

Utjecaj trošenja na vibracije i buku kugličnih ležaja

Štefan, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:715602>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Štefan

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Marko Štefan

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku, na uloženom vremenu, pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Veliko hvala asistentu Josipu Cerovečkom koji je pomagao u svim aspektima eksperimentalnog dijela kako bi kvalitetno i u što kraćem roku dobili rezultate.

Posebno hvala mojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studija.

Marko Štefan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Štefan** JMBAG: 0035228629

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj trošenja na vibracije i buku kugličnih ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The effect of wear on the vibrations and noise of ball bearings**

Opis zadatka:

Kuglični ležajevi u radu su izloženi dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Praćenje stanja ležaja moguće je provesti periodički ponovljenim snimanjem vibracija, buke i zagrijavanja i usporedbom sa zapisima snimljenim na novom ležaju. Pojava mehaničkih oštećenja, trošenja i korozije uzrokuje promjene u vibracijama, buci i zagrijavanju ležaja. U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike, radne uvjete i mehanizme trošenja i korozije kugličnih ležajeva u pogonu transportne trake punionice piva te metode za mjerenje vibracija i intenziteta buke.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti snimanje i usporediti pojavu vibracija i buke na istovrsnim novim i istrošenim kugličnim ležajima pri različitim brzinama vrtnje te analizirati pojavu trošenja i korozije prstenova i kuglica ležaja. Na temelju rezultata ispitivanja procijeniti povezanost promjena u intenzitetu buke te amplitudi i ubrzanju vibracija sa stanjem istrošenih ležaja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

9. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

11. srpnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

15. – 19. srpnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. VALJNI LEŽAJEVI.....	3
2.1. Valjni ležajevi	3
2.2. Kuglični i valjkasti ležajevi.....	6
2.3. Igličasti ležajevi	7
2.4. Proračun radnog vijeka ležaja	9
2.5. Materijali za valjne ležajeve	11
3. ISPITIVANJE VIBRACIJA, BUKE I ZAGRIJAVANJA LEŽAJA	13
3.1. Izvori vibracija	13
3.2. Analiza vibracija	14
3.3. Senzori za mjerenje vibracija.....	16
3.4. Mjerenje temperature ležaja [10]	19
3.5. Mjerenje buke	20
4. STRATEGIJE I INDIKATORI NADZORA ZA ODRŽAVANJE LEŽAJEVA.....	22
4.1. Strategije održavanja.....	22
4.2. Indikatori nadzora	22
5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA	26
5.1. Plan pokusa	26
6. REZULTATI ISPITIVANJA	34
6.1. Izgled istrošenih površina ležaja	34
6.2. Ispitivanje vibracija ležajeva.....	38
6.3. Ispitivanje buke	42
6.4. Analiza zagrijavanja ležaja	45
6.5. Analiza istrošenih površina.....	47
6.6. Ispitivanje tvrdoće ležaja	50
6.7. Analiza mikrostrukture ležaja	51
7. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA.....	54

POPIS SLIKA

Slika 1. a) Klizni ležaj b) Valjni ležaj [2]	3
Slika 2. Trenje kotrljanja[4]	4
Slika 3. Tri glavne skupine valjnih ležajeva: a) kuglični ležaj b) valjkasti ležaj c) igličasti ležaj [3]	5
Slika 4. Vrste valjnih ležajeva [3]	5
Slika 5. Radijalni kuglični ležaj [3].....	7
Slika 6. Podjela igličastih ležajeva [5]	8
Slika 7. Ležaj bez unutrašnjeg prstena: a) kruti ležaj b) samoprilagodljivi ležaj [6].....	8
Slika 8. a) luskanje valjnog tijela b) umor površine i adhezijsko trošenje[1]	9
Slika 9. Cjeloviti postupak toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6 [8]	12
Slika 10. Vremenski dijagrami brzine vibracija ispravnog i neispravnog ležaja [10]	14
Slika 11. Prikaz harmonijskog gibanja jednostavnog vibracijskog sustava[19]	14
Slika 12. Pojavni oblici vibracija: a) harmonična, b) stohastička vibracija [19]	15
Slika 13. Periodična impulsna vibracija [19]	16
Slika 14. Naizmjenična vibracija impulsnog tipa [19].....	16
Slika 15. Glave senzora za mjerenje ubrzanja [12].....	17
Slika 16. Ovisnost intenziteta signala izmjenjenog akcelerometrom, sondom brzine i sondom pomaka o frekvenciji vibracija [13]	19
Slika 17. Mjerenje temperature ležajeva pomoću kontaktnog termometra [10]	20
Slika 18. Uređaj za mjerenje intenziteta buke [15]	21
Slika 19. zbor fizikalnih veličina koje treba mjeriti ovisno o prirodi traženih grešaka [19]....	23
Slika 20. Punilica CAN limenki proizvođača SIMONAZZI	28
Slika 21. Punilica CAN limenki proizvođača SIMONAZZI	28
Slika 22. Provedba ispitivanja	29
Slika 23. Uređaj za ispitivanje vibracija.....	30
Slika 24. Mikrofon za ispitivanje buke ležaja i senzor vibracija ležaja	30
Slika 25. Digitalni termometar UT320D.....	31
Slika 26. Laserski tahometar UT373	31
Slika 27. Izmjerena brzina vrtnje	32
Slika 28. Uređaj za ispitivanje tvrdoće.....	32
Slika 29. Izrezani uzorak B1 (FAG6301) pripremljen za ispitivanje mikrostrukture i analizu istrošenih površina.....	33
Slika 30. Analiza površine uzoraka primjenom svjetlosnog mikroskopa s kamerom	34
Slika 31. Srednja vrijednost akceleracije vibracija ležaja pri brzini vrtnje 945 o/min.....	38
Slika 32. Srednja vrijednost brzine vibracija pri brzini vrtnje ležaja 945 o/min.....	39
Slika 33. Srednja vrijednost pomaka vibracija ležaja pri brzini vrtnje 945 o/min.....	39
Slika 34. Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 945 o/min.....	40
Slika 35. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak A.....	42
Slika 36. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke: a) uzorak A1 b) uzorak A2	42
Slika 37. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak B	43
Slika 38. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke: a)uzorak B1 b) uzorak B2.....	43
Slika 39. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke za uzorak C	44
Slika 40. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak C1	44
Slika 41. Temperaturna sonda za mjerenje temperature ležaja	46
Slika 42. Promjena temperature ležaja usred ispitivanja.....	46
Slika 43. Uzorak C1 zaliven u polimernu masu.....	51
Slika 44. Metalografski mikroskop Olympus GX51.....	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste i opis valjnih ležajeva [3].....	6
Tablica 2. Kemijski sastav čelika EN DIN 100Cr6	11
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika EN DIN 100Cr6 u polaznom stanju prije strojne obrade	11
Tablica 4. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju SNR 4203A.....	26
Tablica 5. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju FAG 6301.....	26
Tablica 6. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju NSK 6302.....	27
Tablica 7. Oznake ispitnih uzoraka ležajeva.....	27
Tablica 8. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja SNR 4203A.....	35
Tablica 9. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja FAG 6301	36
Tablica 10. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja NSK 6302	37
Tablica 11. Karakteristične frekvencija za rad ležajeva.....	40
Tablica 12. Temperature uzoraka prije i poslije ispitivanja	45
Tablica 13. Tragovi trošenja na vanjskom prstenu ležaja	47
Tablica 14. Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu i kavezu ležaja	48
Tablica 15. Tragovi trošenja na kuglici ležaja	49
Tablica 14. Otisci na uzorku C1	50
Tablica 15. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na uzorku C1	50
Tablica 16. Mikrostruktura uzorka C1 povećanje 500x.....	52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{10}	10^6 rotacija	Osnovni radni vijek ležaja
C	N	Osnovna dinamička nosivost
P	N	Radno opterećenje ležaja
p	-	Eksponent potencije za ležajeve
r	r/min	Brzina vrtnje
L_{10h}	h	Osnovni nazivni resurs
L_{na}	10^6 rotacija	Prilagođeni nazivni resurs
α_1	-	Faktor pouzdanosti
α_2	-	Faktor materijala
α_3	-	Faktor radnih uvjeta
T_0	°C	Početna temperatura
T_1	°C	Temperatura nakon ispitivanja
ΔT	°C	Razlika između temperature nakon ispitivanja i početne

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisane su karakteristike valjnih ležajeva, metode ispitivanja, vibracije, buke i zagrijavanja ležaja te objašnjene neke preventivne mjere održavanja ležajeva i sama važnost održavanja strojeva u proizvodnom pogonu. U eksperimentalnom dijelu rada ispitani su novi i istrošeni kuglični ležajevi izdvojeni iz stroja za punjenje limenki. Na ispitanim ležajevima provedena su mjerenja vibracije, buke i zagrijavanja te ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture materijala ležaja. Provedena ispitivanja dala su uvid u promjene radnih karakteristika kugličnih ležaja uzrokovanih trošenjem i korozijom.

Ključne riječi: kuglični ležajevi, vibracije ležaja, buka ležaja, trošenje ležaja, korozija ležaja

SUMMARY

In the theoretical part of the work, the characteristics of rolling bearings, testing methods, vibrations, noise, and bearing heating are described, and some preventive maintenance measures for bearings and the importance of machine maintenance in the production facility are explained. In the experimental part of the work, new and worn ball bearings extracted from a can filling machine were tested. Measurements of vibration, noise, and heating, as well as testing of the hardness and microstructure of the bearing material, were conducted on the tested bearings. The conducted tests provided insight into the changes in the operating characteristics of ball bearings caused by wear and corrosion.

Key words: ball bearings, bearing vibrations, bearing noise, bearing wear, bearing corrosion

1. UVOD

Ležajevi su nezaobilazni elementi u konstrukciji strojeva i vozila koji omogućujući oslonac, vođenje i gibanje pokretnih dijelova mehanizama u odnosu na nepomične dijelove poput postolja ili kućišta strojeva i vozila. Njihova osnovna svrha je prijenos gibanja i sile s jednog dijela stroja na drugi, dok istovremeno smanjuju trenje između povezanih komponenti. Primjenjuju se u automobilskoj industriji (motori, mjenjači, kotači), industrijskoj opremi (električni motori, pumpe), kućanskim aparatima (perilice rublja, usisavači), građevinskoj i poljoprivrednoj opremi, biciklima, motociklima, elektronici (hard diskovi, ventilatori), medicinskoj opremi i u energetske sektoru (vjetroturbine, hidroelektrane).

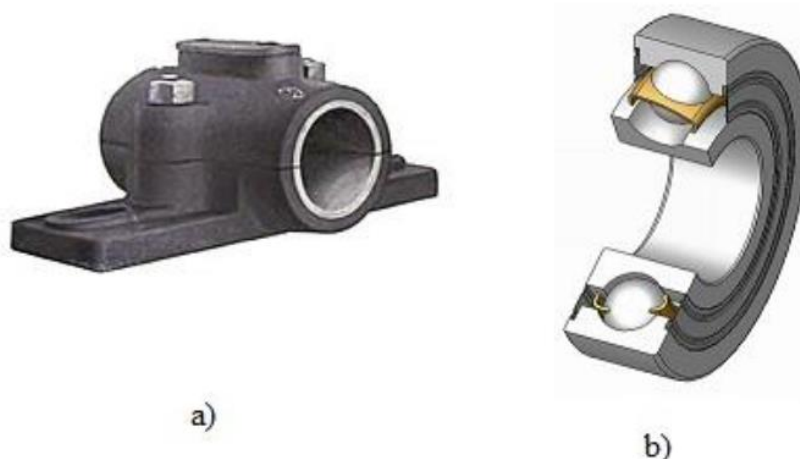
Održavanje ležajeva bitno je za dugovječnost i pouzdanost mehaničkih sustava. Redovita provjera vibracija, buke i zagrijavanja ležaja omogućuju otkrivanje znakova trošenja, korozije i oštećenja. Pravilno podmazivanje smanjuje trenje i trošenje, čime se smanjuje rizik od pregrijavanja i produžava vijek trajanja ležajeva. Pravovremena zamjena istrošenih ili oštećenih ležajeva osigurava pouzdanost i učinkovitost sustava. Kontinuirano praćenje radnih uvjeta, poput temperature, brzine vrtnje i opterećenja, osigurava rad ležajeva unutar njihovih specifikacija, čime se sprječavaju kvarovi i smanjuju troškovi održavanja.

Postoje situacije kada ležaj treba prijevremeno zamijeniti te kada se ležaj zamjenjuje preventivno, premda nije nužna zamjena. Zbog boljeg razumijevanja utjecaja trošenja i korozije na rad ležaja i potrebu njihove zamjene u radu će se ispitivati karakteristike istovrsnih novih i istrošenih ležajeva mjerenjem: vibracije, buke, i zagrijavanja ležaja u radu bez opterećenja. Nakon pokusa u simulatoru vrtnje ležaja analizirat će se izgled istrošenih površina te će se ispitati tvrdoća i mikrostruktura ležaja. Iz rezultata provedenih ispitivanja očekuje se detaljan uvid utjecaja specifičnih oštećenja ležaja na pojavu specifičnih frekvencija buke i zagrijavanja ležaja.

TEORIJSKI DIO

2. VALJNI LEŽAJEVI

Pravilnim izborom ležaja smanjuje se trošenje između komponenti stroja u međusobnom gibanju i gubici energije koji nastaju u radu stroja. Osnovna podjela ležaja je na klizne i valjane ležajeve. Razlika između njih je u konstrukciji, materijalima i primjeni. Na slici 1 prikazani su primjeri kliznog i valjanog ležaja [1]:



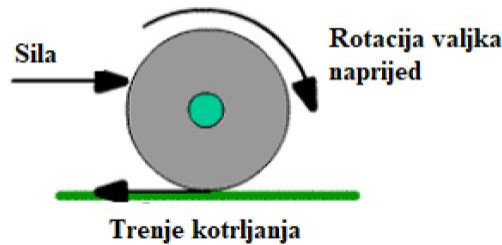
Slika 1. a) Klizni ležaj b) Valjni ležaj [2]

Rad ležajeva je često od presudnog značenja za ispravan rad i vijek konstrukcija i strojeva. Potrebno je ispravno odabrati odgovarajući ležaj za konkretnu namjenu prema odgovarajućem proračunu površina nosivosti ležajnih tijela i očekivanom eksploatacijskom vijeku konstrukcije. Potrebno je uzeti u obzir brojne čimbenike kao što su: način opterećenja, promjer osovine ili vratila, brzina vrtnje, zahtijevani radni uvjeti, životni vijek, temperatura, okolina itd. [1]

2.1. Valjni ležajevi

Valjni ležajevi dijele se prema obliku valjnih dijelova koji rotiraju između prstenova ili ploča. Valjna tijela mogu biti kugličnog, valjkastog ili igličastog oblika. Trenje koje nastaje između valjnih tijela i prstenova ili ploča naziva se trenje kotrljanja. Trenje je otpor koji se javlja između površina nalijeganja dva tijela te se suprotstavlja njihovom međusobnom gibanju, bilo da je riječ o klizanju, kotrljanju ili valjanju (kinetičko trenje), ili pak onemogućuje gibanje (statičko trenje). Otpor koji se javlja pri trenju valjanja manji je od onog pri trenju klizanja jer se pri tome dodirna površina u međusobnom gibanju svodi na točke, kad su valjni elementi kuglastog

oblika. Elastična deformacija valjnih tijela je neizbježna, no između njih se još pojavljuje i trenje kotrljanja. Shematski prikaz djelovanja sile trenja kotrljanja prikazan je na slici 2.[3]:



Slika 2. Trenje kotrljanja[4]

Valjni ležajevi mogu istovremeno prenositi radijalno i aksijalno, samo radijalno ili samo aksijalno opterećenje. [3]

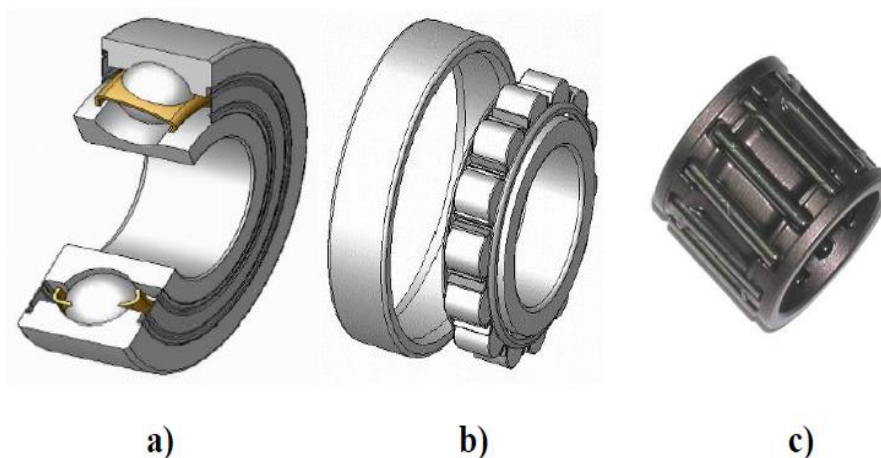
Neke od prednosti valjnih ležajeva u usporedbi s kliznima jesu sljedeće:

