

# Ultrazvučna dijagnostika u održavanju

---

Milosavljević, Viktor

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:241073>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Viktor Milosavljević**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak, dipl. ing.

Student:

Viktor Milosavljević

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Dragutinu Lisjaku, na stručnim savjetima i iskazanoj pomoći prilikom izrade ovog rada.

Viktor Milosavljević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **VIKTOR MILOSAVLJEVIĆ** JMBAG: **0035221771**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ultrazvučna dijagnostika u održavanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ultrasound diagnostics in maintenance**

Opis zadatka:

Ultrazvuk se smatra prvom linijom obrane za pronalaženje nedostataka koji mogu dovesti do kvara nekog tehničkog sustava. Prvi znakovi promjene u funkcionalnosti tehničkog sustava obično se očituju u promjeni ultrazvučnih frekvencija i to u relativno ranoj fazi degradacije sustava. Ova značajka predstavlja ogromnu prednost u primjeni ove dijagnostičke metode u odnosu na druge metode koje se primjenjuju u održavanju tehničkih sustava.

Na temelju prethodno navedenog, u radu je potrebno:

1. Detaljno opisati metodu ultrazvučne dijagnostike u održavanju tehničkih sustava.
2. Proanalizirati i opisati primjere primjene u industriji.
3. Napraviti mjerenje i dati procjenu stanja rotacijskog stroja na temelju ultrazvuka.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Dragutin Lisjak

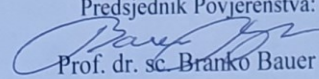
Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. - 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. - 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. Uvod .....	1
2. Osnove ultrazvuka .....	2
2.1. Brzina ultrazvuka .....	2
2.2. Akustična impedancija i njezin utjecaj na širenje .....	4
3. Osnove ultrazvučne dijagnostike .....	6
3.1. Vrste senzora.....	6
3.1.1. Beskontaktni senzori .....	6
3.1.2. Kontaktni senzori .....	9
3.2. Heterodinski princip i primjena .....	10
3.3. Mjerenje ultrazvuka .....	11
3.4. Snimanje signala u vremennoj i frekvencijskoj domeni .....	12
4. Primjena ultrazvučne dijagnostike u industriji .....	14
4.1. Propuštanja.....	14
4.2. Inspekcija ventila i sustava pare.....	17
4.3. Ležaji i podmazivanje .....	18
4.3.1. Podmazivanje ležajeva.....	19
4.3.2. Detekcija kvarova ležajeva .....	21
4.4. Inspekcija pumpi .....	23
4.5. Inspekcija elektroinstalacija .....	24
4.5.1. Korona.....	25
4.5.2. Praćenje.....	26
4.5.3. Električni luk.....	27
5. Eksperimentalne metode.....	28
5.1. Sonavu kamera .....	28
5.2. Simulator kvarova ležaja.....	30
5.2.1. Kuglični ležaj ER12 .....	31
6. Rezultati mjerenja i diskusija.....	35
6.1. Oštećenje kuglice .....	35
6.2. Oštećenje unutarnjeg prstena .....	37
6.3. Oštećenje vanjskog prstena .....	38
6.4. Kombinacija svih oštećenja .....	40
7. ZAKLJUČAK.....	42

## POPIS SLIKA

Slika 1. Beskontaktni senzori; a)Fleksibilni senzor; b) Parabolični senzor; c) EDS [2]	7
Slika 2. Zaštita od drugog izvora pomoću krpe [2].....	7
Slika 3. Blokiranje drugog izvora pomoću pozicioniranja tijela [2] .....	8
Slika 4. Prekrivanje propištanja krpom [2] .....	8
Slika 5. Upravljanje refleksijom ultravjeka [2].....	9
Slika 6. Kontaktni senzori; a) Iglasti kontaktni senzor; b) RS1 najvojni senzor [2].....	10
Slika 7. Prikaz „Crest“ fakotra, RMS-a i „peaka“.....	12
Slika 8. Prikaz vremenske domene oštećenog ležaja [2] .....	13
Slika 9. Prikaz frekvencijske domene oštećenog ležaja [2] .....	13
Slika 10. Primjer propuštanja komprimiranog zraka [2].....	15
Slika 11. Inspekcija ventila bezkontaktnim senzorom [2] .....	17
Slika 12. Primjer loše podmazanog ležaja i krajnja posljedica [7] .....	20
Slika 13. Primjer vremenskog signala dobro podmazanog ležaja [6] .....	20
Slika 14. Primjer vremenskog signala loše podmazanog ležaja [6].....	21
Slika 15. Prikaz oštećenih impelera pumpe [2].....	23
Slika 16. Proces nastajanja ozona [2].....	25
Slika 17. Prikaz mogućih nastanka korone [2].....	25
Slika 18. Prikaz vremenskog signala korone [2].....	26
Slika 19. Prikaz vremenskog signala praćenja [2] .....	26
Slika 20. Prikaz nastanka električnog luka [2].....	27
Slika 21. Prikaz vremenskog signala električnog luka [2] .....	27
Slika 22. Sonavu kamera [8] .....	28
Slika 23. Prikaz funkcionalnosti ultrazvučne kamere [8] .....	29
Slika 24. Prikaz zaslona za upravljanje ultrazvučnom kamerom[8] .....	30
Slika 25. Simulator kvarova ležaja [9] .....	31
Slika 26. kuglični ležaj ER12 [10] .....	32
Slika 27. Dimenzije ležaja ER12 [11].....	33
Slika 28. Nacrt ležaja ER12 [11].....	33
Slika 29. Primjeri oštećenja kugličnog ležaja; a) Normalan ležaj; b) Ležaj sa oštećenjem vanjskog prstena; c) Ležaj sa oštećenjem unutrašnjeg prstena; d) Ležaj sa oštećenom kuglicom ; [12].....	34
Slika 30. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje kuglice ležaja .....	35
Slika 31. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećene kuglice .....	36
Slika 32. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje unutarnjeg prstena ležaja.....	37
Slika 33. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećenog unutarnjeg prstena .....	37
Slika 34. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje vanjskog prstena ležaja .....	38
Slika 35. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećenog vanjskog prstena.....	39
Slika 36. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje kombinaciju svih oštećenja.....	40
Slika 37. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja svih kvarova .....	40

