj blizini mašina koje generišu vibracije.

Čak i kod ležaja kod kojih postoji dovoljna količina maziva a nisu u pokretu doći će do kontakta kotrljajnih elemenata i staze kotrljanja. Odsustvo kretanja dovodi do gubitka uljnog filma i do metalnog kontakta dva elementa. Ukoliko je takav ležaj izložen vibracijama, doći će do relativnog kretanja kotrljajnih elemenata i prstenova. Kao rezultat ovih malih pomeranja dolazi do odvajanja malih delića sa staze kotrljanja i formiranja malih ulegnuća na samoj stazi. Kuglice formiraju sferična ulegnuća (sl. 2.18), a valjčići žljebove (slika 2.19).



Slika 3.18 – Oštećenje kugličnog ležaja usled povećanih vibracijama [4]



Slika 3.19 – Oštećenje valjkastog ležaja izazvano povećanim vibracijama

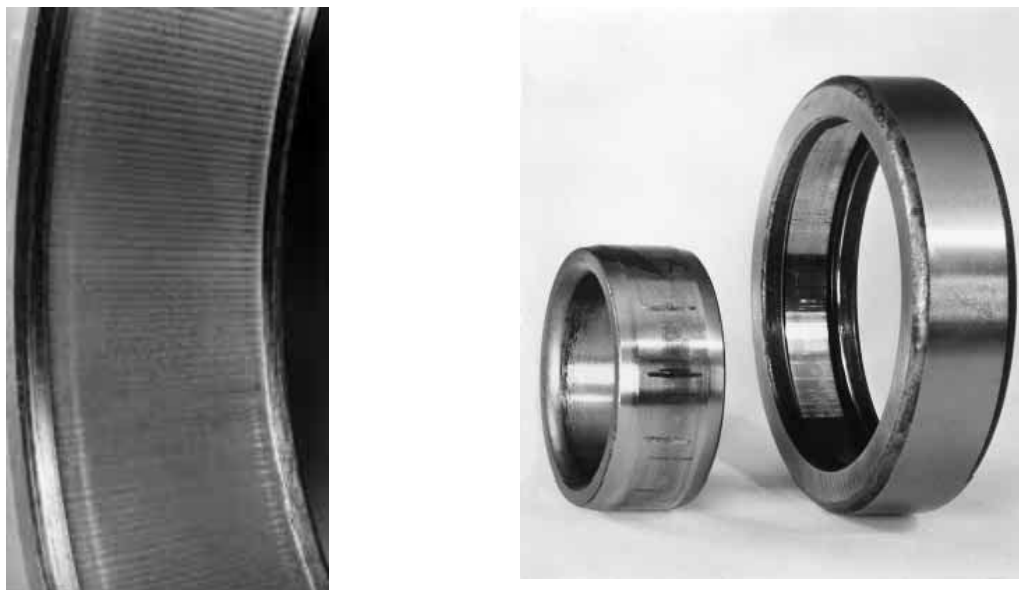
U mnogim slučajevima moguće je zapaziti rđu u dnu ulegnuća koja se javlja kao rezultat oksidacije odlomljenih delića kotrljajne staze.

Kod ove vrste oštećenja, na kotrljajnim elementima ne postoje vidljivi tragovi oštećenja.

Na stepen oštećenja značajno utiču intenzitet vibracija, vremenski period u kome je ležaj izložen i unutrašnji zazor u ležaju, dok frekvencija vibracija nema značajan efekat.

Pokazalo se da su valjkasti ležajevi osetljiviji na ovaj tip oštećenja od kugličnih ležajeva.

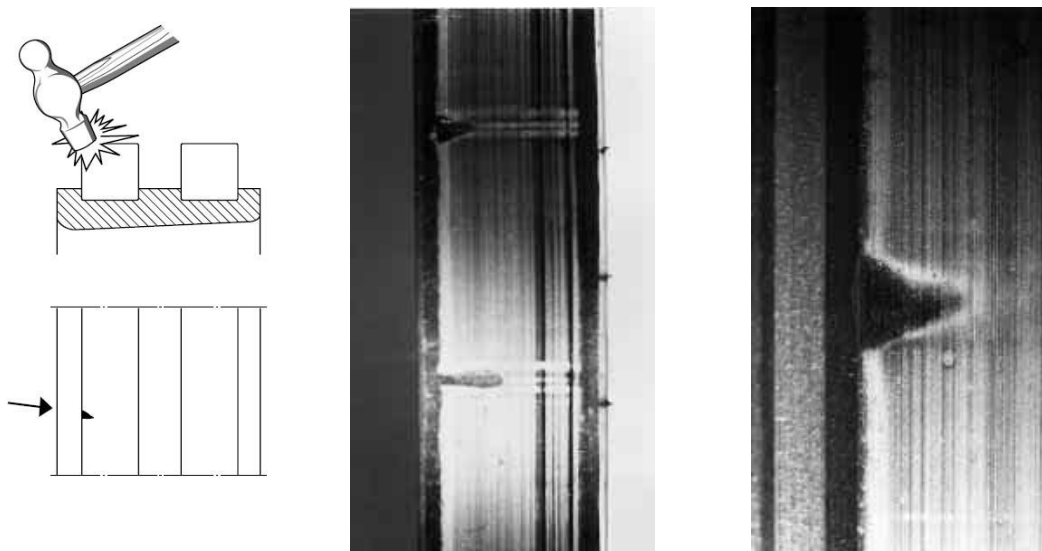
Udubljenja izazvana vibracijama ponekad liče i na oštećenja usled prolaska električne struje. Ipak, moguće je uočiti razliku prema boji žljebova ili ulegnuća. Kod oštećenja usled prolaska struje, dno udubljenja je tamne boje, za razliku od predhodnog slučaja gde je dno svetlo ili korodiralo.



Slika 3.20 – Oštećenja ležaja izazvana povećanim vibracijama [4]

3.2.2 Utiskivanje (Identations)

Pri nepravilnoj montaži ležajeva, kod koje se silom deluje na pogrešan prsten, sila se prenosi preko kotrljajnih elemenata što može uzrokovati pojavu oštećenja elemenata u obliku/vidu nazubljenja. Isti tip oštećenja može se javiti ukoliko je ležaj u radu izložen dejstvu prevelikog opterećenja (sl. 2.21).



Slika 3.21 – Oštećenje ležaja usled nepravilne ugradnje [4]



Slika 3.22 – Brazde na aksijalnom ležaju [4]

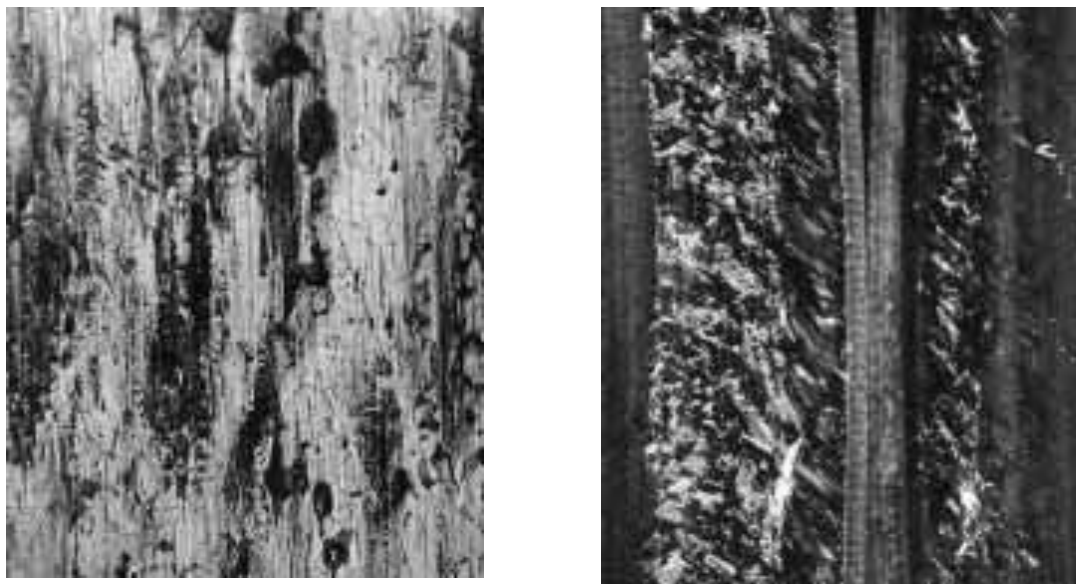
Treći uzrok ove pojave može biti i prisustvo spoljnih čestica. Ove čestice ne moraju da budu tvrde. Parčiči papira ili krpe koja je ostala pri montaži mogu da naprave brazde na stazi kotrljanja (sl. 2.23).



Slika 3.23 – Oštećenje ležaja usled prisustva spoljnih čestica [4]

3.2.3 Razmazivanje (Smearing)

Kada dve nedovoljno podmazane površine, pod dejstvom opterećenja klizaju jedna preko druge, dolazi do prelaska materijala sa jedne površine na drugu. Ova pojava naziva se razmazivanje pri čemu površine postaju zasečene i imaju iskidan izgled (sl. 2.24). Generalno, pri pojavi razmazivanja, materijal je zagrejan do temperature na kojoj počinje otpuštanje a zatim, pod dejstvom površinskog pritiska, i do odvajanja čestica ili loma.



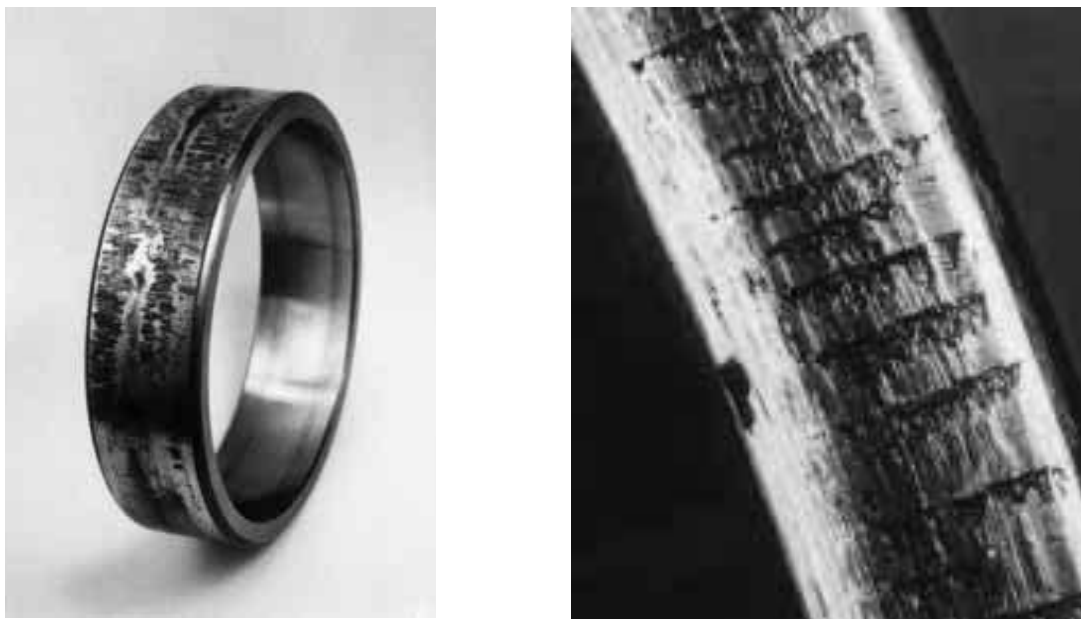
Slika 3.24 – Oštećenje ležaja – razmazivanje [4]

Ova pojava najčešće se javlja na valjkastim ležajevima pri velikim aksijalnim opterećenjima i malim brzinama (sl. 2.25).



Slika 3.25 – Oštećenje valjkastog ležaja usled dejstva velikih aksijalnih sila i nekvalitetnog podmazivanja [4]

Razmazivanje se može pojaviti i u slučaju relativnog kretanja spoljnog prstena i kućišta ili unutrašnjeg prstena i vratila.

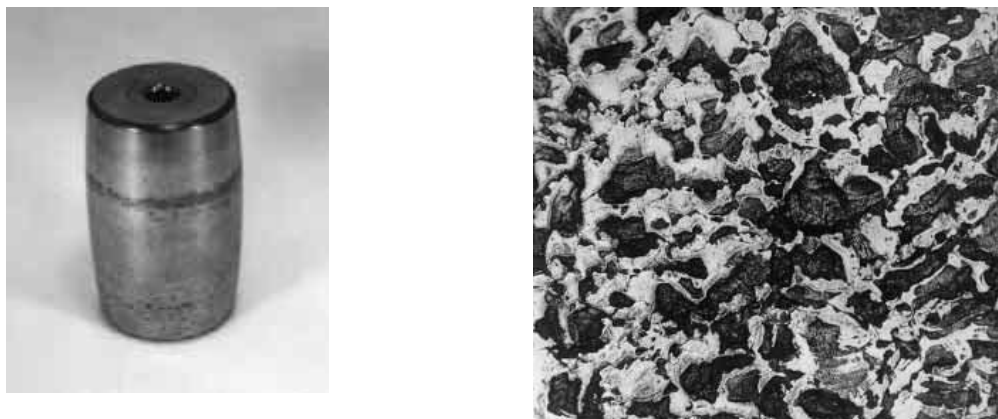


Slika 3.26 – Oštećenje spoljnih površina ležaja [4]

3.2.4 Površinsko razaranje (Surface Distress)

Površinski zamor ležaja javlja se u slučajevima kada uljni film, koji razdvaja kontaktne površine postane suviše tanak. U tom slučaju, vrhovi neravnina jednog dela zadiru u drugi što dovodi do nastanka mikro naprslina. Ove naprsline ne treba mešati sa prslinama nastalih usled zamora materijala (dubinske prsline). Površinski naprsline su mikroskopski veličine, povećavaju se veoma postepeno do veličine koja može uticati na glatko kotrljanje. Ponekad, ove mikro naprsline mogu ubrzati nastanak zamora materijala i dubinskih prsline i na taja način smanjiti radni vek ležaja.

Rizik za nastanak površinskog zamora je minimalan ukoliko mazivo, pod dejstvom povišene temperature ili opterećenja, nije izgubilo potrebnu viskoznost, tj. i dalje je takvog kvaliteta koji omogućuje stvaranje uljnog filma dovoljne debljine.



Slika 3.27 – Površinsko razaranje ležaja [4]

3.2.5 Korozija

Kod ležaja mogu nastati dva slučaja korozije: dubinska korozija i korozija usled trenja (fretting).

Prva nastaje kada voda ili drugi korozivni element prodru u unutrašnjost ležaja, u tolikoj meri da mazivo ne može da obezbedi dovoljnu zaštitu. U prvoj fazi korozije pojavljuju se flekice koje kasnije prelaze u duboku rđu (sl. 2.28). Kisele tečnosti izazivaju intenzivnu koroziju dok su bazne manje opasne. Pored kiselina i morska voda je izuzetno agresivna.



Slika 3.28 – Dubinska korozija ležaja [4]

Drugi vid korozije nastaje kada postoji zazor između vratila i unutrašnjeg prstena ili kućišta i spoljnog prstena, što omogućuje relativno kretanje pomenutih elemenata. Relativna pomeranja mogu da dovedu i do otkidanja

sitnih čestica materijala. Ove čestice brzo oksidišu pri dodiru sa kiseonikom iz atmosfere. Kao rezultat ovog vida korozije može se desiti da se prsten ležaja ne oslanja ravnomerno na kućište što dovodi do nepravilne raspodele opterećenja u ležaju.



Slika 3.29 –Korozija ležaja usled trenja (Fretting) [4]

3.2.6 Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje

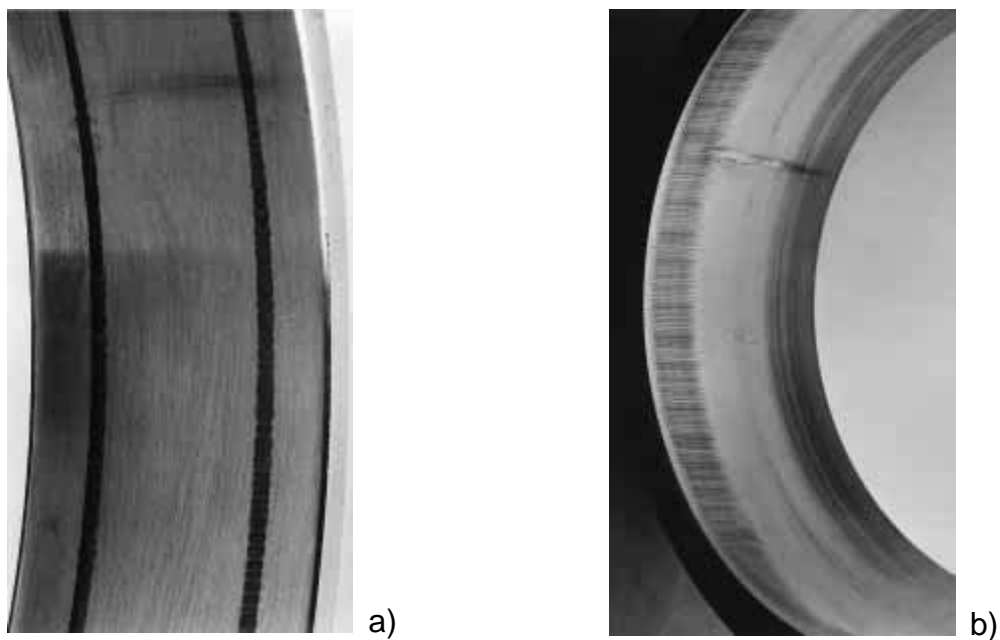
Pri prolasku struje kroz ležaj, sa jednog prstena kroz kotrljajna tela do drugog prstena, na kontaktnim površinama stvara se električni luk. Ovaj proces dovodi do zagrevanja materijala od tačke kaljenja do topljenja. Ova pojava izaziva promene boje kontaktnih površina u zavisnosti da li je površina okaljena, otpuštena ili istopljena (sl. 2.30a).

Prolazak struje može da izazove i nastanak žljebova kako na kotrljajnoj stazi tako i na kotrljajnim elementima (sl. 2.30b).

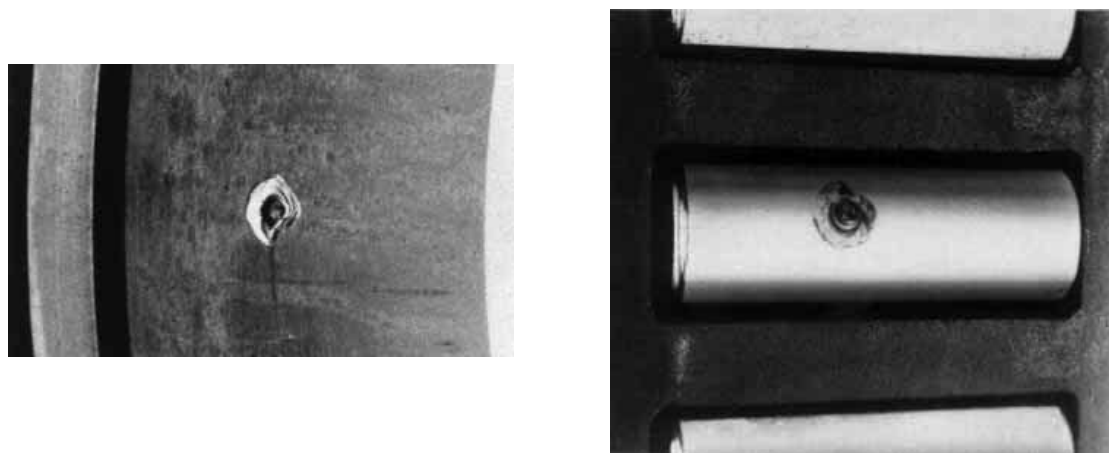
Oštećenja uzrokovana prolaskom struje su slična oštećenjima usled povećanih vibracija, što ponekad može da dovede do zabune. Razliku je moguće napraviti prema boji žljebova. U prvom slučaju oštećenja su tamne boje, dok su kod vibracija oštećenja svetle ili boje rđe. Duga razlika je u tome što kod oštećenja izazvanih vibracijama nema oštećenja kotrljajnih tela.

Ukoliko ležaj nije u rotaciji on je znatno otporniji na pojavu ove vrste oštećenja od ležaja u pokretu. Na stepen oštećenja ležaja utiče nekoliko faktora: intenzitet struje, vreme, opterećenje ležaja, radna brzina, mazivo.

Jedini način da se spreči pojava ove vrste oštećenja je prevencija prolaska bilo kakve struje kroz ležaj.



Slika 3.30 – Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje kroz ležaj [4]

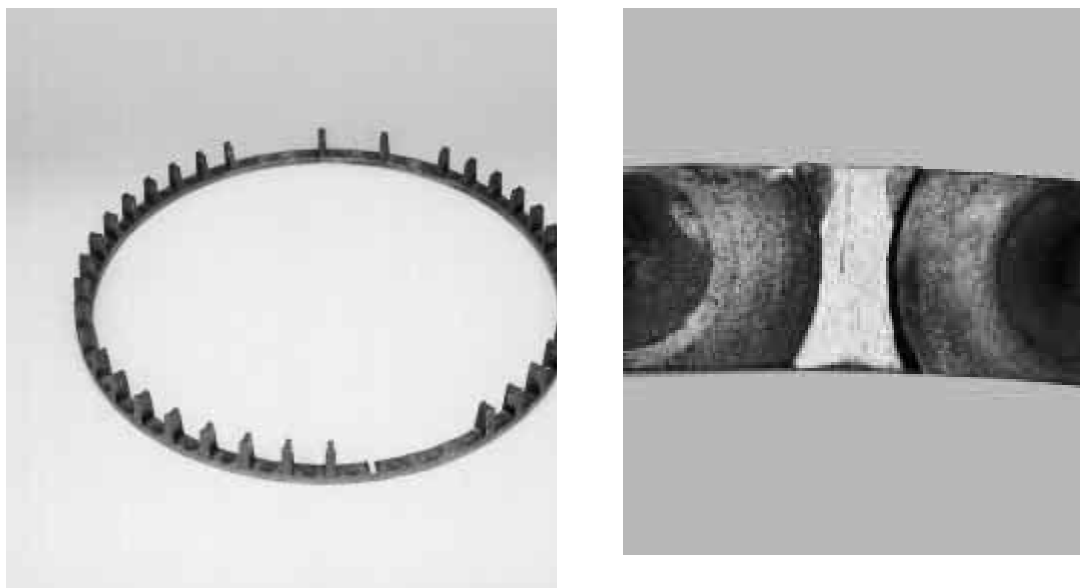


Slika 3.31 – Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje velike jačine [4]

3.2.7 Oštećenja kaveza

Uzroci oštećenja kaveza teško se pronalaze. Razlog za to leži u činjenici da na ležaju kod koga postoje oštećenja kaveza, najčešće su prisutna oštećenja i na drugim elementima ležaja što otežava uvrđivanje uzroka.

Ipak postoje određeni uzroci koji mogu da uzrokuju oštećenje kaveza. Najčešći su: povećane vibracije, previsok broj obrtaja, blokiranje ležaja, habanje.



Slika 3.32 – Oštećenje kaveza [4]

4. PREGLED POSTOJEĆIH METODA DIJAGNOSTIKE LEŽAJA

U savremenoj literaturi za dijagnostiku mehaničkih sistema opisane su brojne dijagnostičke metode koje koriste različite tehnike i algoritme za obradu električnog signala iz senzora. U zavisnosti od predmeta ispitivanja, potrebno je izabrati odgovarajuću metoda iz mnoštva postojećih.

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

Tradicionalne tehnike za analizu vremenskog signala analiziraju karakteristične osobine vremenskog signala kao što su: vršne vrednosti (peak), interval između vršnih vrednosti, standardna devijacija, RMS vrednost signala, kurtosis itd. Savremene tehnike za analizu vremenskog signala koriste vremenski-sinhronizovano usrednjavanje (*Time synchronous average*). Ideja ove metode je korišćenje uređenog 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:

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(t + nT), 0 \leq t < T \quad (4.1)$$

Gde je:

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

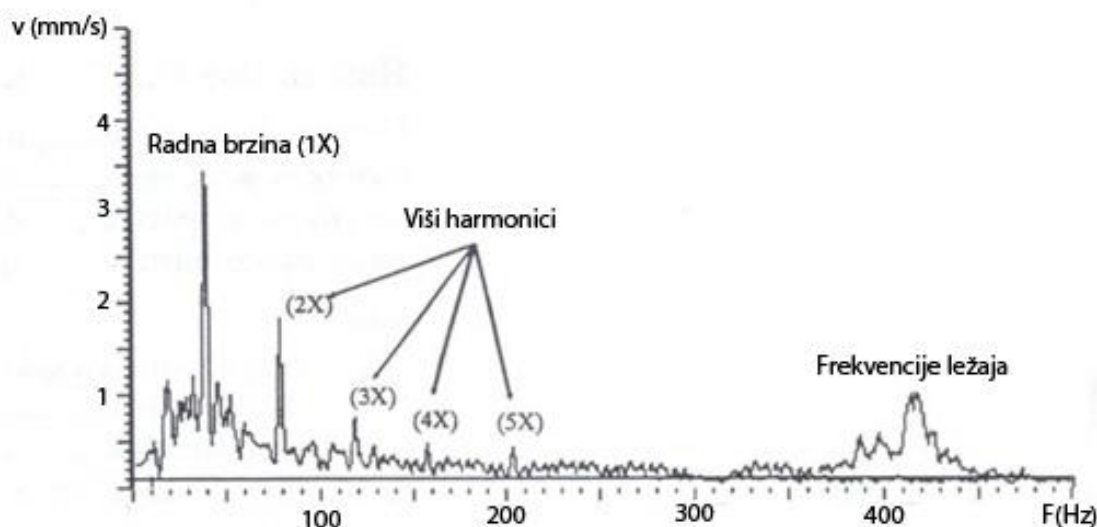
Napredne tehnike analize vremenskog signala koriste modele vremenskih serija, pri čemu je osnovna ideja podešavanje signala pomoću parametarskih modela vremenskih serija, kako bi se iz osnovnog signala izdvojile one karakteristike koje su bazirane upravo na tim parametrima. Primeri koji se susreću u 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. Prednost ove metode, u poređenju sa analizom u vremenskom domenu, je mogućnost jednostavnije identifikacije i izdvajanja određenih komponenti signala koji su nam interesantni. Tehnika koja je danas najšire zastupljena je brza Furijeova transformacija (*Fast Fourier Transform – FFT*). Razlog za najširu upotrebu je njena jednostavnost. Pregledom celokupnog spektra vibracija, na jednostavan način se mogu locirati i izdvojiti one komponente koje su dominantne. Ako na postrojenju postoje problemi, spektralna analiza nam pruža mogućnost da taj problem lociramo i odredimo uzrok njihovog nastanka. Praćenjem trenda moguće je predvideti vremenski period kada će problem postati kritičan.

Savremeni instrumenti memorišu signal u digitalnoj formi, preračunavaju pojedinačne komponente složenog signala i prikazuju rezultate u obliku spektra vibracija.

Pri određivanju uzroka vibracija koristi se činjenica da specifični mašinski problemi generišu specifične frekvencije. Problemi sa ležajevima detektuju se na višim frekvencijama (sl. 4.1).



Slika 4.1 – Karakterističan spektar vibracija

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)

Većina ljudi može da čuje zvuk čija je frekvencija u granicama od 20 Hz do 18 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. Upoređujući frekventni spektar u nekom vremenskom intervalu, moguće je detektovati rast amplitude na sopstvenoj frekvenciji, koja je u direktnoj korelaciji sa oštećenjem ležaja.

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

Pored brojnih prednosti koje ima, analiza vibracijskog signala u frekventnom domenu ima i određene nedostatke. Pošto se vremenski signal transformiše u frekventni, u stanju smo da vidimo sve komponente koje su prisutne u signalu ali pri tome gubimo informaciju kada se to dogodilo, nemamo vremensku odrednicu. To je najveći nedostatak frekventne analize a posebno je izražen kod analize nestacionarnih procesa. To je bio glavni razlog za razvoj novih, vremensko-frekventnih tehnika analize signala, koje vibracijski signal istražuju istovremeno i u vremenskom i u frekventnom domenu. Kod vremensko-frekventne 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 spektogram i Vigner-vile-ova distribucija. Osnovna ideja STFT je da se ceo vibracijski signal podeli u segmente sa kratkim vremenskim intervalima a zatim primeni Furijeova transformacija nad svakim segmentom. Jasno je da će analizirajući signal na ovaj način dati više informacija o tome kada se javljaju različite frekventne komponente, ali se tako postavlja i novi problem – kako iseći željeni signal? 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. *Dirac* - ovog impulsa. Pošto je konvolucija u vremenskom domenu isto što i množenje u frekventnom, i pošto Furijeova transformacija *Dirac* - 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, odnosno visokom rezolucijom, 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. Drugim rečima, signal se ne može jednostavno predstaviti kao tačka u vremensko-frekventnom prostoru. Zbog svega ovoga, vrlo je važno kako se signal odseca.

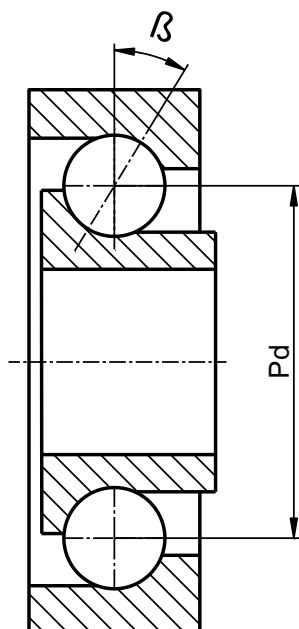
Wavelet transformacija ili *wavelet* analiza je možda najskorije rešenje da se prevaziđu negativne osobine Furijeove transformacije. U *Wavelet* analizi koriste se potpuno promenljive (skalabilne) funkcije kao prozor za odsecanje što rešava problem odsecanja signala. Prozor se pomera po signalu i za 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 višerezolucijska 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 nedetaljnom 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 (4.1). Za njihovu primenu potrebni su podaci o broju obrtaja, broju kotrljajnih elemenata, prečniku kotrljajnih elemenata, podeonom prečniku ležaja i uglu dodira.



Slika 4.2 – Geometrija kugličnog ležaja

$$\begin{aligned}
 BPF I &= \frac{z}{2} \left(\frac{N}{60} \right) \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\
 BPF O &= \frac{z}{2} \left(\frac{N}{60} \right) \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right) \\
 BSF &= \frac{1}{2} \frac{P_d}{B_d} \left(\frac{N}{60} \right) \left(1 + \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos^2 \beta \right) \\
 FTF &= \frac{1}{2} \left(\frac{N}{60} \right) \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \beta \right)
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

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

B_d – prečnik kotrljajnog elementa

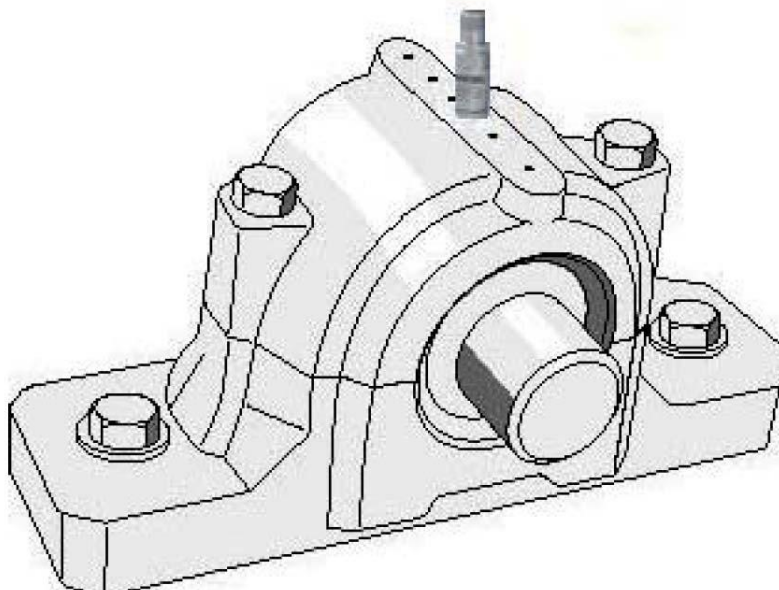
P_d – podeoni prečnik ležaja

β – ugao kontakta kuglice i staze kotrljanja (°)

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

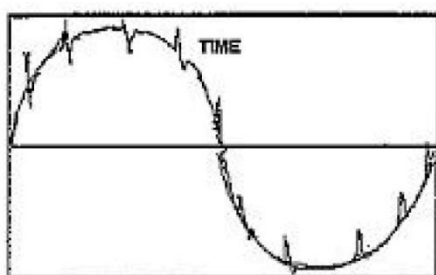
4.5 Envelopa ubrzanja

Otkaz ležaja je uvek praćen pojavom buke, vibracija i povećanjem temperature ležaja. Na slici 4.3 prokazano je kućište u kome se nalazi ležaj sa oštećenjem na spoljašnjoj kotrljajnoj stazi. Na kućištu je postavljen akcelerometar koji meri vibracije koje se prenose kroz ležaj i kućište. 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.

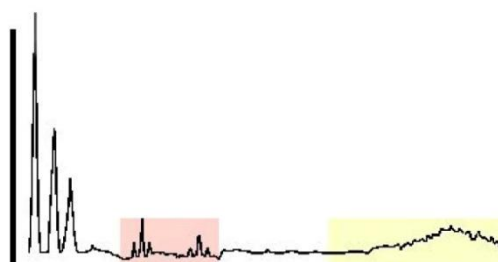


Slika 4.3 – Kućište ležaja sa senzorom [12]

Vremenski signal koji dobijamo sa senzora (slika 4.4) 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 prikazan je na slici 4.5.