1. Faktor trenja je zbog trenja valjanja za 25 % do 50 % niži nego kod kliznih ležajeva
2. Manji gubitak snage zbog manjeg trenja
3. Standardizirani su i jednostavniji za zamjenu
4. Imaju visoku nosivost
5. Imaju malu zračnost (prikladnu za precizni rad električnih i alatnih strojeva)
6. Troše male količine maziva
7. Jednostavno održavanje

Neki od nedostataka valjnih ležajeva jesu sljedeći:

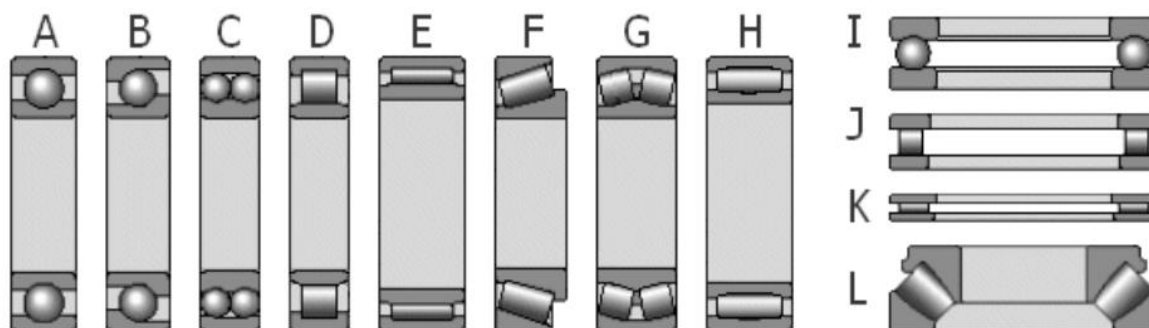
1. Bučniji rad
2. Veća osjetljivost na udarna opterećenja
3. Skuplji su od kliznih ležajeva
4. Slaba otpornost na mehaničke vibracije
5. Zahtjevnija je ugradnja i rasklapanje (uske granice tolerancije)

Na slici 3. prikazana je podjela valjnih ležajeva na tri glavne skupine:



Slika 3. Tri glavne skupine valjnih ležajeva: a) kuglični ležaj b) valjkasti ležaj c) igličasti ležaj [3]

Raznolikost valjnih ležajeva je u oblicima njihovih elemenata. Na slici 4. su prikazane neke od standardnih izvedbi valjnih ležajeva. Opis izvedbi naveden je u tablici 1.



Slika 4. Vrste valjnih ležajeva [3]

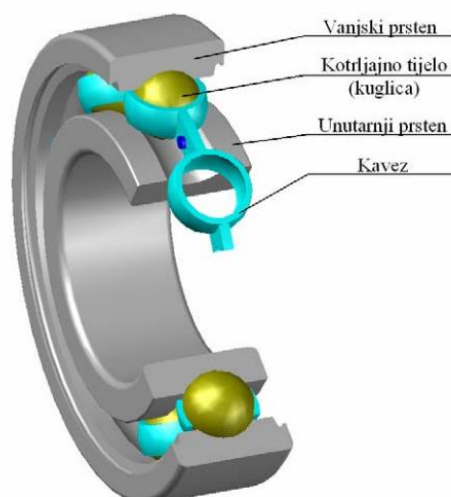
Tablica 1. Vrste i opis valjnih ležajeva [3]

Oznaka sa slike	Naziv ležaja	Vrsta valjnog tijela	Dodir(teorij ski)	Smjer prenošenja opterećenja
A	Jednoredni kuglični	Kuglica	Točka	Radijalno
B	Jednoredni kuglični s kosim dodirom	Kuglica	Točka	Radijalno-aksijalni
C	Dvoredni kuglični samopodesivi	Kuglica	Točka	Radijalno-aksijalni
D	Jednoredni valjkasti	Valjak	Crta	Radijalno
E	Jednoredni igličasti	Iglica	Crta	Radijalno
F	Stožasti ležaj	Stožac	Crta	Radijalno-aksijalni
G	Dvoredni bačvasti samopodesivi	Bačvica	Crta	Radijalno-aksijalni
H	Jednoredni valjkasti	Valjak	Crta	Radijalno
I	Jednoredni kuglični	Kuglica	Točka	Aksijalno
J	Jednoredni valjkasti	Valjak	Crta	Aksijalno
K	Jednoredni igličasti	Iglica	Crta	Aksijalno
L	Bačvasti ležaj	Bačvica	Crta	Aksijalno

2.2. Kuglični i valjkasti ležajevi

Kuglični ležajevi standardizirani su prema normi ISO 492:2023 te koriste kuglice za osiguranje rotacije s minimalnim vibracijama, dok valjkasti ležajevi koriste valjke za sličnu svrhu, ali s većom nosivošću opterećenja. Kuglični ležajevi često se koriste na mjestima koja zahtijevaju visoku preciznost pozicioniranja povezanih strojnih elemenata i brzu rotaciju, dok se s druge strane valjkasti ležajevi koriste na mjestima gdje je prisutno veliko opterećenje, a manja brzina vrtnje. Zbog svojih karakteristika kuglični ležajevi se pretežito koriste u električnim motorima, ventilatorima, pumpama i raznovrsnim osovinskim sklopovima. S druge strane valjkasti ležajevi se koriste u mjenjačima automobila, vlakova i željeznice te u teškim industrijskim strojevima kao što su preše, dizalice, valjkaste staze i dr. [1]

Kuglični ležaj sastoji se od unutarnjeg i vanjskog prstena između kojih su smještene kuglice. Kuglice podržava kavez koji sprječava njihovo sudaranje, dok brtve osiguravaju zaštitu od vanjskih nečistoća i produžuju vijek trajanja ležaja. Primjer kugličnog ležaja i njegovih dijelova prikazan je na slici 5. [1]



Slika 5. Radijalni kuglični ležaj [3]

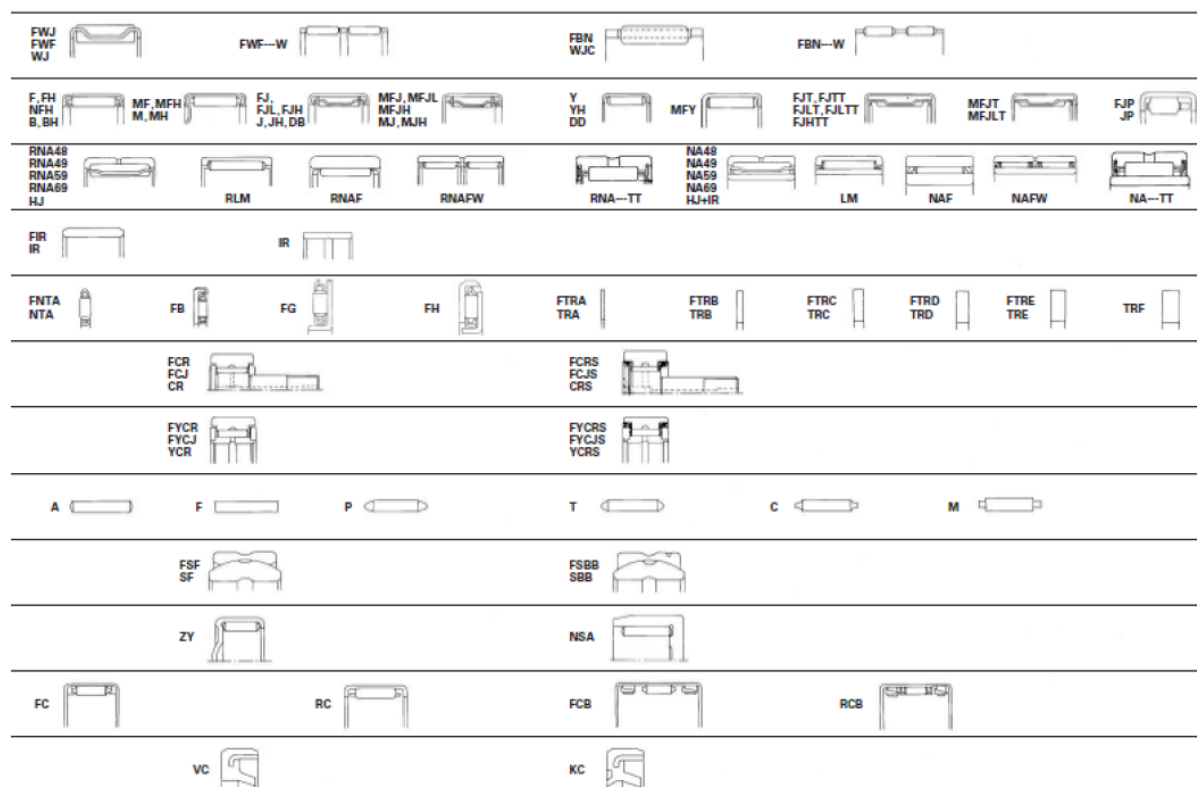
2.3. Igličasti ležajevi

Standardizirani igličasti ležajevi prema normi ISO 1206:2018 (DIN 617) osiguravaju relativno veliku nosivost unatoč malim poprečnim presjecima. Valjna tijela, valjci manjih promjera (iglice), izrađuju se s unutarnjim prstenom ili bez njega. Kompaktan oblik igličastih ležajeva primjeren je u slučajevima gdje u radijalnom smjeru ima malo prostora za ugradnju. Igličasti ležajevi s unutarnjim prstenom koriste se za uležištenja kod kojih nije moguće ili nije ekonomski opravdano kaljenje i brušenje vratila. S druge strane, igličasti ležajevi bez unutarnjeg prstena predstavljaju optimalno rješenje za uležištenja kod kojih je moguće površinski kaliti rukavce vratila i potom ih fino brusiti. Oba tipa ležajeva su primjereni samo za radijalna opterećenja. Na slici 6. prikazana je podjela standardnih igličastih ležajeva. [1]

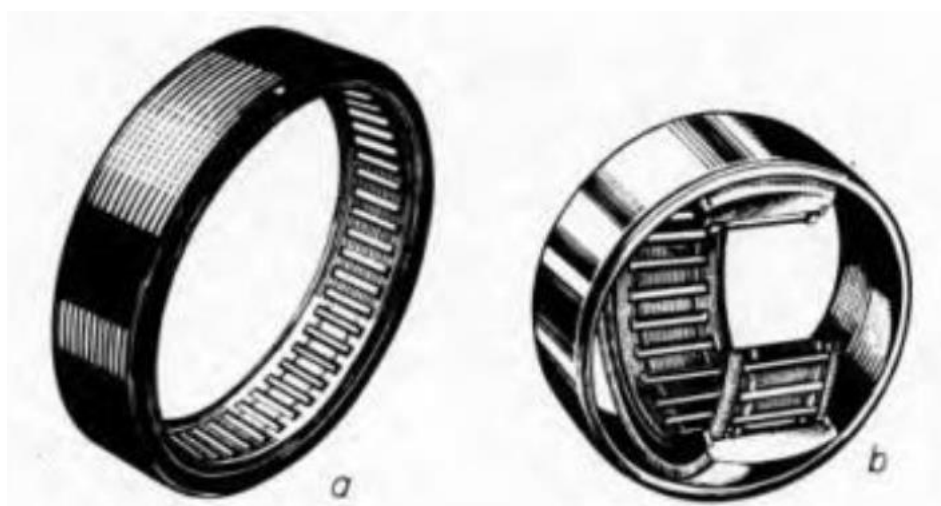
Glavne komponente igličastog ležaja su unutarnji i vanjski prsten te iglice. U većini slučajeva nema unutarnjeg prstena, tada su iglice u direktnom dodiru s osovinom ili vratilom. Takvi ležajevi bez unutarnjeg prstena su isključivo radijalni te su prikladni za rad pri visokim brojem okretaja, dobro podnose udarce i imaju veliku nosivost.

Igličasti ležaji se smatraju najsuvremenijim od svih vrsta ležaja te se zbog svojih prednosti sve više primjenjuju u strojogradnji i zrakoplovstvu.

Na slici 7. prikazane su krute izvedbe igličastih ležaja. Njihovi valjni elementi (iglice) zapravo su tanki valjci sa zaobljenim rubovima s promjerom između 1,5 i 5,0 mm i dužinom od 5 mm do 10 mm. [6]



Slika 6. Podjela igličastih ležajeva [5]



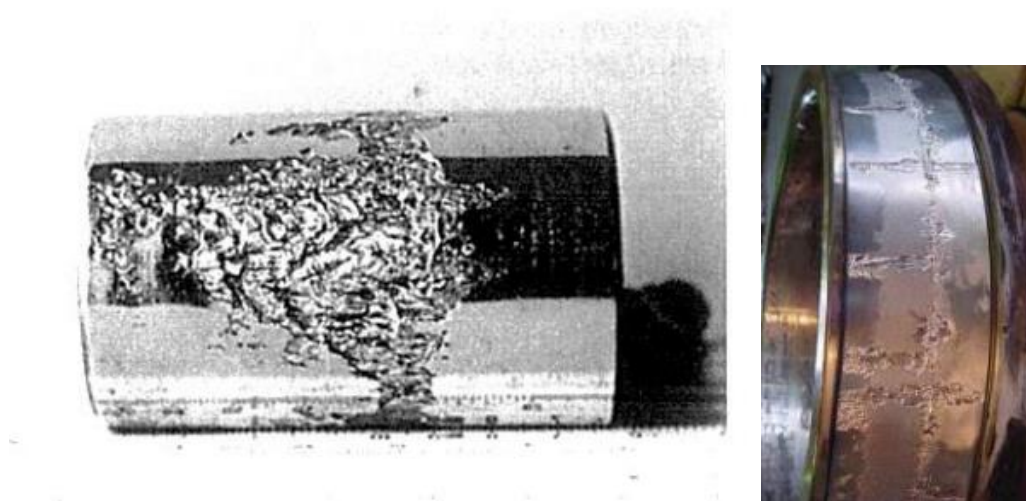
Slika 7. Ležaj bez unutrašnjeg prstena: a) kruti ležaj b) samoprilagodljivi ležaj [6]

2.4. Proračun radnog vijeka ležaja

Ležajevi koji rade u uobičajenim eksploatacijskim uvjetima, na sobnoj temperaturi i bez visokog opterećenja, izloženi su tlačnim kontaktnim pritiscima koji oštećuje dijelove ležajeva. Zbog periodičkih promjena tlačnog opterećenja dolazi do stvaranja jamica trošenja i ljuskanja površina na dijelovima ležaja.

Efektivni radni vijek ležaja se definira kao broj okretaja ležaja prije pojave ljuskanja na prstenovima ili valjnim tijelima. Ljuskanje dijelova površine valjnog ležaja od čelika prikazano je na slici 8.a) Ostali mehanizmi dotrajavanja koji mogu uzrokovati oštećenje ležaja jesu: adhezijsko i abrazijsko trošenje, stvaranje mikro i makro pukotina te djelovanje tribokorozije. Do pojave tih mehanizama trošenja dolazi zbog nepravilnog podmazivanja, pogrešnog brtvljenja ili lošeg odabira ležaja prilikom projektiranja. Zbog oštećenja ležaja može se pojaviti povećanje vibracija, zagrijavanje i pojačani šum (buka) ležaja. Na slici 8.b) prikazan je oštećeni unutarnji prsten ležaja. [15]

Radni vijek trajanja je različit za ležajeve koji su jednaki i rade u istim eksploatacijskim uvjetima. Do toga dolazi zbog materijala od kojih su ležajevi napravljeni. Stoga je radni vijek trajanja ležaja definiran na statističkom modelu. Prema statistici osnovni radni vijek ležaja je ono vrijeme koje će 90 % ležajeva koji su napravljeni od istog materijala izdržati u istim eksploatacijskim uvjetima ili duže bez pojave ljuskanja uslijed umora materijala. Za ležajeve koji rade konstantnom brzinom osnovni radni vijek se označuje u brojem radnih sati sa sigurnošću od 90 %.



Slika 8. a) ljuskanje valjnog tijela b) umor površine i adhezijsko trošenje[1]

Glavna normama propisana karakteristika ležaja, zajedno s osnovnom dinamičkom nosivosti (C) je ekvivalentno opterećenje ležaja (P) definirano kao ono opterećenje koje valjni ležaj treba podnijeti tijekom eksploatacije u kojoj se ostvari milijun okretaja valjnih tijela.