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjeri brzina.....	4
Tablica 2. Opis funkcionalnosti ultrazvučne kamere [8] .....	29
Tablica 3. Specifikacije ležaja ER12 [10] .....	32
Tablica 4. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećene kuglice .....	36
Tablica 5. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog unutarnjeg prstena .....	38
Tablica 6. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog vanjskog prstena.....	39
Tablica 7. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog sa sva tri kvara.....	41



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\lambda$	m	Valna duljina
$f$	Hz	Frekvencija
$v$	m/s	Brzina prostiranja ultrazvuka
$E$	N/m <sup>2</sup>	Elasticitet materijala
$\rho$	N/m <sup>3</sup>	Gustoća materijala
$Z$	Ns/m <sup>3</sup>	Akustična impedancija
$p$	N/m <sup>2</sup>	Zvučni tlak
$U$	m <sup>3</sup> /s	Volumenski protok
$z$	Ns/m <sup>3</sup>	Specifična akustična impedancija

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je dijagnostika u održavanju primjenom ultrazvuka. Rad se sastoji od teorijskog i praktičnog dijela. U teorijskom dijelu opisane su osnove ultrazvuka, ultrazvučne dijagnostike i primjene ultrazvuka u industriji. Praktični dio rada je bio da se pomoću eksperimentalnih metoda (Sonavu kamera i simulator kvarova ležajeva) testiraju različiti kvarovi ležajeva. Na temelju praktičnog rada napravljena je analiza rezultata i izveden zaključak o prednostima i nedostacima ove metode.

Ultrazvučna tehnologija postaje sve važnija u prediktivnom održavanju tehničkih sustava zbog stanja, praćenja i pouzdanosti, zahvaljujući krivulji brzog učenja, jednostavnosti zbog jednostavnosti primjene, fleksibilnosti i brzog učenja. Otkrivanje propuštanja raznih armaturnih spojeva danas je jedna od najčešćih primjena ultrazvuka, a sve se više koristi za dijagnostiku specifičnih mehaničkih kvarova i kvarova električnih instalacija.

Eksperimentalne metode pomažu pri lakšem snalaženju u praksi tako da inspektor zna prepoznati vrstu kvara na simulatoru te mu to omogućuje lakše snalaženje u stvarnosti. Primjer u ovom praktičnom radu je bio da se testiraju različiti kvarovi ležaja. Na taj način inspektor prepoznaje kako otprilike zvuči ležaj sa određenim kvarom te na taj način on može prepoznati pokvareni ležaj u praksi.

Ključne riječi: ultrazvuk, ultrazvučna dijagnostika, održavanje, prediktivno održavanje

## **SUMMARY**

The topic of this paper is diagnostics in maintenance using ultrasound. The work consists of a theoretical and a practical part. In the theoretical part, the basics of ultrasound, ultrasound diagnostics and applications of ultrasound in industry are described. The practical part of the paper was to test various bearing failures using experimental methods (Sonavu camera and bearing failure simulator). Based on the practical work, an analysis of the results was made and a conclusion was drawn on the advantages and disadvantages of this method.

Ultrasonic technology is becoming increasingly important in predictive maintenance of technical systems due to condition, monitoring and reliability, thanks to the fast learning curve, simplicity due to ease of application, flexibility and rapid learning. Detecting the leakage of various reinforcing joints is one of the most common applications of ultrasound today, and it is increasingly used for the diagnosis of specific mechanical and electrical installation failures.

Experimental methods help with easier navigation in practice so that the inspector knows how to recognize the type of failure on the simulator and this enables him to navigate in reality more easily. An example in this practical work was to test different bearing failures. In this way, the inspector recognizes what a bearing with a certain defect sounds like, and in this way he can recognize a broken bearing in practice.

Key words: ultrasound, ultrasound diagnostics, maintenance, predictive maintenance

## 1. Uvod

Ultrazvučna dijagnostika je metoda ispitivanja bez razaranja koja koristi visokofrekventne zvučne valove za otkrivanje i dijagnosticiranje problema unutar širokog raspona opreme i sustava. To je vrijedan alat za stručnjake za održavanje jer im omogućuje brzo i točno prepoznavanje potencijalnih problema prije nego što postanu kritični, čime se smanjuje vrijeme zastoja i produljuje životni vijek opreme.