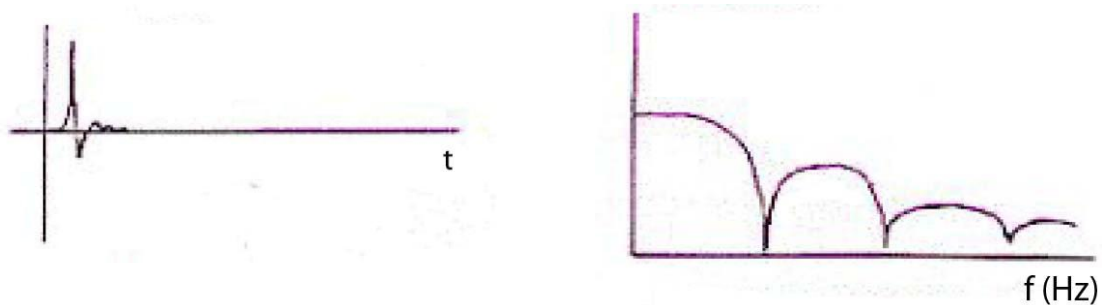
Slika 4.4 – Vremenski signal



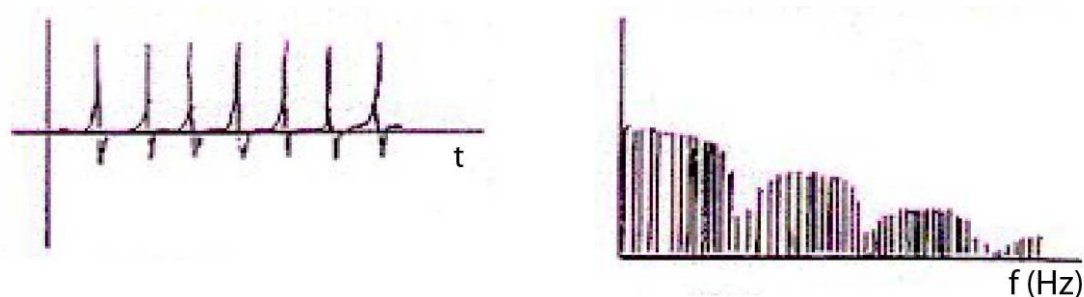
Slika 4.5 – Frekventni signal

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.

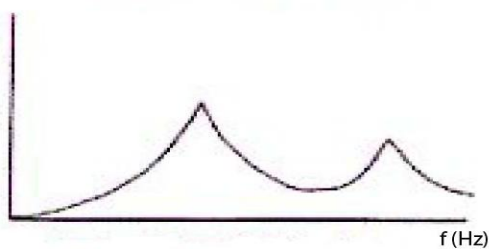
Da bi objasnili sam karakter spektra prikazaćemo nekoliko različitih signala (slika 4.6 a – 4.6 e).



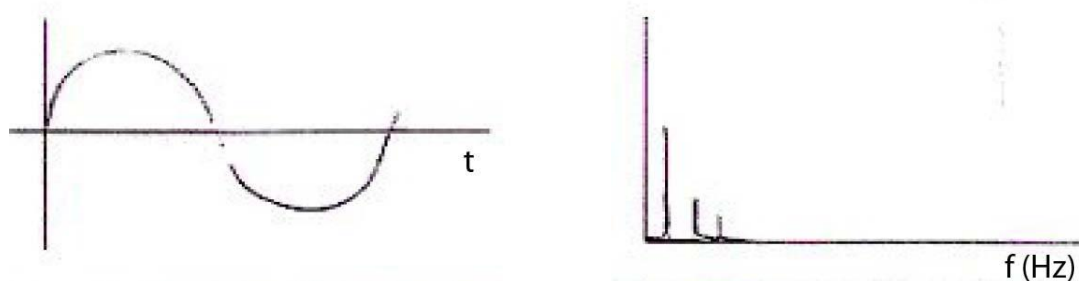
Slika 4.6 a – Pojedinačni impuls



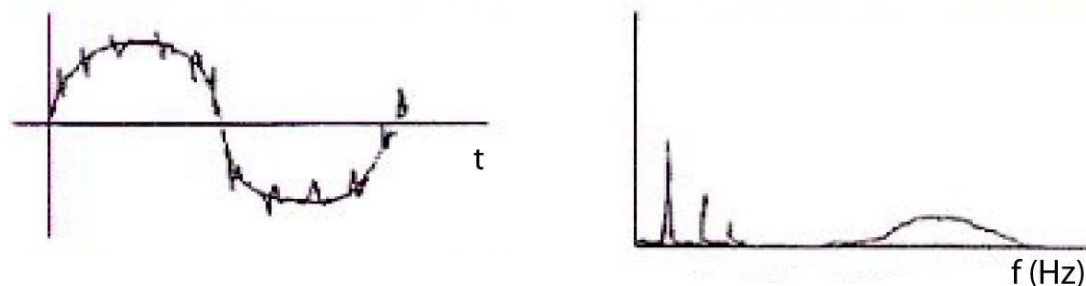
Slika 4.6 b – Serija pojedinačnih impulsa



Slika 4.6 c – Tipična prelazna funkcija



Slika 4.6 d – Vibracijski signal niske frekvencije

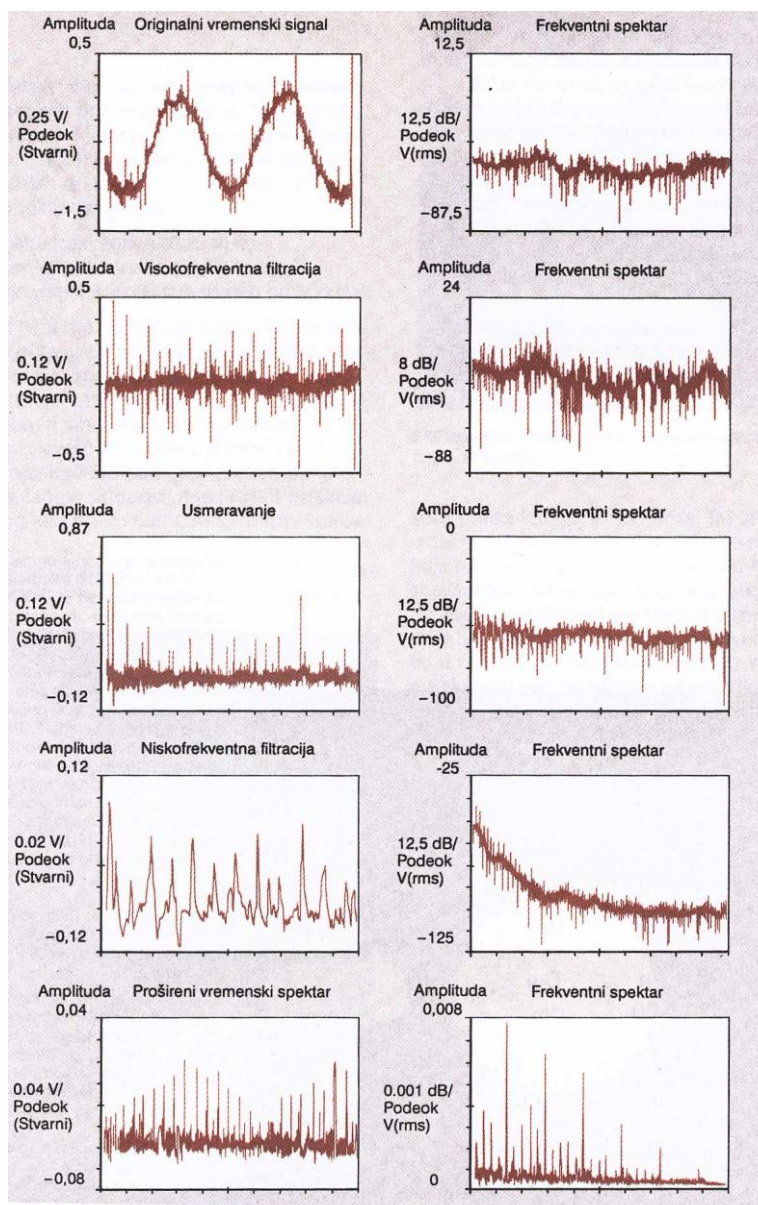


Slika 4.6 e – Vibracijski signal oštećenog ležaja

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 g_E .



Slika 4.7 – Envelopa ubrzanja [3]

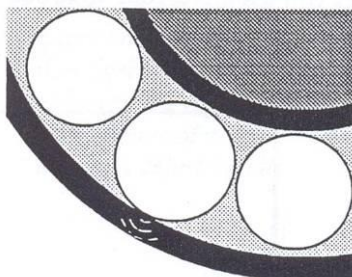
U novije vreme ova merna metoda se pokazala kao pouzdan alat za detekciju oštećenja kotrljajnih ležajeva i zubaca zupčastih prenosnika.

4.6 SEE (Spectral Emitted Energy)

SEE je metoda za detekciju otkaza ležajeva i zupčanika u ranoj fazi otkaza. Zasniva se na merenju akustične emisije generisane metalnim kontaktom. Uzroci koji mogu da generišu akustičnu emisiju su: otkaz ležaja, nedovoljna količina maziva, zaprljanost maziva, preopterećenje, mikroklizanje, kavitacija, električni šum itd.

Za merenje **SEE** koriste se specijalni akustični senzori koji registruju ultrazvučne talase opsega 150-500 kHz. SEE predstavlja jednu od najboljih metoda za detekciju oštećenja ležaja, jer može de registruje mikroskopska oštećenja površina. Vibracije koje se generišu pri takvim oštećenjima ne mogu se meriti standardnim metodama vibro-dijagnostike.

Istovremenim praćenjem SEE, envelope ubrzanja, temperature i nivoa vibracija stiču se uslovi za pouzdanu analizu i procenu pravog trenutka za preduzimanje korektivnih akcija.



Slika 4.8 – SEE (Spectral Emitted Energy)

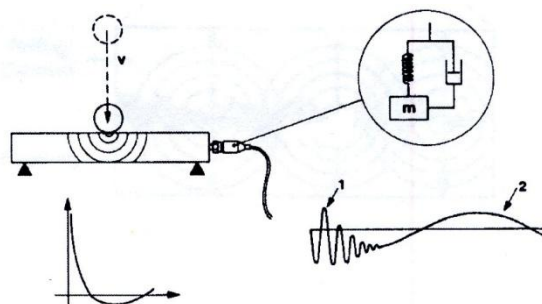
4.7 HFD (High Frequency Detection)

HFD obezbeđuje rano upozorenje za oštećenje ležaja. Metoda prikazuje numeričku vrednost ukupnih vibracija visokog spektra (5 kHz ÷ 60 kHz), generisanu malim oštećenjima.

Zbog širine mernog opsega i karakteristike davača, pri merenju **HFD** metodom koriste se akcelerometri čija se rezonantna frekvencija nalazi unutar mernog opsega. Karakteristika ove metode je pojačavanje vrlo slabih signala generisanih malim udarima. Izmerene vrednosti izražavaju se u *g*.

4.8 SPM (Shock Pulse Method)

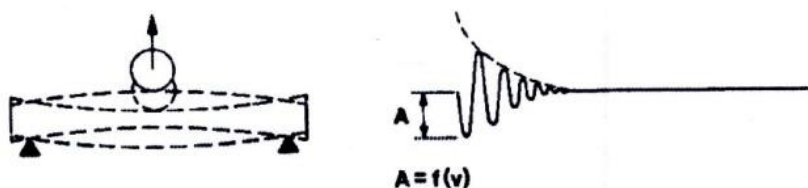
Najkraće rečeno, SPM metoda detektuje razvoj mehaničkih udarnih talasa uzrokovanih sudarom dve mase. U trenutku udara, dolazi do molekularnog kontakta i kompresionog talasa na obe mase. SPM metoda je bazirana na pojavama u materijalu koje se dešavaju u ekstremno kratkom vremenskom periodu neposredno nakon prvog kontakta čestica tela. Molekularni kontakt proizvodi izuzetno veliko ubrzanje čestica u tački udara [5].



Slika 4.9 – Udar kuglice u šipku - impulsni udar [5]

Na primeru sa slike 4.9 može se objasniti pojava koji se događa u trenutku udara loptice u šipku. Pre udara, šipka se nalazi u stanju mirovanja dok se kuglica kreće određenom brzinom (*v*). U trenutku udara površine šipke i kuglice će doživeti spajanje pri brzini jednakoj brzini kuglice. U tački udara pokrenuto je veliko ubrzanje materijala. U toku inicijalne faze kontakta, intenzitet ovog ubrzanja zavisi isključivo od brzine kuglice dok mase kuglice i šipke kao ni spoljne vibracije nemaju uticaja na to. Ubrzanje materijala u tački udara generiše kompresioni talas koji se prostire ultrazvučno u svim pravcima

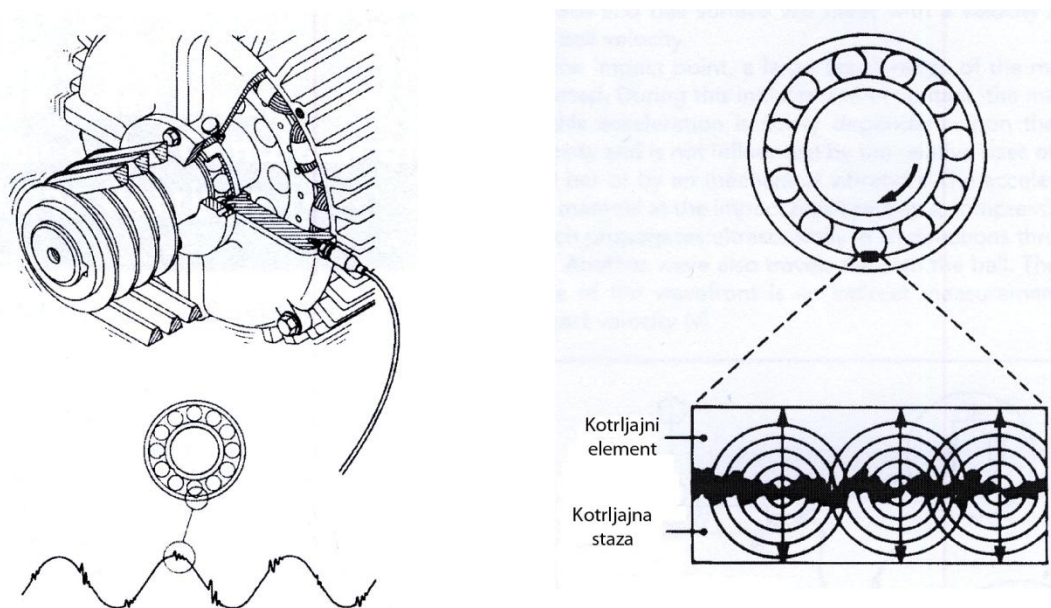
kroz šipku. Drugi talas se takođe prostire i kroz kuglicu. Pri tome je merenje intenziteta fronta talasa indirektno merenje brzine udarca (v).



Slika 4.10 – Vibracije šipke nakon impulsnog udara

U toku druge taze udara (slika 4.10), energija kuglice će saviti šipku što će izazvati vibracije na njoj. Ove vibracije mogu se detektovati analizom vibracija.

SPM metoda detektuje i meri intenzitet mehaničkog udara, detektovanjem i merenjem rezultantnog fronta kompresionog talasa. Za ovu vrstu merenja koriste se piezo-električni akcelerometar za merenje mehaničkih udara bez uticaja drugih faktora kao što su pozadinske vibracije i šumovi. Ovaj senzor je mehanički i elektronski podešen tako da je njegova rezonantna frekvencija 32kHz. Kompresioni talas uzrokovan mehaničkim udarima generiše oscilacije u senzoru na njegovoj rezonantnoj frekvenciji. To je prikazano na slici 4.10 kao tranzientni električni signal uzrokovan udarom. Maksimalna amplituda (A) ovih oscilacija direktno je proporcionalna brzini udara (v). Pošto je priroda ovog signala dobro poznata i definisana, signal sa akceleromera može se elektronski filtrirati čime se isključuju svi ostali uticaji i šumovi.



Slika 4.11 – SPM metodologija detekcija oštećenja ležaja [5]

Kontaktna površina ležaja nikada nije idealno glatka. Na njoj su uvek prisutne određene neravnine i nepravilnosti. Pri rotaciji ležaja te neravnine ili oštećenja generišu mehaničke udare, koji dalje proizvode udarne talase. Drugim rečima, ležaj se ponaša kao generator udarnih impulsa. Intenzitet ovih impulsa zavisi od stanja kontaktne površine i obimne brzine ležaja, koja je u funkciji broj obrtaja i dimenzija ležaja.

U praksi, pri prolasku ležaja kroz njegove životne faze, od novog ležaja do faze u kojoj su istrošeni svi resursi ležaja i neophodna njegova zamena, intenzitet udarnih impulsa povećava se i do 1000 puta.

SPM je metodologija koja omogućuje detekciju oštećenja i njegovu kvantifikaciju što je od velikog značaja za planiranje održavanja.

5 DETEKCIJA OŠTEĆENJA LEŽAJA U ULTRAZVUČNOM DOMENU

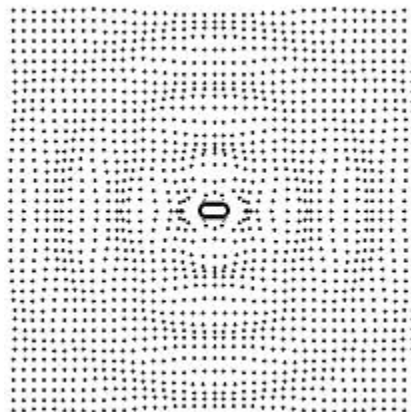
5.1 Vibracije visokih frekvencija - ultrazvuk

Generalno gledano, zvuk nastaje vibriranjem tela. U muzičkim instrumentima to se ostvaruje vibriranjem žica, ljudski glas nastaje vibriranjem glasnih žica. U zavisnosti od fizičkih karakteristika tela koje vibrira zavisice i frekvencija emitovanog zvuka.

Po definiciji, ultrazvuk je zvuk čija se frekvencija nalazi iznad gornje granice čujnosti. Ljudsko uvo registruje zvuk čija je frekvencije između 20 Hz i 20 kHz.

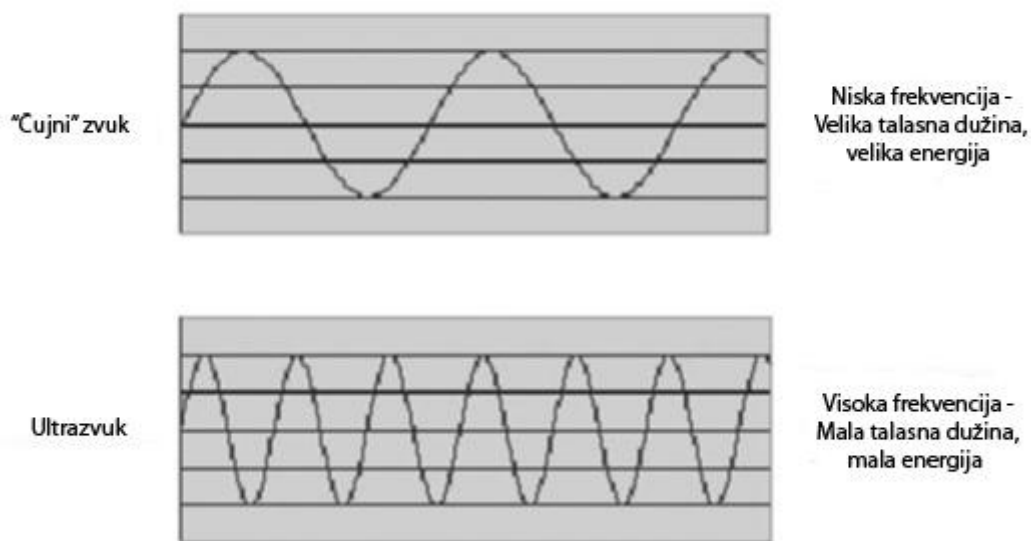
Dakle, za ljudske receptore ultrazvuk je potpuno nečujan. Ukoliko želimo da ga „čujemo“ moramo ga translirati u čujni oblast. Za tu translaciju koriste se odgovarajući instrumenti - ultrazvučni detektori.

Ultrazvuk se prostire kroz sve medijume (voda, vazduh, metal...). On se od svog izvora prostire radijalno u svim pravcima (slika 5.1) i na svom putu, energija zvučnog talasa se umanjuje. Pojava je poznata kao slabljenje talasa.



Slika 5.1 – Prostiranje zvučnog talasa [6]

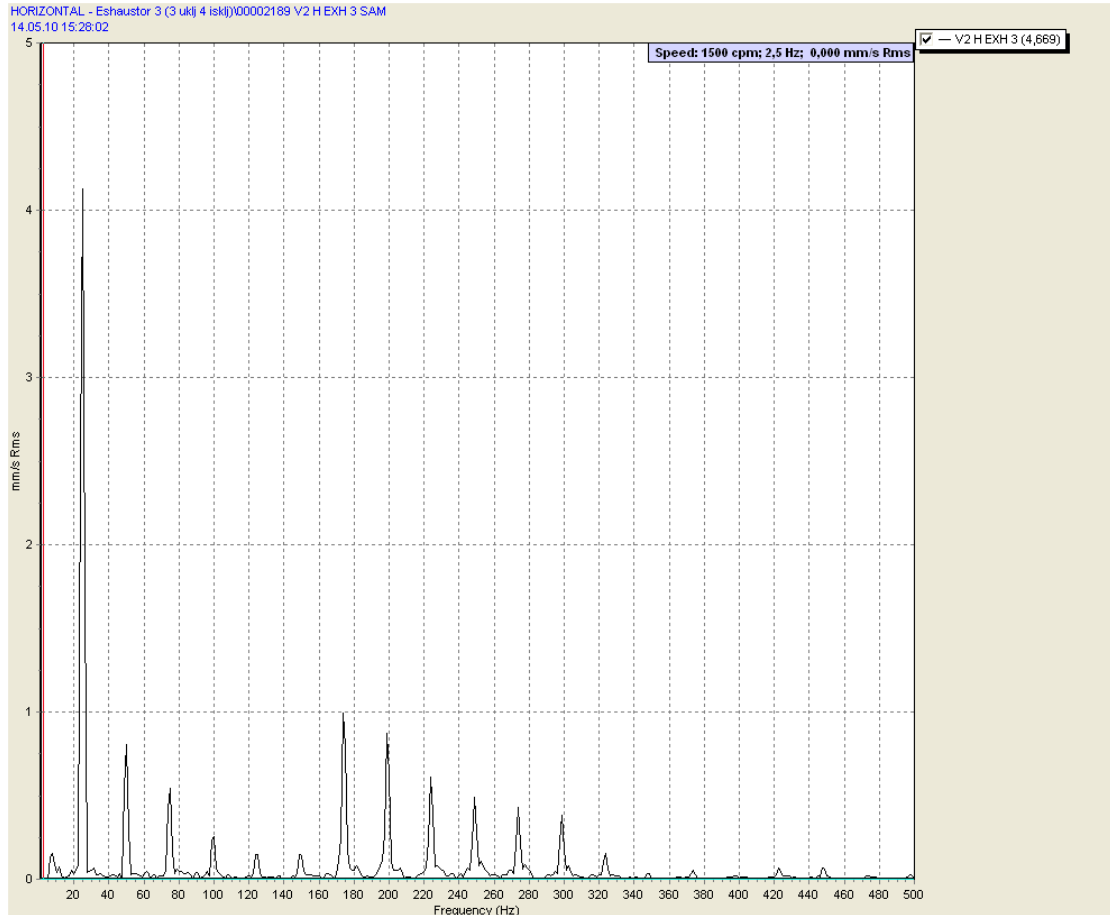
Zvuk koji se nalazi u zoni čujnosti prostire se dalje i šire od ultrazvuka. Razlog za izuzetnu usmerenost i izrazito slabljenje ultrazvučnog signala je to što je njegova talasna dužina kratka (sl. 5.2).



Slika 5.2 – Zvučni talas [6]

Činjenica da je ultrazvuk veoma usmeren omogućuje jednostavnije lociranje njegovog izvora, odnosno oštećenja na mašini, bez interferencije drugih uticaja, što je izuzetno korisno kod detekcije oštećenja ležaja.

U opštem slučaju, vibraciona slika na kućištu ležaja je veoma složena. Pored oštećenja ležaja i lošeg podmazivanja najčešće je prisutan i čitav niz drugih mehaničkih problema koji generišu sopstvene komponente što zajedno daju veoma složenu vibracijsku sliku (slika 5.3).



Slika 5.3 – Spektar vibracija na kućištu ležaja

5.2 Akustička emisija ležaja

Svi ležajevi, ispravni ili oštećeni, novi ili korišćeni, u radu generišu određeni nivo ultrazvuka, kao posledicu kontakta kotrljajnih elemenata i kotrljajnih staza.

Ležaj u dobrom stanju će generisati manju akustičku emisiju od oštećenog ležaja. Pored mehaničkog stanja ležaja, na nivo emitovane akustičke emisije utiče i kvalitet maziva. Ležaj sa kvalitetnim podmazivanjem generiše manju emisiju od ležaja sa nedovoljnim ili nekvalitetnim mazivom. Sa smanjenjem viskoznosti maziva i pojavom prvih znakova zamora materijala ležaja, povećava se trenje u ležaju a samim tim i nivo akustičke emisije.

Detekcija oštećenja ležaja u ultrazvučnom domenu je metoda nadzora ležaja koja se razlikuje od tradicionalnih pristupa detekcije. Ova metoda analizira visokofrekventni deo spektra, frekvencije u opsegu 100 kHz - 500 kHz. Senzori koji se koriste o ovoj tehnici osetljivi su na metalni kontakt koji se pojavljuje pri prelasku kotrljajnog elementa preko kotrljajne staze bez prisustva dovoljnog sloja maziva. U tom slučaju, senzor na izlazu emituje visokofrekventni pulsirajući signal.

Povećan signal očit na ovaj način ukazuje ili na nedovoljnu podmazanost ili na pojavu prvih oštećenja na ležaju. Ukoliko se i nakon podmazivanja ležaja očita povećana vrednost akustičke emisije to je pouzdan pokazatelj prisustva oštećenja.

Merenje akustičke emisije (ultrazvuka) i analiza vibracija su veoma slične metodologije koje pružaju potpuno različite informacije.

Sa jedne strane, merenje vibracija u nisko frekventnom domenu (brzina vibracija i pomeraj) može da ukaže na prisutnost mehaničkih problema tipa neuravnoteženost, nesaosnost i sl., pri čemu je detekcija oštećenja ležaja moguća tek u njegovoj kasnijoj fazi otkaza, što značajno skraćuje vreme za planiranje zaustavljanja mašine.

Sa druge strane, merenje vibracija u visokofrekventnom domenu (merenje akustičke emisije) omogućuje praćenje čitave evolucije ležaja, određivanje optimalnog intervala podmazivanja i količine maziva i detekciju prvih znakova oštećenja ležaja.

Merenjem i praćenjem trenda akustičke emisije ležaja moguće je odrediti optimalan interval zamene maziva i predvideti trenutak nastanka prvih oštećenja ležaja.

Merenje akustičke emisije i praćenje njenog trenda omogućuje nam sagledavanje čitavog životnog veka ležaja. To nije zamena za analizu vibracija, to je dodatni alat za uspešniju primenu koncepta prediktivnog održavanja.

5.3 Proces obrade signala

Namena mernih pretvarača i sistema je da ostvare funkcionalnu vezu između izlazne veličine i merene fizičke veličine. Prenosna funkcija koja daje zavisnost izlazne veličine od merene $y=f(x)$ ujedno je i najvažnija karakteristika mernog sistema ili pretvarača. Poželjno je da ova funkcija bude linearna, nepromenljiva u vremenu i pri promeni stanja okoline i ostalih parametara koji se ne mere direktno. Obično se zadaje opseg svih uticajnih veličina za koje ova zavisnost važi. Na osnovu ove funkcije, tj. njoj inverzne funkcije, i veličine y , može se izračunati merena veličina x . Odstupanja realne vrednosti x od izračunate, na osnovu usvojene funkcije f , ujedno daje i grešku sistema, koja može biti slučajnog ili sistematskog karaktera, osnovna ili dodata itd. Greška se iskazuje preko preciznosti i tačnosti, u relativnom obliku u odnosu na opseg - klasa tačnosti, ili merenu veličinu - relativna greška, može biti prikazana grafički na celom mernom opsegu - kalibraciona kriva, ili na neki drugi način.

Prethodno razmatranje se odnosilo pre svega na prenosne karakteristike sistema. Od značaja su takođe i ulazne i izlazne karakteristike, a karakteristike se takođe mogu podeliti i na statičke (za spore promene merene veličine) i dinamičke (zavisno od brzine promene merene veličine, tj. njenog frekventnog spektra). Ponašanje mernog pretvarača ili sistema, takođe se može iskazati kroz karakteristike vezane za pouzdanost i uticaj promena parametara okoline, kroz otpornost na šum i smetnje.

Pomenuta funkcija koja daje zavisnost između merene i izlazne veličine, bez obzira da li je u pitanju merni pretvarač ili sistem, i da li je izlazna veličina u digitalnom ili analognom obliku, naziva se prenosna funkcija ili amplitudno amplitudna karakteristika. Njen nagib u svakoj tački je statička osetljivost $S = dy/dx$ i ona može biti zavisna od ulazne veličine, ili konstantna u celom opsegu, kada se smatra da je karakteristika linearna. Osetljivost se može zadati

i u bezdimenzionalnom obliku, tj. $S_r = \frac{\frac{dy}{dx}}{x}$, što predstavlja relativnu osetljivost. Ako

se prenosna funkcija predstavi pravom, maksimalno odstupanje od ove zamišljene prave daje linearnost, koja se najčešće zadaje u procentima u

odnosu na opseg merenja. Odstupanja prenosne funkcije od idealne se iskazuju i kroz sledeće parametre:

- pomeraj (drift) nule - pomeranje karakteristike u vertikalnom smeru, tj. postojanje izlaza kada je ulazna veličina jednaka nuli, pri čemu drift može biti u vremenu ili prouzrokovan bilo kojom promenom parametara okoline. Kako drift ima dimenziju merene veličine, jednak je potrebnoj dovedenoj vrednosti merene veličine, da bi izlazna veličina bila jednaka nuli,
- histerezis - nejednoznačnost karakteristike, tj. različita zavisnost za slučajeve kada se ulazna veličina smanjuje i povećava. Prouzrokovan je apsorpcijom energije od strane mernog pretvarača, može biti usled mehaničkih, magnetnih ili električnih deformacija materijala,
- mrtvi hod ili prag osetljivosti je maksimalna promena ulazne veličine oko nulte (početne) vrednosti, za koju se ne menja izlazna veličina,
- rezolucija je takođe maksimalna promena merene veličine koja ne izaziva promenu izlazne, ali za razliku od mrtvog hoda ovaj parametar se definiše na celom mernom opsegu, pri čemu ne mora da ima konstantnu vrednost. Ovaj parametar je posebno karakterističan za digitalne merne uređaje,
- dinamički opseg $D = \log(X_{\max} / X_{\min})$ pokazuje koliki je maksimalni opseg promena merene veličine pri kom su zadovoljene propisane karakteristike, recimo linearnost prenosne funkcije. Opseg merene veličine se često deli i na pokazni i merni, pri čemu je u mernom opsegu zagarantovana propisana tačnost, dok je pokazni nešto širi i predstavlja opseg u kom merni uređaj još uvek regularno obavlja svoju funkciju.

U realnim uslovima rada greška je dosta zavisna i od brzine promene merene veličine. Ako se ukupna greška umanjuje za iznos statičke greške, tj. greške koja postoji i pri sporim promenama merene veličine, dobiće se dinamička greška. Ako pretpostavimo da se merena veličina u nekom trenutku beskonačno brzo promeni na neku novu vrednost, tj. ako je merni sistem pobuđen Hevisajdovom funkcijom, usled inertnosti mernog sistema greška će

na početku biti 100%, a kasnije će se smanjivati sve dok indicirana vrednost ne postigne novo ravnotežno stanje koje poseduje samo statičku grešku. Ponašanje senzora, mernih pretvarača i celih sistema može se predstaviti dinamičkom prenosnom funkcijom nultog, prvog, drugog i višeg reda, a dinamičko ponašanje se može predstaviti i amplitudno frekventnom karakteristikom.

5.3.1 Greške u mernom lancu

Razmotriće se činiooci koji utiču na ukupnu mernu nesigurnost digitalnog akvizicionog sistema. Komponente koje se razmatraju postoje u svim varijantama digitalnih akvizicionih sistema, bez obzira da li je merni lanac delimično ili potpuno integrisan. Greška koja se unosi u digitalni merni sistem primarno je određena greškom kvantizacije po amplitudi i u vremenu. Često se svi ostali uticaji zanemaruju smatrajući da je proizvođač obezbedio da sve ostale greške budu manje od jednog kvanta. Ovo nije uvek tačno, pogotovu za različite temperaturne i ostale uslove rada.

Po svom uzroku, pojedinačni doprinosi ukupnoj grešci mernog sistema mogu se podeliti na:

1. Greške usled konačne brzine uzorkovanja i konačne rezolucije konverzije
2. Uticaj indukovanih smetnji i nesavršenosti dela za anlagonu obradu signala
3. Greške kola za uzorkovanje i držanje
4. Ostale greške same analogno digitalne konverzije
5. Greške obrade i konverzije podataka u računaru

5.3.2 Uticaj šuma i analogne obrade signala

Jedna od najčešćih analognih obrada signala je pojačanje. U akvizicionim sistemima često se koriste pojačavači sa mogućnošću programabilnog podešavanja pojačanja - PGA.

U industrijskom okruženju, uz veliko prisustvo smetnji, ako je senzor udaljen od pojačavača, potrebno je dovoditi signal preko diferencijalnog ulaza. Za ovu svrhu koriste se instrumentacioni pojačavači sa velikim faktorom

potiskivanja zajedničkog napona smetnji, dobrom linearnošću i širokim opsegom promene pojačanja. Vrlo su bitna i dinamička svojstva pojačavača. Gornja granična frekvencija pojačavača definisana je za pad napona od $3dB$ što je nedopustivo velika greška, pa se koristi mnogo užih frekventni opseg. Ako je a dozvoljena greška pojačanja (npr. $a=0.01$), a gornja granična frekvencija upotrebljenog pojačavača f_g , onda je maksimalna frekvencija ulaznih signala

$$f = f_g \sqrt{2a}$$

Ostali parametri koji se definišu kod pojačavača su ulazna impedansa, ulazne struje, naponski ofset, temperaturni drift ofseta napona, faktor potiskivanja zajedničkog napona, maksimalna strmina porasta napona, potiskivanje promene napona napajanja i td. Uticaj svih ovih nesavršenosti na tačnost sistema neće biti posebno razmatran.

Uticaji šuma mogu se podeliti na one koji su prisutni u samom mernom signalu i na one indukovane u akvizicionom sistemu.

Šum superponiran mernom signalu može se smanjiti adekvatnim filtriranjem signala u skladu sa odabranom graničnom frekvencijom korisnog signala i brzinom uzorkovanja. A/D konvertor integracionog tipa u značajnoj meri filtrira serijski šum određenih frekvencija.