Odnos između nominalnog vijeka trajanja, dinamičke nosivosti i opterećenja koje djeluje na ležaj pri brzini vrtnje $n > 20 \text{ min}^{-1}$ računa se formulom: [16]

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (1)$$

gdje je: p – eksponent vijeka trajanja, koji iznosi za kuglične ležajeve $p = 3$, za valjne ležajeve $p = \frac{10}{3}$. [16]:

Nominalni vijek trajanja se izražava u satima rada ležaja: [16]

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

gdje je n (s^{-1}) brzina vrtnje ležaja, C (kN) je dinamička nosivost normalnog ležaja, P (kN) je ekvivalentno opterećenje ležaja u normalnim radnim uvjetima. Nominalni vijek trajanja izračunat na razini pouzdanosti od 90 % (L_{10}) zadovoljava većinu uporaba ležajeva, budući da je stvarno dostižan životni vijek veći od izračunatog. Također, uz 50 %-tnu pouzdanost vijek trajanja (L) je u pravilu pet puta veći od nominalnog vijeka trajanja (L). Osim toga poznato je iz literature da uvjeti podmazivanja značajno utječu na životni vijek ležaja. Stoga je normom ISO 281:2007 uvedena oznaka prilagođenog vijeka trajanja, prema izrazu: [16]

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 L_{10} \quad (3)$$

gdje je L_{na} – prilagođeni nominalni vijek trajanja, Faktor n znači razliku između iskazane pouzdanosti i razine pouzdanosti 100 %. Faktor α_1 naziva se faktor prilagodbe prema zahtijevanoj sigurnosti, koristi se kada potreban osnovni radni vijek izračunat s većom sigurnosti od 90%. Faktor α_2 naziva se faktor prilagodbe prema materijala ležaja, faktor se koristi u slučaju proizvodnje ležaja od nestandardnog materijala. Faktor α_3 naziva se faktor prilagodbe prema radnim uvjetima. Na faktor α_3 utječu radni uvjeti poput podmazivanja (viskoznost maziva pri različitoj temperaturi), brzina vrtnje pri kojoj ležaj radi i smanjenje tvrdoće uslijed visokih radnih temperatura. [16]

2.5. Materijali za valjne ležajeve

Za izradu valjnih ležajeva koriste se različiti materijali, ovisno o specifičnim zahtjevima primjene i okruženju u kojem će se koristiti. Materijali za ležajeve trebaju imati visoku granicu razvlačenja, dobru dimenzijsku stabilnost, visoku otpornost na umor materijala, poboljšanu otpornost na trošenje, dobru otpornost na koroziju i dobru obradivost.

Za izradu valjnih ležaja uobičajeno se upotrebljavaju visokouglični čelici legirani kromom, srednjouglični čelici, čelici za cementiranje, čelici za rad pri povišenim temperaturama, nehrđajući čelici i polimerni materijali. [7]

Čelik EN DIN 100Cr6 pripada skupini niskolegiranih Cr čelika za hladni rad. Ovi čelici se uglavnom primjenjuju za izradu alata i dijelova ležaja zbog svoje otpornosti na trošenje i otpornosti na visoke specifične pritiske. U konstrukcijskoj primjeni čelik EN DIN 100Cr6 se uglavnom koristi za male i srednje ležajeve te se ujedno koristi za proizvodnju vijaka, klinova, matica i postolja za strojeve kao što su tokarilice, glodalice, i dr.. [8] Kemijski sastav čelika 100Cr6 se sastoji od elemenata navedenih u tablici 2:

Tablica 2. Kemijski sastav čelika EN DIN 100Cr6

C%	Mn%	Si%	Cr%	Cu%	S%
0,95 - 1,10	0,2 - 0,5	≤ 0,35	1,3 - 1,6	≤ 0,025	≤ 0,025

Mehaničkih svojstva čelika EN DIN 100Cr6 u polaznom stanju prije kaljenja i popuštanja prikazana su u tablici 3. [8]

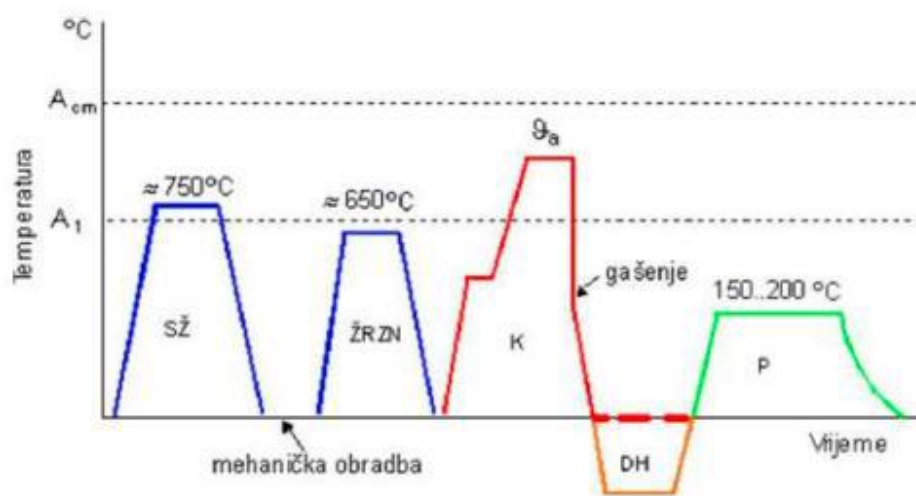
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika EN DIN 100Cr6 u polaznom stanju prije strojne obrade

Vlačna čvrstoća nakon sferodizacijskog žarenja	Tvrdoća u žarenom stanju pri ograničenoj tvrdoći	Tvrdoća u sferodizacijsko žarenom stanju	Poisson-ov omjer	Modul smicanja
570-720 MPa	< 22 HRC	7 - 17 HRC	0,27 - 0,3	80 GPa

Kako bi se postigla potrebna uporabna svojstva, čelik EN DIN 100Cr6 se podvrgava postupcima toplinske obrade:

- žarenjima (sferodizacijskom, za smanjenje zaostalih naprezanja)
- kaljenju
- dubokom hlađenju
- popuštanju

Cjeloviti postupak toplinske obrade uobičajeno se može prikazati u dijagramu temperatura – vrijeme (tzv. dijagram postupka) kako je prikazano na slici 9.



Slika 9. Cjeloviti postupak toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6 [8]

Nakon toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6 postižu se njegova uporabna svojstva: visoka tvrdoća, dobra žilavost, dobra dimenzijska stabilnost i osrednja otpornost na koroziju.

3. ISPITIVANJE VIBRACIJA, BUKE I ZAGRIJAVANJA LEŽAJA

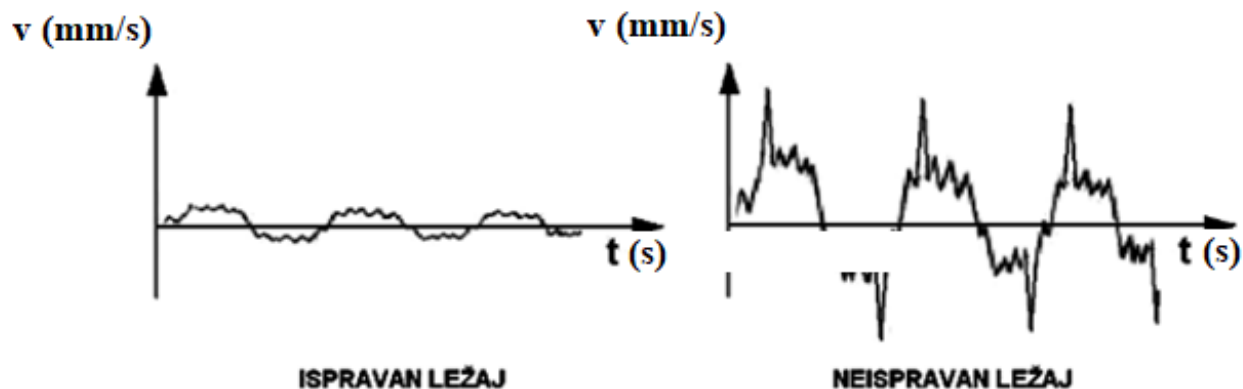
Valjni ležajevi često se koriste u strojevima od kojih se zahtijeva tihi rad, kao što su kućanski aparati i električni motori. Zbog toga male vibracije ležaja postaju sve važniji zahtjev na konstrukciju i primjenu ležaja. U današnje vrijeme općenito je prihvaćeno da je tih rad ležaja sinonim za optimalno oblikovanje i dobru završnu obradu uređaja ili stroja. Kao rezultat toga, proizvođači ležaja razvili su testove vibracija kao učinkovitu metodu za mjerenje kvalitete rada ležaja. Čest pristup je montiranje ležaja na vreteno simulatora s tišim radom od rada ležaja te mjerenje radijalne brzine na točki na vanjskom prstenu ležaja u tri frekvencijska pojasa: 50-300 Hz, 300 - 1800 Hz i 1800 - 10000 Hz prema normi ISO 15242-1:2015. Ležaj mora zadovoljiti granice efektivne vrijednosti brzine vibracije (tzv. RMS brzina) u sva tri frekvencijska pojasa. Međutim, u većini situacija vibracija ležaja ne može se mjeriti izravno, pa je zapis vibracija ležaja modificiran utjecajem ostalih dijelova stroja i vibracijama druge opreme montirane na stroju, kao što su električni motori, zupčanici, remenice, hidraulika, itd. [9]

3.1. Izvori vibracija

Pod radijalnim i nepravilnim opterećenjima, vibracije su neizbježna pojava u radu valjnih ležajeva, čak i ako je ležaj geometrijski savršen i ne postoje nikakvi znakovi loše kvalitete površine valjnih tijela i prstenova. Oštećenja ležaja mogu se podijeliti na „raspodijeljena“ i „lokalna“.

„Raspodijeljena“ oštećenja uključuju hrapavost površine, valovitost i valjna tijela izvan nazivnih mjera. Pojave na površini ležaja reda veličine kao što je širina kontaktne površine Hertzovog pritiska ili manje od nje, nazivaju se „hrapavosti površine“. Pojave na površine većih valnih duljina nazivaju se „valovitosti površine“. Raspodijeljeni nedostaci uzrokovani su greškama u proizvodnji, nepravilnom ugradnjom ili abrazivnim trošenjem ležaja. [9]

Lokalizirani nedostaci uključuju pukotine, jamice i lomove na valjnim površinama ležaja. Najčešći izvor lomova na ležajevima su jamice i mikropukotine na površini nastale trošenjem ležaja nastale umorom površine. Kvar ležaja zbog umora površine ili umora materijala može biti ubrzan preopterećenjem ili udarnim opterećenjem ležajeva tijekom rada ili ugradnje. Kad god lokalni nedostatak na valjnom elementu ležaja stupi u interakciju s njegovim spojnim elementom, dolazi do naglih promjena u kontaktnim naprezanjima na dodirnoj površini, koje generiraju kratkotrajni impuls sile. Ovaj impuls proizvodi vibracije i buku koji upućuju na prisutnost kvara u ležaju. [9]

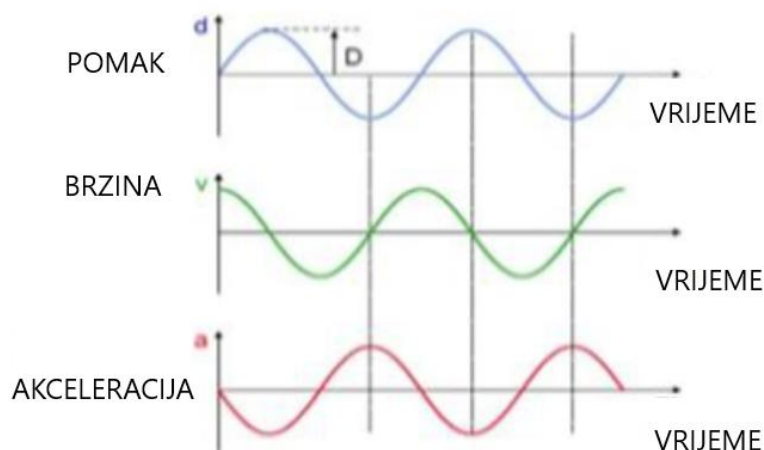


Slika 10. Vremenski dijagrami brzine vibracija ispravnog i neispravnog ležaja [10]

3.2. Analiza vibracija

Prema normi AFNOR NF E 90-001: Vibracija je varijacija karakteristične veličine gibanja ili položaja mehaničkog sustava ovisna o vremenu veća ili manja od određene prosječne ili referentne vrijednosti [18].

Vibracija stroja podložnog periodičnoj sili može se opisati u terminima pomaka, brzine i ubrzanja. Brzina vibracijskog gibanja odgovara promjeni njegovog pomaka po jedinici vremena. Ubrzanje predstavlja promjenu brzine po jedinici vremena. [18]

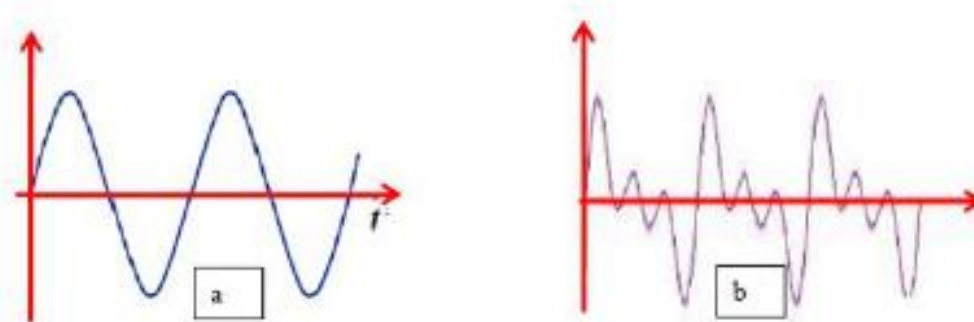


Slika 11. Prikaz harmonijskog gibanja jednostavnog vibracijskog sustava[19]

Vibracija je uglavnom karakterizirana svojom frekvencijom, amplitudom i prirodom, a sile koje generiraju vibracije mogu se podijeliti na:

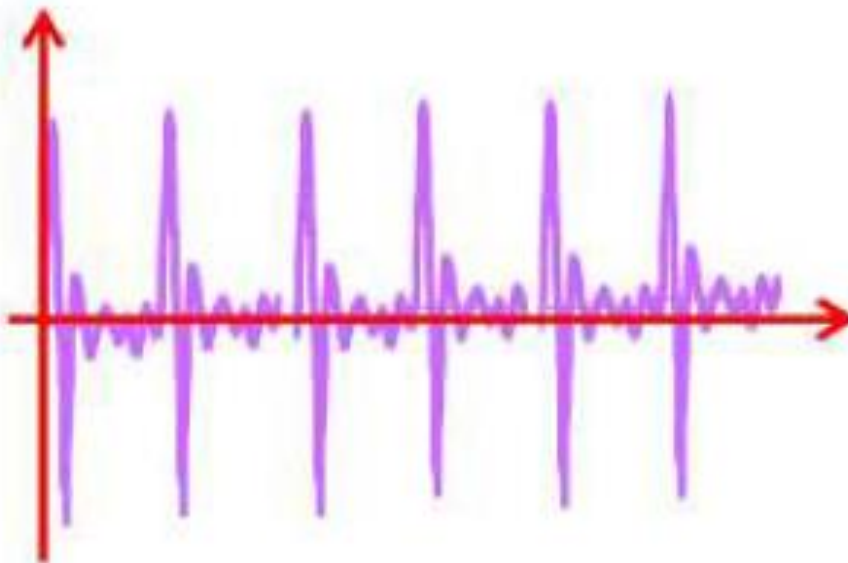
- Impulsne sile (udar)
- Prijelazne sile (promjena opterećenja)
- Periodične sile (neuravnoteženost)
- Nasumične sile (trenje)

Svaki rotirajući stroj u radu generira vibracije koje se mogu klasificirati na sljedeći način. Periodične vibracije jednostavnog sinusoidnog tipa (slika 12 a) ili složenog sinusoidnog tipa (slika 12. b) koje predstavljaju normalno ili abnormalno funkcioniranje određenog broja mehaničkih ciklusa (rotacija osovine, zazor zupčanika). [19]



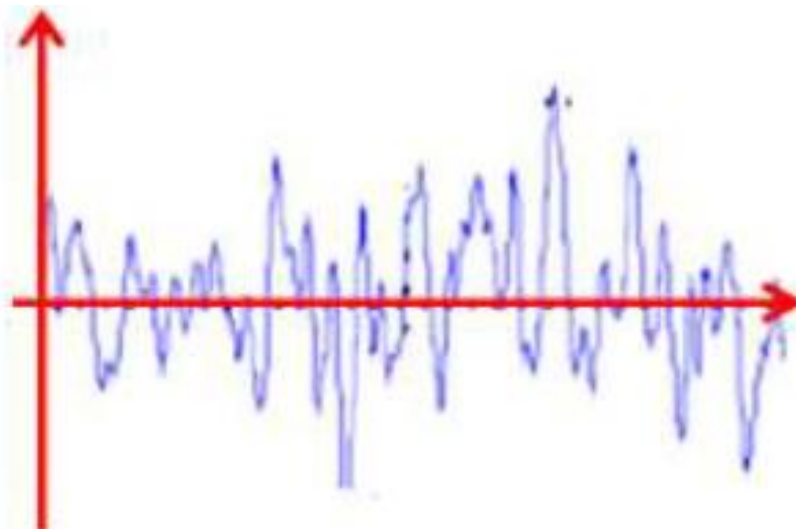
Slika 12. Pojavni oblici vibracija: a) harmonična, b) stohastička vibracija [19]