Korištenje ultrazvuka u održavanju može se podijeliti u dvije glavne kategorije: online nadzor i offline pregled. Online nadzor uključuje kontinuirani nadzor opreme tijekom rada, korištenje senzora i sustava za prikupljanje podataka za otkrivanje i dijagnosticiranje problema u stvarnom vremenu. Izvanmrežni pregled, s druge strane, uključuje isključivanje opreme, izvođenje detaljne inspekcije i zatim vraćanje opreme u servis.

Ultrazvuk se može koristiti za otkrivanje širokog spektra problema, uključujući:

- Istrošenost mehaničke opreme kao što su ležajevi, zupčanici i pumpe
- Propuštanja u sustavima komprimiranog zraka i tekućine
- Korozija i erozija u cjevovodima i spremnicima
- Električni problemi poput luka i labavih spojeva

Postoji nekoliko prednosti korištenja ultrazvučne dijagnostike u održavanju. To je metoda ispitivanja bez razaranja, tako da se može koristiti na opremi koja je još u uporabi. To je također isplativa metoda koja može uštedjeti novac na popravcima i zastojima. Osim toga, može se koristiti za otkrivanje problema koji nisu vidljivi golim okom.

Ultrazvučna dijagnostika je korisna kod eksperimentalnih metoda (Sonavu kamera i simulator kvarova ležajeva) pomoću kojih se testiraju različiti kvarovi jednog ležaja (oštećenja kuglice, vanjskog i unutarnjeg prstena) te da se pomoću kamere iščitaju amplitude za svako oštećenje i kombinaciju svih oštećenja. Pomoću statističkog izračuna i dijagrama se provodi analiza koja daje kratki uvid u rezultate.

Takav način eksperimentalnog mjerenja je jako koristan u održavanju jer se na samome simulatoru se mogu podešavati različite brzine vrtnje te možemo lako u praksi prepoznati kvarove ležajeva pri različitim brzinama vrtnje. Također je bezopasno raditi mjerenje pomoću kamere jer je Sonavu kamera beskontaktni senzor koji je vrlo jednostavan za korištenje.

## 2. Osnove ultrazvuka

Zvuk je mikroskopska oscilacija na molekularnoj razini tvari. Ultrazvuk je definiran kao zvučni valovi koji imaju razinu frekvencije iznad 20 kHz, viši od raspona ljudskog sluha. Ultrazvuci koji se prenose zrakom djeluju u donjem ultrazvučnom spektru od 20-100 kHz i imaju sljedeće svojstva:

- Mali objekt lako blokira ultrazvuk koji se prenosi zrakom.
- Ne prodire u čvrste površine (iako može proći pukotine).
- Ultrazvuk koji se prenosi zrakom zrači ravnom linijom.
- Ultrazvuk ne prelazi na veliku udaljenost.

Gornja svojstva ultrazvuka iskorištavaju se kako bi ga učinila korisnom tehnikom u pružanju ranih informacija u slučajevima:

- Otkrivanje curenja u sustavima tlaka i vakuuma (npr. Kotlovi, izmjenjivači, kondenzatori, hladnjaci, stupovi za destilaciju, vakuumske peći, specijalni plinski sustavi)
- Pregled nosača
- Pregled pare
- Puhanje ventila
- Integritet brtvila i brtve u spremnicima, cijevnim sustavima
- Kavitacije pumpe
- Otkrivanje korone u prekidaču
- Analiza ventila kompresora

### 2.1. Brzina ultrazvuka

Brzina ultrazvuka u sredstvu ovisi o vrsti vala, gustoći i elastičnosti materijala u kojem se val širi, te o temperaturi i naprezanju. Ovisnosti brzine širenja ultrazvuka o temperaturi, te unutarnjem ili vanjskom naprezanju treba uzeti u obzir u onim slučajevima kada promjene brzina ultrazvučnih valova nisu zanemarive u odnosu na primijenjenu tehniku i dopuštenu mjernu netočnost.[1]

Za odnos valne duljine, frekvencije i brzine ultrazvuka vrijedi relacija:

$$\lambda \cdot f = v \quad (1)$$

gdje su:

$\lambda$  – valna duljina [m],

$f$  – frekvencija [Hz],

$v$  – brzina [m/s].

Ovisi o gustoći i elasticitetu materijala:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

$E$  – elasticitet

materijala [ $\text{N/m}^2$ ],

$\rho$  – gustoća materijala

[ $\text{kg/m}^3$ ],

$v$  – brzina [m/s].

Budući da se elastična svojstva i gustoća mijenjaju s temperaturom (i tlakom u slučaju plinova), mijenja se i brzina zvuka. Na primjer, brzina zvuka u zraku, pri 0 °C i tlaku od 1 bara, iznosi 341 m/s, ali na 20 °C iznosi 343 m/s, što je povećanje od 3,6%. Za istu valnu duljinu zvuka koji se generira, rezultirajuća frekvencija također bi se povećala za ovih 3,6%.