Što se tiče šuma indukovanog u akvizicionom sistemu, ako je pojačavač na početku lanca, onda je on ujedno i najkritičnija komponenta. Za precizne operacione pojačavače pri niskim frekvencijama, do 10 Hz, doprinos šuma je $10\mu V$ (od pika do pika), a za više frekvencije daje se u zavisnosti od širine frekventnog opsega, recimo $10^n V / \sqrt{Hz}$ (efektivna vrednost). Za integraciju u inteligentnom senzoru često se biraju CMOS pojačavači, pre svega zbog pogodnosti te tehnologije za realizaciju digitalne kontrolne logike. Oni imaju veliku ulaznu impedansu i mogu se postići velika pojačanja, ali imaju dosta izražen šum u odnosu na bipolarne.

Kako je analogno-digitalni konvertor mesto gde se mešaju analogni i vrlo šumni digitalni deo kola, potrebno je što više odvojiti, kako komponente tako i provodnike analognog i digitalnog dela. Takođe, mase treba povezati

samo u jednoj tački niske impedanse, tj. što bliže izvoru, a između napajanja integrisanih kola i mase treba vezati kondenzator što bliže samom kolu.

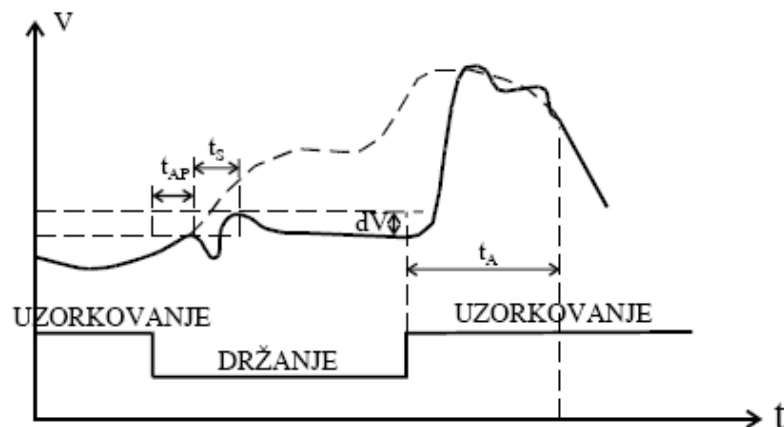
U industrijskim uslovima moguće je postojanje indukovanih smetnji vrlo velikih maksimalnih vrednosti, više od 1000 V. Kao zaštita ulaznih kola akvizicionih sistema obično se upotrebljava varistor, koji ima vrlo dobru mogućnost apsorpcije energije impulsa smetnji.

5.3.3 Kolo za uzorkovanje i držanje

Da bi ispravno radili, pojedini tipovi konvertora zahtevaju da se napon ulaznog analognog signalane menja za više od vrednosti koraka kvantizacije. Ako je brzina promene ulaznog signala takva da se za vreme konverzije može promeniti u većem opsegu, neophodna je upotreba kola za držanje i uzorkovanje.

Ova funkcija najčešće se realizuje pomoću dva operaciona pojačavača, prekidača i kondenzatora, pa su i karakteristike određene osobinama ovih elemenata: ofset i tačnost pojačavača, velika ulazna impedansa, gornja granična frekvencija, struja curenja prekidača i kondenzatora, uticaj temperature i napona napajanja i td. Najveći uticaj na tačnost imaju ofset napona, dielektrična apsorbcija i struja curenja kondenzatora.

Kolo za uzorkovanje i držanje radi u dva režima: režim uzorkovanja promene kada se prati ulazni signal, i režim držanja kada treba da se održi konstantnim napon koji je bio u trenutku zadavanja komande. Realni vremenski dijagram promene napona može se sagledati sa slike 5.4.



Slika 5.4 - Ulazni i izlazni napon kola za uzorkovanje i držanje

Da bi kolo počelo da prati ulazni napon moraju se napuniti ulazne kapacitivnosti, a brzina je ograničena i maksimalnom brzinom promene napona na izlazu operacionog pojačavača. Očigledno je da vreme semplovanja t_A ne može da bude beskonačno kratko i da je proporcionalno očekivanoj tačnosti. Ako je konvertor sa n bita i ako se pretpostavi daje promena napona ekvivalentna punjenju kondenzatora s vremenskom konstantom τ onda je

$$t_A = \tau \ln(2^n - 1).$$

5.3.4 Izbor rezolucije i brzine uzorkovanja

Informacija o merenoj veličini u računaru može se pamtiti samo u vidu konačnog broja uzoraka, koji mogu imati vrednosti iz tačno određenog, konačnog skupa brojeva, pa je očigledno da se pri analogno-digitalnoj konverziji vrši kvantizacija i u vremenu i po nivou. Kako brzina uzorkovanja određuje potrebnu brzinu rada, tj. gornju graničnu frekvenciju svih komponenti lanca A/D konverzije, a broj bitova preciznost tih istih komponenti, izbor ovih parametara je ključna odluka u projektovanju akvizicionog sistema. Ova odluka često određuje i eventualno upotrebljeni mikroprocesor.

Broj bita analogno digitalne konverzije direktno je određen maksimalnom dinamikom signala koji se obrađuje. Ako su e_{\max} i e_{\min} maksimalne i minimalne apsolutne vrednosti signala, a n broj bita konvertora, onda važi $2^n = \frac{e_{\max}}{e_{\min}}$ tj. $n = \log_2 \frac{e_{\max}}{e_{\min}}$ pri čemu se uzima prva veća celobrojna vrednost, sa dodatkom jednog bita ako je signal bipolaran.

Drugi kriterijum za izbor broja bita je i ukupan šum u sistemu koji često prekriva donju granicu signala. Ako srednja kvadratna vrednost normalizovanog signala amplitude 1 i srednje vrednosti 0.5 iznosi $e^{-2} = \frac{1}{9}$, a srednja kvadratna vrednost kvantizacionog šuma $\sigma^2 = \frac{q^2}{12}$, pri čemu je $q = 2^{-n}$, onda je odnos signal-šum kvantovanja:

$$F = \frac{e^{-2}}{\sigma^2} = \frac{2^{2n}}{3}, \text{ tj. } F \text{ [dB]} = 10 \log_{10} \left(\frac{2^{2n}}{3} \right) \Rightarrow n = \frac{F \text{ [dB]}}{6} + 0,8$$

U poslednjoj formuli je pretpostavljeno da je ukupan šum u sistemu jednak kvantizacionom šumu, i na osnovu te jednakosti izračunat broj bita konvertora.

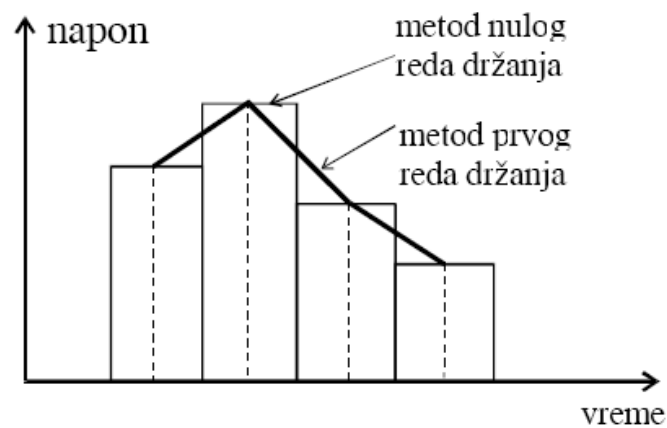
Uopšteno govoreći broj bita konvertora treba da odgovara nivou ostalih grešaka i smetnji u sistemu, računajući tu i greške usled vremenske, temperaturne i ostale nestabilnosti parametara sistema. Čak i ako je mikroračunarski sistem u ostalom svom delu npr. šesnaestobitni, nema svrhe, zbog kompatibilnosti, birati 16 bita za konverziju, bez odgovarajuće tačnosti ostalih komponenti sistema, jer je broj bita konvertora najčešće obrnuto proporcionalan brzini konverzije.

Problem velike dinamike ulaznog signala se, sem povećanjem broja bita, može rešiti upotrebom pojačavača sa podesivim pojačanjem. Ovo je posebno bitno kod brojačkih i integracionih konvertora jer se kod njih vreme konverzije eksponencijalno povećava sa porastom dinamike signala, tj. broja bita konverzije.

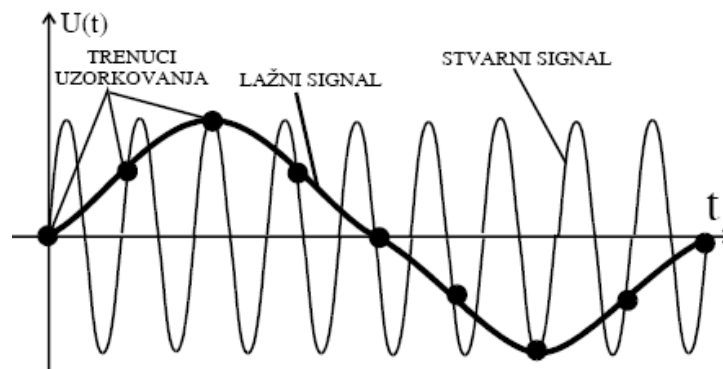
Frekvenciju uzorkovanja treba prilagoditi brzini promene procesa koji se posmatra. U teoriji je dobro poznata Šenonova teorema koja kaže daje dovoljna frekvencija uzorkovanja dva puta veća od gornje granične frekvencije ulaznog signala, da bi se dati signal obnovio bez ikakvih gubitaka informacije. Ova teorema važi za uzorkovanje beskonačno strmim Dirakovim impulsima i za rekonstrukciju signala pomoću idealnog filtra, što u praksi nije slučaj. Zato se često uzima da je frekvencija uzorkovanja 5 do 10 puta veća od gornje granične frekvencije ulaznog signala. Ova gornja granična frekvencija može se ograničiti analognim filtrom na ulazu. Jedan od kriterijuma izbora frekvencije uzorkovanja je da se posmatrani signal ne promeni za više od jednog kvanta, na intervalu između dva uzorkovanja. Ovo je esencijalno bitno za ispravan rad nekih tipova konvertora (konvertor sa sukcesivnom aproksimacijom). Međutim, za veću rezoluciju konvertora pokazuje se da gornja granična frekvencija signala ne bi mogla da bude veća od nekoliko Hz, pa se S/H kolo nameće kao neophodno za ove konvertore. Ono ujedno igra i ulogu niskofrekventnog filtra.

Sama greška usled uzorkovanja, koja u realnim sistemima definitivno postoji, dosta zavisi i od načina rekonstrukcije signala, (slika 5.5) što je korisno

razmotriti za slučaj primene D/A konvertora. Ako se signal smatra konstantnim za vreme trajanja jednog uzorka, onda je to metod nultog reda držanja (izlaz iz D/A konvertora bez filtra), i on unosi znatnu grešku. Međutim ako se signal samo snima za kasniju (post akvizicionu) obradu, rekonstrukcija se može bolje izvršiti spajanjem središta uzorka (metod prvog reda držanja) ili komplikovanijim digitalnim filtrima višeg reda.



Slika 5.5 - Rekonstrukcija signala u vremenu



Slika 5.6 - „Aliasing“ akviziranog signala

Ako uzorkovani signal, odnosno neka njegova komponenta, ima frekvenciju višu od polovine frekvencije uzorkovanja (manje od dve uzorkovane digitalne vrednosti – tačke po periodi), tada može doći do sasvim pogrešne predstave o digitalizovanom signalu, tj. može se javiti komponenta sa frekvencijom koja ne postoji u posmatranom signalu - "Aliasing" (slika 5.6).

Pored šuma ovo je još jedan od razloga zašto se obavezno vrši filtriranje ulaznog signala filtrom propusnikom niskih učestanosti.

U digitalnim sistemima automatskog upravljanja vreme konverzije i obrade signala javlja se kao čisto transportno kašnjenje što može da bude dosta nepovoljno sa stanovišta stabilnosti sistema.

Maksimalna brzina uzorkovanja je ograničena i konfiguracijom mikroračunarskog sistema, tipom povezivanja sa konvertorom, organizacijom softvera itd. Ako se sva potrebna izračunavanja i eventualno upravljanje obavljaju u intervalu između dve konverzije kaže se da sistem radi u realnom vremenu.

5.4 Opis instrumenta za merenje ultrazvučne emisije

Laboratorijski sistem koji je korišćen za merenje ultrazvučne emisije u detekciji stanja kotrljajnih ležajeva, sastoji se od:

- Piezoelektričnog davača specijalne konstrukcije i podešene frekventne karakteristike
- Analognog elektronskog bloka
- Digitalnog osciloskopa
- Programa za analizu zapisa

U nastavku se nalazi detaljna tehnička specifikacija.

Piezoelektrični senzor

Fizička svojstva piezoelektričnosti i piezootpornosti postala su predmet izučavanja krajem prve polovine ovog veka. Neposredno nakon teorijskih radova usledila su aplikativna istraživanja. U prvom planu početnih eksperimenata bio je fenomen piezoelektričnosti, koji se u teoriji opisuje kao nastavak **pojave električne struje** pri mehaničkoj deformaciji određenih materijala. Tokom istih istraživanja uočen je i recipročni efekat, tj. nastanak mehaničkih vibracija usled dejstva električnih impulsa. Na bazi ovog fenomena razvijeni su kvarcni oscilatori, prema kojima su utvrđeni mnogi standardi u oblasti merenja frekvencije.

Zahvaljujući izvanrednim tehničkim karakteristikama, pre svega mehaničkoj stabilnosti i izuzetno širokom i linearnom mernom opsegu, piezoelektrični kristali su veoma brzo postali komercijalno dostupni i praktično nezamenjivi pretvarači pritiska.

Iako je zabeleženo mnoštvo piezoelektričnih materijala, u mernoj primeni se nalazi srazmerno mali broj njih, i taj broj je razvrstan u dve osnovne grupe. Prvu čine prirodno polarizovani kristali, i to oni dobijeni iz monolitnih kristala (kvarc, Rochelle so) i oni dobijeni sintetičkim postupkom (litijum sulfat, amonijum dihidrogen fosfat ADP). U drugu grupu spadaju industrijski polarizovane feroelektrične keramike (barijum titanat, olovo cirkonat titanat – PZT, olovo metaniolat), koje međusobno imaju vrlo slična mehanička i merna svojstva.

Osetljivost većine „prirodnih“ kristala na promenu temperature i vlažnosti usmerila je težište tehničkih primena na sintetički dobijene piezoelektrične keramike. Ovoj inženjerskoj orijentaciji svakako je doprinela i niska proizvodna cena, sasvim slobodan izbor fizičkog oblika i dimenzija, kao i podesiv strujni odziv zavisno od odnosa gradivih komponenti. Nedostaci sintetičkih keramika vezani su za delimičnu promenu karakteristika koju izaziva starenje i moguća depolarizacija usled jakih temperaturnih ili mehaničkih šokova. Zbog toga se samo kod baždarne etalon opreme koristi prirodni kvarc, koga krasi izrazita postojanost i merna linearnost, čak i za raspon opterećenja $1:10^6$.

Proizvodnja feroelektričnih keramika odvija se višestepeno. Početna operacija obuhvata oblikovanje praškaste smeše u željenu formu pod visokim pritiskom, nakon čega sledi sinterovanje na visokoj temperaturi. Zavisno od predviđene namene, posle sinterovanja može se primeniti i mehanička obrada. Trajna polarizacija pločica postiže se zagrevanjem iznad Kirijeve ¹ temperature u jakom električnom polju i postupnim hlađenjem u istoj sredini. Pravac polarizacije definiše se saglasno mernoj orijentaciji pločice, dok se parametri samog procesa usklađuju sa projektovanim mernim karakteristikama i upotrebljenim sirovinama i aditivima.

Jednačine koje opisuju osnovne relacije između mehaničkih i električnih svojstava piezoelektričnih elemenata mogu se sažeti u par osnovnih formula koje povezuju sledeće veličine:

$\underset{\sim}{\sigma}$ - tenzor mehaničkog napona²

$\underset{\sim}{S}$ - tenzor deformacije

D – vektor električnog pomeranja (električne indukcije)

E – vektor električnog polja

Bilo koja kombinacija jedne mehaničke i jedne električne veličine može se smatrati parom nezavisno promenljivih ulaznih veličina, tako da se preostale dve mogu uvek izraziti kao funkcionalno zavisne. Pokazalo se da je najpogodnije usvojiti $\underset{\sim}{\sigma}$ i E kao nezavisno promenljive, pa zatim smatrajući da je funkcijska veza između D i $\underset{\sim}{\sigma}$ linearna, utvrditi osnovnu relaciju piezoelektričnog svojstva kombinovanu sa poznatom jačinom dielektrika, koja povezuje D i E .

Uz pretpostavke da mehaničke promene ukoje nastaju u strukturi piezoelementa ne menjaju električna svojstva ³ i da je električno polje van

¹ Temperatura na kojoj dolazi do gubitka magnetičnih svojstava

² Oznaka tenzora u Euklidovom prostoru

³ Razdvojen uticaj mehaničkih promena na električne karakteristike i električnih promena na mehaničke karakteristike

piezoelektričnog elementa zanemarljivo, može se pokazati da deformacijom izazvan električni napon ima vrednost

$$U = \frac{Q}{C_0} = -\frac{1}{C_0} \int_V d_{ijk} \sigma_{jk}^0 E_i dV \quad [5.1]$$

gde C_0 ja statički kapacitet, Q - pojavno naelektrisanje, σ_{jk}^0 raspodela mehaničkog napona u električno nezavisnom elementu i E_i električno polje usled jediničnog napona u mehanički nezavisnom elementu V .

Većina piezoelektričnih elemenata izrađuje se u obliku tanke ploče, čija se debljina u mernom pravcu (O_3) može označiti sa w , a kontaktna površina sa A . U tom slučaju jedinično električno polje postaje

$$E_i = E_3 = \frac{1}{w} \quad [5.2]$$

A time jednačina [5.1] dobija sledeći oblik

$$U \frac{\epsilon_{33}^\sigma}{w} = Q = -\frac{1}{w} \int_V d_{3jk} \sigma_{jk}^0 dV \quad [5.3]$$

Da bi se došlo do egzaktnih izraza kojima se može odrediti izlazni napon (U), odnosno naelektrisanje (Q) na polovima piezoelementa pri zadatoj deformaciji, uvode se sledeće aproksimacije:

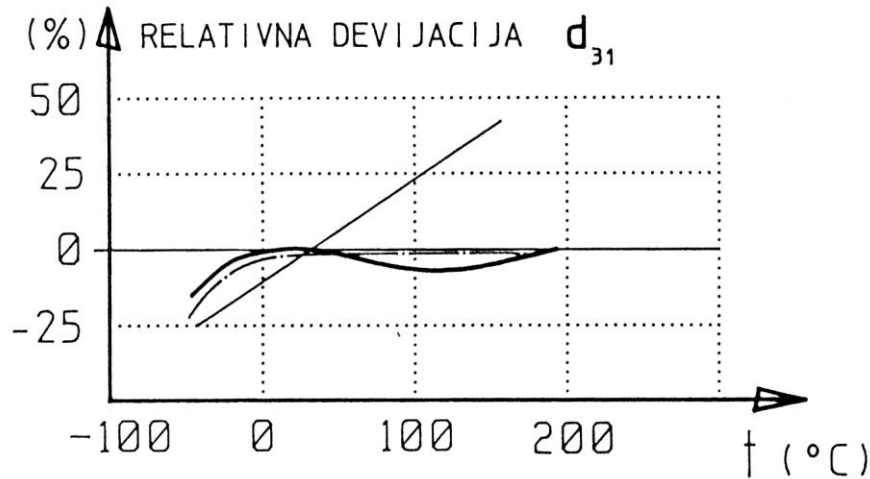
- Pri rešavanju elastičnog problema struktura piezoelementa se smatra izotropnom
- Iako postoji relativno odstupanje kristalografskih i polarizacionih osa od geometrijskih, smatra se da su svi vektori i njihove komponente usmereni duž geometrijskih osa
- Usvaja se skraćeno indeksiranje tenzora napona, s obzirom na njegovu simetričnu formu i činjenicu da postoji samo šest nezavisnih komponenti⁴

Tako se jednačina [5.3] transformiše u konačan aplikativni oblik [5.4], gde je izabrani merni pravac O_3 upravan na kontaktnu površinu A

$${}^4 \sigma \sim \begin{matrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_1 & \sigma_6 & \sigma_5 \\ = & \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & = & \sigma_6 & \sigma_2 & \sigma_4 \\ & \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & & \sigma_5 & \sigma_4 & \sigma_3 \end{matrix}$$

$$U \frac{\epsilon_{33}^{\sigma} A}{w} = Q = -\frac{1}{w} \int_V d_{3n} \sigma_n dV \quad [5.4]$$

$$n = 1, 2, \dots, 6$$



- PZT keramika G 1278
- BaTiO₃ - HD-11
- Olovometaniobat G-2000

Gulton Industries Inc. Fullerton, California USA

Slika 5.7 – Karakteristike piezoelktričnih materijala

Analiza električnih i mehaničkih svojstava piezokeramike diskaste forme počinje uvođenjem određenih pretpostavki. Smatra se da opterećenje koje deluje na merni element, potiče od koncentrisane pritisne sile (F) usmerene u pravcu polarizacije (O_3) i da je ravnomerno raspoređeno po čitavoj površini (A). Tada sledi da polje napona, u prvoj aproksimaciji, ima formu:

$$\sigma_n = 0 \text{ za } n \neq 3; \sigma_3 = \frac{F}{A} \quad [5.5]$$

gde su zanemarena ograničenja, koja inače zavise od načina oslanjanja.

Zamenom σ_n iz jednačine [5.4], sa σ_3 dobija se izraz koji definiše intenzitet pojavnog naelektrisanja

$$Q = -\frac{1}{w} \int_V d_{33} \sigma_3 dV = -d_{33} F \quad [5.6]$$

Za operativne analize korisno je uvesti još jednu fizičku veličinu koja neposredno ilustruje mernu karakteristiku. To je osetljivost davača na dejstvo sile $Q_F = \frac{Q}{F}$, što se za izabrani diskasti model izjednačava sa piezoelektričnom konstantom materijala⁵.

$$Q_F = -d_{33} \quad [5.7]$$

Statički kapacitet C_0 piezoelementa izražen je sledećom jednačinom,

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33}^\sigma A}{w} \quad [5.8]$$

tako da se naponska osetljivost na silu $U_F = \frac{U}{F}$ može definisati kao

$$U_F = \frac{w d_{33}}{A \varepsilon_{33}^\sigma} \quad [5.9]$$

Iz ovog izraza se vidi da geometrijski parametri pločice (w , A) direktno utiču na intenzitet generisanog napona. Tako da porastom debljine elementa (w) raste i odgovarajući naponski nivo. Ovo svakako ne znači da će se zbog primarnog interesa za što intenzivnijim signalom, enormno uvećati debljina pločice (w). Gornja granica te dimenzije limitirana je očekivanim nivoom rezonantne učestanosti mernog elementa [5.10].

$$f_n = \frac{1}{4w \rho s_{33}^D} \quad [5.10]$$

Osim mogućnosti da se povećanjem debljine piezoelektričnog elementa, poveća njegova osetljivost na silu, to se može postići i nadovezivanjem više pločica. Osetljivost paketa on N paralelno vezanih pločica jednaka je

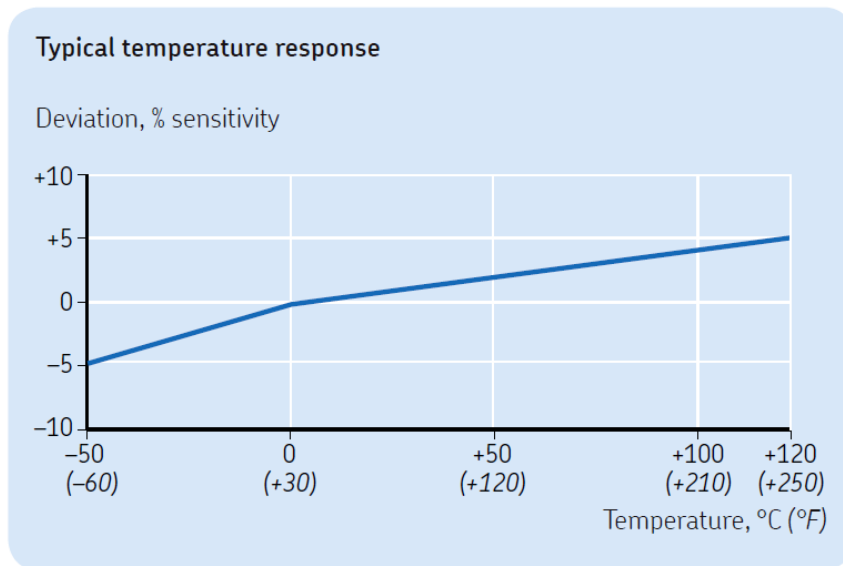
$$Q_F = -N d_{33} \quad [5.11]$$

što neposredno sledi iz jednačine [5.6], ako se proširi oblast integracije. Jasno je da ova kombinacija ima i N puta nižu kritičnu frekvenciju.

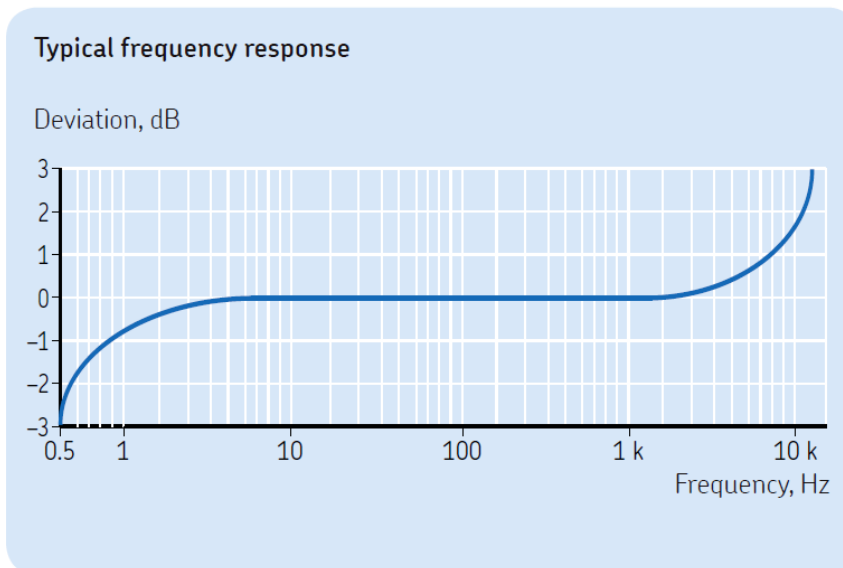
Standardni piezoelektrični senzori koji se koriste za merenje vibracija na mašinama, imaju mernu osetljivost 100 mV/g, dok im se rezonantna frekvencija

⁵ Za kvarc $Q_F = -d_{11}$

nalazi između 10 i 20 kHz. Tipičan dijagram standardnog piezoelektričnog senzora prikazan je na slici 5.8a i 5.8b.



Slika 5.8a – Temperaturska karakteristika piezo-senzora



Slika 5.8b – Frekventna karakteristika piezo-senzora

Sa slike 5.8b jasno se vidi da je gornja granica linearnosti ovog senzora u zoni oko 10 kHz. Takva vrsta senzora nije pogodna za detekciju oštećenja ležaja jer se pojave oštećenja registruju na znatno višim frekvencija od kritične frekvencije standardnog senzora.

To je ujedno i glavni razlog zbog koga smo se odlučili za specijalni (akustički) senzor čiji se radni opseg nalazi u znatno višoj zoni (100 kHz – 500 kHz).

Osnovne karakteristike senzora:

CMSS 786M Dual Sensor-accelerometer (SKF)



Slika 5.9 – Piezoelektrični akustički senzor

Osetljivost: 10 mV/g ± 2dB

Merni opseg: 100 kHz – 500 kHz

Kapacitet: 500 pF

Napajanje: 18-30 VDC, 2-10 mA

Izlazna impedansa: 100 Ω

Temperaturski opseg: -50°C - +120°C

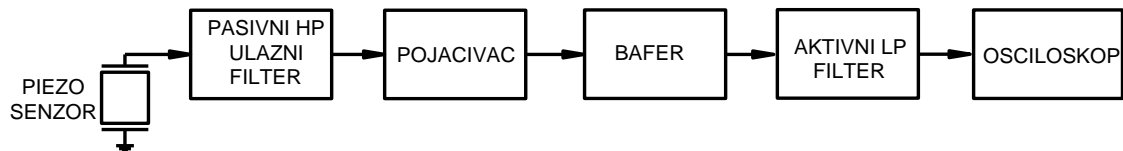
Maksimalna vrednost vibracija: 500 g (vršna vrednost)

Maksimalna vrednost vibracija pri udaru: 5000 g (vršna vrednost)

Analogni elektronski blok

Piezoelektrični davač ima merni opseg od 100 do 500 kHz. Operativni ultrazvučni domen kreće se od 40 kHz i obuhvata sve do 300 kHz. Optimalni opseg u detekciji ležajeva je 100-250 kHz. Upravo prema ovoj karakteristici urađen je prilagođeni pojasni filter. Njime se praktično potiskuju svi harmonici ispod 100 kHz i oni iznad 250 kHz.

Osim pojasnog filtera analogni blok obezbeđuje napajanje za akcelometar i to preko specijalne „Current pump diode“, koja ograničava struju napajanja na 4.3 mA. Po izlazu iz analognog bloka signal se prosleđuje u digitalni osciloskop (sl. 5.10), koji beleži vremenski signal sa definisanom gustinom zapisa. Detaljna analiza ultrazvučne i emisije izvodi se „post event“, tako što se detektuju značajni harmonici i potom komparira njihova amplituda i frekvencija sa referentnim vrednostima. Na osnovu slike snimljenog signala u ultrazvučnom domenu zaključuje se o stepenu oštećenja ispitivanog ležaja.



Slika 5.10 – Blok dijagrama elektronskog bloka



Slika 5.11 – Izgled analognog elektronskog bloka

Digitalni osciloskop DSO2250 USB



Slika 5.12 – Digitalni osciloskop

Tehničke karakteristike:

Broj kanala: 2

Max. sampling rate: 250 MS/s jedan kanal ili 125 MS/s za oba kanala

Vertikalna rezolucija: 8 bit/kanalu

Opseg: 8 div

Ofset: ± 4 div

Impendansa: 1 M Ω

DC tačnost: $\pm 3\%$

Način prikaza: Y-T, X-Y

5.5 Kriterijumi za ocenu stanja ležaja merenjem ultrazvučne emisije

Postavljanje generalnog kriterijuma za ocenu stanja ležajeva na osnovu ultrazvučne emisije je previše ambiciozan zahtev. Ono što je realno je uspostavljanje niza kriterijuma za različite tipove i dimenzije ležajeva, pri čemu će globalna zakonitost biti ista i zasnivaće se na logaritamskoj vrednosti relativnog odnosa energetske emisije ispravnog (referentnog) ležaja i onoga koji se ispituje, jednačina [5.12].

$$UZ_{EM} = 20 \log \frac{v_{max}}{v_{ref}} - 10 \quad [5.12]$$

gde je $v_{ref} = 10 \text{ mV}$

Konstanta koja postoji u jednačini zavisi od tipa ležaja i translira izlaznu vrednost iz jednačine [5.12] u odgovarajući referentni domen; zeleno – dobro, žuto – zadovoljavajuće, crveno – neprihvatljivo.

Vrednosti koje daje jednačina [5.12] su realne i predstavljaju prepoznatljiv indikator višestruko uvećanog šuma kod oštećenog ležaja.

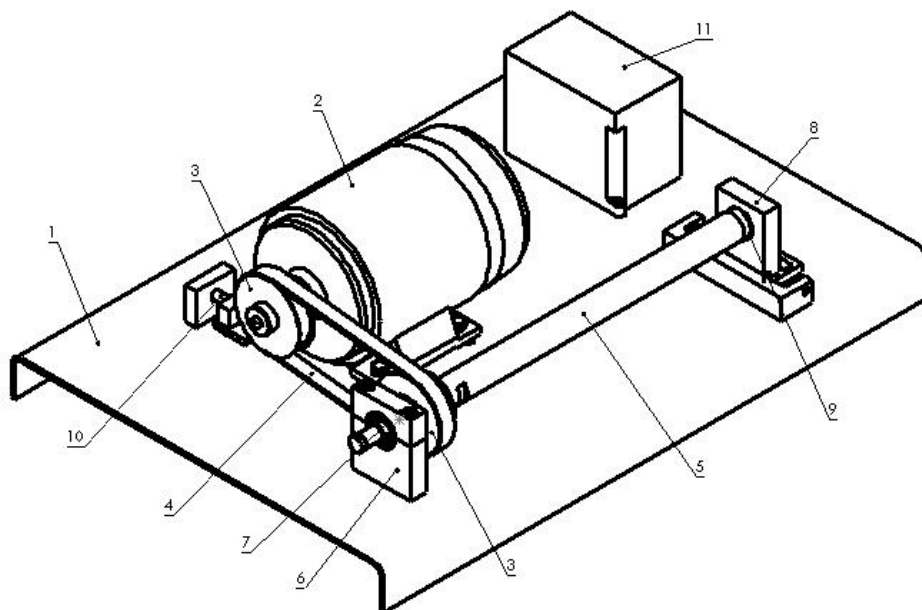
6 EKSPERIMENTALNI RAD – ISPITIVANJE LEŽAJA

6.1 Konstruisanje probnog stola za ispitivanje ležaja

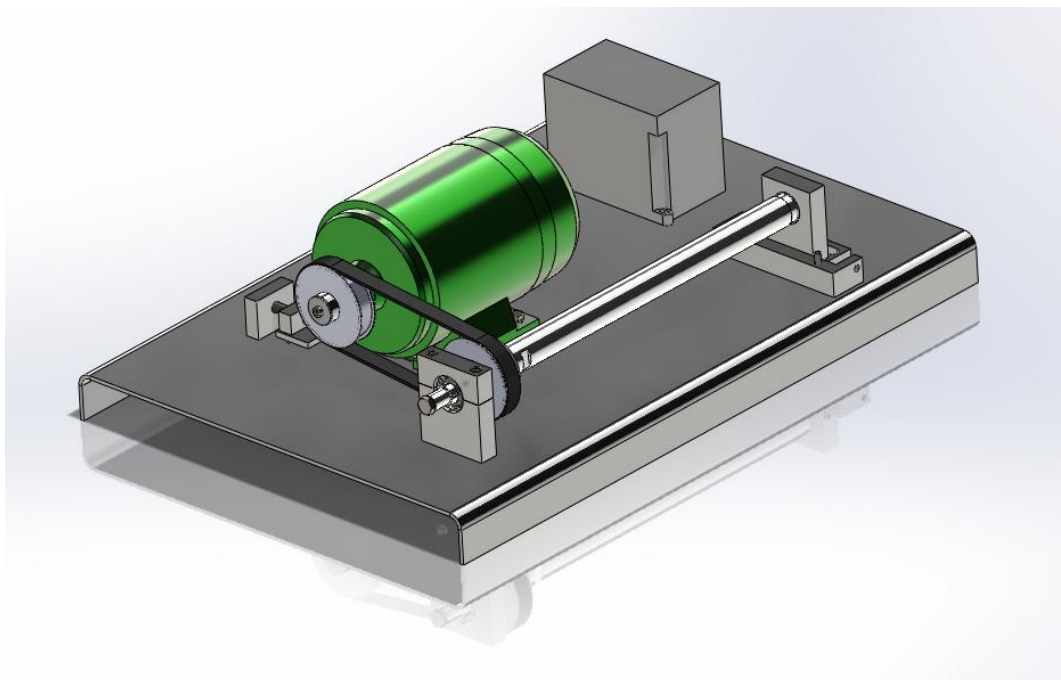
Osnovni zahtev koji je postavljen pri projektovanja uređaja za ispitivanje je da se na njemu mogu simulirati opterećenja koja su bliska realnim opterećenjima u toku eksploatacije.