Periodične vibracije impulsnog tipa (slika 13) nazivaju se tako s obzirom na sile koje generiraju te vibracije i njihov nagli, kratkotrajni i periodični karakter. Ti udarci mogu biti uzrokovani prirodnim događajima (automatske preše, mlinovi čekićari, klipni kompresori) ili nenormalnim događajima poput oštećenja ležajeva ili zupčanika, pretjeranog zazora. [19]



Slika 13. Periodična impulsna vibracija [19]

Na slici 14 prikazana je nasumična vibracija impulsnog tipa koja može biti uzrokovana nedostatkom podmazivanja u valjnom ležaju ili kavitacijom pumpe. [19]



Slika 14. Naizmjenična vibracija impulsnog tipa [19]

3.3. Senzori za mjerenje vibracija

Za dijagnostiku stanja ležaja ugrađenih u stroj bitno je postaviti senzore na odgovarajuća mjesta. Prilikom postavljanja senzora treba izbjegavati obojena područja, neopterećene zone ležajeva, razmake između kućišta i strukturalne rascjepa. Prilikom korištenja ručnog senzora

najbitnije je osigurati konzistentnost očitavanja, pravilno pozicioniranje senzora, pravilan kut između stroja i senzora te dovoljnu silu kojom se pritišće senzor na stroj. Kada je god moguće preporučljivo je mjeriti vibracije u sva tri smjera: aksijalnom, horizontalnom i vertikalnom. [11] Mjerenja vibracija u vertikalnom smjeru uobičajeno prikazuju manje vibracije zbog krutosti uređaja, djelovanja sile teže i učvršćivanja stroja. U idealnim uvjetima tijekom mjerenja vibracija u aksijalnom smjeru dobivaju se male vrijednosti vibracija, jer do vibracija u tom smjeru dolazi samo zbog dijelova koji nisu u ravnini i zbog savijanja osovine ili vratila. [11] Mjerenja vibracija u horizontalnoj ravnini, okomito na os vrtnje ležaja uobičajeno daje najintenzivnije vibracije zbog elastičnih deformacija kućišta u horizontalnoj ravnini te zbog moguće pojave neuravnoteženog rasporeda strojnih dijelova, koji dodatno povećava vibracije. Na slici 15 prikazane su različite glave senzora za mjerenje vibracija. [11]



Slika 15. Glave senzora za mjerenje ubrzanja [12]

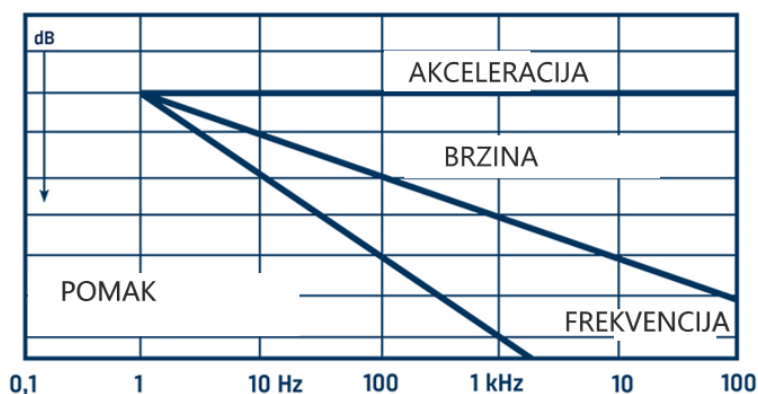
Vibracije kod strojeva imaju tri mjerljive karakteristike: pomak, brzinu i ubrzanje. Unatoč matematičkoj vezi triju veličina, sve tri karakteristike imaju različita svojstva i daju uvid u različite nepravilnosti u radu ležaja. [13]

Pomak vibracije se iskazuje u milimetrima ili mikrometrima te se može opisati kao promjena udaljenosti mjerenog objekta u odnosu na početni položaj, odnosno kao razmak između dva krajnja položaja vibrirajuće površine. Pomak se obično mjeri senzorom poznatim kao sonda pomaka ili vrtložna sonda. Sonda pomaka je beskontaktni uređaj koji mjeri relativnu udaljenost između dviju površina. Njom se najčešće prati pomak vibracija vratila na strojevima s kliznim

ležajima s frekvencijom do 10 Hz. Sonde za pomak mjere samo kretanje osovine ili rotora u odnosu na kućište stroja. [13]

Druga mjerljiva karakteristika je brzina vibracija. Mjeri se u milimetrima u sekundi ($\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$), a fizikalno predstavlja promjenu vrijednosti pomaka u jedinici vremena. Trenutna vrijednost brzine vibracija mijenja se s promjenom pomaka i frekvencijom vibracija. Stoga se uobičajeno mjere efektivna i vršna (maksimalna) vrijednost brzine vibracija (RMS brzina). Efektivna vrijednost brzine vibracija ukazuje na mehaničku energiju koja se predaje materijalu ležaja zbog naleta valjnih tijela na koncentrirane ili raspodijeljene nepravilnosti u ležaju, pojave neuravnoteženosti rotirajućih masa, povećane zračnosti u ležaju ili lokalnih promjena u mehaničkim svojstvima valjnih površina. Mjerenja vibracija pomoću brzina je najčešće korišteno mjerenje vibracija u području frekvencije vibracija od 10 Hz do 1000 Hz. Takvi senzori su bili među prvima električnim sensorima za mjerenje stanja stroja, jer brzina ostaje ista neovisno o frekvenciji sve dok se proizvodi jednaka količina dinamičkog gibanja. Nedostatak senzora brzine je da se kod niskih i visokih frekvencija gubi točnost i preciznost mjerenja. [13]

Ubrzanje vibrirajuće površine se iskazuje u ($\frac{\text{mm}}{\text{sec}^2}$) i matematički predstavlja derivaciju brzine promjene pomaka mjerene površine. U fizikalnom smislu ubrzanje vibracija predstavlja promjenu brzine u jedinici vremena i također je vremenski promjenljiva veličina. Efektivna vrijednost ubrzanja vibracija mjeri pojavu mehaničkih sila trenja u ležaju. Vršna vrijednost ubrzanja vibracija mjeri sudare i udarce valjnih tijela i lokalno smještenih nedostataka ili prepreka gibanju u ležaju. Ovakva oštećenja stvaraju visoke frekvencije vibracija, iznad 1000 Hz. Ubrzanje vibracija se mjeri se akcelerometrom koji sadrži jedan ili više piezoelektrični poluvodič spojen na uteg neke zadane mase, koji vibrira sukladno vibraciji stroja ili strojnog dijela na koji je spojen. Preporučljivo mjerno područje za primjenu akcelerometara je za vibracije od 1 kHz do 10 kHz. [13]. Ovisnost pomaka, brzine i ubrzanja vibracija o frekvenciji i slabljenju izmjerenog signala prikazan je na slici 16.



Slika 16. Ovisnost intenziteta signala izmjenog akcelometrom, sondom brzine i sondom pomaka o frekvenciji vibracija [22]

3.4. Mjerenje temperature ležaja [10]

Radna temperatura svakog ležaja mora biti u propisanim granicama sukladno uputama proizvođača ležaja. U slučaju da to nije tako može doći do trajnog oštećenja ležaja ili osovine na koju je ležaj montiran. Ležaji opće namijene predviđeni su za rad na temperaturama od -20 °C do 110 °C.

Neki od uzroka pregrijavanja ležaja jesu sljedeći:

- loše podmazivanje ležaja
- previsok broj okretaja
- povećanje faktora trenja ležaja
- kontaminacija(zaprljanje) maziva
- djelovanje vanjskog izvora topline.

U većini slučajeva dovoljno je rukom opipati kućište ležaja i subjektivno procijeniti njegovu temperaturu. Točniji postupak mjerenja temperature ležaja se provodi s pomoću kontaktnih i beskontaktnih IR termometra ili termografskih kamera.. Za beskontaktna mjerenja temperature ležaja IR termometrom ili termografskom kamerom treba zadati odgovarajuću vrijednost koeficijenta emisije toplinskog zračenja.

Na slici 17. prikazano je mjerenje temperature ležaja pomoću kontaktnog termometra.



Slika 17. Mjerenje temperature ležajeva pomoću kontaktnog termometra [10]

3.5. Mjerenje buke

Mjerenje razine buke može također biti korisno u otkrivanju oštećenja u valjnim tijelima ležaja. Osnovne značajke buke sadržane su u njezinoj jačini (intenzitetu), ali i u njezinoj kakvoći (dodatnim šumovima), visini, trajanju, isprekidanosti ili kontinuiranosti. Mjerenje buke obično se provodi na dva načina: mjerenjem zvučnog tlaka ili mjerenjem intenziteta zvuka. Obje tehnike su relativno nove no mogu biti itekako korisne u otkrivanju oštećenja u samim ležajevima. Intenzitet zvuka definira se kao vremenski prosječna brzina protoka zvučne energije kroz jedinicu površine. Za mjerenje intenziteta zvuka koristi se posebna sonda s dva mikrofona. Mjerenje intenziteta zvuka preporučljivo je za praćenje oštećenja valjnih ležajeva kotača na željezničkim prugama, gdje je ova metoda točnija i pouzdanija nego mjerenje zvučnog tlaka. [14]

Na slici 18 prikazan je uređaj za mjerenje intenziteta buke s kondenzatorskim mikrofonom s opsegom mjerenja zvuka u frekvencijskom području od 31,5 Hz do 8 kHz.



Slika 18. Uređaj za mjerenje intenziteta buke [15]

Za rad ležajeva u strojevima, preporučena razina buke ovisi o specifičnostima stroja i okruženju u kojem se koristi. Općenito, u industrijskim postavkama želi se minimizirati buka radi zaštite zdravlja radnika i poboljšanja radnih uvjeta. Preporučuje se da razina buke u blizini radnih mjesta bude što niža kako bi se smanjio utjecaj na slušni sustav radnika. Za ležajeve u brzohodnim strojevima (s brzinama vrtnje iznad 1500 o/min) preporučljivo je da rade tiho i bez značajnih vibracija ili buke. To može značiti da se moraju primjenjivati odgovarajući ležajevi visoke kvalitete, pravilno podmazani i održavani kako bi se smanjila buka koja nastaje rotacijom ležajeva ili prijenosom vibracija na kućište ležaja i postolje stroja. Konkretno, nema strogo definirane "dozvoljene" razine buke za rad ležajeva u strojevima, već se izrađuju interne preporuke specifične za svaki tip stroja i njegovu primjenu. Ipak, stručnjaci za sigurnost na radu preporučuju da se razina buke što više smanji kako bi se osigurala udobnost radnika i smanjio rizik od oštećenja sluha. [16]

Prema međunarodnim standardima i mnogim nacionalnim zakonima, dozvoljena razina buke u radnim uvjetima varira ovisno o trajanju izloženosti. Na primjer, prema smjernicama koje su uobičajene u Europi i SAD-u preporučuju se slijedeći dozvoljeni intenziteti buke [16]:

- 85 decibela (dB): Maksimalna dozvoljena razina buke za osmosatni radni dan
- 90 dB: Pri ovoj razini buke, radnici smiju biti izloženi maksimalno četiri sata dnevno.
- 95 dB: Izloženost je ograničena na dva sata dnevno.
- 100 dB: Radnici smiju biti izloženi maksimalno jedan sat dnevno

4. STRATEGIJE I INDIKATORI NADZORA ZA ODRŽAVANJE LEŽAJEVA

Za učinkovito održavanje treba propisati precizne i pouzdane preventivne mjere i aktivnosti. Mjerenje vibracija je najpouzdanija preventivna mjera koja najranije i na najbolji način pokazuje stanje i otkriva pogoršanja u radnim karakteristikama rotirajućeg stroja. Ono omogućuje identificiranje naprezanja čim se pojavi, prije nego što dođe do nepovratne štete te također omogućuje prepoznavanje uzroka kvara [17]

4.1. Strategije održavanja

Jedan od glavnih zadataka inženjera održavanja je sprječavanje neplanskih zaustavljanja i pojave kvarova na strojevima. Strategije održavanja strojeva mogu se podijeliti u slijedeće četiri skupine [17]:

- Korektivno (reparativno) održavanje, podrazumijeva popravke neispravne opreme. Ovo održavanje stvara troškove popravka, troškove zastoja i kašnjenja zbog zaustavljanja proizvodnje.
- Korektivno održavanje, podrazumijeva popravke kada stroj počne pokazivati simptome kvara ili odstupanja radnih parametara izvan dozvoljenih tolerancija. Ovim načinom održavanja se nastoji ispraviti odstupanja radnih parametara stroja prije nego što se dogodi kvar s zastojem ili havarijom stroja.
- Preventivno održavanje: podrazumijeva predviđanje kvarova specifičnom dijagnostikom i održavanje opreme prije pojave kvara. Ovaj način održavanja može značajno smanjiti potrebu zaustavljanja proizvodnje zbog kvara stroja.
- Prediktivno održavanje (održavanje po stanju) podrazumijeva stalnu analizu rada opreme i primjenu održavanja kada pojedini pokazatelji daj naznaku pojave kvara ili kad se pojave vrijednosti izvan toleriranog pojasa radnih parametara opreme. Ovom strategijom se izbjegava većina kvarova jer se nikada ne prelazi očekivani vijek trajanja dijelova.

4.2. Indikatori nadzora

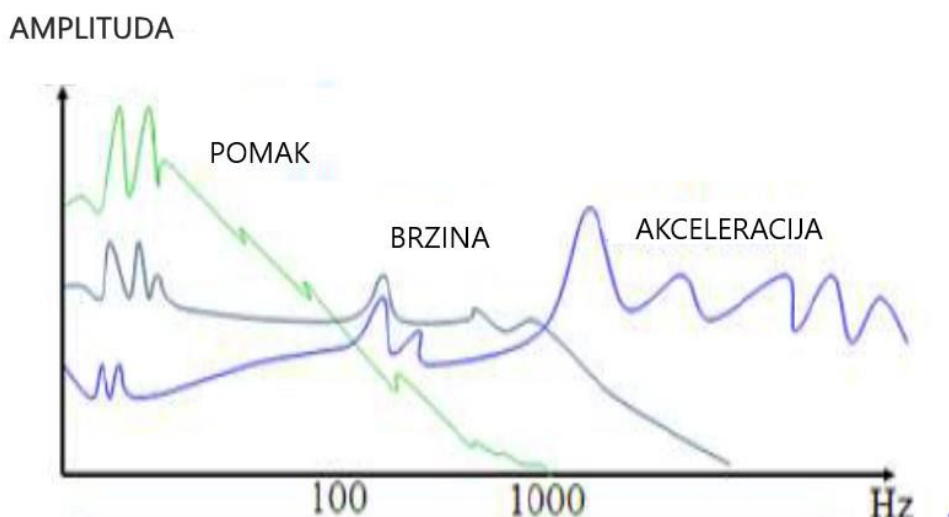
Za praćenje stroja potrebno je odabrati fizikalnu veličinu koju treba mjeriti, a tu fizikalnu veličinu predstavljaju indikatori nadzora.

za otkrivanje kvara u rotirajućim strojevima uobičajeno se mjeri amplituda pomaka, brzine ili ubrzanja vibracija, ovisno o frekvenciji dominantne vibracijske komponente stroja.

Budući da je pomak obrnuto proporcionalan kvadratu frekvencije, mjerenje u načinu pomaka učinkovito će smanjiti sva srednjefrekventna i visokofrekventna titranja te pojačati niskofrekventna titranja ispitivanog stroja ili strojnog elementa. Njegova primjena ograničena je na vrlo niske frekvencije: $f \leq 100$ Hz.

Brzina je obrnuto proporcionalna frekvenciji: što je frekvencija veća, to je brzina manja. Stoga je primjena senzora brzine vibracija ograničena je na niske frekvencije: $f \leq 1000$ Hz.

Ubrzanje vibracija, koje predstavlja dinamičke sile u rotirajućim ili vibrirajućim elementima stroja, ne ovisi o frekvenciji. Mjerenje ubrzanja u analizi vibracija može se točno i pouzdano primjenjivati u širokom frekvencijskom području: $0 \leq f \leq 20000$ Hz (Slika 19).