[2]

Veze između molekula su jako bitne, tj. da li je veza jača (veća brzina) ili slabija (manja brzina).

**Tablica 1. Primjeri brzina [1]**

<b>Materijal</b>	<b>Brzina zvuka [m/s]</b>
Voda na 0°C	1403
Voda na 20°C	1481
Voda na 100°C	1543
Bakar	4600
Željezo	5130
Nehrđajući čelik	5790
Čelik	6100

## 2.2. Akustična impedancija i njezin utjecaj na širenje

Akustična impedancija  $Z$  je omjer akustičnog tlaka  $p$  i akustičkog volumenskog protoka  $U$ . Ona na određenoj frekvenciji pokazuje koliki je zvučni tlak generiran određenom vibracijom zraka na toj frekvenciji.[2]

$$Z = p / U \quad (4)$$

$Z$  - akustična impedancija [ $\text{Ns/m}^3$ ],

$p$  - tlak [ $\text{N/m}^2$ ],

$U$  – volumenski protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Specifična akustična impedancija  $z$  je omjer akustičnog tlaka i specifičnog protoka, koji je isti kao protok po jedinici površine (brzina protoka).[2]

$$z = p / u \quad (5)$$

$z$  - specifična akustična impedancija [ $\text{Ns/m}^2$ ],

$p$  - tlak [ $\text{N/m}^2$ ],

$u$  – specifični protok po jedinici površine [ $\text{m/s}$ ].

Korištenjem impedancije nam pomaže u objašnjenju kako se zvuk širi kroz različite materijale i kako on zrači iz čvrstog tijela u plin.

Na temelju vrijednosti impedancije može se proračunati kakav će biti udio prolazne i reflektirane energije ultrazvuka na granici pri prijelazu iz jednog sredstva u drugo. U slučaju da je specifična zvučna impedancija sredstva dvaju materijala jednaka, na granici između takvih dvaju materijala neće doći do refleksije. [2]

Refleksija zvuka na prepreci:

$$R = \left[ \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right]^2 \quad (6)$$

gdje je :

$R$  = Amplituda reflektiranog zvuka

$E$  = Amplituda emitiranog zvuka =  $1 - R$

$z_1$  = Specifična Akustička Impedancija materijala 1

$z_2$  = Specifična Akustička Impedancija materijala 2

Uz pretpostavku očuvanja energije, tada će količina emitiranog zvuka biti  $1 - R$ . Što je veća razlika, to će biti više refleksije i tako će se manje zvuka prenositi.

Svaka promjena u materijalu na putu ultrazvučnog signala imat će ovo granično ponašanje. Pri svakoj promjeni materijala na putu od izvora zvuka do senzora gubi se dio signala.

Količina izgubljenog signala određena je ovom jednadžbom. Što je manje granica, što je manje promjena u specifičnoj akustičkoj impedanciji, to je bolji prijenos ultrazvučnog signala od izvora do senzora.

Svaka promjena u materijalu uzrokuje refleksiju i odgovarajuće smanjenje odaslanog ultrazvuka. Jedan od uobičajenih načina za smanjenje ovog problema je uzimanje očitavanja iz metalne cijevi za mast. Međutim, ako se čelična cijev za podmazivanje (specifična akustična impedancija od 4,516) na čeličnom ležaju zamijeni aluminijskom cijevi za podmazivanje (specifična akustična impedancija od 1,71), ležaj bi sada reflektirao 20% ultrazvučnog signala -cijevno sučelje. Sama ova promjena tada bi smanjila emitirani signal za 1,6 dB $\mu$ V. [2]



### 3. Osnove ultrazvučne dijagnostike

Popularnost ultrazvučne inspekcije za upravitelje održavanja i pouzdanosti pripisuje se jednostavnosti upotrebe, svestranosti i niskim troškovima implementacije. Nekada se smatralo pratiocem temeljnih prediktivnih tehnologija kao što su analiza vibracija i infracrveno snimanje, pojava samostalnih programa ultrazvučne inspekcije danas prevladava u odjelima za pouzdanost. [3]

Ultrazvuk se sada smatra prvim obrambenim sustavom u svakodnevnoj borbi za vrijeme neprekidnog rada proizvodnje. Ultrazvuk u zraku je prediktivno održavanje za mase. [3]

Primjene u kojima se ultrazvučna tehnologija može koristiti gotovo su neograničene, što daje njezinu masovnu privlačnost. Detekcija curenja komprimiranim zrakom, praćenje stanja ležajeva i akustičko podmazivanje ležajeva popularne su primjene. [3]

Neki inspektori nadziru tisuće parnih odvajača i otkrivaju curenje u kotlovima, kondenzatorima i izmjenjivačima topline. Drugi kombiniraju ultrazvučnu inspekciju i infracrveno skeniranje za dodatnu sigurnost skeniranju središnje ploče motora ili pregledima visokonaponskih trafostanica i prijenosnih i distribucijskih vodova.[3]