Osnovni delovi uređaja su:

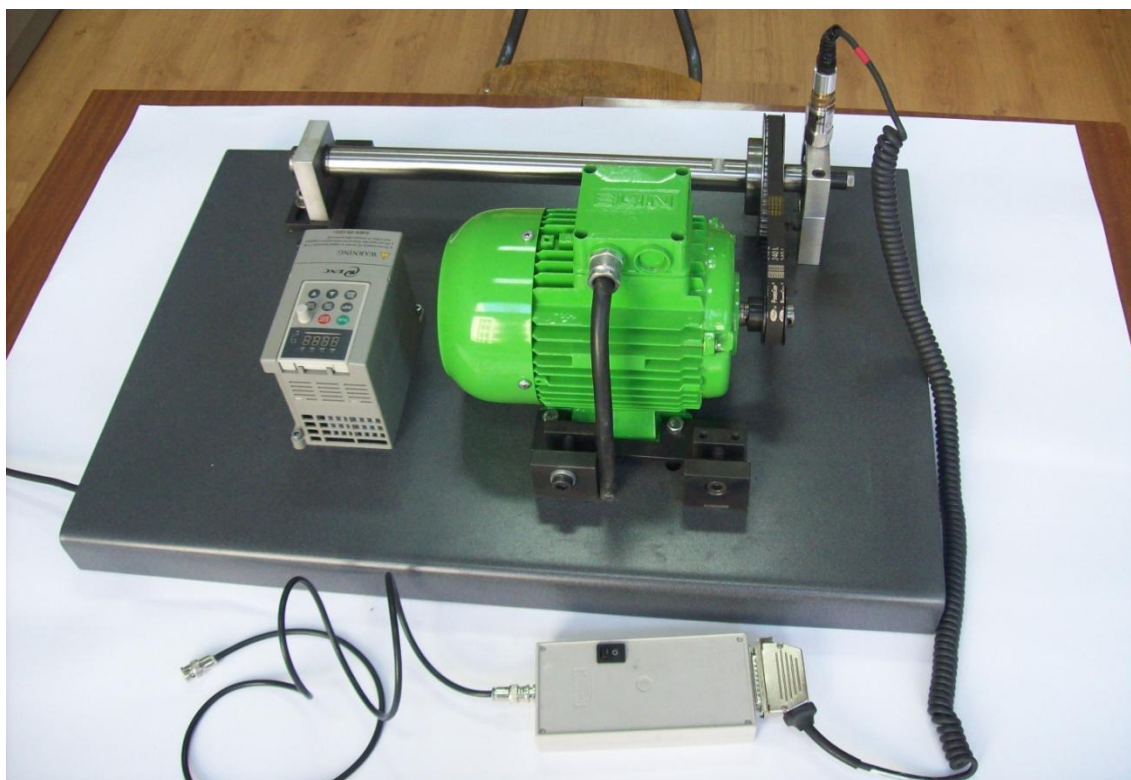
1. Osnovna ploča
2. Pogonski el. motor
3. Kaišnici
4. Zupčasti kaiš
5. Vratilo
6. Kućište ležaja
7. Ležaj 1 (ležaj koji se ispituje)
8. Kućište kliznog ležaja
9. Klizni ležaj
10. Zatezač
11. Frekventni regulator



Slika 6.1 – Crtež ispitnog stola



Slika 6.2 – Trodimenzionalni prikaz ispitnog stola



Slika 6.3 – Izgled ispitnog stola

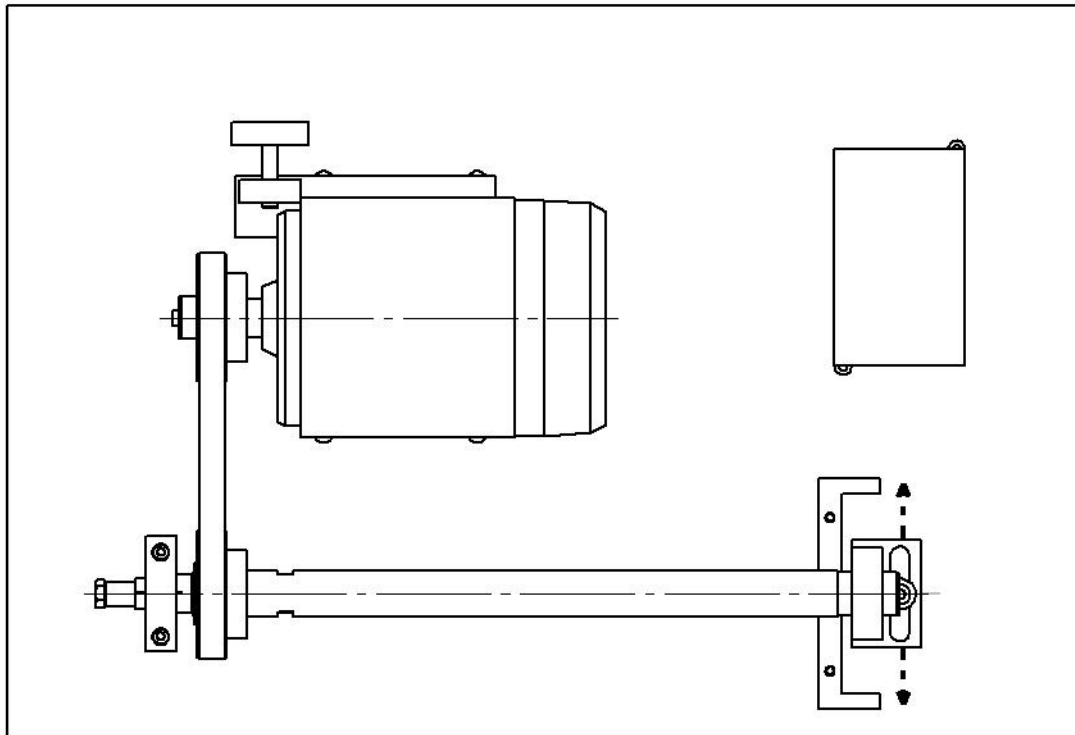
Uređaj je tako konstruisan da se na njemu mogu simulirati:

- Radijalno opterećenje
- Zakošenje ležaja
- Prednaprezanje unutrašnjeg prstena (smanjenje unutrašnjeg zazora)

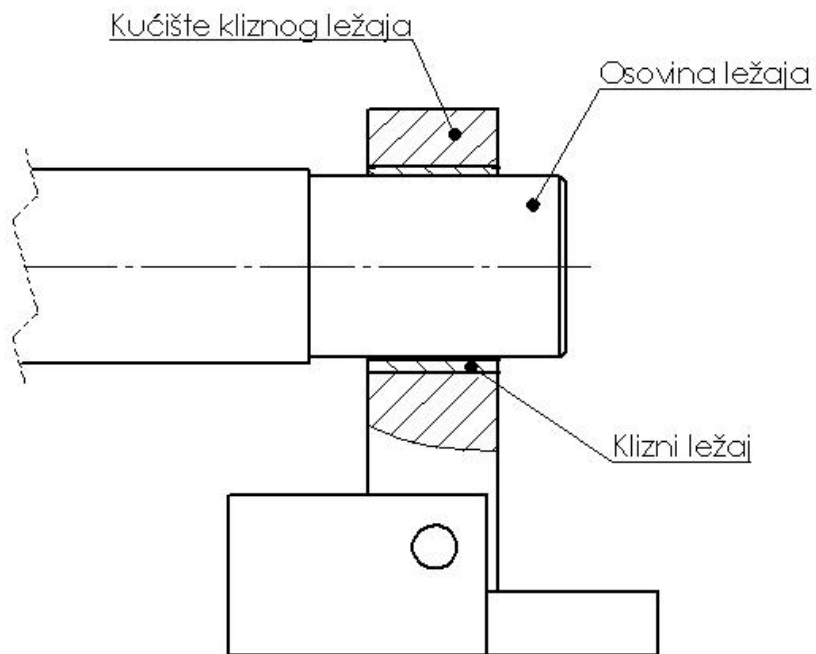
Radijalno opterećenje ležaja se ostvaruje pomoću posebnog zatezača i sistema kliznih vođica. Pomoću njih je omogućeno pravolinijsko pomeranje el. motora tokom zatezanja, čime se ispunjava uslov paralelnosti osa el. motora i osovine ležaja.

Da bi se izvela simulacija zakošenja ležaja, drugi oslonac osovine je pomerljiv. Pravac pomeranja je upravan na osu, čime je moguće zakositi osovinu u odnosu na ležaj (slika 6.4).

Da bi se eliminisali okolni šumovi tokom merenja, drugo ležište osovine je klizno (slika 6.5).

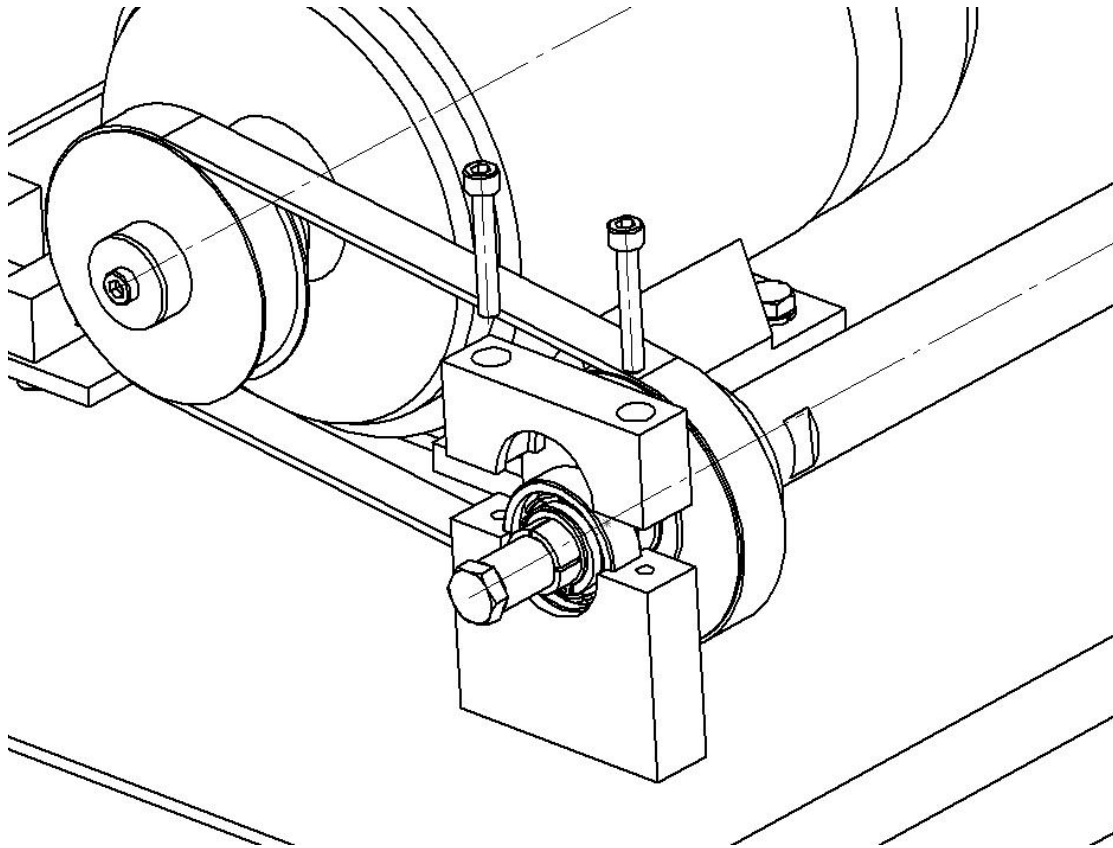


Slika 6.4 – Mogućnost pomeranja kliznog ležišta



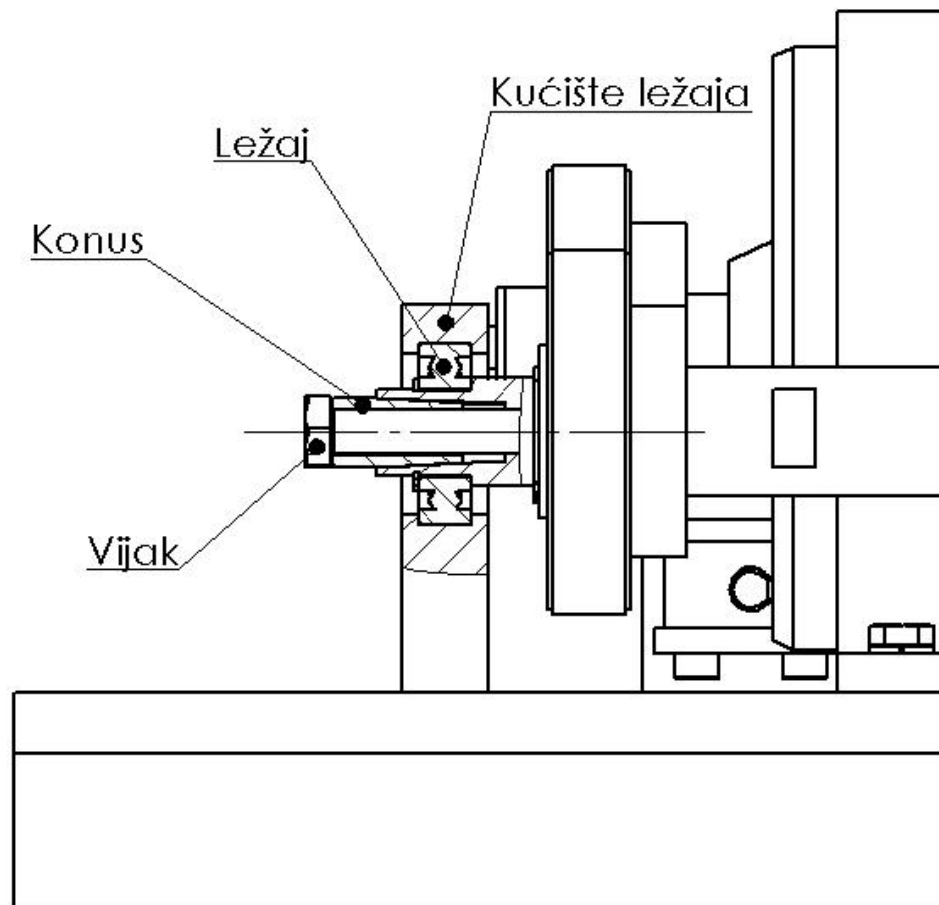
Slika 6.5 – Poprečni presek kliznog ležišta

Pošto se ispitivanja izvode nad više ležajeva, neophodna je konstrukcija koja omogućuje jednostavnu i brzu montažu i demontažu. Taj zahtev je ostvaren izradom dvodelnog kućišta (slika 6.6). Odvrtnjem vijaka na kućištu omogućeno je brzo oslobađanje spoljnjeg prstena ležaja.



Slika 6.6 – Konstrukcija kućišta ležaja

Veza unutrašnjeg prstena ležaja i osovine ostvaruje se preko specijalno projektovane rasečene osovine sa konusom (slika 6.6). Ovakvo rešenje omogućuje jednostavnu montažu i demontažu ležaja na osovinu, a sa druge strane, kontrolisanim pritezanjem čeonog vijka generiše se sila koja se preko konusa prenosi na unutrašnji prsten ležaja. Na ovaj način moguće je ostvariti naprezanje unutrašnjeg prstena i smanjenje zazora u ležaju.



Slika 6.7 – Veza ležaja i osovine

6.2 Opis merenja i definisanje procedura merenja

Osnovu eksperimenta čini uporedna analiza četiri metode detekcije oštećenja ležaja:

- Spektralna analiza
- Envelopa ubrzanja (SKF metoda)
- SPM (Shock Pulse Method)
- Merenje ultrazvučne emisije

Za ispitivanje su upotrebljeni ležajevi koji su korišćeni na rolnama transportnih traka površinskog kopa Kostolac, različitog stepena oštećenja. Svi su istog tipa (6306), različitih proizvođača.

Pošto se nad ležajevima izvode uporedna ispitivanja, potrebno je obezbediti približno jednake radne uslove za sva merenja. Kako se sila zatezanja i paralelnost osa ne menjaju tokom merenja, jedini parametar koji je promenljiv je temperatura ležaja i maziva. Zbog toga je potrebno pratiti i temperaturu ležaja.

Nakon pokretanja el. motora merena je temperatura ležaja i praćen njen trend. Za početak merenja je izabran trenutak u kome je temperatura postala stabilna.

Pre početka merenja svi ležajevi su numerisani (slika 6.8).



Slika 6.8 – Numeracija ležajeva

Nakon završenih merenja, zamenjen je ležaj i ponovljena opisana procedura.

6.3 Merni instrumenti

Za ispitivanja ležajeva korišćeni su sledeći merni instrumenti:

- Microlog CMVA 60 (SKF, Švedska)
- SPM 43A (SPM – Švedska)
- Ispitni sto

6.3.1 Microlog CMVA 60 (SKF – Švedska)

Microlog CMVA 60 je višenamensni analizator data kolektor. Pomoću ovog uređaja merene su ukupne vibracije (spektralna analiza) i envelope ubrzanja.



Slika 6.9 – Microlog CMVA 60, SKF (Vibroanalizator, data kolektor)

Osnovni tehnički podaci

Ulazni senzori:

- akcelerometar, induktivni davač, beskontaktna sonda
- SEE senzor
- AC/DC senzor („amper klješta“)
- senzor pritiska
- senzor temperature
- tahometar

Merenja:

- Merni opseg: 0.5 Hz ÷ 20 kHz
- FFT analiza
- min. frekvencija: 0 Hz
- max. frekvencija: 20 kHz
- rezolucija: 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400 linija
- Programske funkcije: Hanning, Uniform, Flat Top

Prikaz rezultata:

- FFT
- Vremenski domen
- Dual (FFT i Vremenski domen)

Napajanje: 7.2V 3.8 Ah (NiMH)

Aplikacije:

- Uravnotež. rotora u jednoj ravni
- Uravnotež. rotora u dve ravni
- Merenje vektora vibracija (amplituda i faza)
- Analiza strujnih parametara el. motora
- Modalna analiza
- Merenje vibracija u prelaznim režimima (Run up/Coast down)

Stepen zaštite: IP65

Dimenzije: 200x267x64 mm

Masa: 2.3 kg

Radni uslovi:

- Temperatura: -20°C ÷ +60°C
- Rel. Vlažnost vazd.: 5 ÷95 %

Komunikacioni port: RS-232

6.3.2 Shock Pulse Meter 43A (SPM – Švedska)

SPM 43A je uređaj za procenu stanja ležajeva (sl. 6.9) istoimenog švedskog proizvođača. Sami principi na kojima je zasnovana ova metoda opisani su u poglavlju 4.8.



Slika 6.10 – SPM 43A

Uređaj se sastoji od:

- Centralne jedinice
- Senzora
- Slušalica

Kao i kod prethodne metode, parametri koji se unose u uređaj su prečnik vratila i radna brzina. Pošto je uređaj analognog tipa, unos parametara se izvodi mehanički, kružnim pomeranjem dva diska do odgovarajuću poziciju.

Za ispitivane ležajeve prečnik unutrašnjeg otvora iznosi 30 mm. Broj obrtaja osovine može se podešavati pomoću frekventnog regulatora a tokom merenja on je iznosio $n=1500$ o/min.

U našem primeru, za $d=30$ mm i $n=1500$ o/min ispravno podešen uređaj je prikazan na slici 6.11.



Slika 6.11 – Podešavanje uređaja SPM 43A

Procedura merenja se izvodi tako što se senzor uređaja nasloni na kućište ležaja, a zatim spoljni disk uređaja pomera do trenutka pojave prvih zvučnih signala u slušalicama. Daljim pomeranjem diska zvuk se pojačava. Pozicija diska u kome se pojavljuju prvi zvučni signali je reporna pozicija za procenu stanja (slika 6.12).



Slika 6.12 – Ocena stanja ležaja pomoću SPM 43A

6.4 Kriterijumi za ocenu stanja ležaja

6.4.1 Spektralna analiza

Standard **ISO 10816** je osnovni dokument koji uspostavlja opšte smernice za merenje i procenu mehaničkih vibracija, izmerenih na nerotirajućim delovima mašina (kućišta ležaja). Standard definiše procedure tokom merenja, merni opseg, radna stanja opreme tokom merenja, izbor mernih tačaka i kriterijume za procenu stanja opreme.

Kriterijum za procenu prihvatljivosti vibracija je tablična definicija kvalitativnog stanja (odlično, prihvatljivo, uslovno prihvatljivo, neprihvatljivo), za različite klase mašina.

Kvalitativne oblasti vibracija su definisane kao:

- Oblast **A** Potpuno nove mašine
- Oblast **B** Prihvatljivo stanje za duži vremenski period
- Oblast **C** Uslovno prihvatljivo stanje, uslovi pod kojima mašina može da funkcioniše određeno vreme, nakon čega je neophodna sanacija povećanih vibracija
- Oblast **D** Neprihvatljivo stanje. Postoji mogućnost oštećenja mašine

U okviru standarda **ISO 10816** nalaze se i **Aneksi A, B, C, D, E i F**.

Klasifikacija mašina data je u Aneksu B.

Aneks B (Kriterijum procene vibracija za određene grupe mašina)

Klasa I – Male mašine (elektromotor do 15 kW)

Klasa II – Mašine srednje veličine bez posebnog fundamenta (tipično elektromotori od 15 kW do 75 kW) kao i mašine vezane za fundament (do 300 kW)

Klasa III – Velike mašine oslonjene na čvrstu podlogu sa znatnom krutošću u pravcu merenja vibracija

Klasa IV – Velike mašine oslonjene na čvrstu podlogu sa mogućnošću pomeranja u pravcu merenja vibracija (turbogeneratorsko postrojenje sa snagom preko 10 MW).

V_{RMS} (mm/s)	Klasa I	Klasa II	Klasa III	Klasa IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	A	A
1.8				
2.8	C	C	B	B
4.5				
7.1	D	D	C	C
11.2				
18			D	D
28				
45	D	D		

Slika 6.13 – Granice za procenu kvaliteta prema ISO10816

6.4.2 Envelopa ubrzanja

Za merenje *Envelope ubrzanja* korišćen je **Microlog CMVA 60 – SKF** (slika 6.9). Pre samog merenja potrebno je podesiti uređaj unosom sledećih parametara:

Tip merenja: Env acc (Enveloped acceleration)

Broj linija (rezolucija): 800

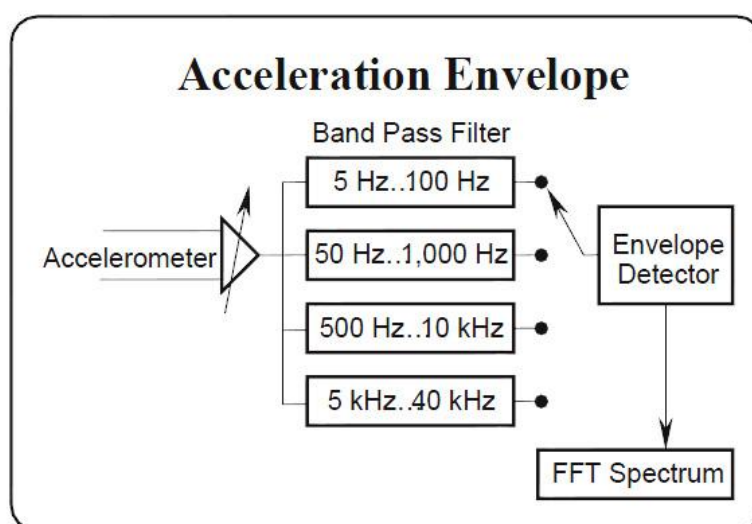
Detekcija: Pk to Pk (Peak to Peak)

Odsecanje niskih frekvencija: 0 ili 0.5% max. frekvencije

Env filter: prema tabeli T 6.1

Tabela 6.1 – Izbor filtera pri merenju Envelope ubrzanja

Filter	Frekventni opseg	Opseg brzine	Opseg analize
1	5 – 100 Hz	0 – 50 o/min	0 – 10 Hz
2	50 – 1 000 Hz	25 – 500 o/min	0 – 100 Hz
3	500 – 10 000 Hz	250 – 5 000 o/min	0 – 1 000 Hz
4	5 000 – 40 000 Hz	2 500 – o/min	0 – 10 000 Hz



Slika 6.14 - Blok dijagram envelope ubrzanja [7]

Za ocenu stanja ležaja merenjem envelope ubrzanja potrebno je odrediti dva parametra: prečnik vratila i broj obrtaja ležaja. Za ispitivane ležajeve prečnik unutrašnjeg otvora iznosi 30 mm. Broj obrtaja osovine može se podešavati pomoću frekventnog regulatora a tokom merenja on je iznosio $n=1500$ o/min.

Na osnovu tih ulaznih parametra i tabele 6.2, mogu se odrediti granice za ocenu stanja ležaja i one su prikazane u tabeli 6.3.

Tabela 6.2 – Kriterijumi za procenu stanja merenjem Envelope ubrzanja [7]

Enveloping Severity g_E Peak-to-Peak	Shaft Diameter and Speed		
	Diameter Between 200mm and 500mm and Speed < 500 RPM	Diameter Between 50mm and 300mm and Speed Between 500 RPM and 1800 RPM	Diameter Between 20mm and 150mm and Speed Between 1800 RPM and 3600 RPM
0.10	Good	Good	Good
0.50			
0.75	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory
1	Unsatisfactory (Alert)		
2	Unacceptable (Danger)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)
4		Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
10		Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)


SKF Condition Monitoring 

Tabela 6.3 – Granice za ocenu stanja ležaja merenjem Envelope ubrzanja

Envelope ubrzanja [g_E]	Stanje ležaja
Env acc < 0.75	Dobro
0.75 < Env acc < 2	Zadovoljavajuće
2 < Env acc < 4	Nezadovoljavajuće (upozorenje)
Env acc > 4	Neprihvatljivo (opasno)

6.4.3 Shock Pulse Meter 43A, SPM - Švedska

SPM metod meri napon generisan u senzoru i beleži njegovu maksimalnu vrednost V_{max} . Zatim, V_{max} konvertuje u dB_{SV} što predstavlja *apsolutnu vrednost akustičke emisije*, koja se određuje prema obrascu:

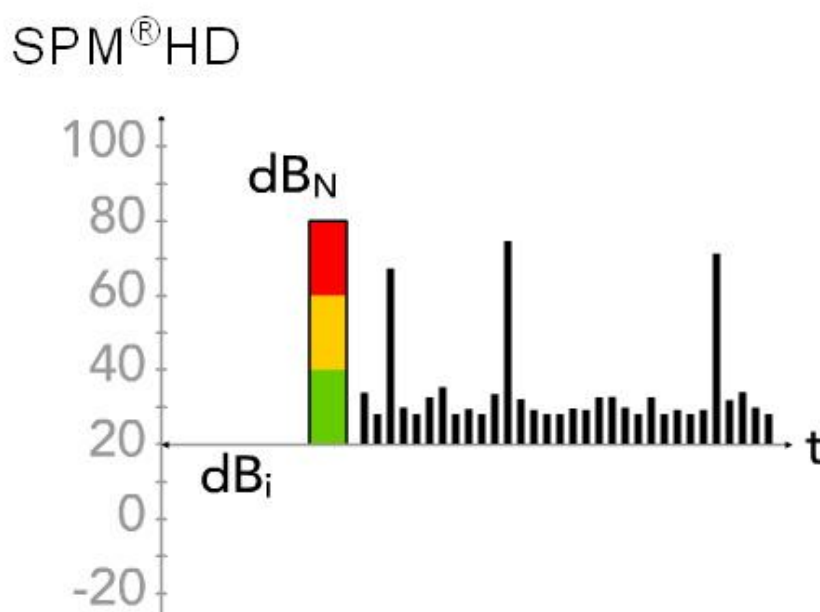
$$dB_{SV} = 20 \log \frac{V_{max}}{V_{ref}} \quad [6.1]$$

gde je V_{ref} referentni napon i iznosi 100 mV [5].

Kako vrednost *apsolutne akustičke emisije* (dB_{SV}) zavisi od stanja ležaja, broja obrtaja mašine i prečnika unutrašnjeg otvora ležaja, njena vrednost ne može biti osnova za procenu stanja. Zbog toga se uvodi novi parametar dB_i - *Inicijalna akustička emisija* koji je u funkciji broja obrtaja i prečnika vratila.

Parametar koji se koristi za procenu stanja ležaja je dB_n - *Normalizovana akustička emisija* i on se dobija kao razlika apsolutne i inicijalne vrednosti akustičke emisije (slika 6.15).

$$dB_n = dB_{SV} - dB_i \quad [6.2]$$



Slika 6.15 – Akustička emisija ležaja po SPM metodi [5]

Na osnovu brojnih ispitivanja utvrđeni su kriterijumi za ocenu stanja i oni su prikazani u tabeli 6.4.

Tabela 6.4 – Granice za ocenu stanja ležaja SPM metodom

dB_N	Stanje ležaja
0 – 20	Dobro
20 – 35	Zadovoljavajuće
35 – 60	Neprihvatljivo

Iz primera sa slike 6.12 vidi se da je u trenutku pojave prvih zvučnih signala u slušalicama, repna oznaka bila na poziciji 23 dB što odgovara *zadovoljavajućem* stanju ležaja.

6.4.4 Detekcija u ultrazvučnom domenu

Parametar koji se koristi za procenu stanja ležaja po metodi merenja ultrazvučne emisije je BC (Bearing Condition).

Na osnovu ispitivanja sprovedenih nad ležajevima različitog stepena oštećenja, utvrđeni su kriterijumi za ocenu stanja i oni su prikazani u tabeli 6.5.