Slika 19. zbor fizikalnih veličina koje treba mjeriti ovisno o prirodi traženih grešaka [19]

Indikator nadzora je veličina izvedena iz tri osnovnih kinematičkih veličina koje karakteriziraju vibracije (ubrzanje, brzina, pomak), koja je osjetljiva na pojavu ili napredovanje greške ili kombinacije grešaka u radu stroja. Za ispravno praćenje, indikator nadzora mora imati dvije bitne kvalitete: jednostavnost mjerenja i značajnost izmjerenih veličina. Opis vibracijskog ponašanja stroja, praćenje promjena radnih karakteristika i postavljanje dijagnoze stanja stroja zahtijevaju upotrebu brojnih indikatora i kriterija. Prema matematičkom obliku mjernih veličina indikatori nadzora su podijeljeni u četiri skupine na: skalarne, spektralne, vektorske i vremenske. [19]

Ovisno o fizikalnom značenju mjerenih veličina, ovi indikatori se mogu grupirati u dvije glavne kategorije: skalarne indikatore koji kvantificiraju vibracijsku energiju koja nije izravno povezana s dinamičkim silama koje uzrokuju vibracije te tipološke (bihevioralne) indikatore koji kvantificiraju uglavnom vibracije iz stroja gdje je kvar. Skalarni indikatori su povezani s neobrađenim signalom ili signalom koji je prethodno obrađen. Ovaj indikator predstavlja karakterističnu veličinu vremenske promjene amplitude izmjenjenog signala (npr. efektivnu vrijednost, vršnu amplitudu, stopu modulacije), raspodjelu amplitude (npr. faktor vrha,) i njegovu spektralnu kompoziciju (npr. amplitudu spektralne komponente, efektivnu vrijednost skupine komponenti, harmonijsko izobličenje). Spektralni indikatori imaju veći značaj od skalarnih jer su osjetljivi na promjene u obliku signala i na promjene u energiji signala. S druge strane neosjetljivi su na učinke maskiranja signala, pod uvjetom da je rezolucija odabrane analize usklađena s frekvencijama ponavljanja traženih fenomena. Spektralni indikatori nude izuzetno zanimljive perspektive u kontekstu nadzora strojeva. Štoviše, oni predstavljaju značajan korak naprijed u usklađivanju između indikatora i grešaka, a jednostavnost njihove grafičke usporedbe s referentnim stanjem značajno olakšava interpretaciju njihovog porijekla. Vektorski indikatori su najmanje poznati za tehničku primjenu od ostalih tipova indikatora. Između njih se ističu orbitalni indikatori kao najpoznatiji u primjeni. Međutim, upotreba djelomično ili potpuno iskrivljenih signala još je uvijek rijetka. Ovaj pojam se često neizravno primjenjuje kada se prate fazne razlike između točaka i smjerova mjerenja kako bi se prikazalo gibanje određene frekvencije u prostoru uzduž osi vrtnje osovine ili ležaja. Vremenski indikatori se određuju iz vremenski ovisne promjene signala dobivene nakon njegovog filtriranja ili demodulacije. Prednost vremenskih indikatora je u tome da su izravno dostupni za vizualnu analizu i interpretaciju. Oni omogućuju dobivanje teško dostupnih informacija iz spektralnog područja, kao što su npr. informacije o broj odlomljenih zubi na zupčaniku, trajanje periodičnog impulsnog fenomena ili predočavanje oblika modulacije signala. [19]


EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA


5.1. Plan pokusa

U suradnji s tvrtkom Carlsberg d.d. u eksperimentalnom dijelu rada ispitivani su kuglični ležajevi korišteni u pogonu pivovare. Za ispitivanja vibracija izuzeti su potrošeni ležajevi iz punilice CAN limenki i istovrsni novi nekoristeni ležajevi. Ispitivani ležajevi različitih su dimenzija i proizvođača te su njihove tehničke karakteristike dane u tablicama 4 do 6:

Tablica 4. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju SNR 4203A

Proizvođač	SNR	
Uzorak	A	
Unutarnji promjer (mm)	17	
Vanjski promjer (mm)	40	
Širina (mm)	16	
Kontaktni kut	25 °	

Tablica 5. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju FAG 6301

Proizvođač	FAG	
Uzorak	B	
Unutarnji promjer (mm)	12	
Vanjski promjer (mm)	37	
Širina (mm)	12	
Kontaktni kut	25 °	

Tablica 6. Izgled i tehnički podaci o kugličnom ležaju NSK 6302

Proizvođač	NSK	
Uzorak	C	
Unutarnji promjer (mm)	15	
Vanjski promjer (mm)	42	
Širina (mm)	13	
Kontaktni kut	25 °	

Ukupno je ispitano 8 ležajeva. Dva potrošena ležaja SNR4203A te jedan takav nekorišteni. Zatim dva potrošena ležaja FAG6301 i jedan takav nekorišteni te jedan potrošeni ležaj NSK6302 i jedan takav nekorišteni. Za lakše razumijevanje teksta, navedeni ležajevi će se imenovati posebnim oznakama kako je navedeno u tablici 7.

Tablica 7. Oznake ispitnih uzoraka ležajeva

	Novi(nekorišten)	Jače korodiran	Slabije korodiran
SNR4203A	Uzorak A	Uzorak A1	Uzorak A2
FAG6301	Uzorak B	Uzorak B1	Uzorak B2
NSK6302	Uzorak C	Uzorak C1	-

Ovi ležajevi dio su stroja koji služi za punjenje CAN limenki te su bili zamijenjeni prije očekivanog roka što nije uobičajena praksa za tako kompleksan stroj. Cilj eksperimentalnog djela rada bio je istražiti zašto je došlo do prijevremene istrošenosti ležaja te usporediti vibracije i buku istrošenih i novih ležaja.



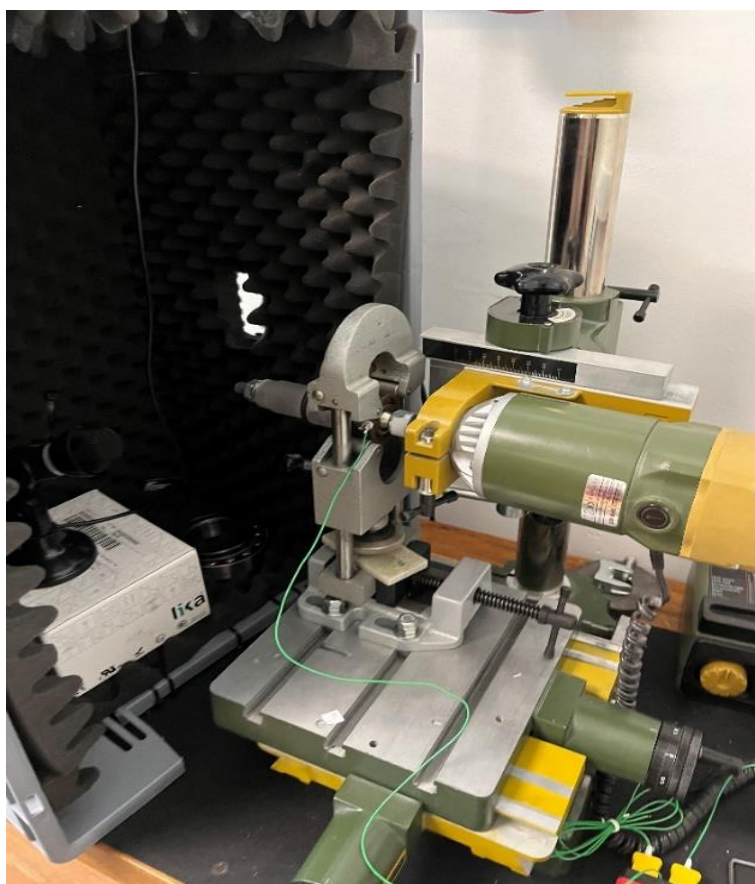
Slika 20. Punilica CAN limenki proizvođača SIMONAZZI



Slika 21. Punilica CAN limenki proizvođača SIMONAZZI

Na svim uzorcima provedena su sljedeća ispitivanja: ispitivanje vibracija, buke te promjene temperature dok je na uzorku C1 provedeno ispitivanje tvrdoće površine i ispitivanje mikrostrukture.

Na postavu prikazanom na slici 22 provedena su ispitivanja vibracija, buke i promjene temperature. Postav se sastoji od: Proxxon bušilice s mogućnošću promjene brzine vrtnje koja je služila kao izvor rotacije osovine od poliamida na koju je postavljen ispitni uzorak. Ispitni uzorak je učvršćen u škripac koji simulira kućište ležaja dok je škripac učvršćen na koordinatni stol s pomoću kojega se postiže centriranost ležaja. U pokusima ispitivanja ležaj je rotirao u praznom hodu (bez opterećenja) 3 min brzinom 945 o/min bez podmazivanja.



Slika 22. Provedba ispitivanja

Za provedbu ispitivanja vibracija korišten je „Vibration meter VM-6360“ uređaj za ispitivanje vibracija proizvođača „Schut“ s jednim mjerenjem vibracija u trajanju od 3 min na svakom uzorku. Uređaj je prikazan na slici 23.



Slika 23. Uređaj za ispitivanje vibracija

Ispitivanje razine buke zadanih uzoraka provedeno je mikrofonom koji je oko sebe imao izolacijsku kutiju sa poliuretanskom oblogom za adsorpciju zvuka i sprječavanje utjecaja neželjenih šumova iz okoline (Slika 24). Mjerni instrument je bio povezan s prijenosnim računalom i računalnim programom Audicity. U istom programu provedena je i analiza zvučnog signala prikupljenih tijekom rotacije uzoraka ležajeva brzinom vrtnje 945 o/min.



Slika 24. Mikrofon za ispitivanje buke ležaja i senzor vibracija ležaja

Mjerenje temperature tijekom rotacije i zagrijavanja ležaja provedeno je s pomoću digitalnog termometra „UT320D“ prikazanog na slici 25.

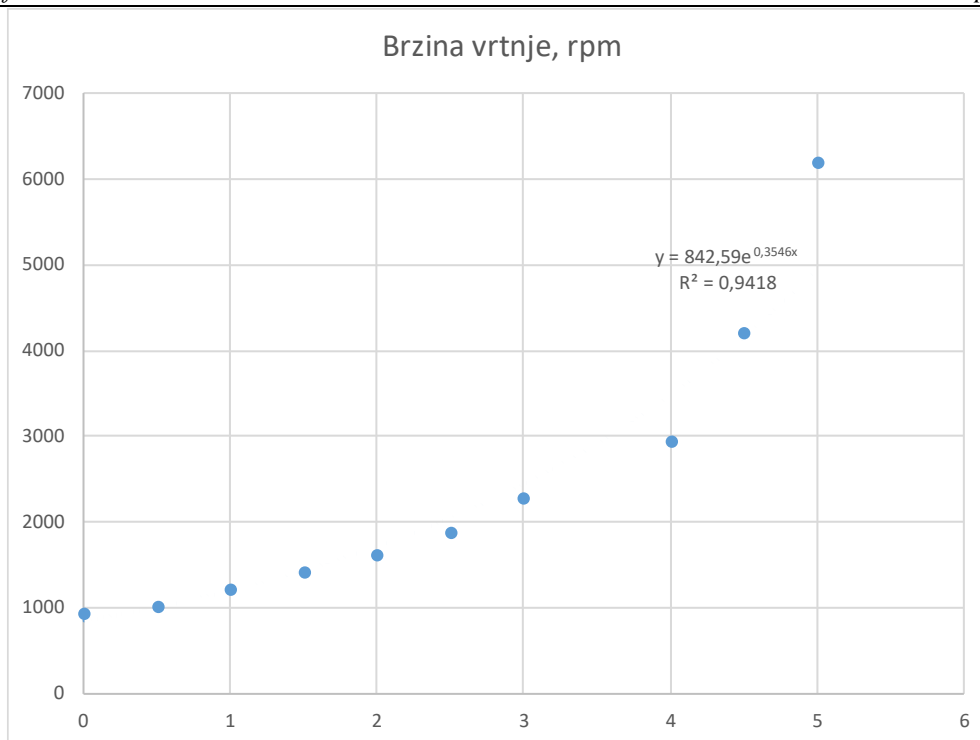


Slika 25. Digitalni termometar UT320D

Tijekom ispitivanja izmjerena je brzina vrtnje pomoću laserskog tahometra „UT373“ (slika 26) koji je služio za određivanje brzine vrtnje elektromotora Proxxon bušilice ovisne o položaju potencijometra na sklopu za elektroničku regulaciju broja okretaja.

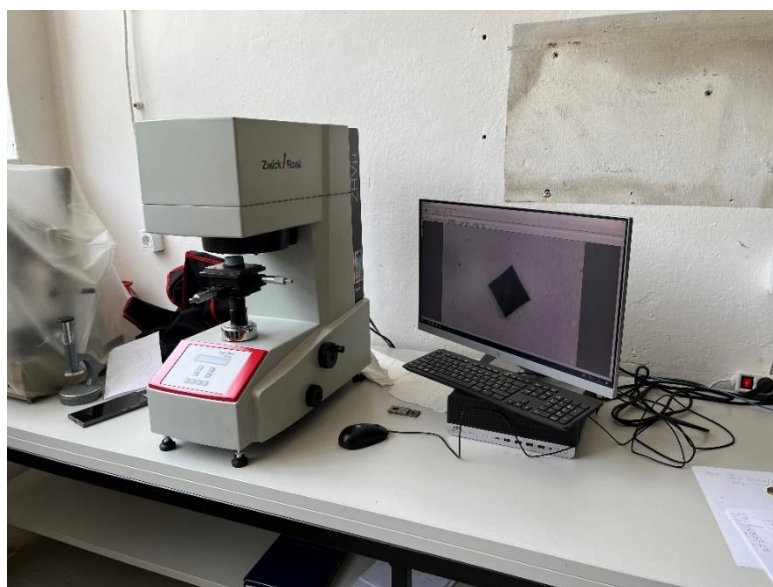


Slika 26. Laserski tahometar UT373



Slika 27. Izmjerena brzina vrtnje

Za provedbu ispitivanja tvrdoće korišten je uređaj Zwick/Roell tipa ZHV30 prema Vickers metodi pri opterećenju od 0,5 kilogram. Uređaj je prikazan na slici 28.



Slika 28. Uređaj za ispitivanje tvrdoće

Na uzorku C1 provedeno je ispitivanje tvrdoće i mikrostrukture ležaja. Ležaj je trebalo prije ispitivanja izrezat da bi se mogao posebno slikat vanjski i unutarnji prsten te kavez. Ispitivani ležaj prikazan je na slici 29.



Slika 29. Izrezani uzorak B1 (FAG6301) pripremljen za ispitivanje mikrostrukture i analizu istrošenih površina

6. REZULTATI ISPITIVANJA









6.1. Izgled istrošenih površina ležaja

Potrošeni ležajevi su prije ispitivanja slikani svjetlosnim mikroskopom (slika 30) te je na svakom slikan vanjski i unutarnji prsten te kavez u kojem se nalaze kuglice. Nove nekoristene ležajeve nije bilo potrebno slikati. Za ovu namjenu korišten je USB svjetlosni mikroskop s kamerom Toolcraft Digimicro Profi s kontinuirano promjenljivim povećanjem od 20:1 do 200:1 spojen na prijenosno računalo i računalnim programom Micro Capture Plus.






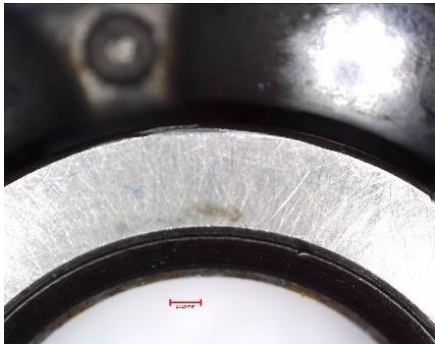




Slika 30. Analiza površine uzoraka primjenom svjetlosnog mikroskopa s kamerom



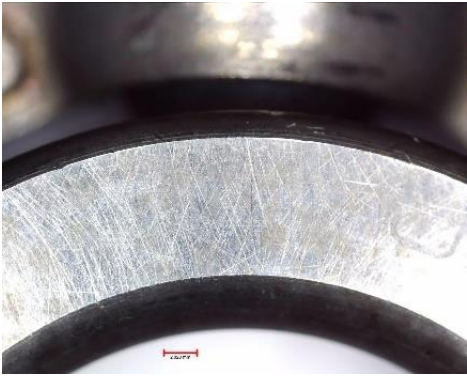

Tablica 8. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja SNR 4203A

Uzorak	A1	A2
Cijeli ležaj	 A photograph of a ball bearing labeled SNR4203A-1. The bearing shows significant wear and discoloration, particularly on the outer ring.	 A photograph of a ball bearing labeled SNR4203A-2. The bearing appears cleaner and less worn than the first one.
Vanjski prsten	 A close-up view of the outer ring of bearing A1. The surface is heavily corroded and pitted, with a rough, brownish texture. A red scale bar is visible in the top left corner.	 A close-up view of the outer ring of bearing A2. The surface is much smoother and more uniform in color, appearing dark grey/black. A red scale bar is visible in the top left corner.
Unutarnji prsten	 A close-up view of the inner ring of bearing A1. The surface shows signs of wear and discoloration, with a rough texture. A red scale bar is visible in the bottom left corner.	 A close-up view of the inner ring of bearing A2. The surface is smoother and more uniform in color. A red scale bar is visible in the bottom left corner.
Kavez	 A close-up view of the cage of bearing A1. The surface is heavily corroded and pitted, with a rough, brownish texture. A red scale bar is visible in the top right corner.	 A close-up view of the cage of bearing A2. The surface is much smoother and more uniform in color. A red scale bar is visible in the top right corner.