#### 3.1. Vrste senzora

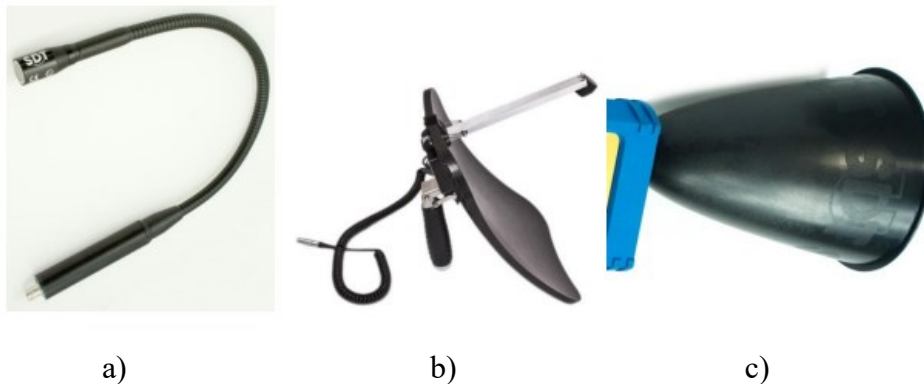
##### 3.1.1. *Beskontaktni senzori*

Beskontaktni senzori nisu u fizičkom kontaktu s objektom mjerenja te detektiraju, obrađuju i memoriraju signal koji se širi zrakom.

Korisno je moći odabrati senzor koji je najprikladniji za zadaću koja se obavlja. Ako pregled zahtijeva rad na daljinu, treba razmisliti o korištenju akustične sirene (senzor proširene udaljenosti - EDS) ili parabolične antene kako se povećala osjetljivost svog ultrazvučnog uređaja.[2]

Za primjene opće namjene ili za rad u skućenim uvjetima, fleksibilni senzor može biti idealan dodatak. Senzori u zraku imaju različite tipove ponašanja. Parabolična antena radi na

drugačiji način fokusiranjem ultrazvučnog signala na žarišnu točku na anteni. Zbog toga je ova vrsta detektora prikladna za precizno lociranje iz daljine. [3]



**Slika 1. Beskontaktni senzori; a)Fleksibilni senzor; b) Parabolični senzor; c) EDS [2]**

#### 3.1.1.1. Tehnike zaštita ultrazvuka za beskontaktna mjerenja

##### a) Zaštita ili blokiranje:

Korištenjem komada kartona, tkanine ili ruke uz zaštitne rukavice kao barijere moguće je blokirati druge izvore ultrazvuka u okolini kako bi se koncentrirali na mjesto curenja. Ova metoda je osobito korisna kada se pokušava locirati curenje vakuuma. [2]



**Slika 2. Zaštita od drugog izvora pomoću krpe [2]**

**b) Pozicioniranje:**

Ako postoje dva izvora ultrazvuka, korištenjem vlastitog tijela se blokira neki drugi izvor. [2]



**Slika 3. Blokiranje drugog izvora pomoću pozicioniranja tijela [2]**

**c) Prekrivanje:**

Plastičnom kantom ili krpom pokriva se poznato curenje tako da se mogu razlikovati dva curenja i blokiraju svi ostali signali. Ova metoda je opet vrlo korisna za pronalaženje curenja vakuuma u prisutnosti curenja zraka. [2]

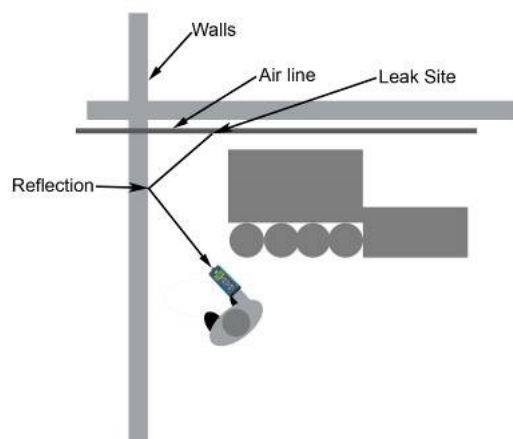


**Slika 4. Prekrivanje propuštanja krpom [2]**

d) Upravljanje refleksijama:

Ultrazvuk će se odbijati od zidova i čvrstih površina kao i svaki drugi zvuk. On je podložan visokom postotku refleksije.[2]

Treba uzeti u obzir da je upadni kut jednak kutu refleksije.



Slika 5. Upravljanje refleksijom ultravuka [2]

### 3.1.2. Kontaktni senzori

Kontaktni senzori koriste se za neinvazivno otkrivanje unutarnjih abnormalnih performansi ili anomalija stroja. Obično postoji izbor ručnih kontaktnih, magnetski spojenih ili trajno ugrađenih senzora.

Kontaktni senzor najčešće se koristi kada stroj, sustav ili komponentu treba brzo skenirati kako bi se utvrdilo gdje se nalazi anomalija ili greška. Također se učinkovito koristi za ulazak u uske prostore kako bi se dobio pristup dobroj točki nadzora. Za mjesta pregleda koja su izvan dosega mogu se koristiti produžne kontaktne šipke. Za mjerne točke koje su teško dostupne ili u nesigurnim područjima mogu se koristiti trajni daljinski kontaktni senzori.