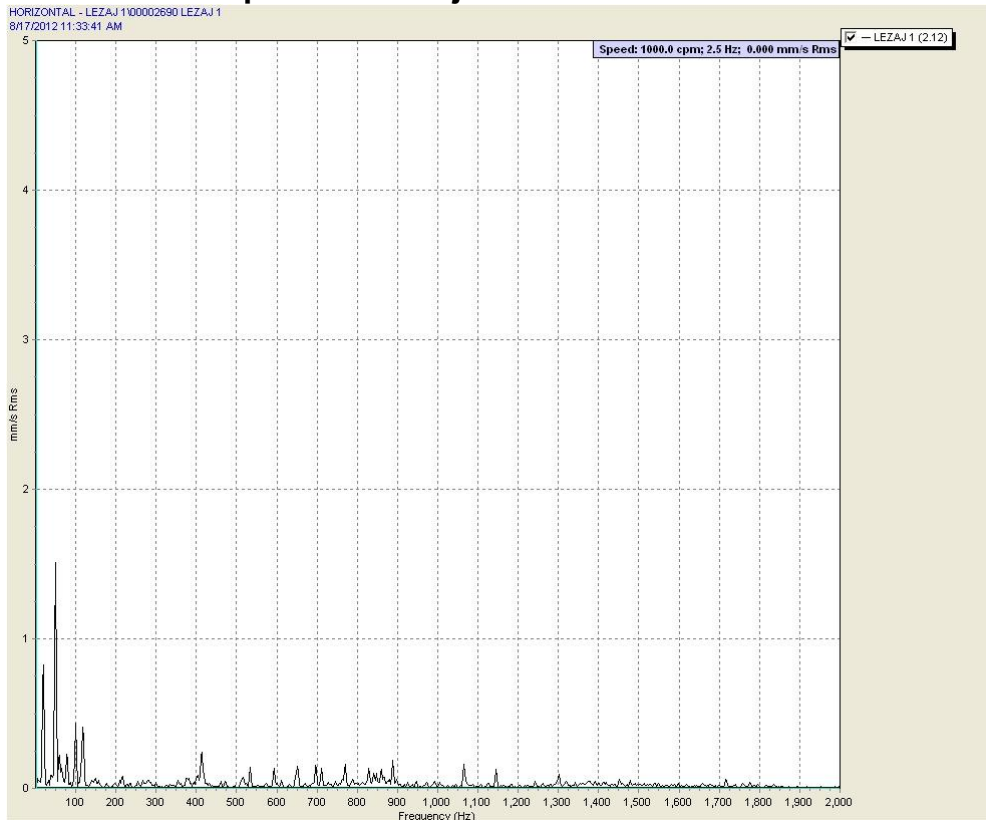
Tabela 6.5 – Granice za ocenu stanja ležaja merenjem ultrazvučne emisije

UZ_{em}	Stanje ležaja
0 – 7.5	Dobro
7.5 – 18	Zadovoljavajuće
> 18	Neprihvatljivo

6.5 Prikaz rezultata ispitivanja

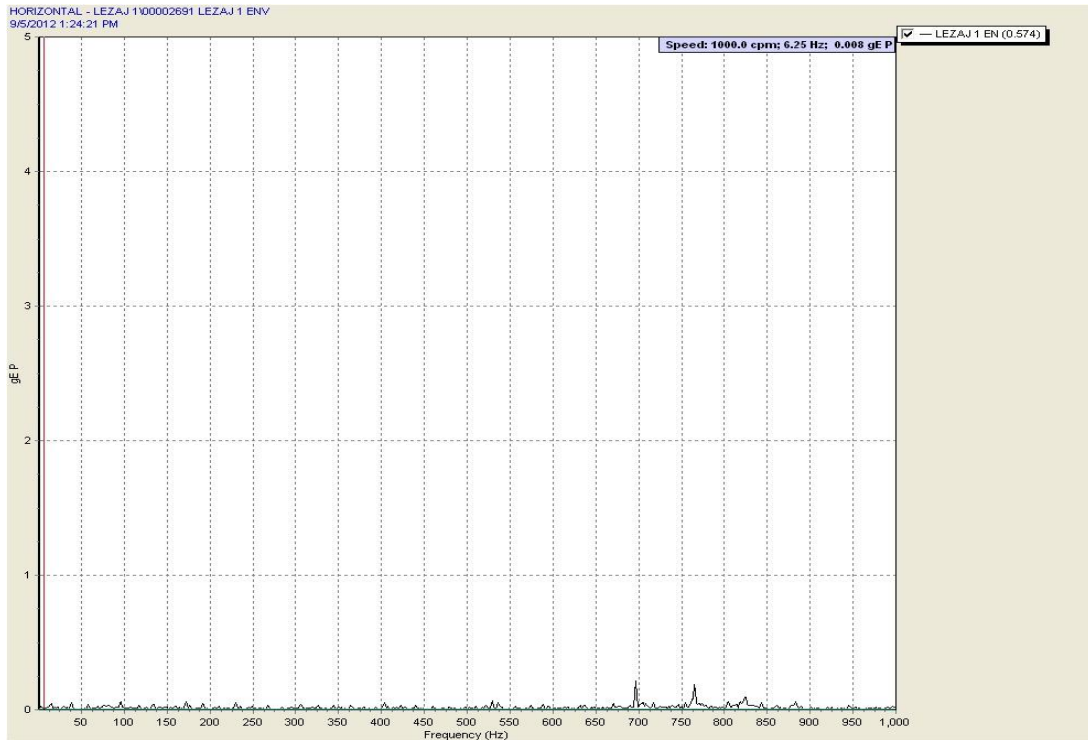
6.5.1 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 1

6.5.1.1 Spektar vibracija



Slika 6.16 – Spektar vibracija na ležaju broj 1

6.5.1.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

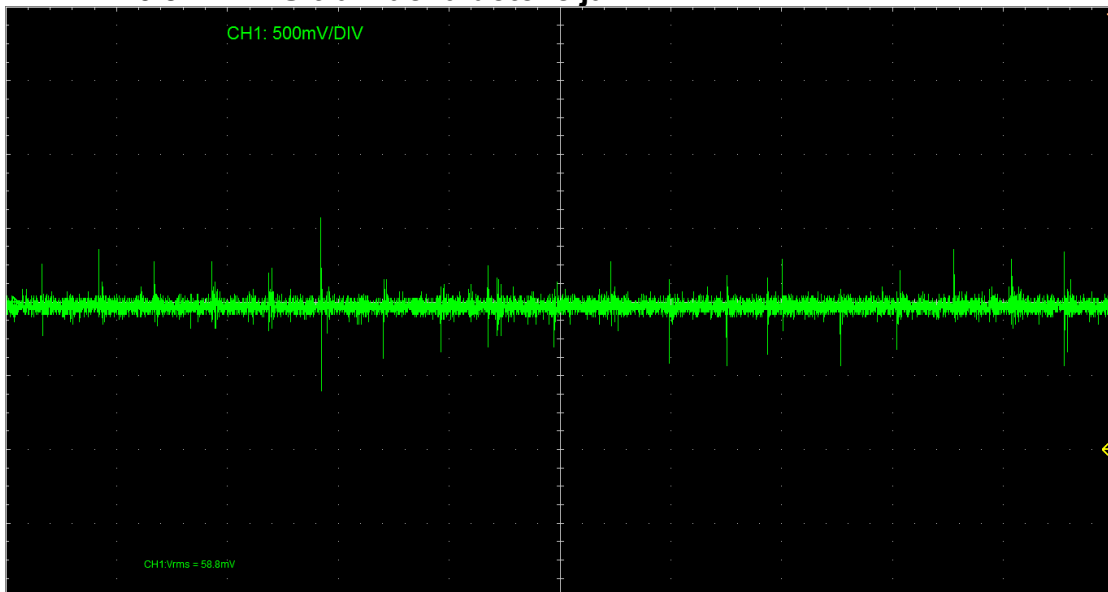


Slika 6.17 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 1

6.5.1.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=27$ dB

6.5.1.4 Ultrazvučna detekcija

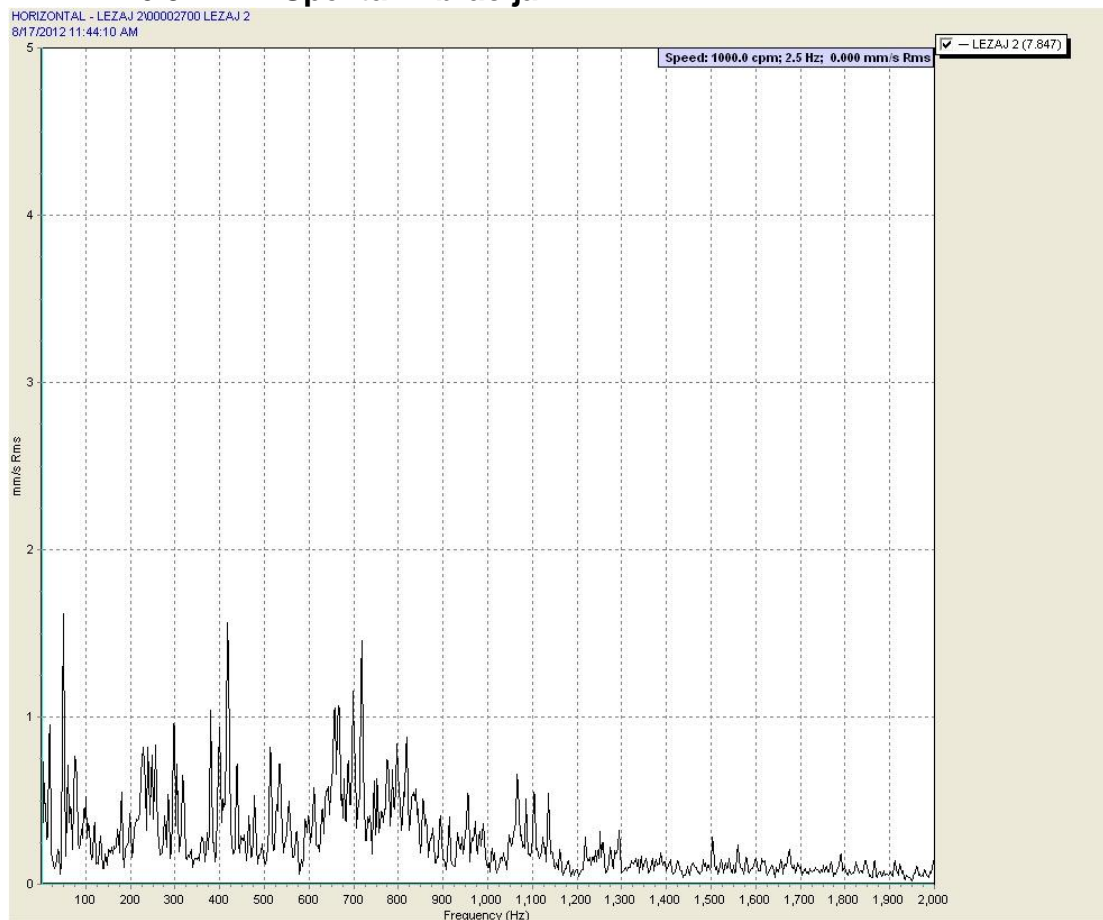


Slika 6.18 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 1

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 5.4$

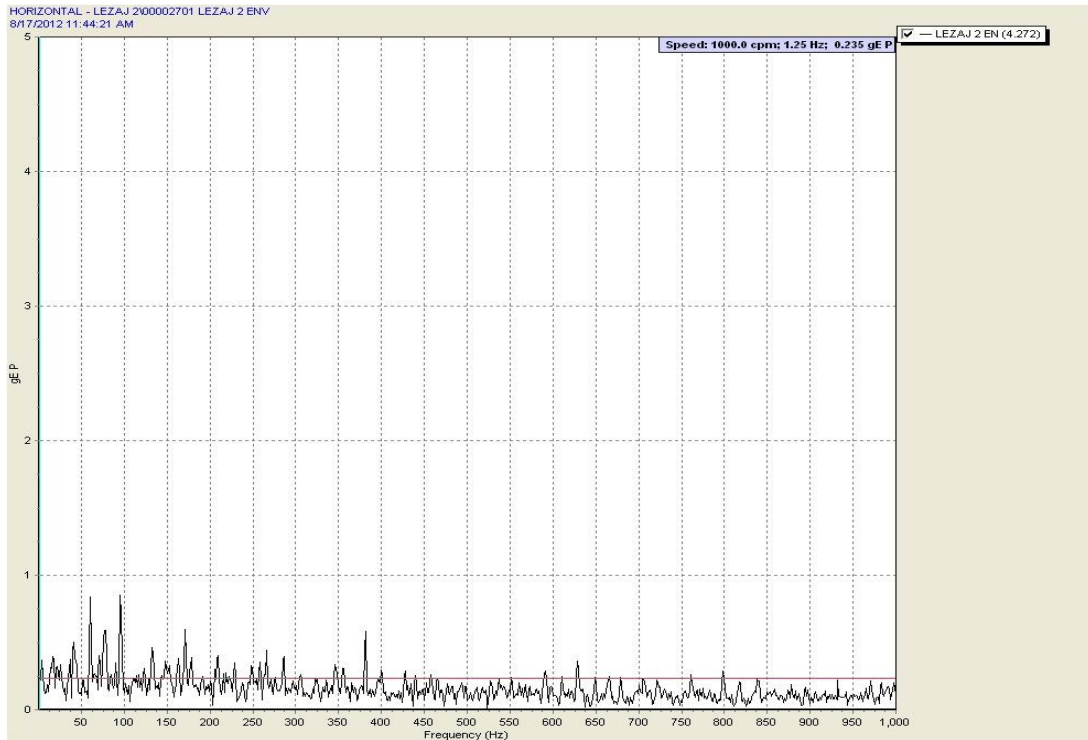
6.5.2 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 2

6.5.2.1 Spektar vibracija



Slika 6.19 – Spektar vibracija na ležaju broj 2

6.5.2.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

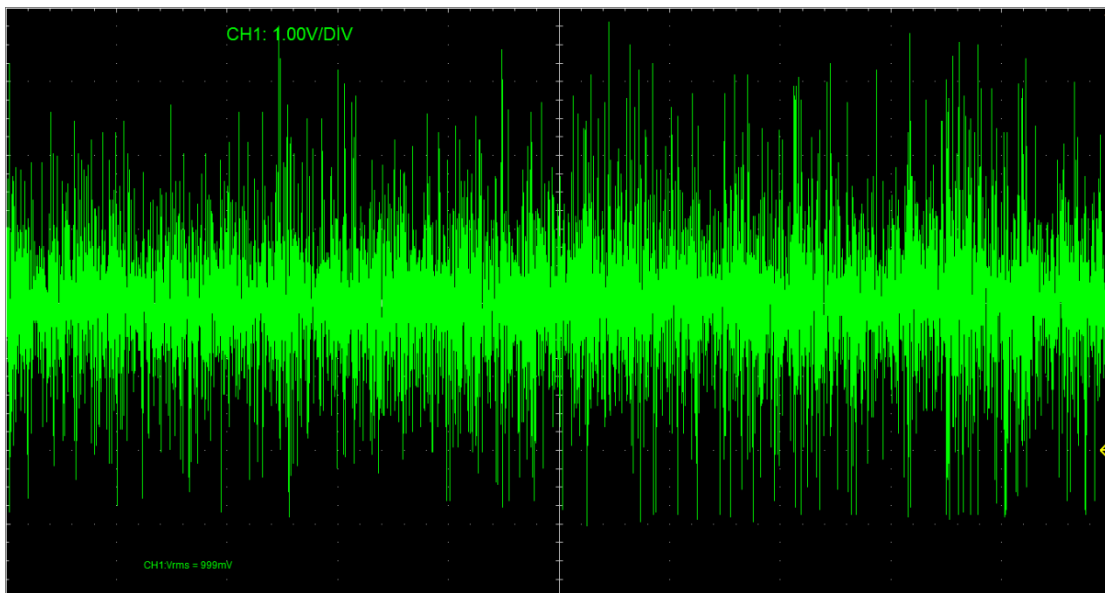


Slika 6.20 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 2

6.5.2.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=60$ dB

6.5.2.4 Ultrazvučna detekcija

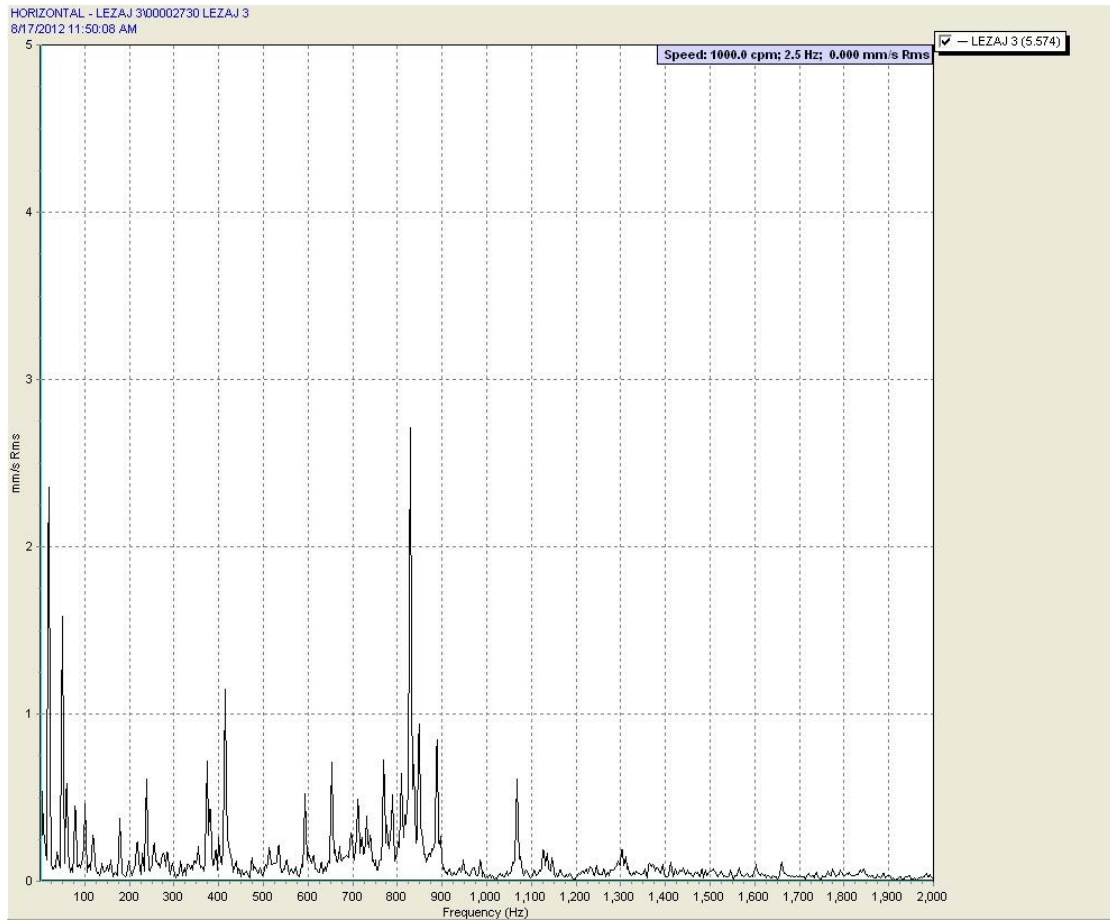


Slika 6.21 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 2

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 30$

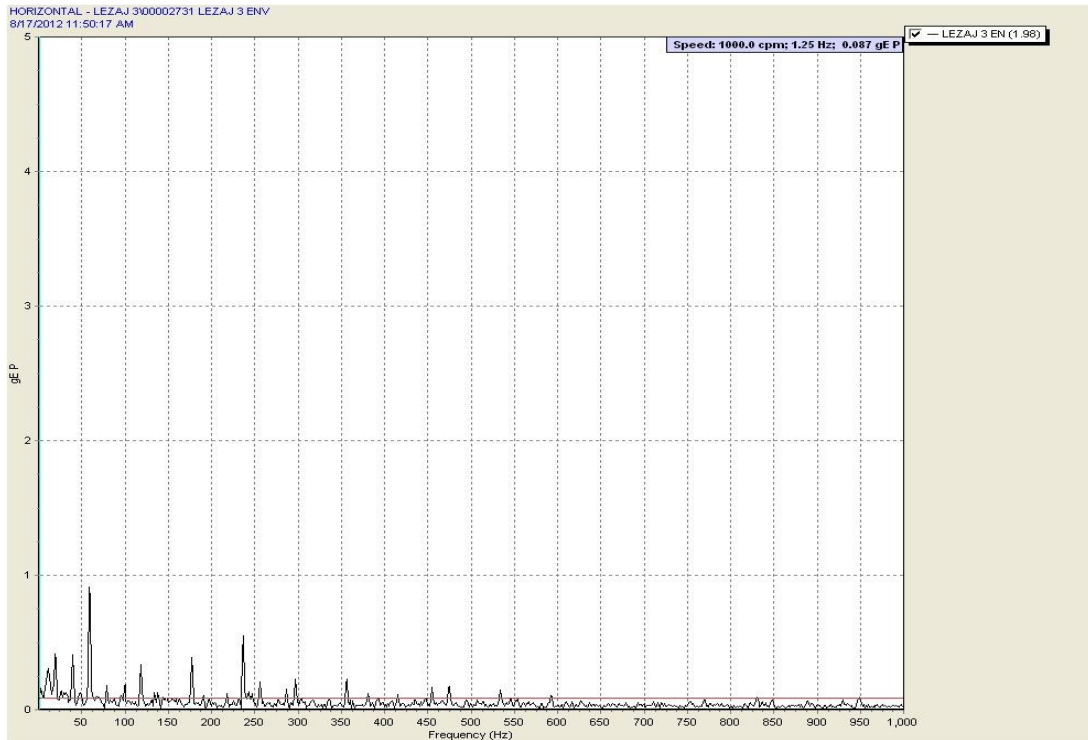
6.5.3 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 3

6.5.3.1 Spektar vibracija



Slika 6.22 – Spektar vibracija na ležaju broj 3

6.5.3.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

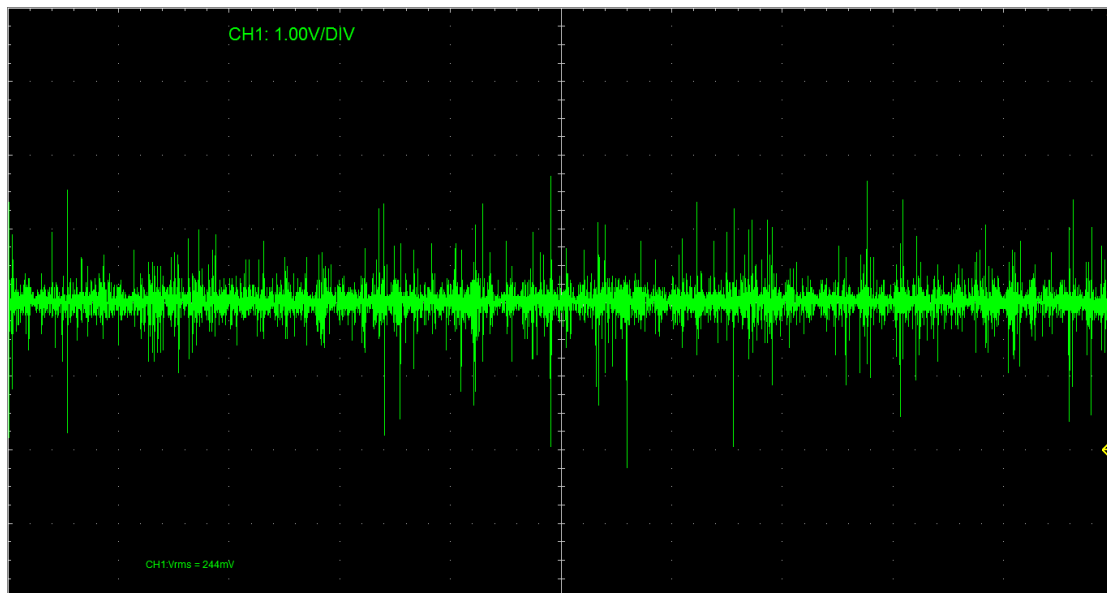


Slika 6.23 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 3

6.5.3.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=35$ dB

6.5.3.4 Ultrazvučna detekcija

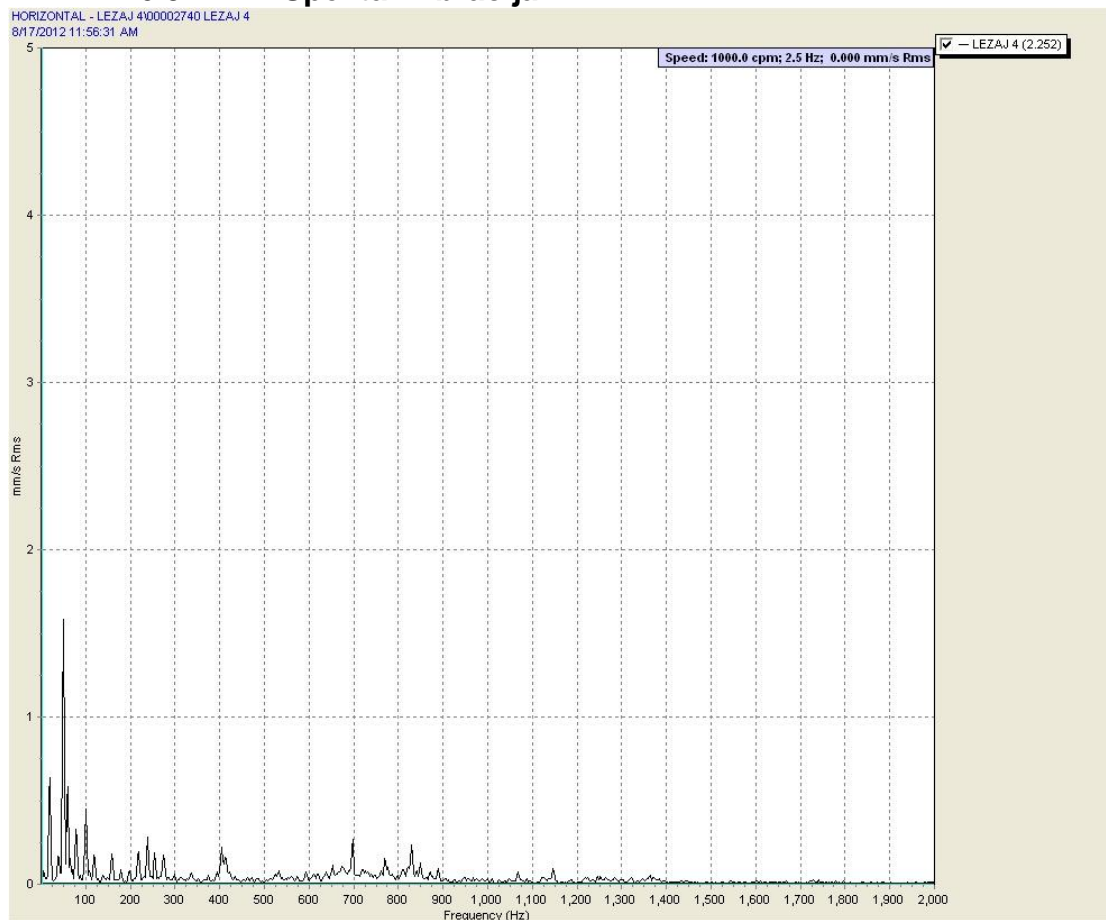


Slika 6.24 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 3

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 17.7$

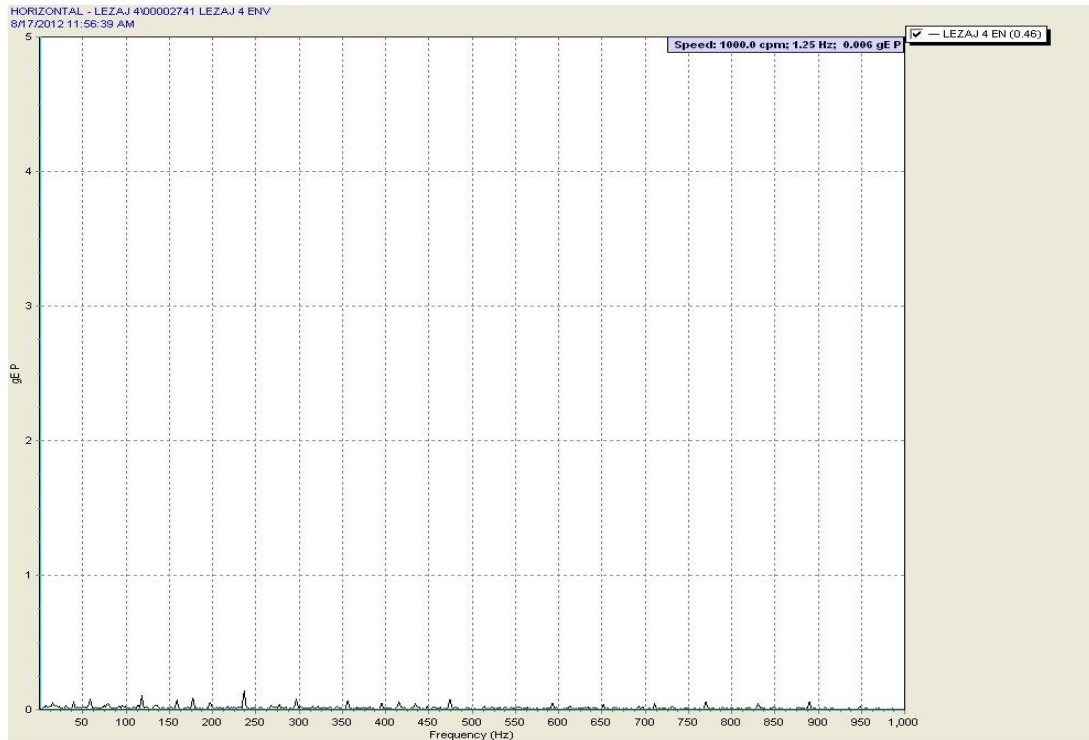
6.5.4 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 4

6.5.4.1 Spektar vibracija



Slika 6.25 – Spektar vibracija na ležaju broj 4

6.5.4.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

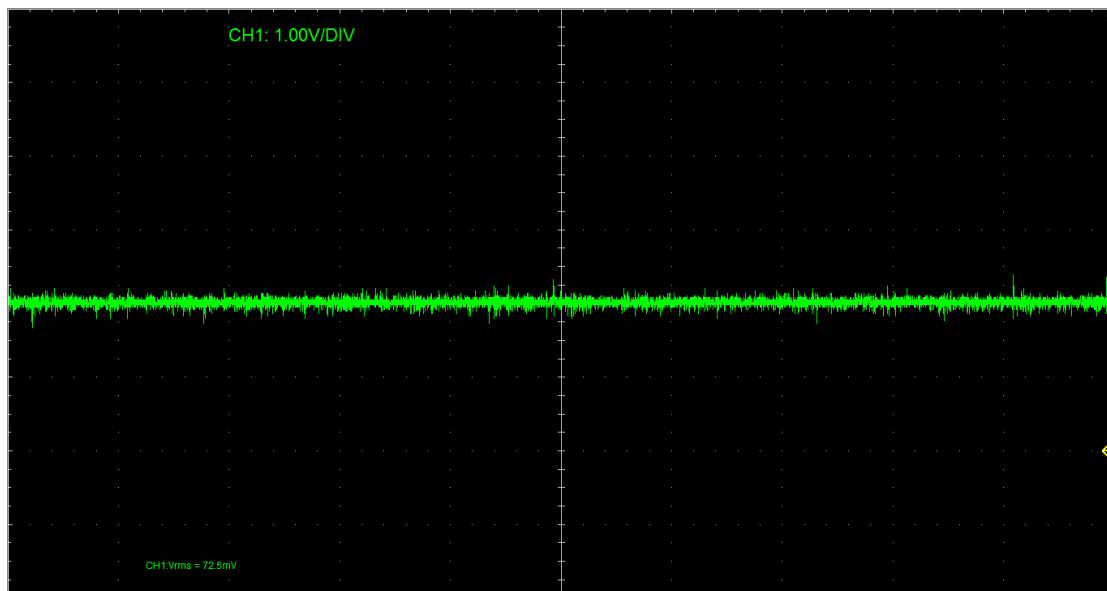


Slika 6.26 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 4

6.5.4.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=22$ dB

6.5.4.4 Ultrazvučna detekcija

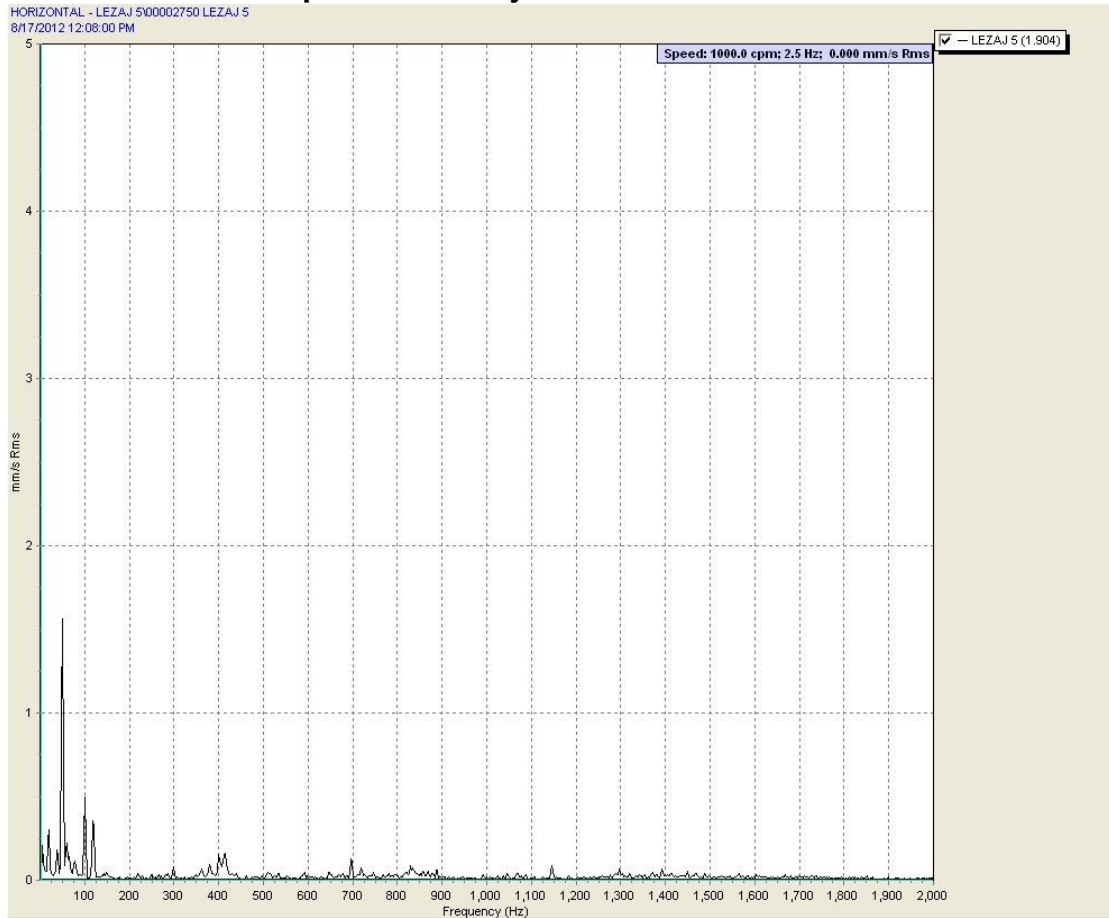


Slika 6.27 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 4

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 7.2$

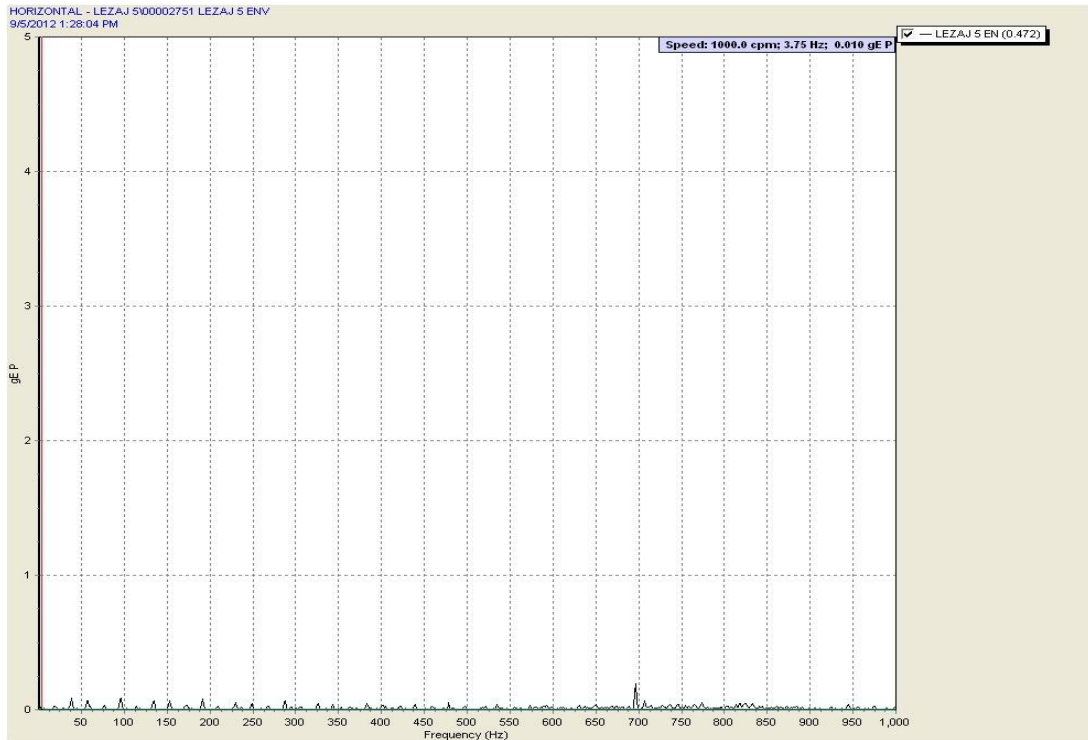
6.5.5 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 5