Tablica 9. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja FAG 6301

Uzorak	B1	B2
Cijeli ležaj		
Vanjski prsten		
Unutarnji prsten		
Kavez		

Tablica 10. Izgled istrošenih površina kugličnog ležaja NSK 6302

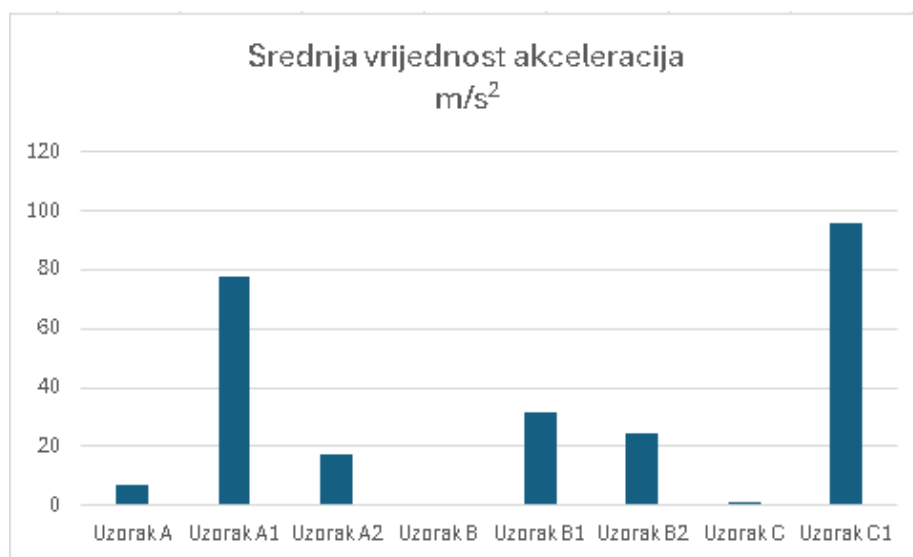
Uzorak	C1
Cijeli ležaj	
Vanjski prsten	
Unutarnji prsten	
Kavez	

Iz priloženih slika vidi se da su uzorci A1 i B1 najviše oštećeni korozijom. Posljedica toga je ta što su došli u doticaj s vodom zbog kvara na stroju i nisu bili adekvatno zaštićeni. Uzorci A2, B2 i C1 nemaju značajnija oštećenja od korozije. Na vanjskom i unutarnjem prstenu te na kavezu se vide jasni znakovi istrošenosti zbog nepravilnog rada stroja tijekom dužeg vremenskog perioda.

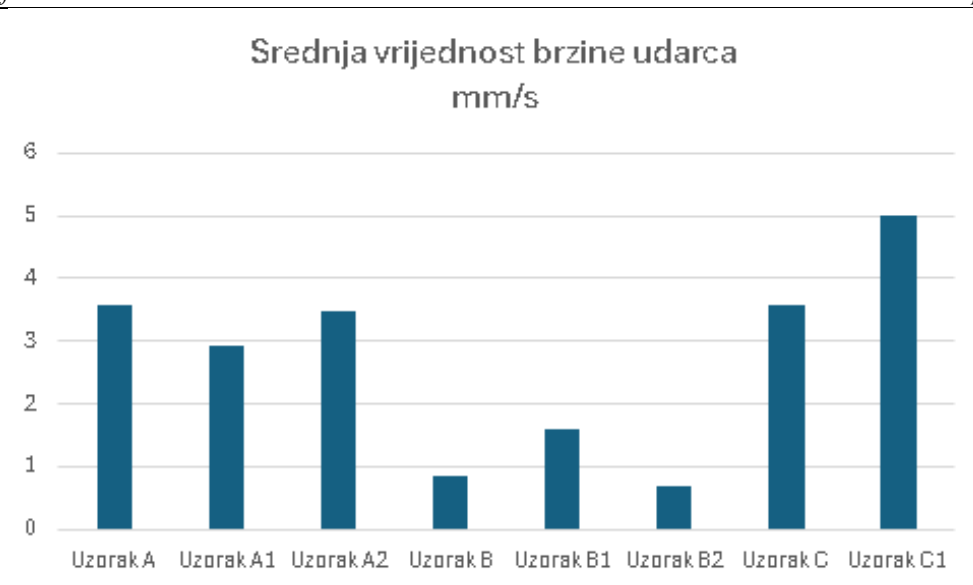
6.2. Ispitivanje vibracija ležajeva

Mjerenja vibracija bila su provedena samo jedanput na svakom uzorku ležaja pri brzini od 945 o/min u trajanju od 3 min. Kod mjerenja vibracija izmjereno je 10 vrijednosti mjerljivih parametara vibracije: brzine, akceleracije pomaka te frekvencije vibracija s najvećim pomakom.

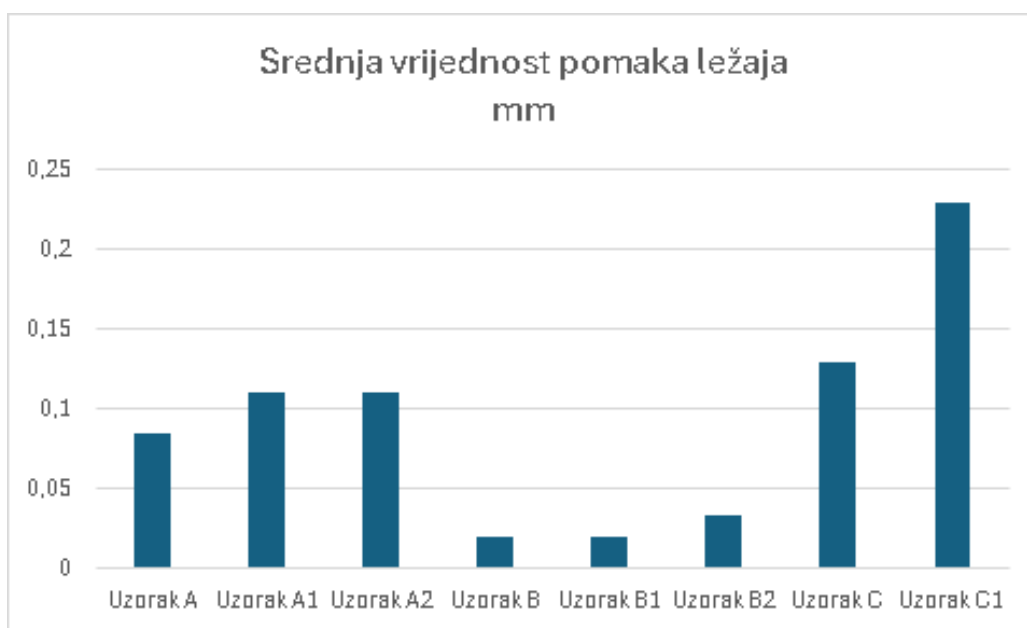
Na slikama 31 do 33 prikazane su srednje vrijednosti akceleracije, srednje vrijednosti brzine i srednje vrijednosti pomaka za svaki uzorak ležaja .



Slika 31. Srednja vrijednost akceleracije vibracija ležaja pri brzini vrtnje 945 o/min



Slika 32. Srednja vrijednost brzine vibracija pri brzini vrtnje ležaja 945 o/min



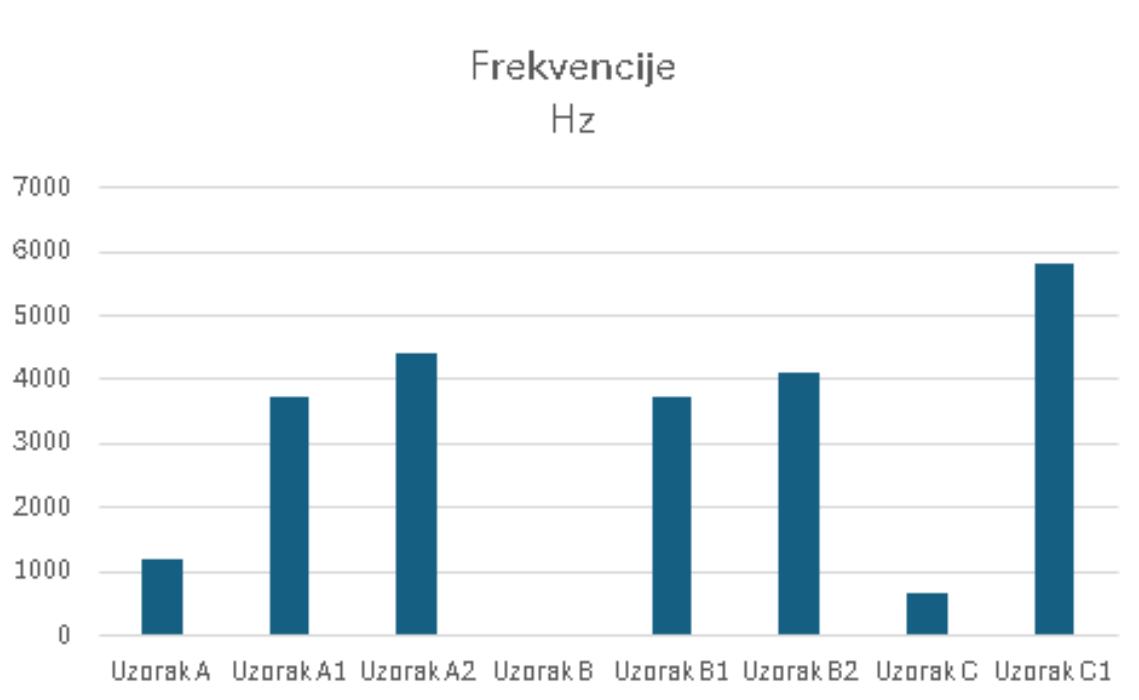
Slika 33. Srednja vrijednost pomaka vibracija ležaja pri brzini vrtnje 945 o/min

Iz slika 31, 32 i 33 može se zaključiti sljedeće:

- najveću vrijednost akceleracije brzine udarca i pomaka pokazao je ležaj C1 što je posljedica njegovih površinskih nepravilnosti i istrošenosti.
- Uzorci A, B i C pokazali su očekivano najmanje vrijednosti akceleracije vibracija dok su kod mjerenja brzine udarca i pomaka pokazali nešto više vrijednosti što može biti uzrok uhadavanja i trenja u mazivu.

- Ostali uzorci pokazali su očekivane rezultate vibracijskih parametara dok su jače korodirani uzorci A1 i B1 pokazali veće vrijednosti akceleracije vibracija što je posljedica same korozije na njima koja negativno utječe na rad ležaja.

Iz rezultata mjerenja, izmjerene su njene vrijednosti, te na slici 34 prikazane su srednje vrijednosti frekvencija vibracija s najvećom amplitudom za svaki ispitni uzorak ležaja. Za uzorak B se nije mogla odrediti frekvencija jer postav mjernog uređaja zbog malog promjera ležaja nije to dozvoljavao.



Slika 34. Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 945 o/min

Pošto su svi ležajevi od sličnih dimenzija, izračunate se karakteristične frekvencija dijelova ležaja za brzinu vrtnje 945 o/min koje su prikazane u tablici 11.

Tablica 11. Karakteristične frekvencija za rad ležajeva

Vanjski prsten	Unutarnji prsten	Kuglice	Kavez
65 Hz	105 Hz	50 Hz	10 Hz

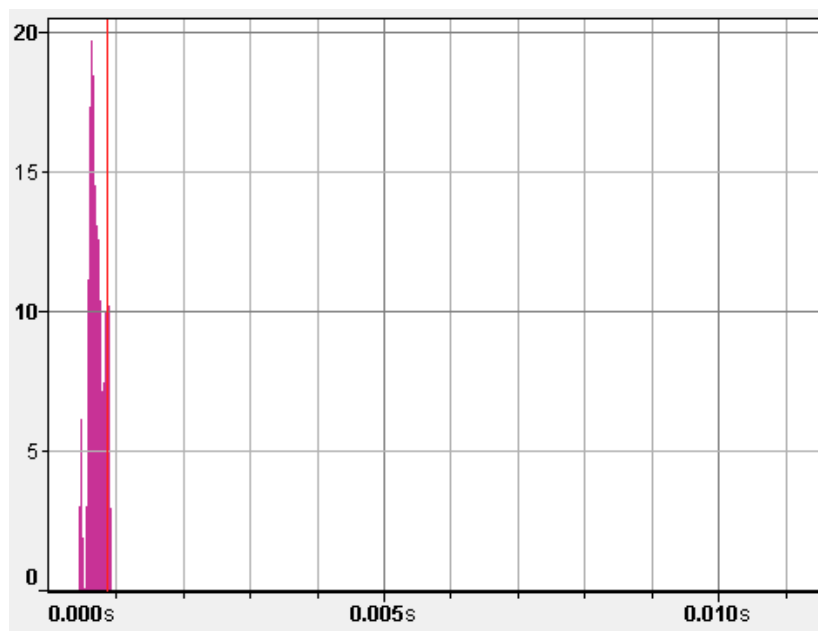
Uspoređujući tablicu 11 i izmjerene frekvencije na slici 34 može se vidjeti da su uzorci A, B i C unutar očekivanih raspona frekvencija dok je kod uzorka A nešto povišena vrijednost što može biti posljedica uhodavanja ili okolnih čimbenika. Ostali uzorci pokazuju rezultate raspona

frekvencija od 3000 Hz do 6000 Hz što pokazuje značajna oštećenja unutar ležajeva, kao što su kontakt metal na metal, mikroskopski udarci i ostala površinska oštećenja. Ovakve visoke frekvencije su direktno povezane s pukotinama u ležajevima, abrazijskim i adhezijskim oštećenjima te korozijom.

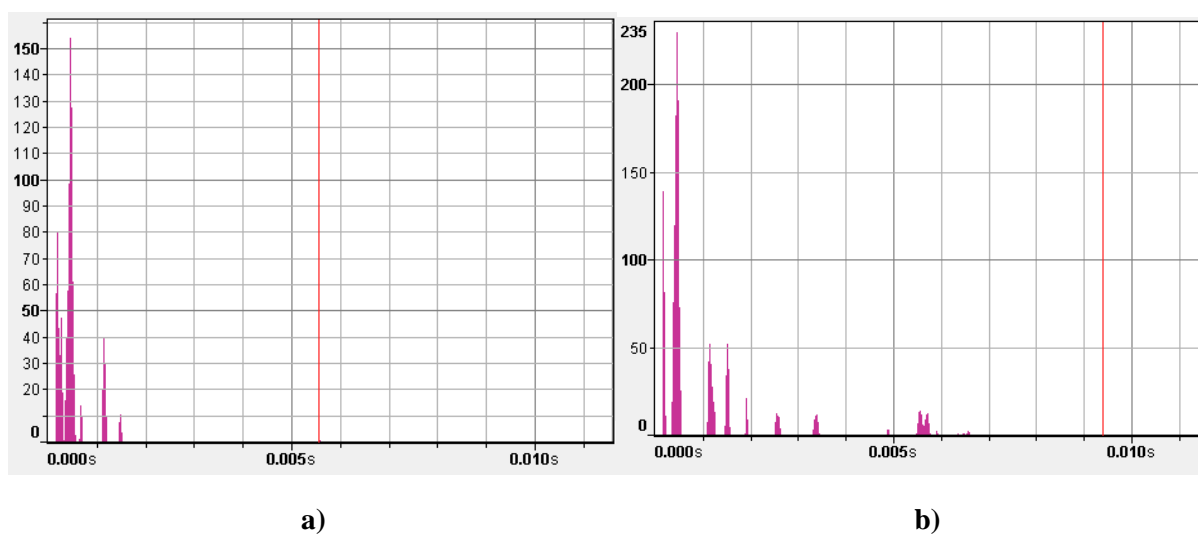
6.3. Ispitivanje buke

Ispitivanje buke provedeno je s pomoću mikrofona i računalnog programa za snimanje i analizu zvuka „Audacity“ na način koji je opisan u prethodnom poglavlju.