Magnetski spregnuti kontaktni senzori uklanjaju varijacije mjerenja povezane s ručnim kontaktnim sensorima. Stoga su idealni u okolnostima kada je potrebno dugo vrijeme uzorkovanja ili gdje više inspektora očitava na istoj točki uzorkovanja. Primjer bi bio nadzor električnog transformatora, budući da lagano pomicanje kontaktnog senzora može zvučati

vrlo slično djelomičnom pražnjenju unutar transformatora, što bi uzrokovalo lažnu indikaciju anomalije.[3]



**Slika 6. Kontaktni senzori; a) Iglasti kontaktni senzor; b) RS1 najvojni senzor [2]**

Na rezultat mjerenja, veliku ulogu u pozicioniranju senzora igraju: ista lokacija/pozicija, isti senzor, opterećenje, brzina, pozicija ventila, slojevi boje, materijal površine...

### 3.2. Heterodinski princip i primjena

Svi kvalitetni ultrazvučni mjerni instrumenti imaju heterodinski krug. Svrha heterodinskog kruga je učiniti nečujni ultrazvučni signal čujnim. Osnova operacije je određeni dio trigonometrije: [2]

$$\sin\theta \times \sin\varphi = \frac{\cos(\theta-\varphi) - \cos(\theta+\varphi)}{2} \quad (7)$$

$\theta$  – frekvencija jednog signala [Hz]

$\Phi$  – frekvencija drugog signala [Hz]

Ova jednadžba predviđa da se množenjem dviju različitih frekvencija stvaraju dvije nove frekvencije – jedna na frekvenciji zbroja i jedna na razlici.

Množenje (ili miješanje) dvaju sinusoidalnih signala zajedno stvara dva kosinusna signala čije su frekvencije zbroj i razlika dva izvorna signala. Počevši od signala frekvencije 36kHz i miješajući ga sa signalom frekvencije 38kHz proizvodi se signal od 2kHz i 74kHz. 36kHz je

nečujno za ljude, ali 2kHz je definitivno čujno za standarde normalnog sluha. Nadalje, priroda izvornog signala – pucketanje, šištanje, udar – ostaje netaknuta.

Heterodinski krug je stoga bitna komponenta u dizajnu ultrazvučnog sustava, obavljajući važnu zadaću generiranja signala koji se može slušati, mjeriti, pratiti i analizirati.

### 3.3. Mjerenje ultrazvuka

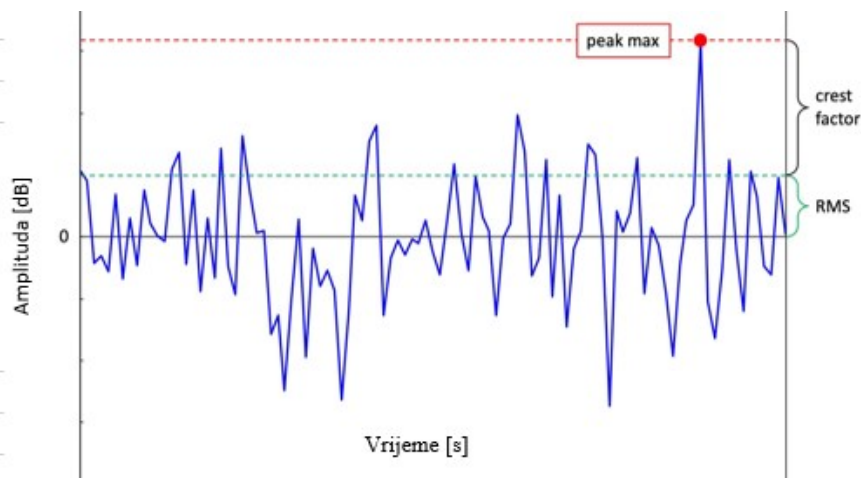
Važno je zapamtiti da je ultrazvučni signal dinamičan signal. Priroda ili karakteristična svojstva tog signala su nešto što se može slušati uživo i što se može karakterizirati na više različitih načina. Jedan način na koji se izmjereni ultrazvučni signal može karakterizirati predstavlja podatke kao:

1. Vršna vrijednost
2. RMS vrijednost,
3. „Crest“ faktor.

Ovi indikatori stanja, kako se ponekad nazivaju, navikli su osigurati numeričku klasifikaciju stanja ležaja koja se može pratiti i imati primijenjene alarme. Postoji vrlo česta pogrešna predodžba, posebno u svijetu vibracija, da je vršna vrijednost signala  $1,414x$  ( $\sqrt{2}x$ ) RMS vrijednosti. Zapravo, ovo vrijedi samo za jednofrekventni sinusoidalni signal.[2]

Prava vršna vrijednost bit će najveća izmjerena vrijednost u signalu i ovo treba izmjeriti vrlo brzo kako bi se uhvatio bilo koji brze prijelazne pojave u signalu. Što je veća frekvencija korištena za uzorkovanje signala, to je bolja detekcija vrhova. RMS (srednja kvadratna vrijednost) vrijednost izračunava se za cijeli uzorak snimljenog signala i u biti predstavlja ukupnu snagu signala. [2]

Omjer vršne vrijednosti prema RMS vrijednost naziva se „Crest“ faktor i ovaj je parametar izuzetno koristan način kvantifikacije koliko je signal "vršan". Crest faktor za jedan sinusni val je stoga ova vrijednost od 1,414. Za nasumični šum „Crest“ faktor obično bi bio oko 3. Ako bi signal uključivao bilo kakve oštre šiljke, klikove ili pucketanja, Crest faktor bi se lako mogao povećati na 6, 10, 20 ili čak i više.[2]