6.5.5.1 Spektar vibracija



Slika 6.28 – Spektar vibracija na ležaju broj 5

6.5.5.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

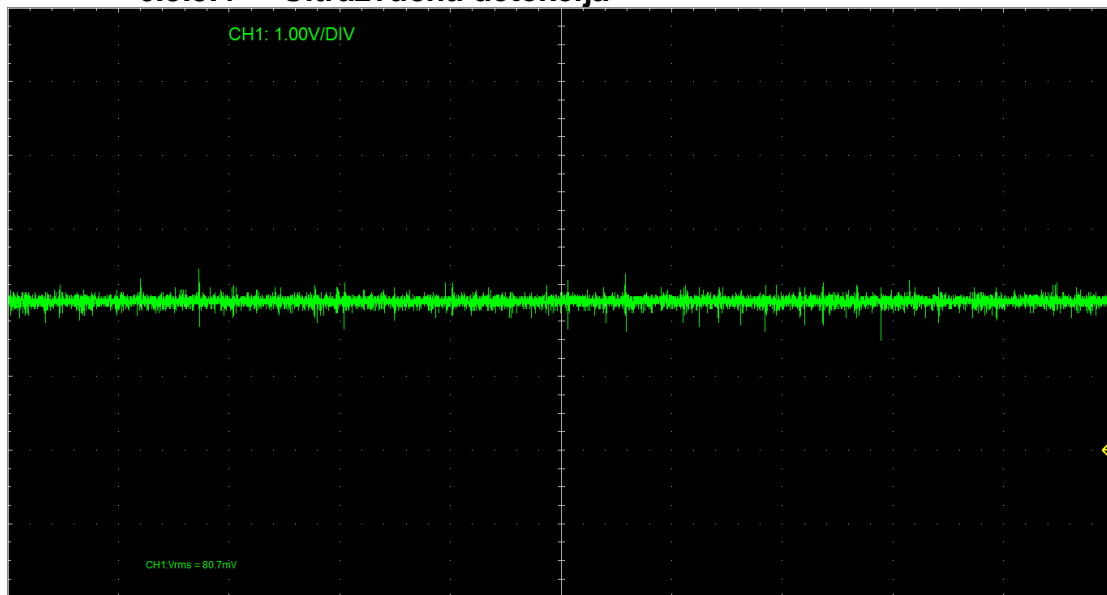


Slika 6.29 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 5

6.5.5.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=27$ dB

6.5.5.4 Ultrazvučna detekcija

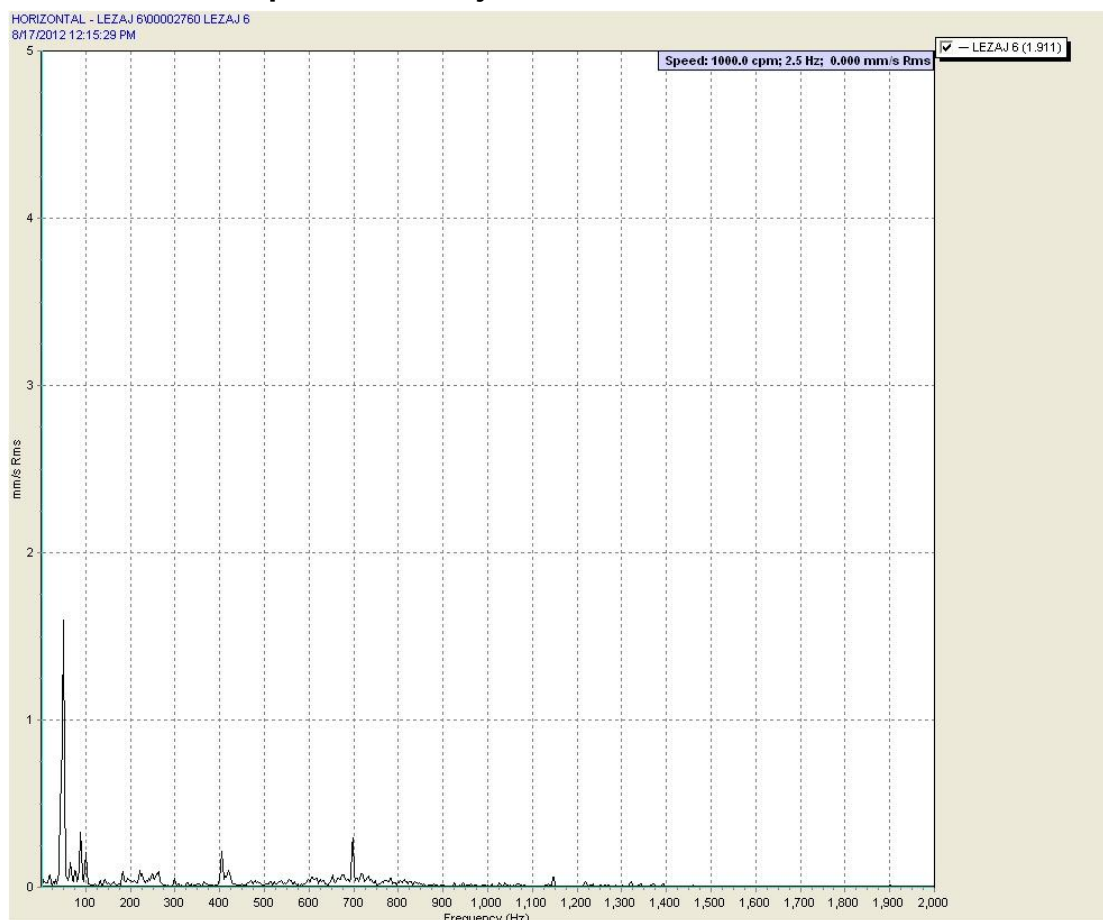


Slika 6.30 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 5

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 8.1$

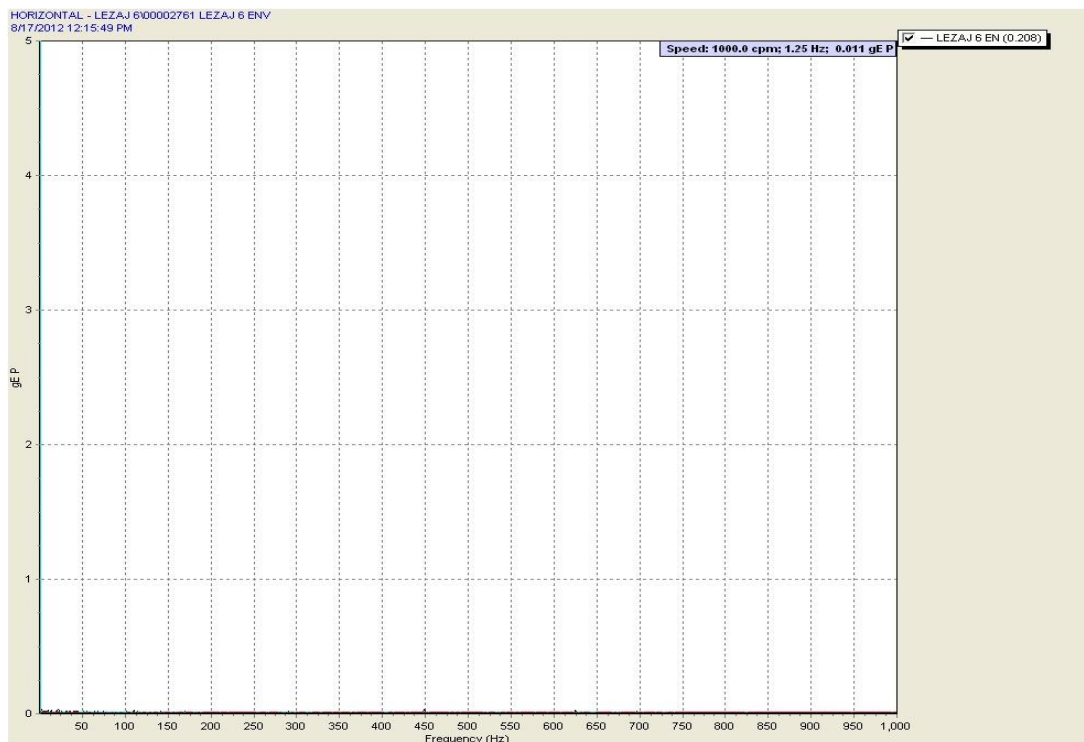
6.5.6 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 6

6.5.6.1 Spektar vibracija



Slika 6.31 – Spektar vibracija na ležaju broj 6

6.5.6.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

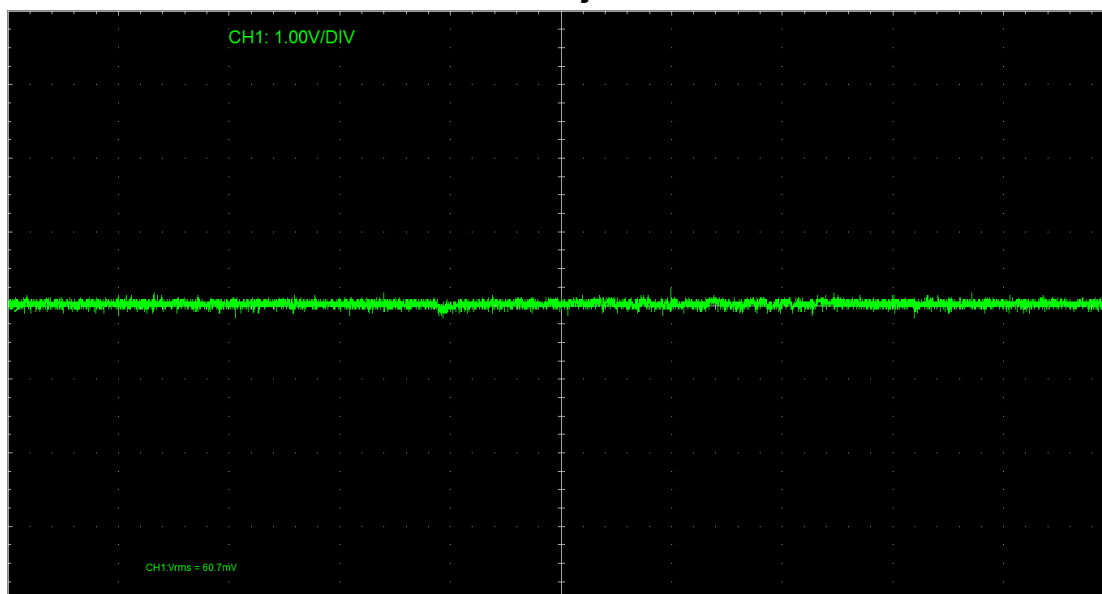


Slika 6.32 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 6

6.5.6.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=10$ dB

6.5.6.4 Ultrazvučna detekcija

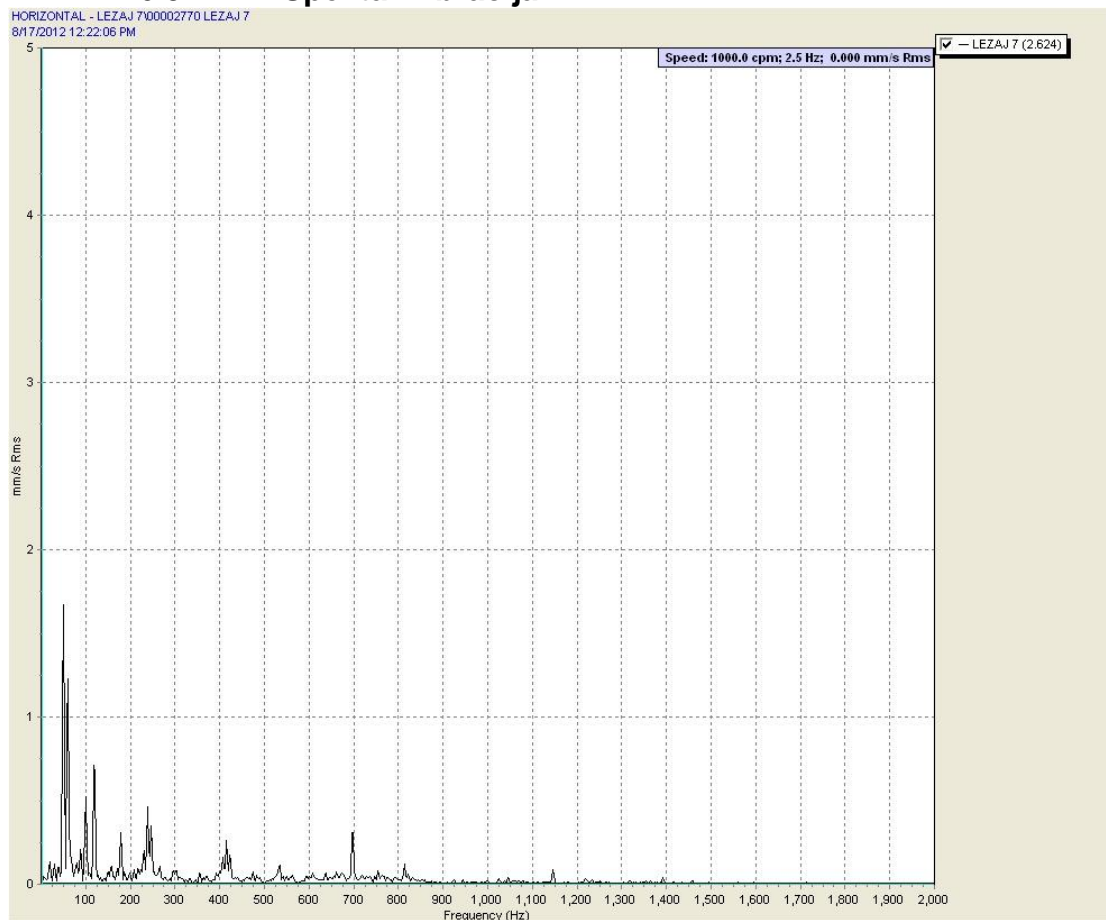


Slika 6.33 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 6

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 5.7$

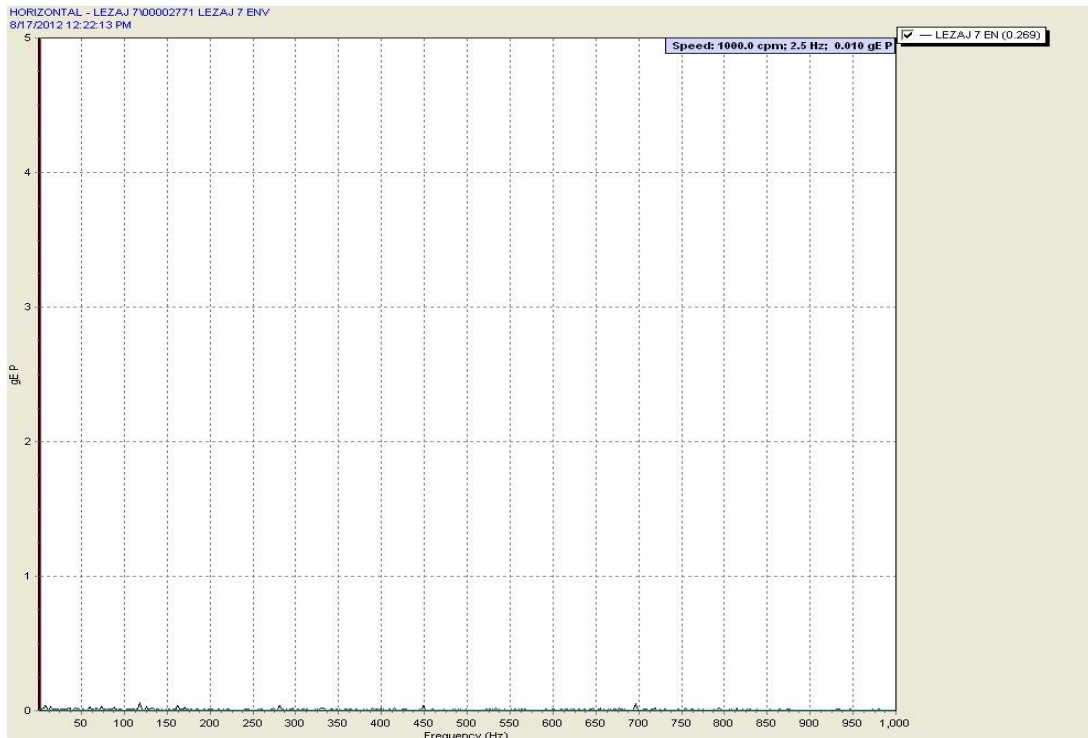
6.5.7 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 7

6.5.7.1 Spektar vibracija



Slika 6.34 – Spektar vibracija na ležaju broj 7

6.5.7.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

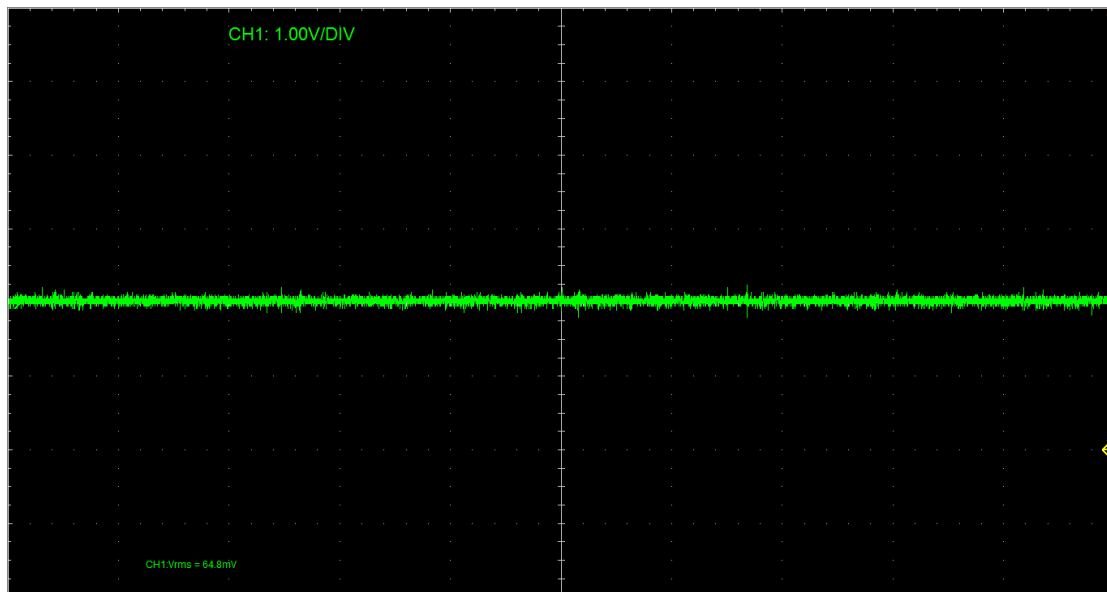


Slika 6.35 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 7

6.5.7.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=20$ dB

6.5.7.4 Ultrazvučna detekcija

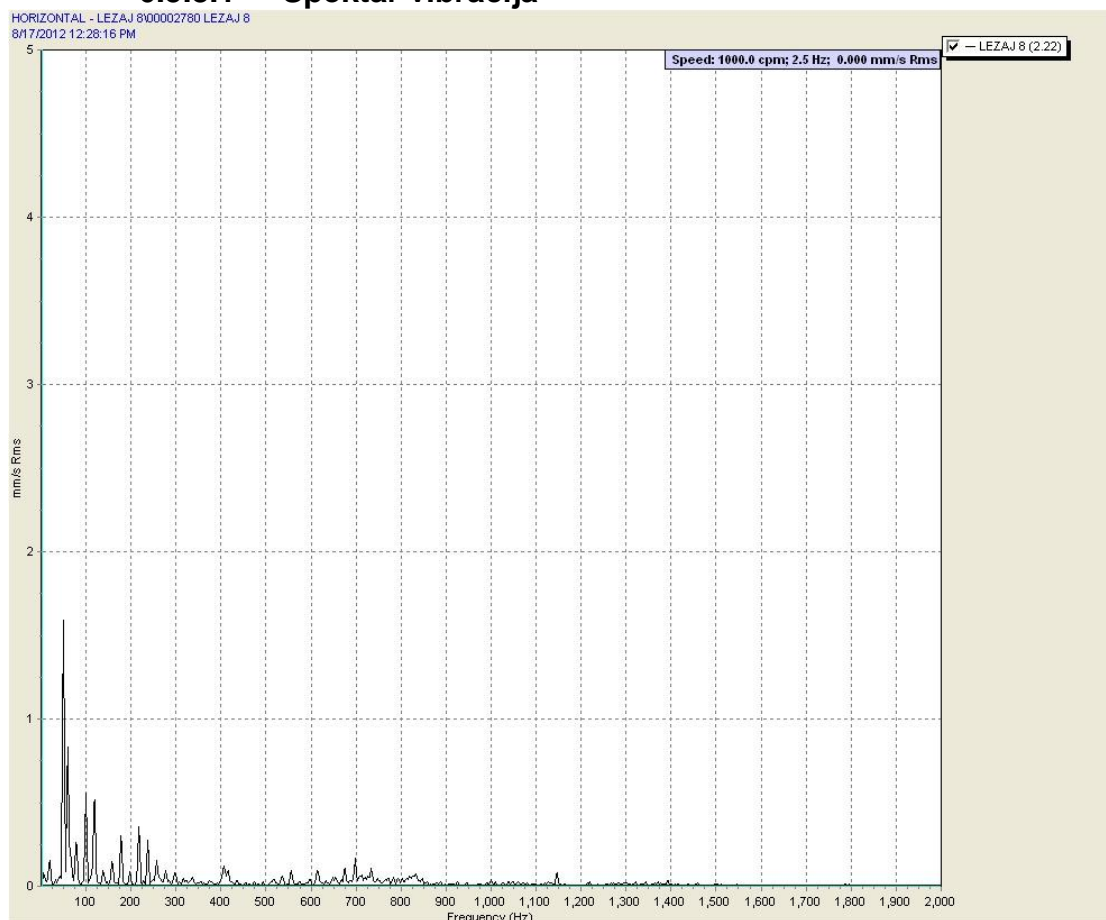


Slika 6.36 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 7

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 6.2$

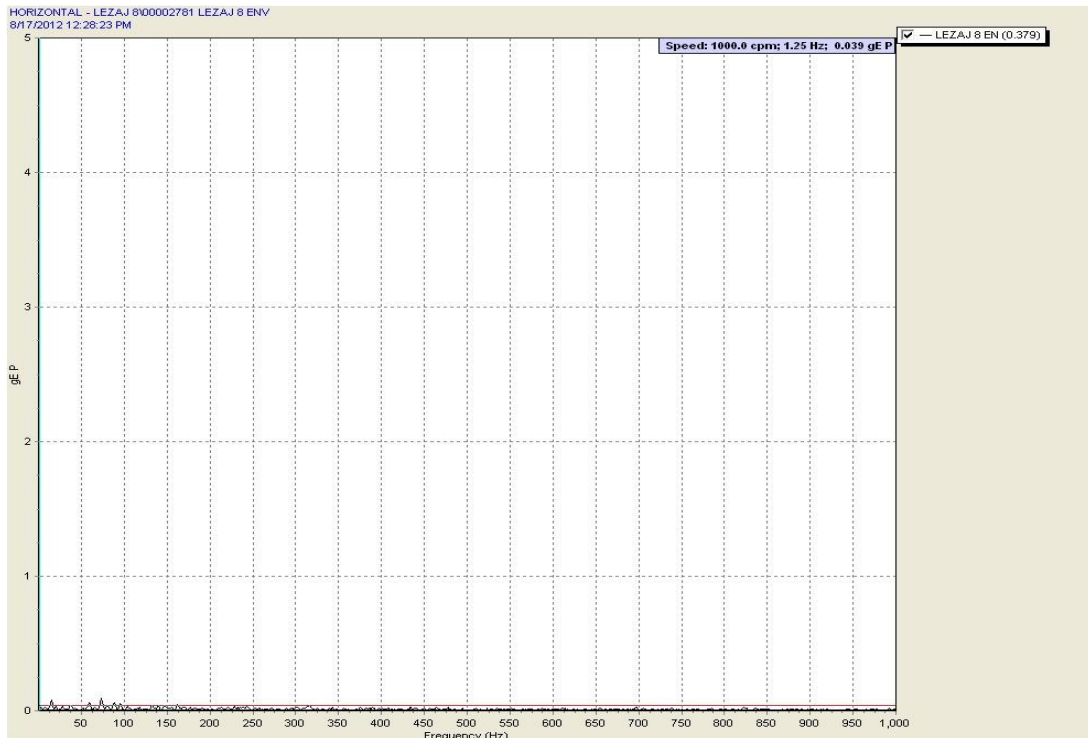
6.5.8 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 8

6.5.8.1 Spektar vibracija



Slika 6.37 – Spektar vibracija na ležaju broj 8

6.5.8.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

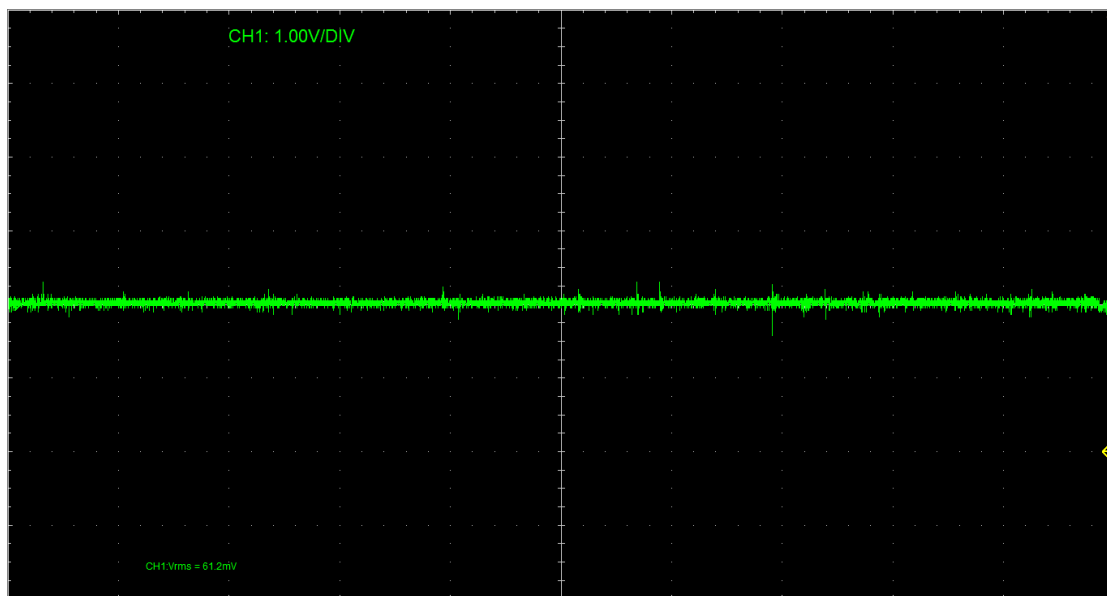


Slika 6.38 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 8

6.5.8.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=22$ dB

6.5.8.4 Ultrazvučna detekcija

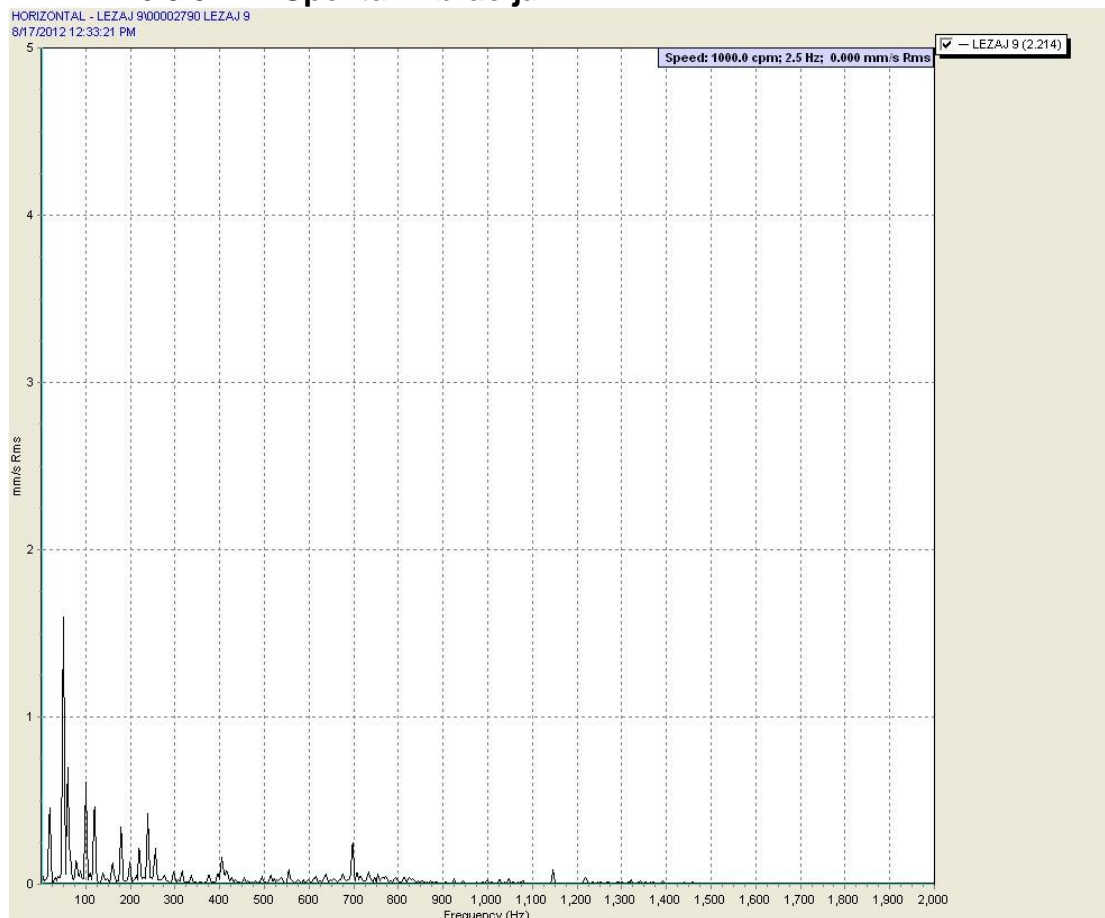


Slika 6.39 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 8

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 5.7$

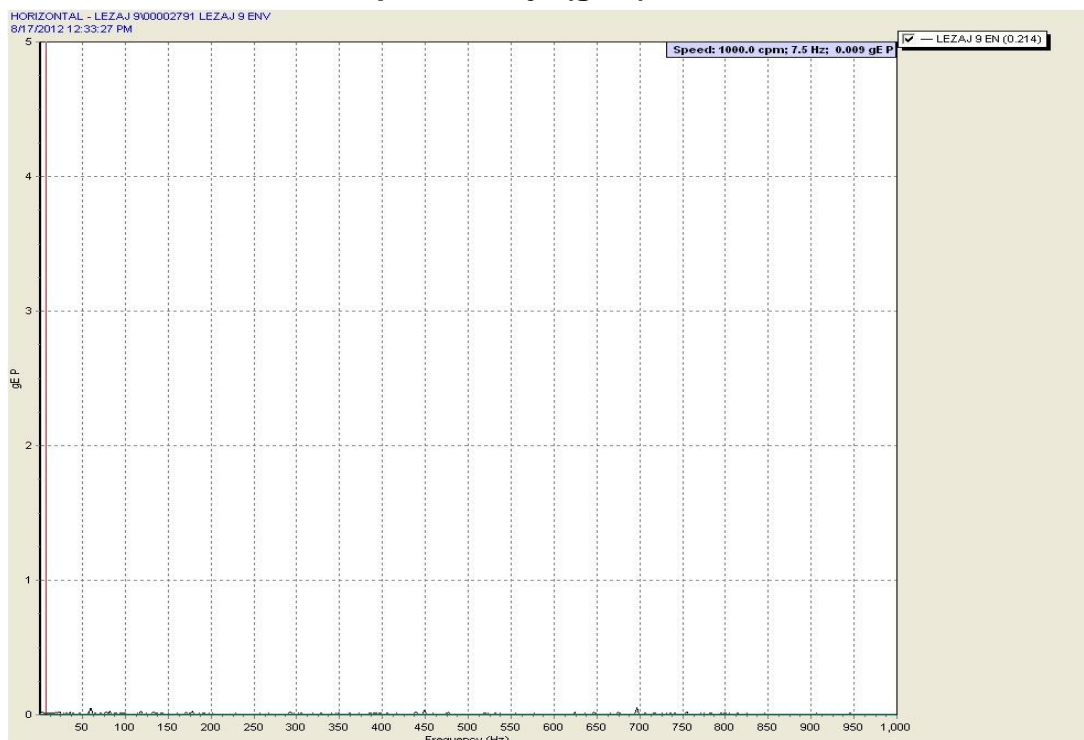
6.5.9 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 9