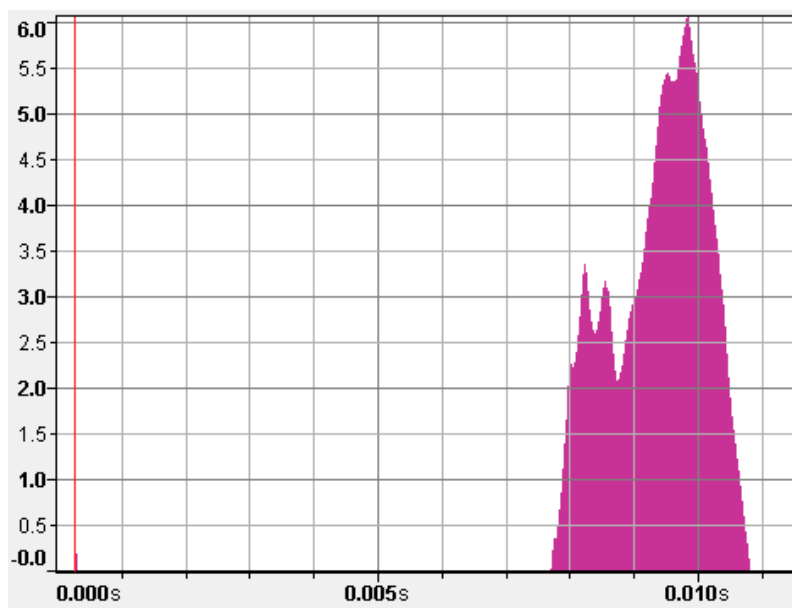
U nastavku su prikazani grafovi ovisnosti intenziteta zvuka (dB) o frekvenciji zvuka. Frekvencija zvuka je na horizontalnoj osi dijagrama prikazana u vremenskoj skali, u zapisu $t=1/f$. U ovom načinu zapisa kraća vremena na horizontalnoj osi odgovaraju zvukovima više frekvencije.



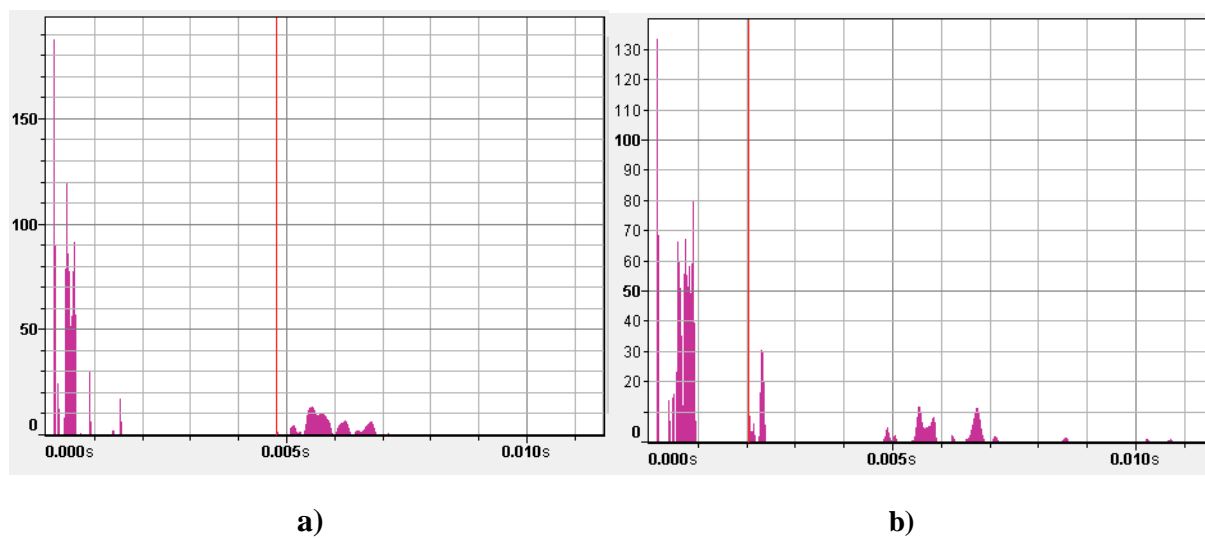
Slika 35. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak A



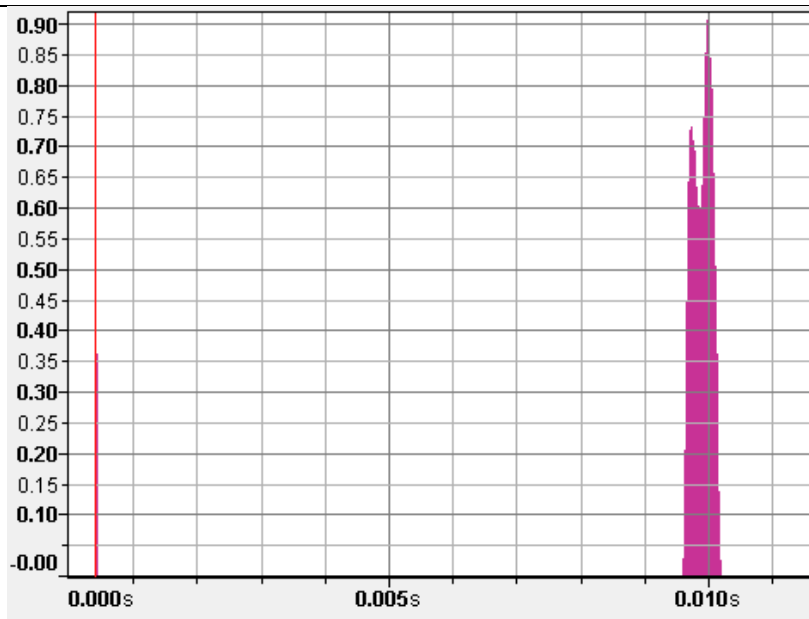
Slika 36. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke: a) uzorak A1 b) uzorak A2



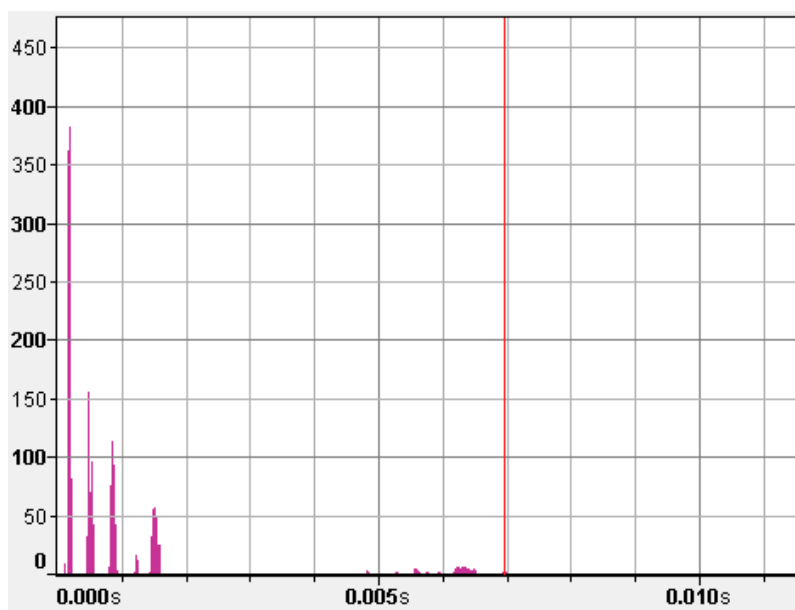
Slika 37. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak B



Slika 38. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke: a)uzorak B1 b) uzorak B2



Slika 39. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke za uzorak C



Slika 40. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke-za uzorak C1

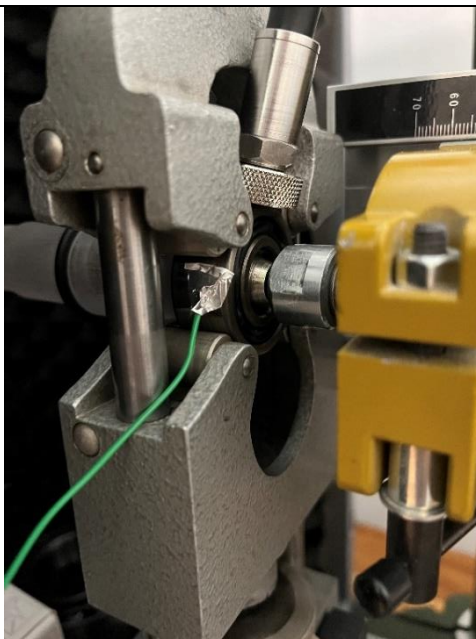
Iz spektrograma na slikama 35 do 40 jasno se vidi da novi ležajevi, uzorci A, B i C imaju znatno manji intenzitet buke te one u sebi imaju samo jedan spektar frekvencije koji ukazuje na miran i tih rad ležaja dok ostali uzorci očekivano pokazuju znatno veće intenzitete buke te njihov širi spektar frekvencija ukazuje na nepravilnosti u njima samima odnosno ukazuje na nepravilan rad ležaja i njegovu istrošenost.

6.4. Analiza zagrijavanja ležaja

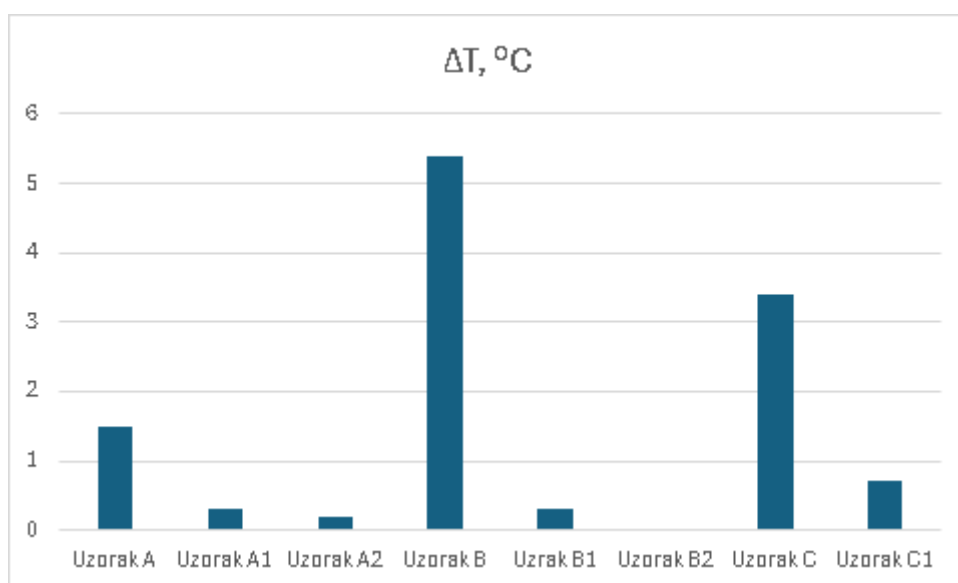
Osim buke i vibracija, također je izmjerena temperatura uzoraka prije i poslije ispitivanja, odnosno zagrijavanje ležaja tijekom ispitivanja. Ispitivanje je provedeno s pomoću digitalnog termometra „UT320D“ kako je već opisano u prethodnom poglavlju. Cilj ispitivanja bio je vidjeti koliko se ležaj zagrije tokom rada te vidjeti ima li kakvih značajnih odstupanja tijekom ispitivanja. U tablici 12 prikazane su temperature prije i poslije ispitivanja te njihova razlika.

Tablica 12. Temperature uzoraka prije i poslije ispitivanja

Temperatura °C			
	T_0	T_1	ΔT
Uzorak A	25,4	26,9	1,5
Uzorak A1	24,5	24,8	0,3
Uzorak A2	24,4	24,6	0,2
Uzorak B	24,1	29,5	5,4
Uzorak B1	26,4	26,7	0,3
Uzorak B2	26,5	26,5	0
Uzorak C	21	24,4	3,4
Uzorak C1	23,5	24,2	0,7



Slika 41. Temperaturna sonda za mjerenje temperature ležaja



Slika 42. Promjena temperature ležaja usred ispitivanja

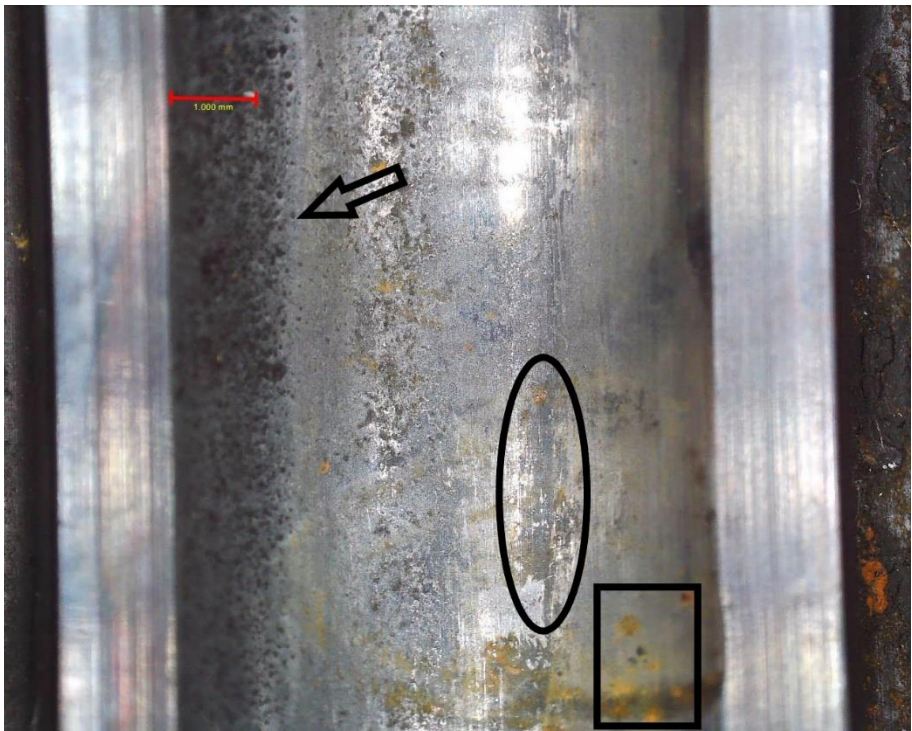
Iz histograma na slici 42 može se jasno vidjeti da su najveće promjene temperature na novim ležajevima odnosno uzorcima A, B i C. Posljedica toga je što su kuglice ležajeva zatvorene te tad mazivo djeluje kao izolator, dok je još jedan od razloga samo uhadavanje ležaja. Ostali uzorci nemaju toliko primjetno povećanje temperature što je razlog taj da su ležajevi otvoreni i nemaju maziva na sebi te je u tom slučaju mala promjena temperature isključivo posljedica trenja između kuglica i prstenova ležaja.

6.5. Analiza istrošenih površina

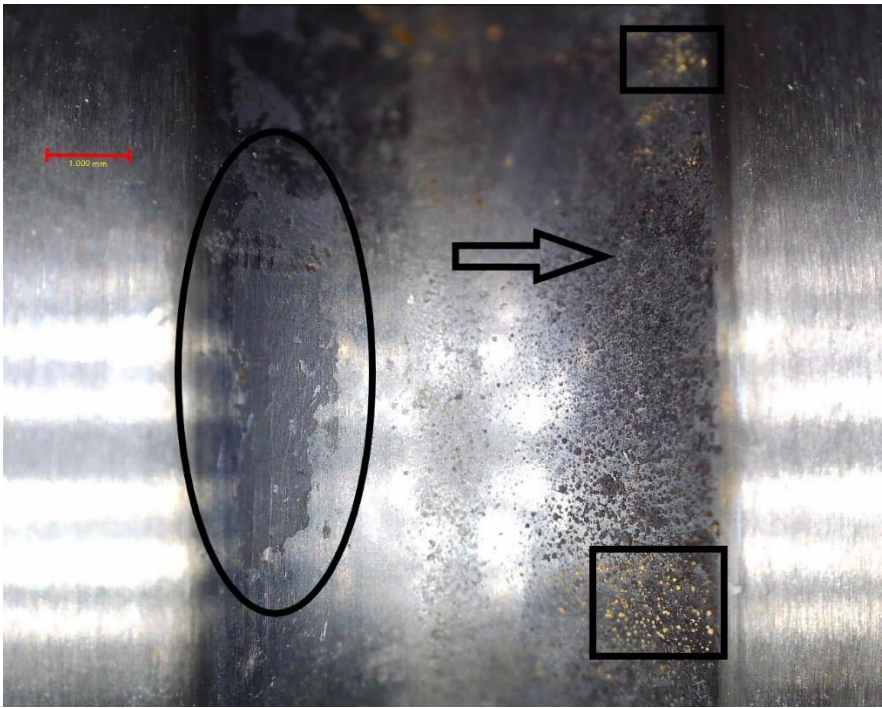
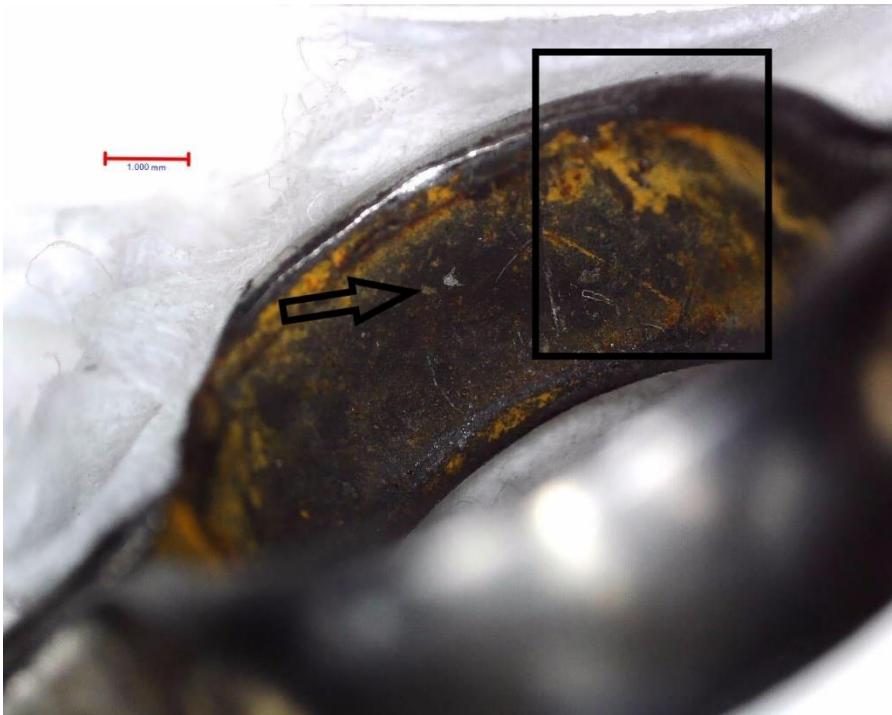
Tijekom ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja ležajevi su bili izloženi rotaciji na brzini od 945 o/min u trajanju od 3 min. Ovaj kratkotrajni rad u uvjetima bez opterećenja i bez podmazivanja nije mogao ostaviti značajne tragove trošenja na novim ležajima. Stoga je za reprezentativni primjer trošenja analiziran uzorak C1 koji je poslije ispitivanja vibracija i buke bio izrezan i metalografski pripremljen za ispitivanje tvrdoće i analizu mikrostrukture.