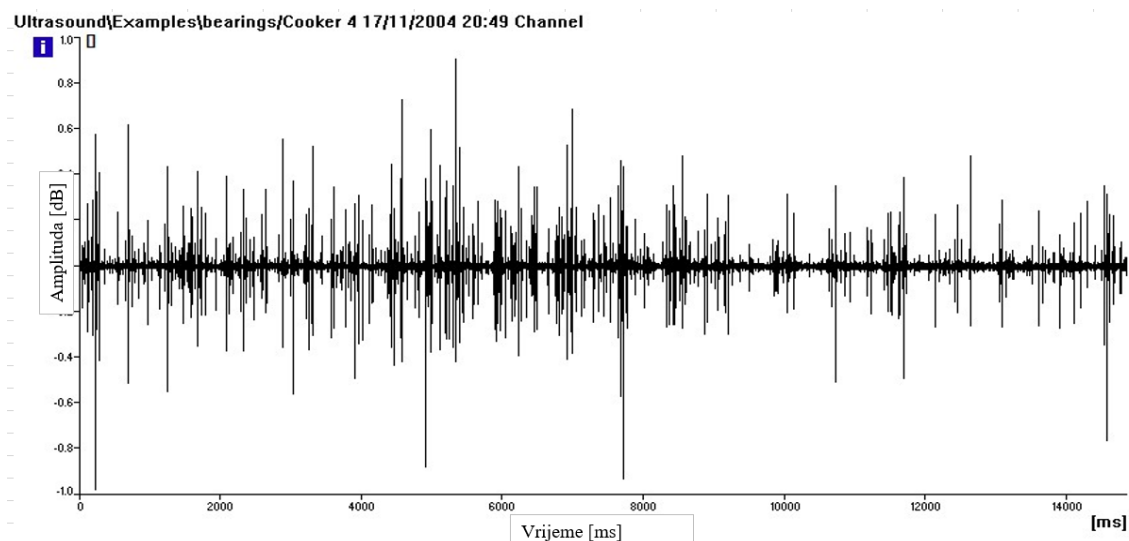


Slika 7. Prikaz „Crest“ fakotra, RMS-a i „peaka“ [3]

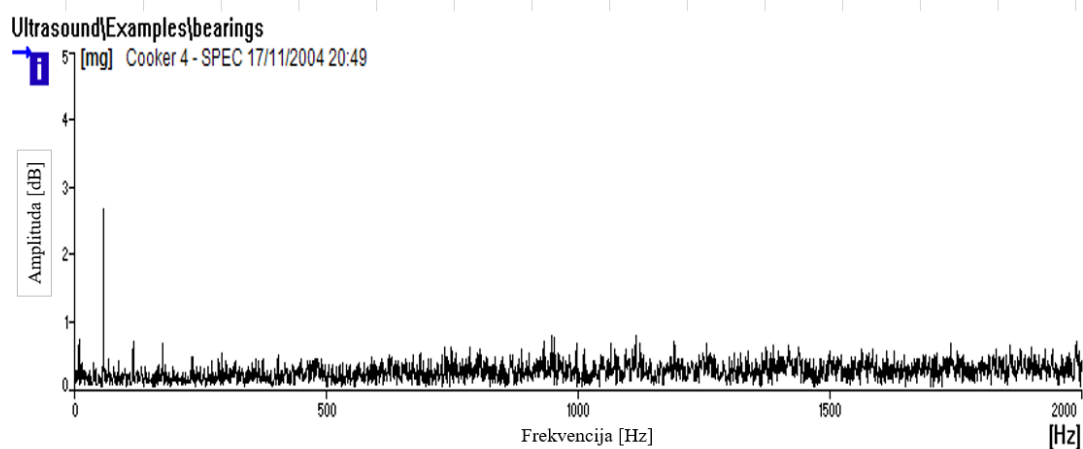
### 3.4. Snimanje signala u vremenjoj i frekvencijskoj domeni

Snimanje signala koji se stvarno čuje na terenu može biti od velike koristi. Kao prvo, može se koristiti za analizu i dijagnozu, ali kao drugo, može se koristiti za komunikaciju.

Postoje dva načina za prikupljanje dinamičkih podataka – u vremenjoj domeni i u frekvencijskoj domeni. Važno je upamtiti da signali koji se ne ponavljaju, isprekidani signali krše zakone Fourierove matematike i stoga ovu vrstu signala treba uhvatiti u vremenjoj domeni, a ne u frekvencijskoj domeni (također uobičajeno poznatoj kao spektar i FFT). Zapravo, uvijek će biti slučaj da je prvo hvatanje vremenškog signala ispravan način prikupljanja podataka u ultrazvuku. [2]



Slika 8. Prikaz vremenske domene oštećenog ležaja [2]



Slika 9. Prikaz frekvencijske domene oštećenog ležaja [2]

Neizbježno je da se prikupe neki loši podaci. Stoga je važno redovito pregledavati sve podatke kako bi se identificirali i uklonili ta loša očitavanja.