6.5.9.1 Spektar vibracija



Slika 6.40 – Spektar vibracija na ležaju broj 9

6.5.9.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

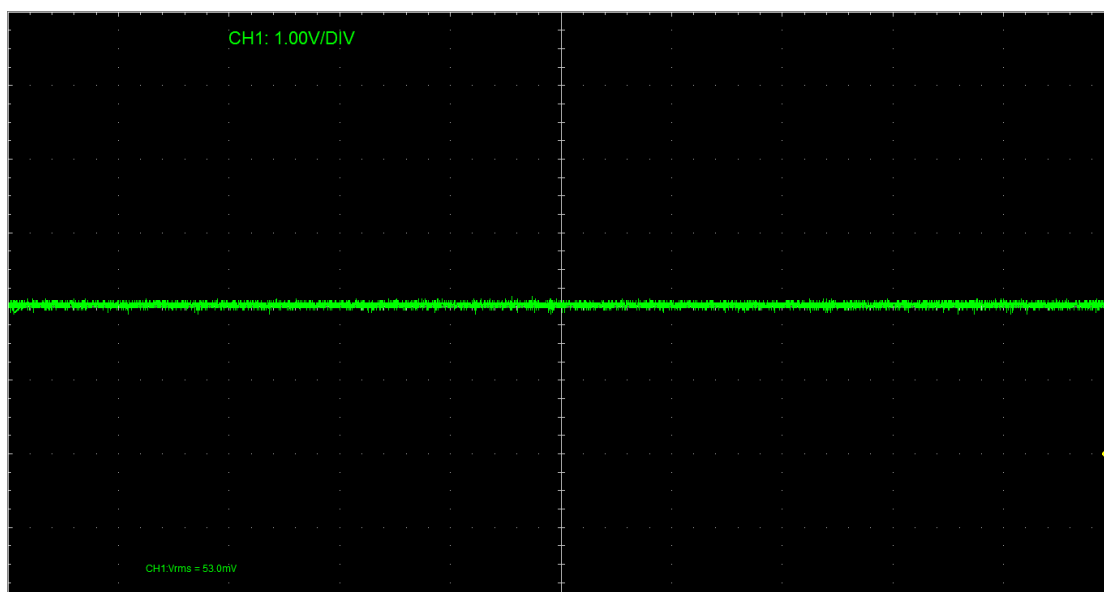


Slika 6.41 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 9

6.5.9.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=14$ dB

6.5.9.4 Ultrazvučna detekcija

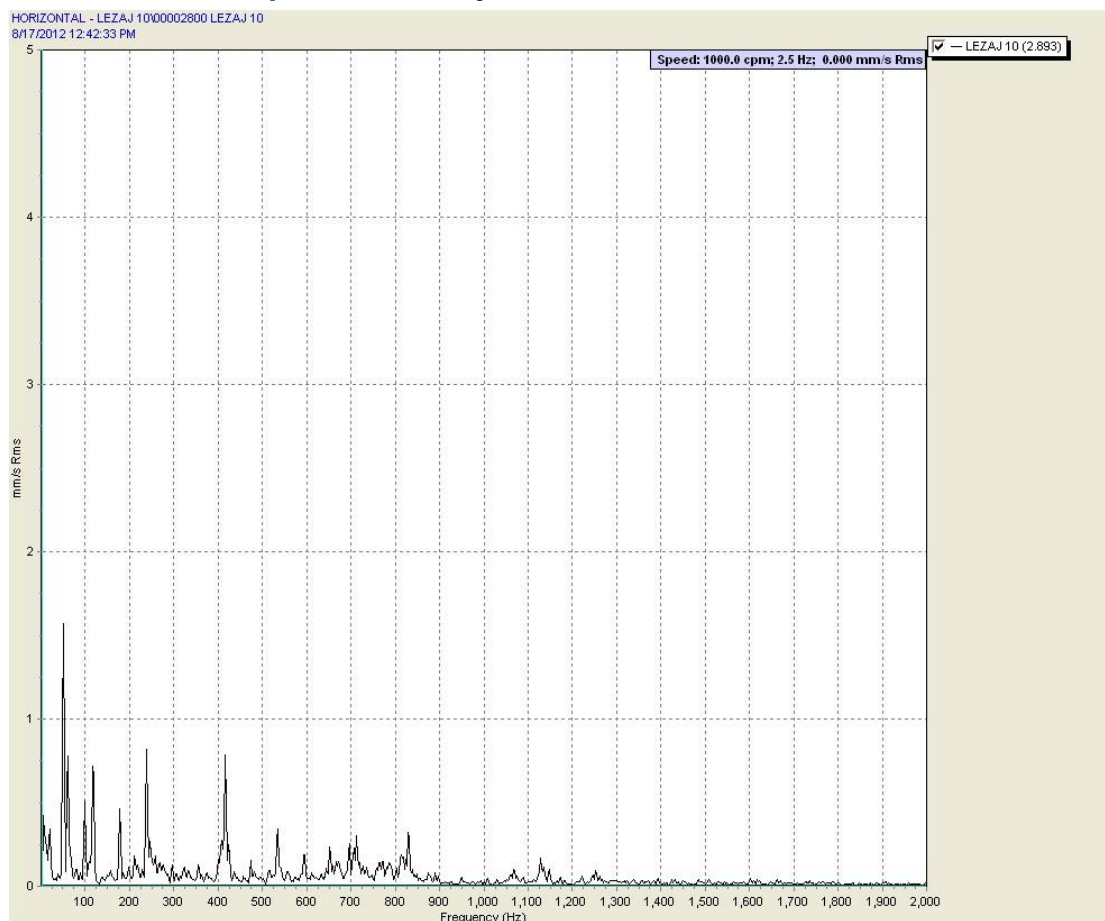


Slika 6.42 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 9

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 4.5$

6.5.10 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 10

6.5.10.1 Spektar vibracija



Slika 6.43 – Spektar vibracija na ležaju broj 10

6.5.10.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

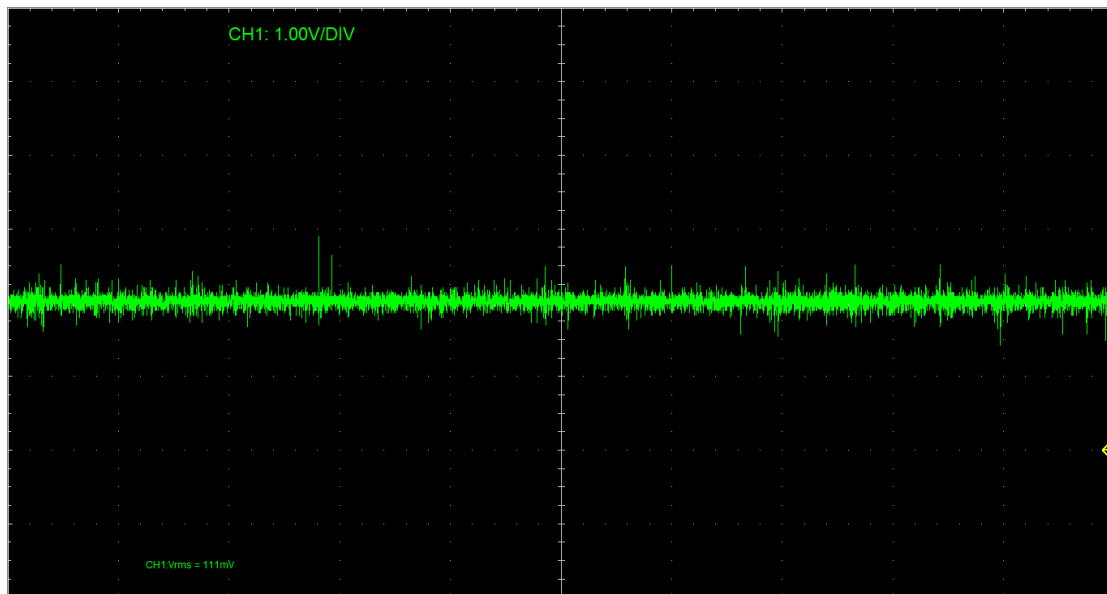


Slika 6.44 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 10

6.5.10.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=28$ dB

6.5.10.4 Ultrazvučna detekcija

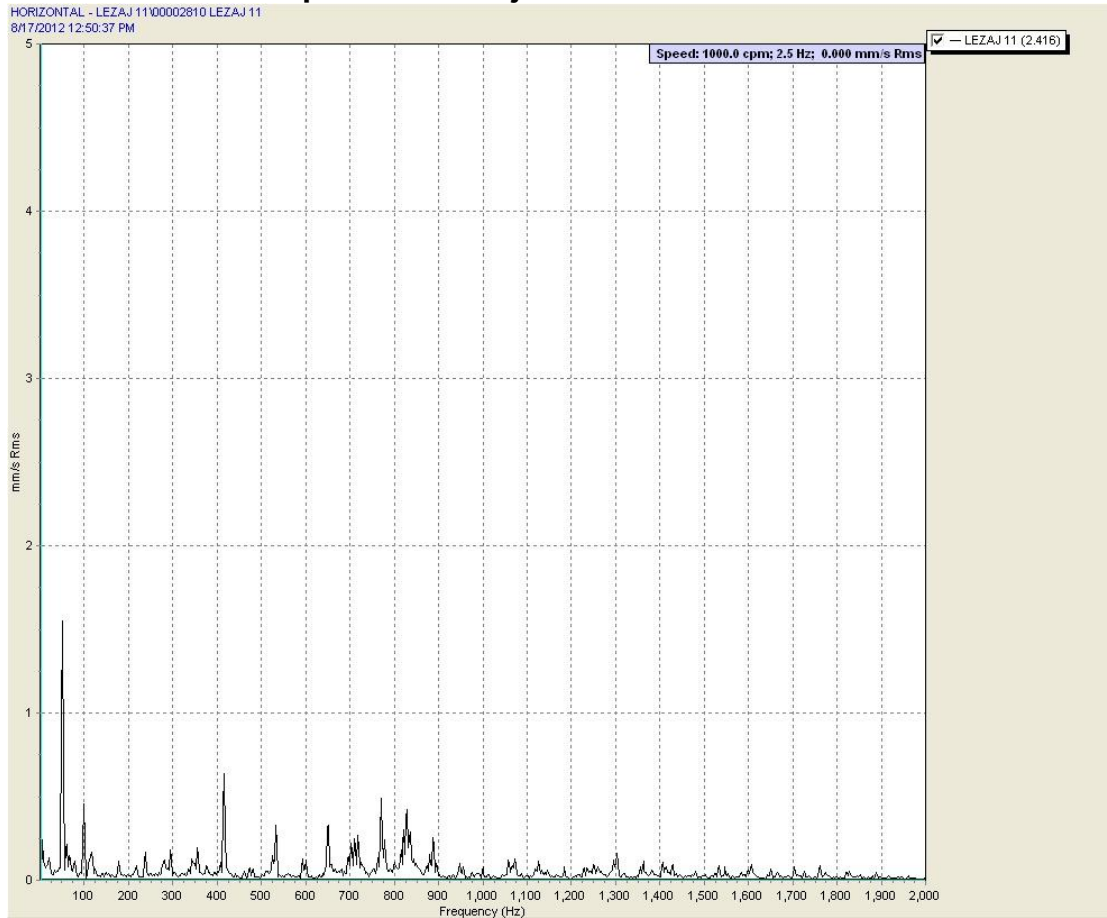


Slika 6.45 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 10

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 10.9$

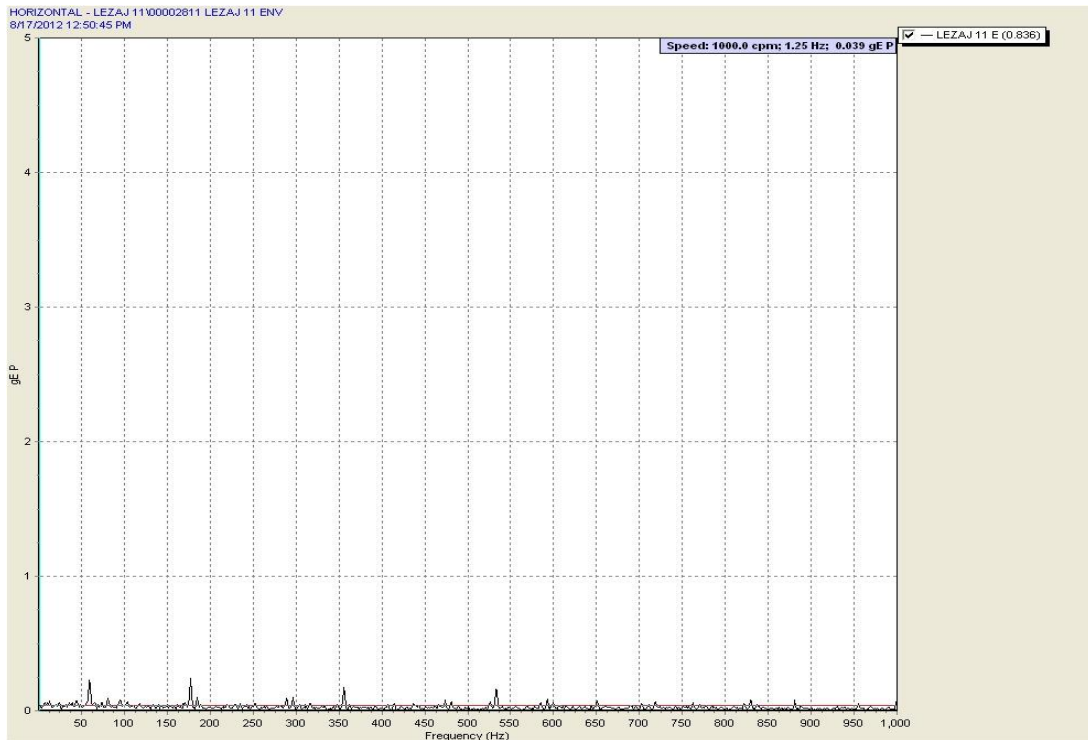
6.5.11 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 11

6.5.11.1 Spektar vibracija



Slika 6.46 – Spektar vibracija na ležaju broj 11

6.5.11.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

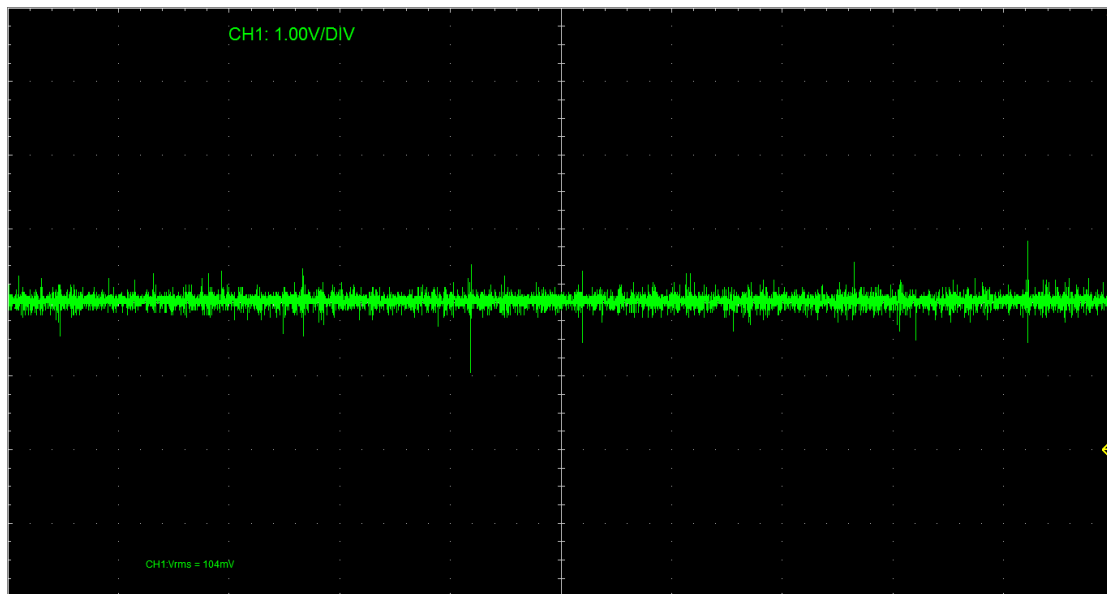


Slika 6.47 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 11

6.5.11.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=25$ dB

6.5.11.4 Ultrazvučna detekcija

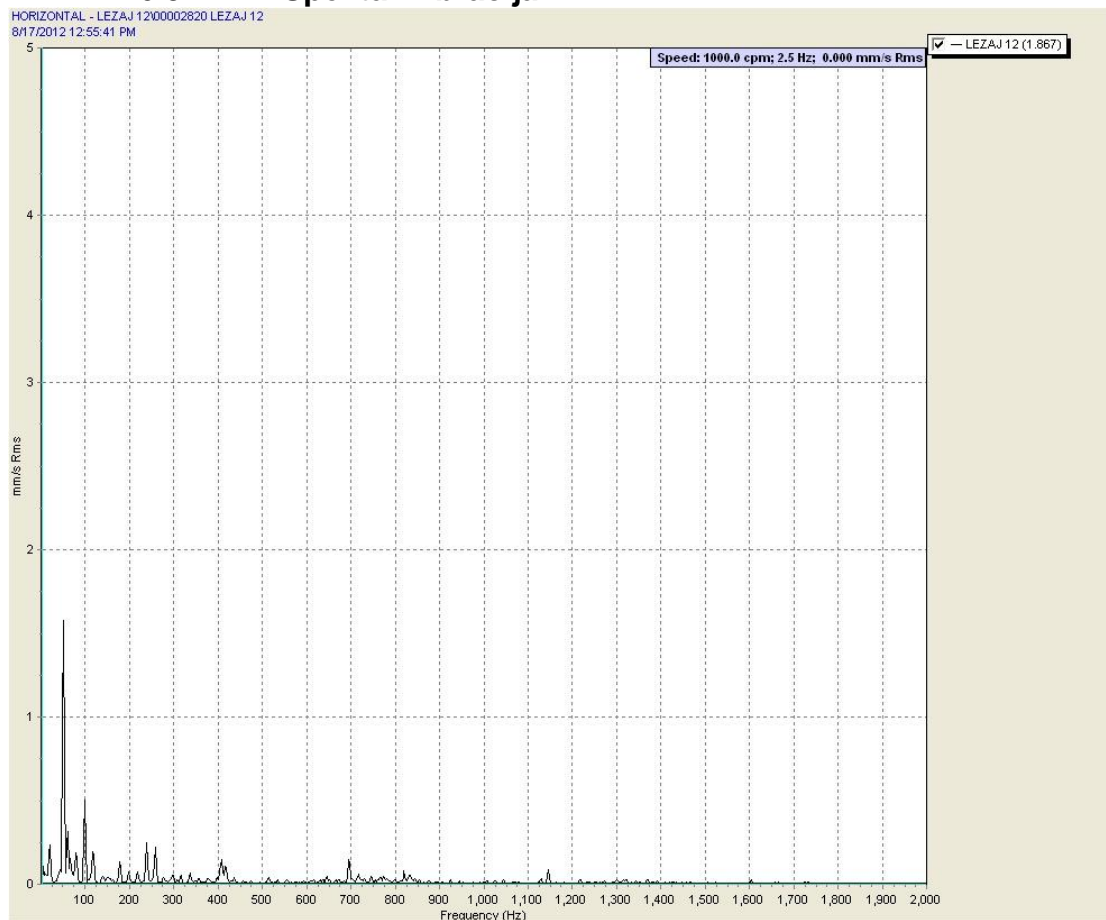


Slika 6.48 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 11

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 10.3$

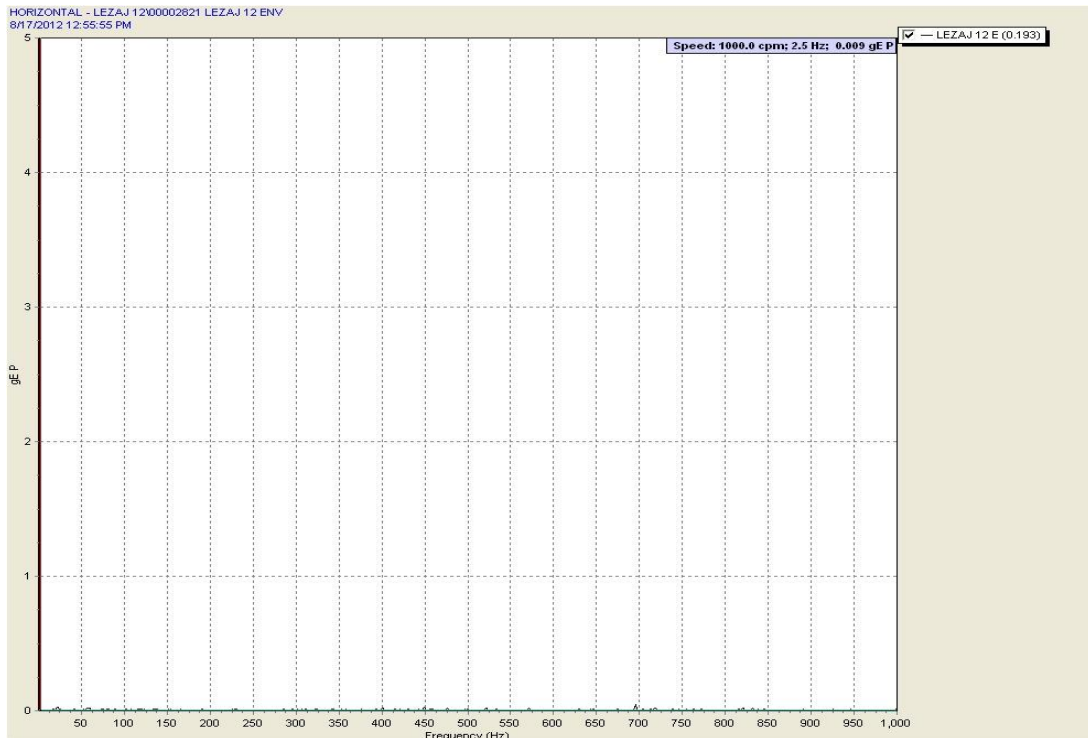
6.5.12 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 12

6.5.12.1 Spektar vibracija



Slika 6.49 – Spektar vibracija na ležaju broj 12

6.5.12.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

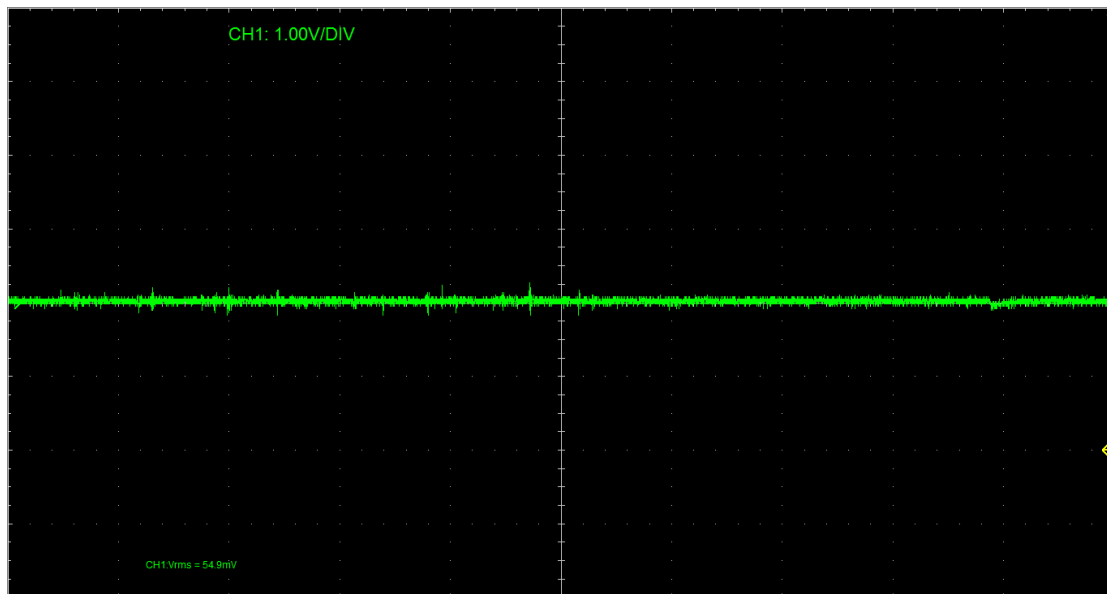


Slika 6.50 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 12

6.5.12.3 1SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=14$ dB

6.5.12.4 Ultrazvučna detekcija

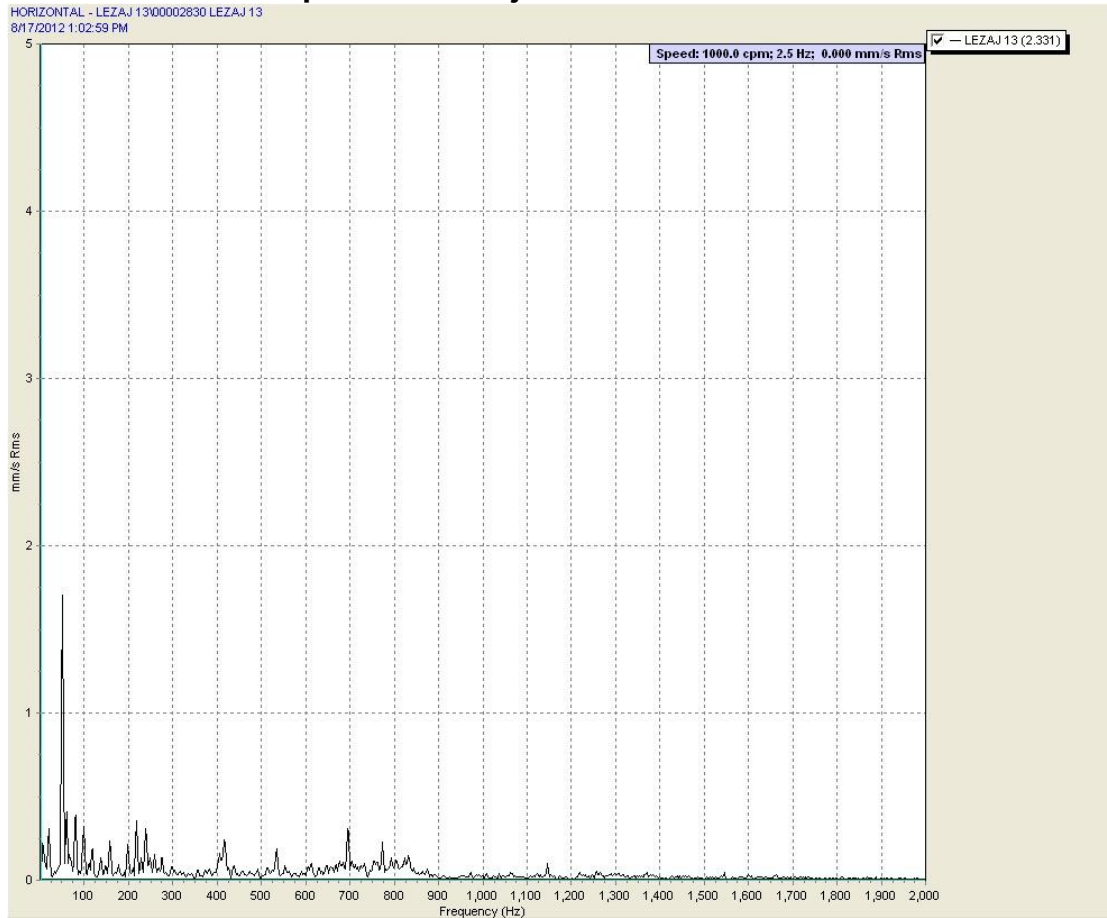


Slika 6.51 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 12

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 4.8$

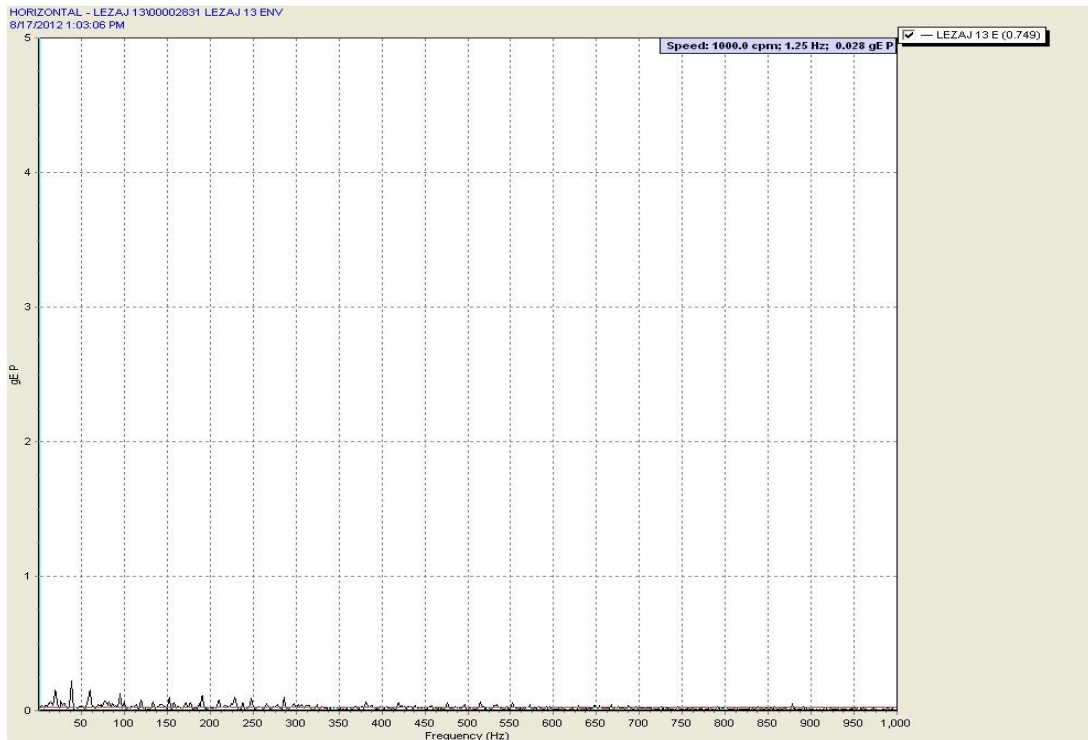
6.5.13 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 13

6.5.13.1 Spektar vibracija



Slika 6.52 – Spektar vibracija na ležaju broj 13

6.5.13.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

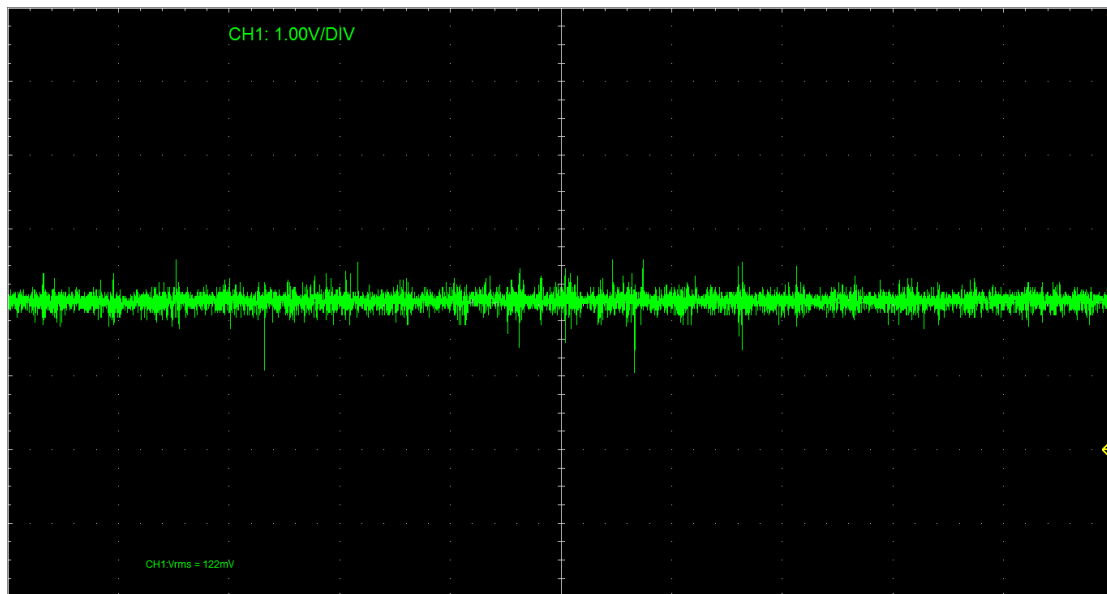


Slika 6.53 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 13

6.5.13.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=25$ dB

6.5.13.4 Ultrazvučna detekcija

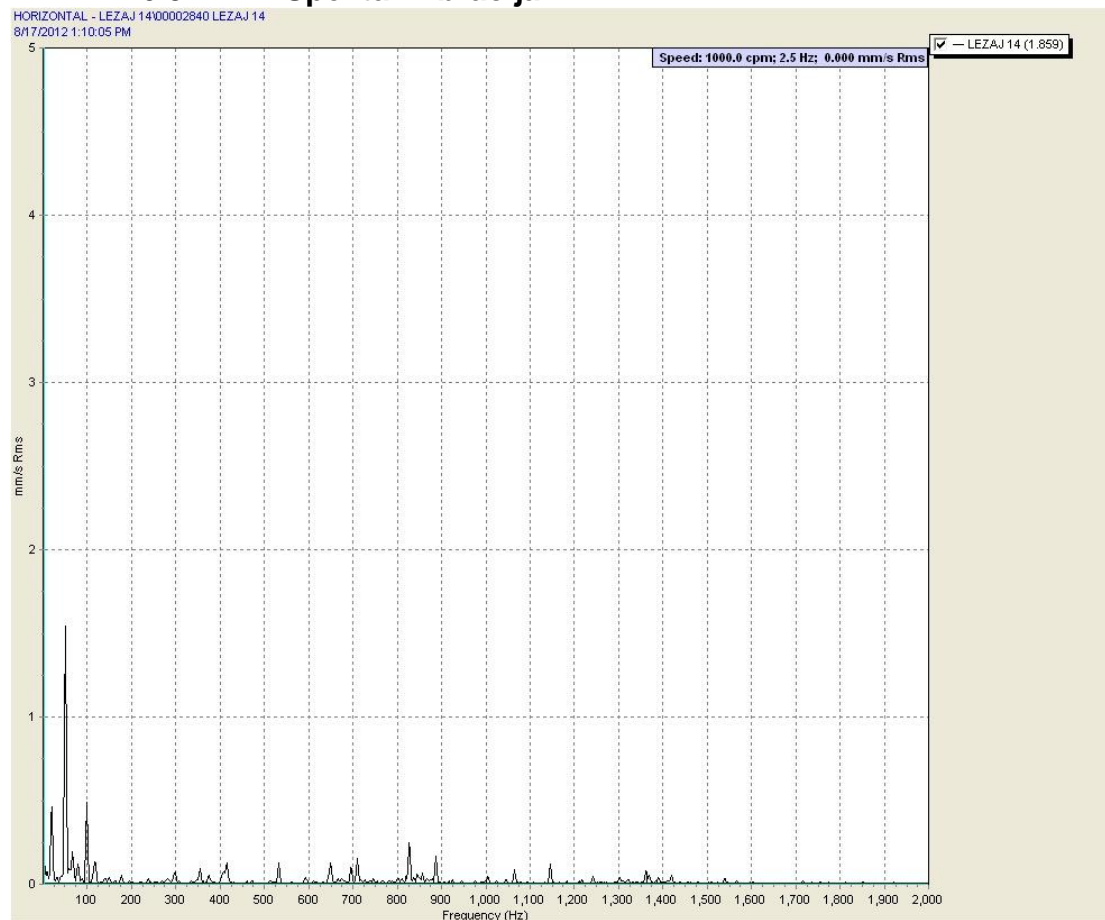


Slika 6.54 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 13

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 11.7$

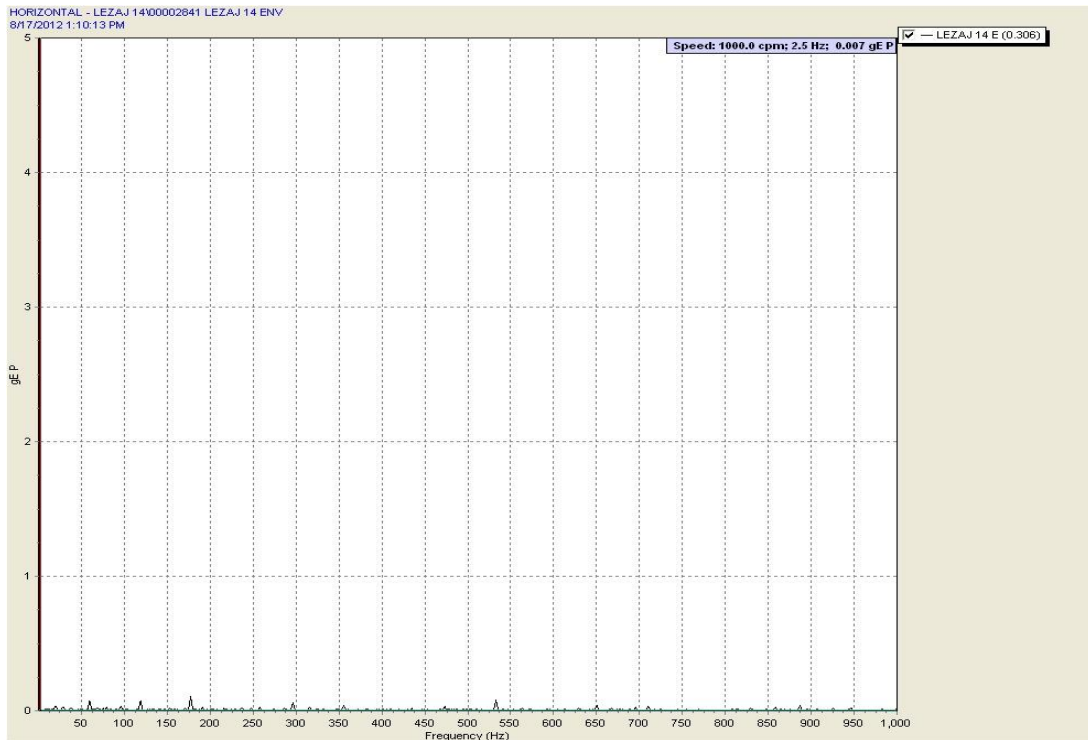
6.5.14 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 14