Jamice trošenja na površini valjne staze i kuglica ležaja C1 predstavljaju početak umora površine i one su u tablicama 13 do 15 prikazane strelicom. Zaokruženi dio na površini prstena pokazuje pojavu adhezijskog trošenja kao posljedicu klizanja valjnih tijela u radu ležaja dok dio koji je označen unutar kvadrata pokazuje znakove korozije.

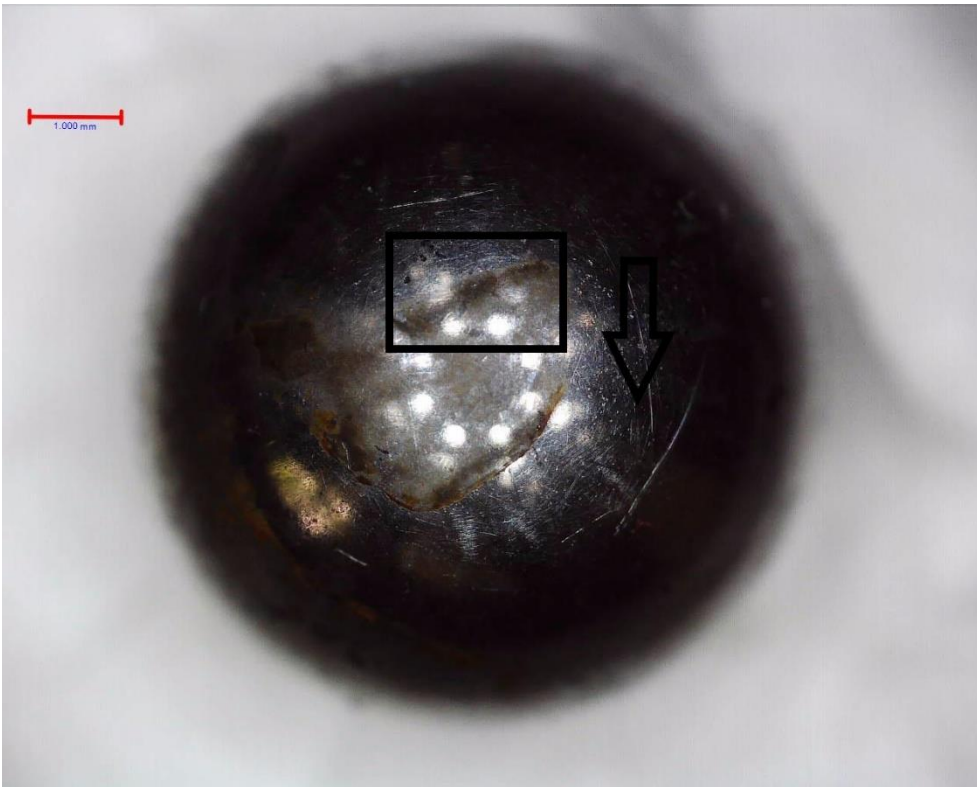
Tablica 13. Tragovi trošenja na vanjskom prstenu ležaja

	Uzorak C1
Vanjski prsten	

Tablica 14. Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu i kavezu ležaja

Uzorak C1	
Unutarnji prsten	
Kavez	


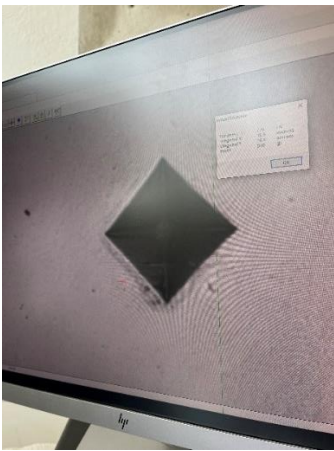
Tablica 15. Tragovi trošenja na kuglici ležaja

	Uzorak C1
Kuglice	

6.6. Ispitivanje tvrdoće ležaja

Tvrdoća ležaja direktno utječe na izdržljivost, nosivost i trajnost ležajeva. Za ovaj dio ispitivanja nije bilo potrebno ispitati sve ležajeve pošto su svi izrađeni od istog čelika DIN EN 100Cr6 te je kao reprezentativni ležaj uzet uzorak C1 i na njegovom presjeku napravljeno 6 otisaka tvrdoće metodom Vickers pri opterećenju od 4,91 N u Laboratoriju za mehanička ispitivanja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Tablica 16. Otisci na uzorku C1

	
Otisak 1	Otisak 2

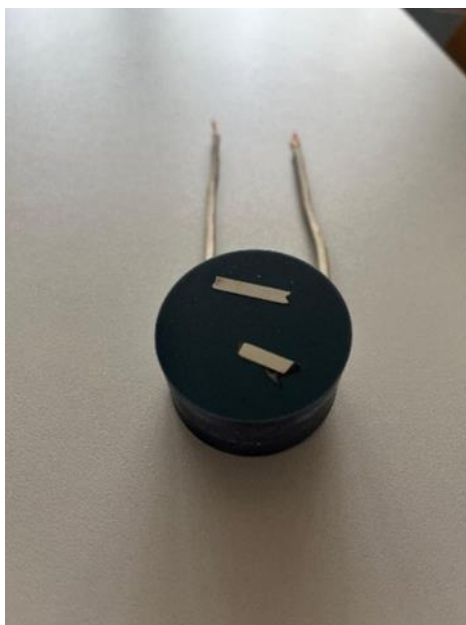
Tablica 17. Izmjerene vrijednosti tvrdoće na uzorku C1

Otisak	Tvrdoća HV 0,5
1	740
2	719
3	724
4	729
5	736
6	734
Srednja vrijednost:	730

Srednja vrijednost tvrdoće površine iznosi 730 HV 0,5 dok standardna devijacija iznosi 7,18. Ovako mala standardna devijacija ukazuje na izrazito homogenu mikrostrukturu koja je nastala niskotemperaturnim popuštanjem martenzita.

6.7. Analiza mikrostrukture ležaja

Za analizu mikrostrukture, metalografski je pripremljen uzorak ležaja C1. Uzorak je zaliven u polimernu masu, te metalografski brušen i poliran u laboratoriju za metalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Izgled metalografskog uzorka je prikazan je na slici 43.



Slika 43. Uzorak C1 zaliven u polimernu masu

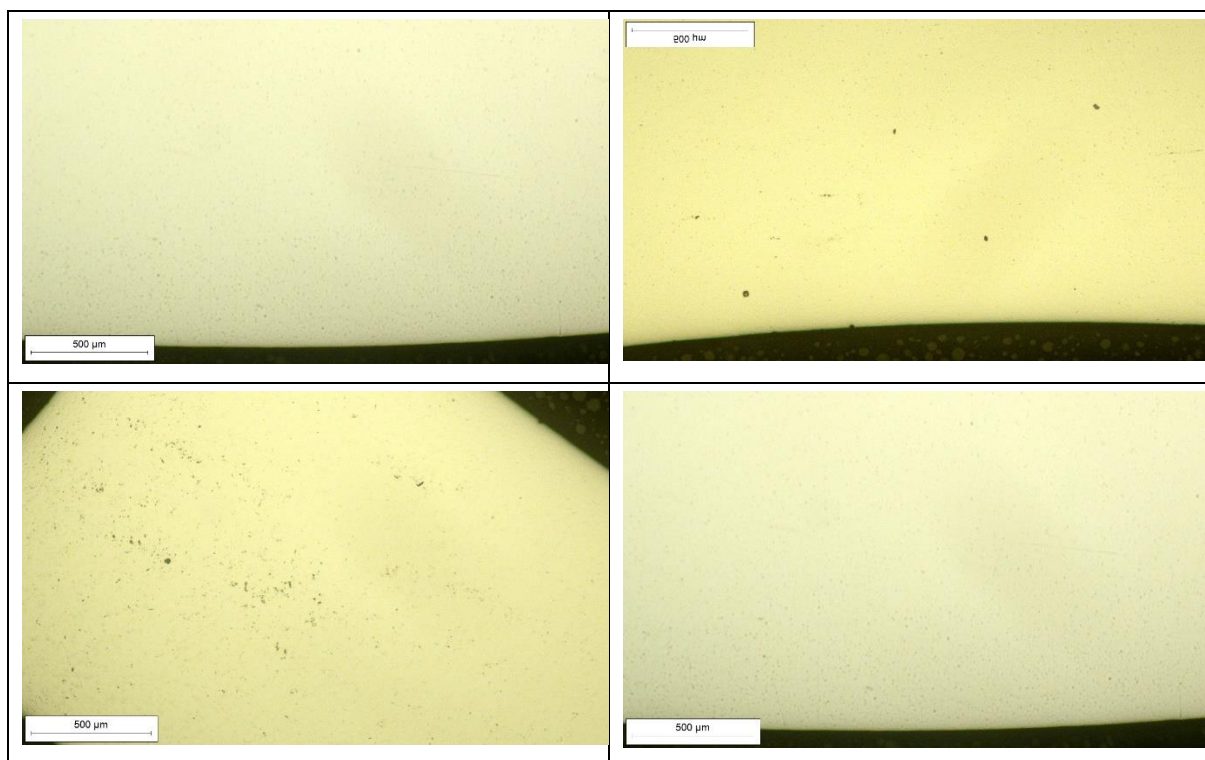
Prije analize mikroskopom, uzorak je nagrizen u 3,5% otopinu nitala u trajanju od 30 sekundi, dok je kemijska reakcija zaustavljena vodom. Nagrizanje se provodi da se jasnije izraze granice zrna.

Analiza mikrostrukture provedena je na metalografskom mikroskopu Olympus GX51 (slika 44) pri povećanjima od 50×, 100×, 200× i 500×. Uređaj sadrži programski paket za obradu slike kojim je moguće mjerenje veličine zrna planimetrijskom metodom i metodom presjeka te određivanje debljine slojeva.



Slika 44. Metalografski mikroskop Olympus GX51

Tablica 18. Mikrostruktura uzorka C1 povećanje 500x



Gledajući slike iz tablice 16 može se jasno vidjeti homogena mikrostruktura nastala niskotemperaturnim popuštanjem martenzita. Ova mikrostruktura kombinira tvrdoću martenzita s poboljšanom žilavošću i smanjenom krhkosti. Nadalje mogu se uočiti sitni sekundarni karbidi i karbidi popuštanja koji su ravnomjerno raspoređeni po matrici popuštenog martenzita.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja vibracije, buke, zagrijavanja ležaja, ispitivanja tvrdoće površine i mikrostrukture te analizom trošenih površina može se zaključiti sljedeće:

- Pri ispitivanju vibracija, najveću vrijednost akceleracije brzine udarca i pomaka ima ležaj C1 što je uzrok njegovih površinskih nepravilnosti i istrošenosti, dok su uzorci A, B i C pokazali očekivano najmanje vrijednosti. U ispitivanjima brzine udarca i pomaka i dalje je uzorak C1 pokazao najveće vrijednosti dok su ostali uzorci pokazali nešto manje vrijednosti. Pri ispitivanju frekvencije vibracija najveći raspon frekvencija je postigao uzorak C1 dok su novi (nekorišteni) ležajevi, uzorci A, B i C pokazali očekivano najmanji raspon frekvencija.
- Tijekom ispitivanja buke uzorci A, B i C (novi ležajevi) pokazali su najmirniji rad, dok je najveću buku proizvodio uzorak C1. Ostali uzorci imali su sličnu razinu buke tijekom ispitivanja.
- Pri ispitivanju zagrijavanja ležajeva najveći prirast temperature je pokazao uzorak B, zatim ga slijede uzorci A i C. Ovakvi rezultati uzrok su uhodavanja ležaja te pošto su kuglice zatvorene mazivo u tom slučaju djeluje kao izolator. Ostali uzorci pokazali su male ili nikakve promjene temperature što je isključivo posljedica sile trenja.
- Iz rezultata analize trošenja uzorka C1 uočene su velike količine rupica na površini koje predstavljaju početak umora površine. Nadalje uočeni su tragovi adhezijskog trošenja kao posljedica klizanja valjnih tijela.
- Mjerenjem tvrdoće površine uočena je mala standardna devijacija koja ukazuje na izrazito homogenu mikrostrukturu.
- Ispitivanje mikrostrukture površine pokazalo je homogenu mikrostrukturu nastalu niskotemperaturnim popuštanjem martenzita. U martenzirnoj matrici uočeni su ujednačeno raspoređeni sitnozrnati sekundarni karbidi i karbidi popuštanja u.

Nakon provedenih ispitivanja može se zaključiti da su istrošeni ležajevi očekivano pokazali najlošije rezultate u pokusu ispitivanja vibracija i buke. Novi ležajevi pokazali su očekivano niske vrijednosti parametara vibracija i buke s napomenom da se novi ležajevi jače zagrijavaju od istrošenih što je posljedica uhodavanja.

Metoda snimanja vibracija, buke i zagrijavanja ležajeva preporučuje se za primjenu u održavanju strojeva i otkrivanju grešaka i nepravilnosti u radu ležajeva .

LITERATURA

- [1] Bhadeshia, HKDH., (2011.) Steels for bearings. Progress in Material Science, str. 270 - 411
- [2] „Ležaj“ Wikipedia, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Le%C5%BEaj> (19.04.2024.)
- [3] Decker K-H. Elementi strojeva. Zagreb: Tehnička knjiga; 2006.
- [4] <https://blog.myrank.co.in/rolling-friction/> (19.04.2024.)
- [5] https://www.nsk.com/common/data/ctrGpdf/bearings/split/e1102/nsk_cat_e1102m_a105-113.pdf dostupno (19.04.2024.)
- [6] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_10_lezaji.pdf (19.04.2024.)
- [7] Qiu M, Chen L, Li Y, Yan Jiafei. Bearing Tribology Principles and Applications
- [8] Novosel M., Cajner F., Krumes D., Alatni materijali, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [9] Dr.S.J.Locey., An overview of bearing vibration analysis
- [10] Halep, A.: Metode za procjenu stanja kotrljajućih ležaja. 1 Konferencija „Održavanje“; Zagreb, 2010.
- [11] ... SKF Reliability Systems. Vibration Diagnostic Guide CM5003. San Diego; 2000.
- [12] <https://www.marposs.com/eng/product/vibration-sensors> (22.04.2024.)
- [13] Scheffer C, Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Oxford; 2004.
- [14] Tandon, N., Choudhury, A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearing, August 1999., str. 469-480.
- [15] <https://mikroklima.com.hr/mjerni-rucni/130-trotec-bs06-mjerac-jacine-zvuka.html> (19.04.2024)
- [16] Zakon o zaštiti na radu (»Narodne novine«, br 59/96, 94/96, 114/03 i 100/04)
- [17] https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_109_de_en.pdf (22.04.2024)
- [18] https://www.fbj-bearings.com/pdf_engineeringdata/calculationofservicelife.pdf (22.04.2024.)
- [19] Farhan F. Mutwalli, Sandeep P. Nevagi: Review of Rotating Machinery Fault Diagnosis with Vibration analysis, 2005., 779-788
- [20] Zahari Taha, Indro Pranoto: Acoustic emission application for monitoring bearing defects., 2018 169-196

-
- [21] Amal Boukili, Mohammed El Hammoumi: Preventive maintenance by vibratory analysis: case study.,2015 291-299
- [22] Stranica HR [Internet]. Ifm.com. [pristupljeno: 2024-7-10]. Dostupno na: <https://www.ifm.com/hr/hr>