6.5.14.1 Spektar vibracija



Slika 6.55 – Spektar vibracija na ležaju broj 14

6.5.14.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

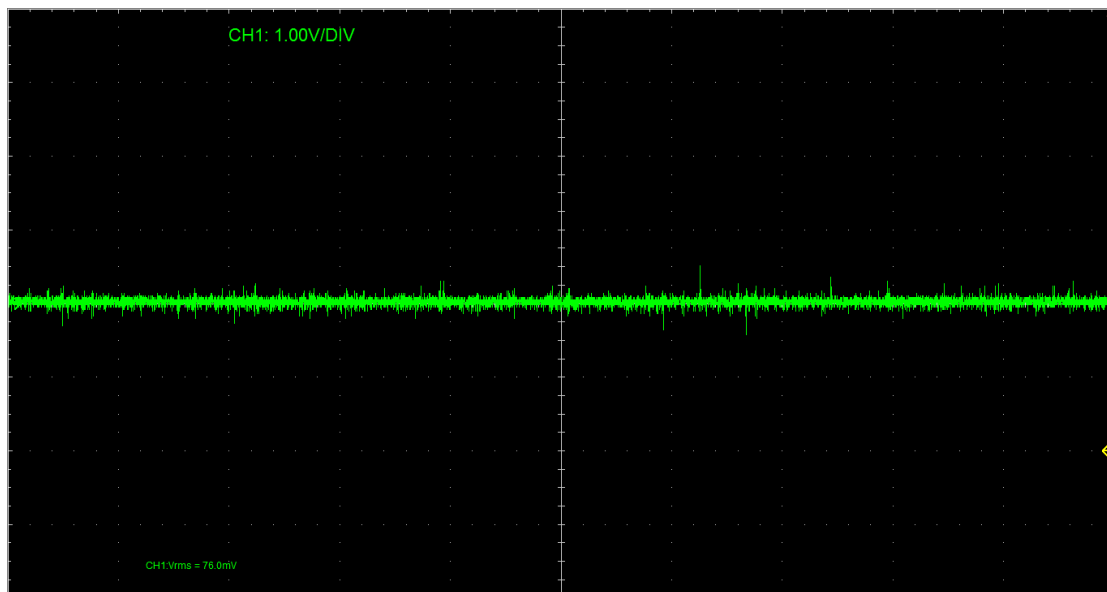


Slika 6.56 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 14

6.5.14.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=20$ dB

6.5.14.4 Ultrazvučna detekcija

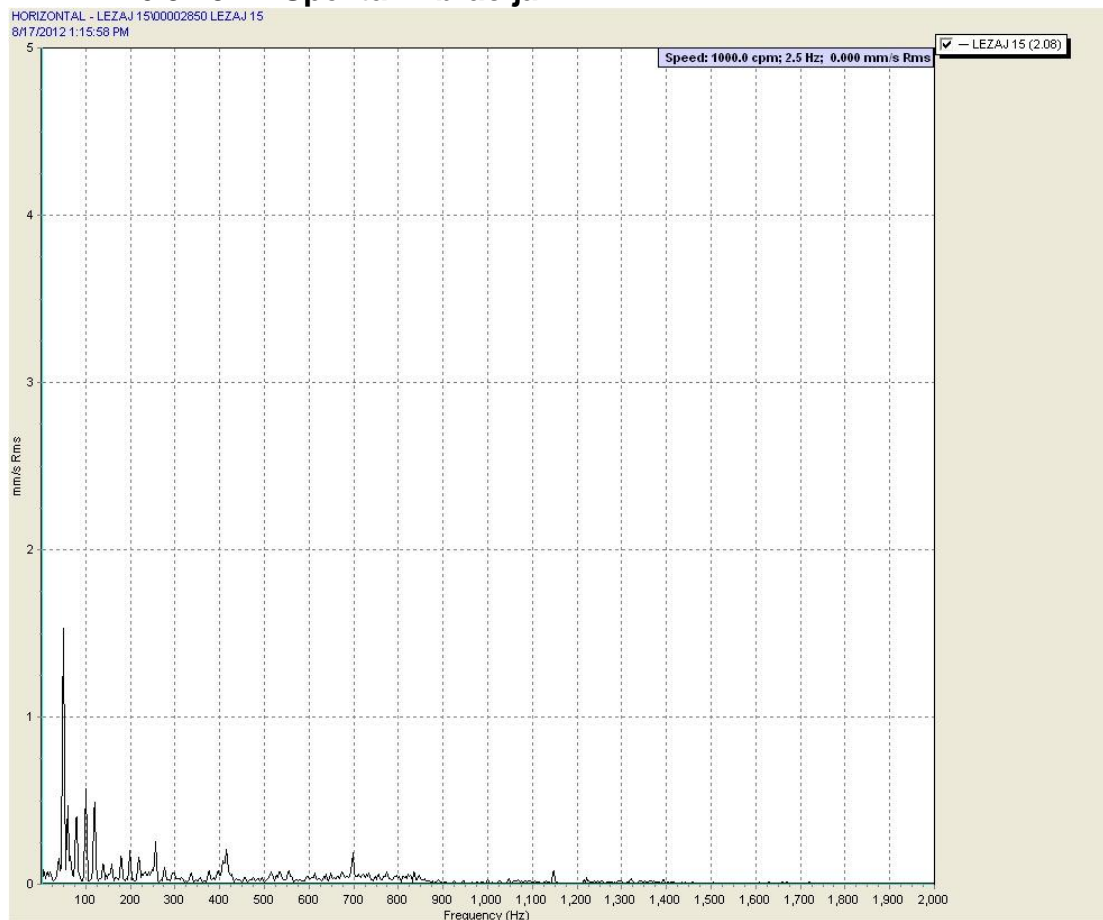


Slika 6.57 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 14

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 7.6$

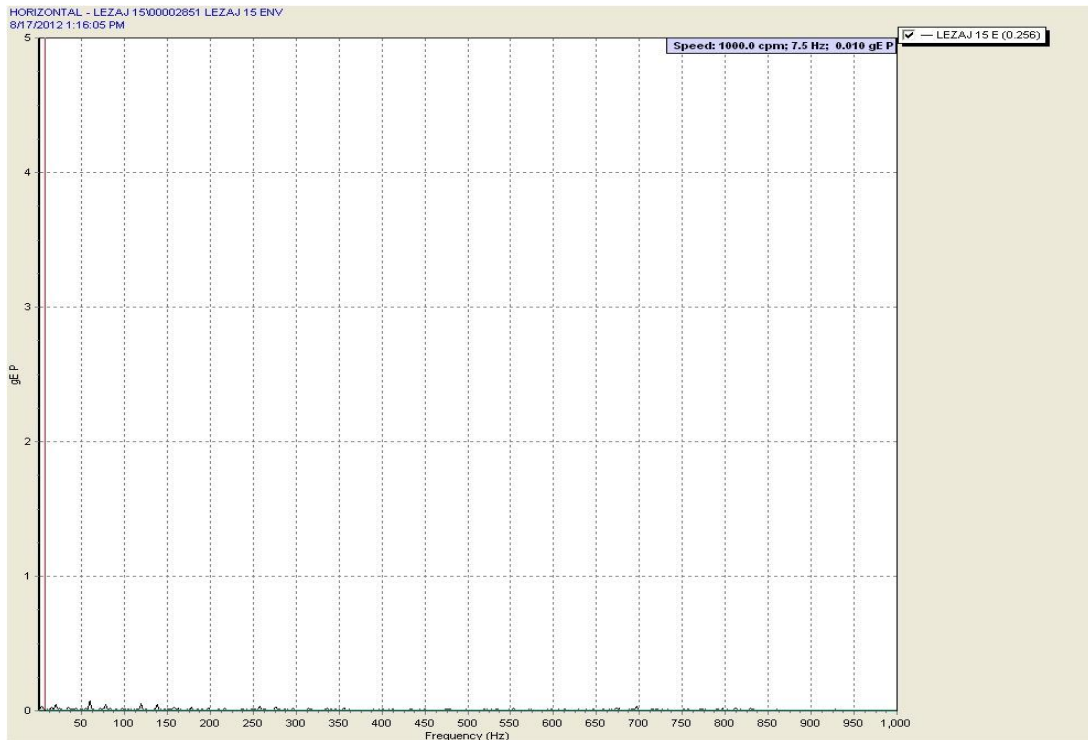
6.5.15 Rezultati ispitivanja na ležaju br. 15

6.5.15.1 Spektar vibracija



Slika 6.58 – Spektar vibracija na ležaju broj 15

6.5.15.2 Envelopa ubrzanja (g_{ENV})

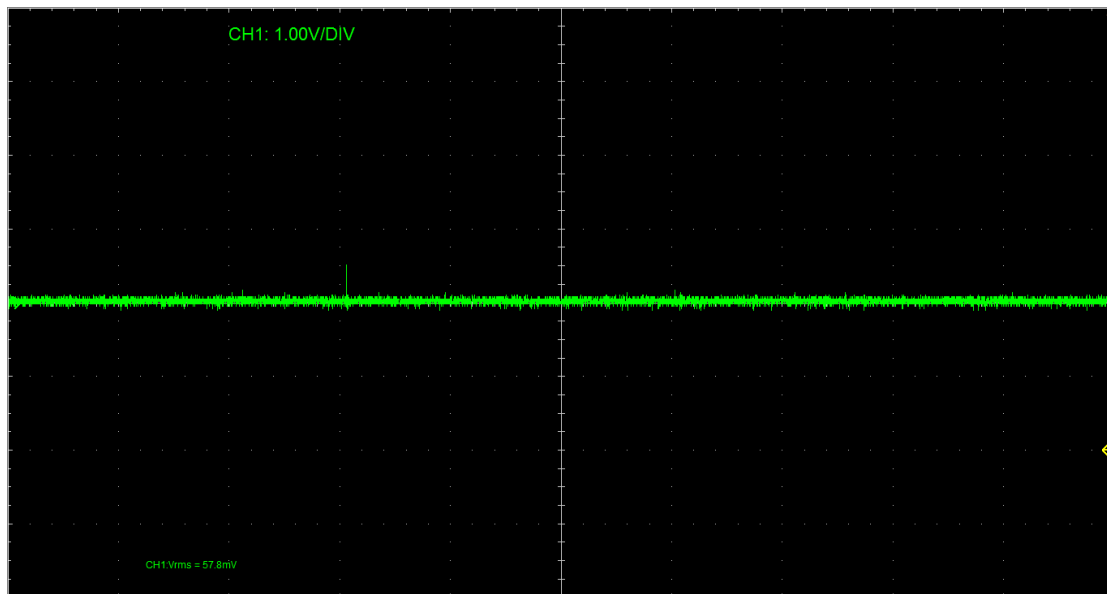


Slika 6.59 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 15

6.5.15.3 SPM metoda

Vrednost normalizovane emisije po SPM metodi iznosi: $dB_N=14$ dB

6.5.15.4 Ultrazvučna detekcija



Slika 6.60 – Ultrazvučna emisija na ležaju broj 15

Vrednost ultrazvučne emisije iznosi: $UZ_{em} = 5.2$

6.6 Analiza rezultata ispitivanja

U tabeli T 6.6 prikazani su zbirni rezultati sa ocenom stanja za četiri različite merne tehnike.

Broj ležaja	Merna metoda	Očitana vrednost	Kriterijum za ocenu stanja	Ocena stanja
1	Spektar vibracija	1.6 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	Envelopa ubrzanja	0.6 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	12 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	UZ _{em}	5.4	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
2	Spektar vibracija	7.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	Envelopa ubrzanja	12 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	SPM	60 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	UZ _{em}	30	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Neprihvatljivo

3	Spektar vibracija	5.6 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	Envelope ubrzanja	5.0 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	SPM	35 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	UZ _{em}	17.7	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće/ neprihvatljivo
4	Spektar vibracija	2.2 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	1.2 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	SPM	22 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	7.2	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro/ zadovoljavajuće
5	Spektar vibracija	1.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	0.5 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro

	SPM	27 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	8.1	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
6	Spektar vibracija	1.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	0.6 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	10 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	UZ _{em}	5.7	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
7	Spektar vibracija	2.6 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	0.7 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	20 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro

	UZ _{em}	6.2	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
8	Spektar vibracija	2.2 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	1.6 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	SPM	22 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	5.7	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
9	Spektar vibracija	2.2 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	0.5 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	14 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	UZ _{em}	4.5	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
10	Spektar vibracija	2.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo	Uslovno prihvatljivo

			>4.5 mm/s – neprihvatljivo	
	Envelopa ubrzanja	4.3 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Neprihvatljivo
	SPM	28 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	10.9	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
11	Spektar vibracija	2.4 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelopa ubrzanja	2 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	SPM	25 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	10.3	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
12	Spektar vibracija	1.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	Envelopa ubrzanja	0.6 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro

	SPM	14 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	UZ _{em}	4.8	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro
13	Spektar vibracija	2.3 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo
	Envelope ubrzanja	2.5 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Nezadovoljavajuće
	SPM	25 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
	UZ _{em}	11.7	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Zadovoljavajuće
14	Spektar vibracija	1.9 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	Envelope ubrzanja	0.8 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	20 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	UZ _{em}	7.6	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro/ zadovoljavajuće
15	Spektar vibracija	2.1 mm/s	< 0.7 mm/s – nove mašine 0.7÷1.8 mm/s – dobro 1.8÷4.5 – uslovno prihvatljivo >4.5 mm/s – neprihvatljivo	Uslovno prihvatljivo

	Envelope a ubrzanja	0.8 g _{ENV}	< 0.75 mm/s – dobro 0.75÷2 mm/s – zadovoljavajuće 2÷4 – nezadovoljavajuće >4 mm/s – neprihvatljivo	Dobro
	SPM	14 dB	0÷20 – dobro 20÷35 – zadovoljavajuće 35÷60 – neprihvatljivo	Dobro
	BC	5.2	0÷7.5 – dobro 7.5÷18 – zadovoljavajuće >18 – neprihvatljivo	Dobro

T 6.6 – Analiza rezultata ispitivanja

7. ZAKLJUČAK

U doktorskoj disertaciji pod nazivom „*Dijagnostika kotrljajnih ležajeva u ultrazvučnom domenu*“ postavljena je originalna metodologija detekcije oštećenja kotrljajnih ležajeva u ultrazvučnom domenu. Razvijen je primenljiv model i prototipsko rešenje elektronskog bloka za kondicioniranje izvornih signala. Formulacija kriterijuma kvaliteta izvedena je na jednostavan način što govori o suštinskom sagledavanju i diferenciranju disipirane energije usled nastalog oštećenja, kako u ranoj tako i u odmakloj pojavnjoj fazi. Sve ovo govori o aktuelnosti i primenljivosti rezultata disertacije sa aspekta realnih industrijskih potreba.

Na osnovu jasno formulisane metode može se uraditi komercijalna aplikacija i implementirati u dijagnostičku opremu za vibrodijagnostiku i detekciju ležajeva. Takođe moguće je napraviti tehničko rešenje namenskog tipa koje će biti razumljivo za korisnike sa elementarnim tehničkim znanjem.

Glavne aktivnosti u toku razvoja metode bile su izvođenje laboratorijskih ispitivanja kotrljajnih ležajeva različitog stepena oštećenja, kao i ispitivanja u realnim uslovima, korišćenjem digitalnog zapisa vibro-akustičkog spektra. Laboratorijska ispitivanja su obuhvatila ispitivanje ležajeva u različitim režimima rada, pri čemu je rađen digitalni zapis emitovanog akustičkog signala. Signal je analiziran u vremenskom i frekventnom domenu i pronađen je optimalni frekventni raspon koji u potpunosti odslikava stanje kotrljajnog ležaja. Zahvaljujući paralelnim merenjima sa odgovarajućom opremom svetskih proizvođača, mogla je da se izvrši validna komparacija i da se podese neophodni parametri za harmonizovanu evaluaciju stanja ležaja.

Tokom istraživanja primenjene su savremene hardverske strukture i savremeni softverski paketi, kao referentna platforma, a paralelno je razvijena i inovativna metoda i sistem za određivanje veka trajanja kotrljajnih ležajeva koja je zasnovana na korišćenju savremenih tehnologija.

Ostvareni naučni doprinos, nastao kao rezultat istraživanja u okviru doktorske disertacije ogleda se kroz smanjenje direktnih i indirektnih troškova održavanja industrijskih sistema i povećanja efikasnosti, što se ostvaruje kroz:

- Jednostavno lociranje problema, zahvaljujući visokoj usmerenosti ultrazvučnih talasa.
- Diferencirano prepoznavanje uzroka oštećenja
- Omogućena je rana detekcija i rano upozorenje
- Metoda ispitivanja je nedestruktivna, ne postoje nepovoljni uticaji na komponente tokom njene primene
- Procenu preostalih resursa ležaja
- Plansku zamenu kotrljajnih ležajeva
- Sprečavanju havarija usled istrošenosti ležajeva
- Otvaranje mogućnosti ulazne kontrole kvaliteta ležajeva

Istraživanja, naučni postupci i dobijeni rezultati mogu se uobličiti u komercijalnu, industrijski primenjivu metodu za određivanje trenutnog stanja i veka trajanja kotrljajnih ležajeva

Trenutno na svetskom tržištu postoje metode i komercijalni programski paketi koji svojim performansama pokrivaju i ovaj segment, ali su zbog opštosti sveobuhvatnosti i visoko postavljenih zahteva primene potpuno nedostupni domaćem tržištu.

Razvojem nove metode detekcije oštećenja kotrljajnih ležajeva stvaraju se uslovi za precizniju procenu stanja ležaja ultrazvučnom dijagnostikom. Time se unapređuje i pojednostavljuje tehnologija održavanja rotacione opreme, što smanjuje postojeće troškove usled zastoja i omogućuje pravovremenu intervenciju. Time se ujedno i povećava pouzdanost rada ključnih energetskih sistema termo-elektrana, toplana, vodovodne infrastrukture i drugih energetskih postrojenja u rafinerijama i procesnoj industriji.

Razvijena metoda otvara nove mogućnosti za kreiranje pratećeg softverskog rešenja koje bi bilo konkurentno postojećim svetskim paketima za dijagnostiku, a po ceni znatno pristupačnijoj domaćem tržištu.

Doktorska disertacija predstavlja savremen i značajan naučni doprinos kojim je omogućeno praćenje stanja kotrljajnih ležajeva na rotacionim mašinama, brza i efikasna procena stanja i otkrivanje ranih oštećenja čime se postiže optimalno iskorišćenje kapaciteta svakog ležaja i produžava radni vek mašine, uz adekvatno smanjenje materijalnih troškova.

8. LITERATURA

1. **Rolling Bearing Analysis**, *Tedric A. Harris*, John Wiley & Sons, INC., 4th edition 2001
2. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**, Bernard J. Hamrock, Steven R. Schmid, BoO. Jacobson, Marcel Dekker INC, Second Edition 2004
3. **SKF Priručnik za održavanje kotrljajnih ležajeva**, SKF 1998
4. **Bearing failures and their causes**, SKF – Product information 401
5. **The Shock Pulse Method for Determining the Condition of Anti-Friction Bearing**, SPM TEC-101
6. **Acoustic Vibration Monitoring**, Lubrication Excellence 2003 Conference Proceedings, Allan Rienstra and James Hall - SDT North America
7. **Enveloping for Bearing Analysis**, Robert M. Jones, SKF Condition Monitoring, San Diego, California
8. **Acoustic Vibration Monitoring**, Allan Rienstra, James Hall, SDT North America
9. **An Introduction to Noise Measurement**, Stuart Courtney, January 2004, SKF Reliability Systems, San Diego, CA
10. **New Advances in Ultrasonic condition Monitoring**, Alan Bandes, UE Systems, Inc.
11. **Applying Acoustic Vibration Monitoring to Predictive Maintenance**, Allan Rienstra, James Hall, SDT North America
12. **Enveloping for Bearing Analysis**, Robert M. Jones, SKF Condition Monitoring, San Diego, CA
13. **Istraživanje nelinearne merne karakteristike rama izotropne krutosti**, prof. dr Aleksandar Veg, doktorska disertacija, Beograd 1992.

Biografija

Ime i Prezime: Goran Šiniković
Datum rođenja: 25.01.1973.
Mesto rođenja: Mostar, Bosna i Hercegovina
Porodično stanje: Oženjen, dvoje dece

Školovanje:

1979. – 1987. Osnovna škola u Konjicu, BiH
1987. – 1991. Matematička gimnazija u Konjicu, BiH
1991. – 1992. Studije na Mašinskom fakultetu u Sarajevu, BiH
1992. – 1993. Studije na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu
1993. – 1999. Studije na Mašinskom fakultetu u Beogradu
odsek Motorna vozila
26.01.1999. Odbranjen diplomski rad
04.05.2006. Odbranjen magistarski rad

Kretanje u poslu:

Od 1999. Mašinski fakultet u Beogradu,
Katedra za teoriju mašina i mehanizama

LISTA SIMBOLA

$s(t)$ – signal

T – period usrednjavanja

N – broj semplova za usrednjavanje

FFT – Brza Furijeova transformacija (*Fast Fourier Transform*)

STFT – Kratko-vremenska Furijeova transformacija (*Short-Time Fourier Transform*)

BPI – 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

B_d – prečnik kotrljajnog elementa

P_d – podeoni prečnik ležaja

β – ugao kontakta kuglice i staze kotrljanja (°)

Hz – Herc (frekvencija)

ω – Ugaona brzina [rad/s]

RMS – Srednji kvadratni koren

a – ubrzanje [m/s^2 , g]

v – brzina [m/s]

s – pomeraj [m/s]

$o - p$ – amplituda izražena od nulte vrednosti do maksimalne vrednosti

$p - p$ – amplituda izražena od minimalne do maksimalne vrednosti

LISTA SLIKA

Slika 2.1 – Evolucija kotrljajnih ležajeva

Slika 2.2 – Da Vinčijev koncept kotrljajnog ležaja

Slika 2.3 – Konstrikcija kotrljajnog ležaja

Slika 2.4 – Tipovi ležaja prema obliku kotrljajnih tela

Slika 2.5 – Radijalno opterećen ležaj

Slika 2.6 – Aksijalno opterećen ležaj

Slika 2.7 – Označavanje ležaja

Slika 3.1 – Faze oštećenja ležaja

Slika 3.2 – Radijalno jednosmerno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena, fiksiran spoljašni prsten

Slika 3.3 – Radijalno jednosmerno opterećenje, fiksiran unutrašnji prsten, rotacija spoljašnjeg prstena

Slika 3.4 – Radijalno opterećenje rotira u fazi sa unutr. prstenom, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran

Slika 3.5 – Radijalno opterećenje rotira u fazi sa spolj. prstenom, fiksiran unutrašnjeg prstena, rotacija spoljašni prsten

Slika 3.6 – Aksijalno jednosmerno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena ili spoljašnjeg prstena

Slika 3.7 – Kombinacija jednosmernog radijalnog i aksijalnog opterećenja, rotacija unutrašnjeg prstena, fiksiran spoljašni prsten

Slika 2.8 – Aksijalno opterećenje

Slika 3.9 – Radijalno jednosmerno opterećenje+neuravnoteženost, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten proklizava

Slika 3.10 – Uske tolerancije-veliki preklop, radijalno opterećenje, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran

Slika 3.11 – Ovalno kućište, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran

Slika 3.12 – Nesnost spoljašnjeg preštena, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran

Slika 3.13 – Nesaosnost unutrašnjeg prstena, rotacija unutrašnjeg prstena, spoljašni prsten fiksiran

Slika 3.14 – Prsten vratila i prsten kućišta ekscentrično pomereni, prsten vratila pokretan

Slika 3.15 – Prsten kućišta zakošen, prsten vratila pokretan

Slika 3.16 – Habanje ležaja izazvano abrazivnim česticama

Slika 3.17 – Habanje ležaja usled neadekvatnog podmazivanja

Slika 3.18 – Oštećenje kugličnog ležaja usled povećanih vibracijama

Slika 3.19 – Oštećenje valjkastog ležaja izazvano povećanim vibracijama

Slika 3.20 – Oštećenja ležaja izazvana povećanim vibracijama

Slika 3.21 – Oštećenje ležaja usled nepravilne ugradnje

Slika 3.22 – Brazde na aksijalnom ležaju

Slika 3.23 – Oštećenje ležaja usled prisustva spoljnih čestica

Slika 3.24 – Oštećenje ležaja – razmazivanje

Slika 3.25 – Oštećenje valjkastog ležaja usled dejstva velikih aksijalnih sila i nekvalitetnog podmazivanja

Slika 3.26 – Oštećenje spoljnih površina ležaja

Slika 3.27 – Površinsko razaranje ležaja

Slika 3.28 – Dubinska korozija ležaja

Slika 3.29 –Korozija ležaja usled trenja (Fretting)

Slika 3.30 – Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje kroz ležaj

Slika 3.31 – Oštećenja ležaja uzrokovana prolaskom struje velike jačine

Slika 3.32 – Oštećenje kaveza

Slika 4.1 – Karakterističan spektar vibracija

Slika 4.2 – Geometrija kugličnog ležaja

Slika 4.3 – Kućište ležaja sa senzorom

Slika 4.4 – Vremenski signal

Slika 4.5 – Frekventni signal

Slika 4.6 a – Pojedinačni impuls

Slika 4.6 b – Serija pojedinačnih impulsa

Slika 4.6 c – Tipična prelazna funkcija

Slika 4.6 d – Vibracijski signal niske frekvencije

Slika 4.6 e – Vibracijski signal oštećenog ležaja

Slika 4.7 – Envelopa ubrzanja

Slika 4.8 – SEE (Spectral Emitted Energy)

Slika 4.9 – Udar kuglice u šipku - impulsni udar

Slika 4.10 – Vibracije šipke nakon impulsnog udara

Slika 4.11 – SPM metodologija detekcija oštećenja ležaja

Slika 5.1 – Prostiranje zvučnog talasa

Slika 5.2 – Zvučni talas

Slika 5.3 – Spektar vibracija na kućištu ležaja

Slika 5.4 - Ulazni i izlazni napon kola za uzorkovanje i držanje

Slika 5.5 - Rekonstrukcija signala u vremenu

Slika 5.6 - „Aliasing“ akviziranog signala

Slika 5.7 – Karakteristike piezoelektričnih materijala

Slika 5.8a – Temperaturna karakteristika piezo-senzora

Slika 5.8b – Frekventna karakteristika piezo-senzora

Slika 5.9 – Piezoelektrični akustički senzor

Slika 5.10 – Blok dijagrama elektronskog bloka

Slika 5.11 – Izgled analognog elektronskog bloka

Slika 5.12 – Digitalni osciloskop

Slika 6.1 – Crtež ispitnog stola

Slika 6.2 – Trodimenzionalni prikaz ispitnog stola

Slika 6.3 – Izgled ispitnog stola

Slika 6.4 – Mogućnost pomeranja kliznog ležišta

Slika 6.5 – Poprečni presek kliznog ležišta

Slika 6.6 – Konstrukcija kućišta ležaja

Slika 6.7 – Veza ležaja i osovine

Slika 6.8 – Numeracija ležajeva

Slika 6.9 – Microlog CMVA 60, SKF (Vibroanalizator, data kolektor)

Slika 6.10 – SPM 43A

Slika 6.11 – Podešavanje uređaja SPM 43A

Slika 6.12 – Ocena stanja ležaja pomoću SPM 43A

Slika 6.13 – Granice za procenu kvaliteta prema ISO10816

Slika 6.14 - Blok dijagram envelope ubrzanja

Slika 6.15 – Akustička emisija ležaja po SPM metodi

Slika 6.16 – Spektar vibracija na ležaju broj 1

Slika 6.17 – Envelope ubrzanja na ležaju broj 1

Slika 6.18 – Akustička emisija na ležaju broj 1

Slika 6.19 – Spektar vibracija na ležaju broj 2

Slika 6.20 – Envelope ubrzanja na ležaju broj 2

Slika 6.21 – Akustička emisija na ležaju broj 2

Slika 6.22 – Spektar vibracija na ležaju broj 3

Slika 6.23 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 3

Slika 6.24 – Akustička emisija na ležaju broj 3

Slika 6.25 – Spektar vibracija na ležaju broj 4

Slika 6.26 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 4

Slika 6.27 – Akustička emisija na ležaju broj 4

Slika 6.28 – Spektar vibracija na ležaju broj 5

Slika 6.29 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 5

Slika 6.30 – Akustička emisija na ležaju broj 5

Slika 6.31 – Spektar vibracija na ležaju broj 6

Slika 6.32 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 6

Slika 6.33 – Akustička emisija na ležaju broj 6

Slika 6.34 – Spektar vibracija na ležaju broj 7

Slika 6.35 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 7

Slika 6.36 – Akustička emisija na ležaju broj 7

Slika 6.37 – Spektar vibracija na ležaju broj 8

Slika 6.38 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 8

Slika 6.39 – Akustička emisija na ležaju broj 8

Slika 6.40 – Spektar vibracija na ležaju broj 9

Slika 6.41 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 9

Slika 6.42 – Akustička emisija na ležaju broj 9

Slika 6.43 – Spektar vibracija na ležaju broj 10

Slika 6.44 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 10

Slika 6.45 – Akustička emisija na ležaju broj 10

Slika 6.46 – Spektar vibracija na ležaju broj 11

Slika 6.47 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 11

Slika 6.48 – Akustička emisija na ležaju broj 11

Slika 6.49 – Spektar vibracija na ležaju broj 12

Slika 6.50 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 12

Slika 6.51 – Akustička emisija na ležaju broj 12

Slika 6.52 – Spektar vibracija na ležaju broj 13

Slika 6.53 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 13

Slika 6.54 – Akustička emisija na ležaju broj 13

Slika 6.55 – Spektar vibracija na ležaju broj 14

Slika 6.56 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 14

Slika 6.57 – Akustička emisija na ležaju broj 14

Slika 6.58 – Spektar vibracija na ležaju broj 15

Slika 6.59 – Envelopa ubrzanja na ležaju broj 15

Slika 6.60 – Akustička emisija na ležaju broj 15

LISTA TABELA

Tabela 6.1 – Izbor filtera pri merenju Envelope ubrzanja

Tabela 6.2 – Kriterijumi za procenu stanja merenjem Envelope ubrzanja

Tabela 6.3 – Granice za ocenu stanja ležaja merenjem Envelope ubrzanja

Tabela 6.4 – Granice za ocenu stanja ležaja SPM metodom

Tabela 6.5 – Granice za ocenu stanja ležaja merenjem ultrazvučne emisije

Tabela 6.6 – Analiza rezultata ispitivanja

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани: мр Горан Шиниковић, дипл.маш.инж.

број уписа _____

Изјављујем


да је докторска дисертација под насловом

ДИЈАГНОСТИКА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА У УЛТРА ЗВУЧНОМ ДОМЕНУ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 23.11.2012.



Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: мр Горан Шиниковић, дипл.маш.инж.

Број уписа _____

Студијски програм _____

Наслов рада: **ДИЈАГНОСТИКА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА У УЛТРА ЗВУЧНОМ
ДОМЕНУ**

Ментор: др Александар Вег, редовни професор

Потписани мр Горан Шиниковић, дипл.маш.инж.

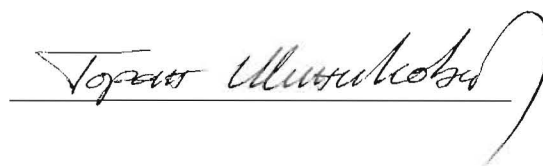
изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 23.11.2012.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

ДИЈАГНОСТИКА КОТРЉАЈНИХ ЛЕЖАЈА У УЛТРА ЗВУЧНОМ ДОМЕНУ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 23.11.2012.