Jedan vrlo čest oblik loših podataka naziva se izrezivanje (clipping). Izrezivanje se događa kada mjerni instrument nije ispravno postavljen i dolazni signal ima previsoku amplitudu da bi se elektronika mogla nositi s njim. Rezultat je da su vrhovi signala odsječeni (ili ošišani) što daje nisku amplitudu.[3]



## 4. Primjena ultrazvučne dijagnostike u industriji

Jedni od primjera u kojima se ultrazvuk upotrebljava su:

1. Propuštanja
2. Sustav pare, odvajači kondenzata, ventil
3. Podmazivanje i ležaji
4. Mehaničke komponente (pumpe)
5. Inspekcija elektroinstalacija

### 4.1. Propuštanja

Propuštanja se mogu pojaviti praktički bilo gdje u postrojenju. To uključuje sustave pod tlakom i sustave pod vakuumom. Do curenja može doći unutar ventila i odvajača pare, u cijevima izmjenjivača topline i kondenzatora ili u atmosferu. Iako je važno locirati potencijalne sigurnosne opasnosti od curenja, gubitak plinova kroz curenje može biti vrlo skup. [4]

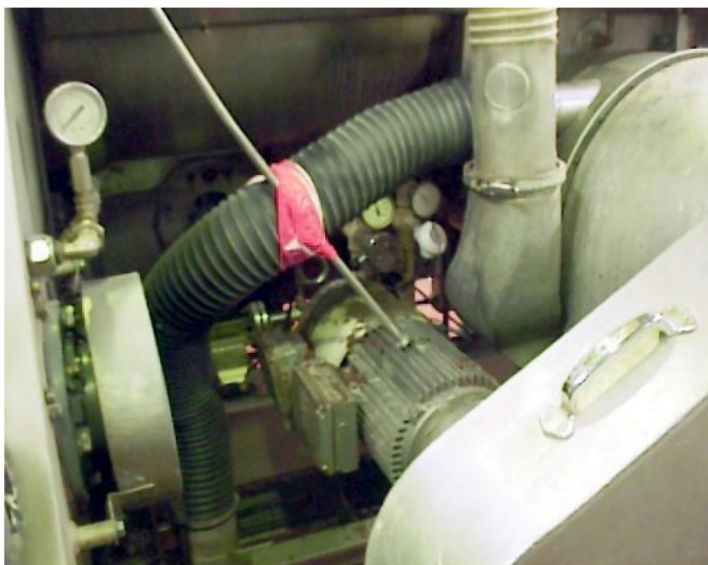
Jedan glavni koncept koji treba razumjeti je da sve curi. Određivanje kada i koje vrste curenja tražiti ovisi o mnogim varijablama, kao što su ekonomičnost, sigurnost, izvedba, utjecaj na povezane objekte ili proizvode (na primjer kvaliteta), kao i ekonomičnost i sposobnost popravka curi nakon što se pronađe. [4]

Propuštanje se događa kada se materijal može premjestiti iz jednog medija u drugi. Kod curenja pod tlakom ili vakuumom, tekućina (tekućina ili plin) kreće se sa strane visokog tlaka kroz otvor curenja na stranu niskog tlaka. Kada uđe u točku niskog tlaka, stvara se turbulentno strujanje. Turbulencije ometaju molekule zraka stvarajući bijeli šum koji sadrži i niske i visokofrekventne komponente. U većini biljnih okruženja okolni zvukovi mogu prikriti ovu buku. Budući da je zvučna komponenta većeg valnog oblika, može se činiti svesmjernom, što otežava lociranje i identifikaciju izvora curenja.[4]

Ultrazvučna komponenta ima svojstva koja uvelike olakšavaju otkrivanje curenja. Kao kratkovalni, slab signal, amplituda brzo opada u odnosu na izvor. Također je longitudinalni valni oblik i smatra se relativno usmjerenim. Budući da ultrazvučni senzori ne detektiraju

komponente niže frekvencije, lociranje i identificiranje curenja može biti vrlo učinkovito, čak i u bučnim okruženjima postrojenja. [4]

Najbolji način mjerenja propusnosti je pomoću bezkontaktnog senzora (u određenim situacijama i kontaktno) uz primjenu generatora ultrazvuka.



**Slika 10. Primjer propuštanja komprimiranog zraka [2]**

Što utječe na otkrivanje curenja? Postoji nekoliko čimbenika zbog kojih se curenje može otkriti ultrazvukom:

a) Turbulencija

Postoje dvije vrste viskoznog strujanja: turbulentno i laminarno. Laminarno strujanje može se definirati kao: 'Protok tekućine u kojem tekućina putuje glatko ili pravilnim stazama. Brzina, tlak i druga svojstva protoka u svakoj točki tekućine ostaju konstantna.

Turbulentno strujanje definirano je kao: 'strujanje tekućine u kojem brzina u danoj točki nepravilno varira u veličini i smjeru'.

Ultrazvuk stoga neće detektirati laminarno strujanje (kao što se nalazi, na primjer, u difuzorima klima uređaja), ali će detektirati turbulentno strujanje. Većina situacija curenja proizvest će turbulentno strujanje. Međutim, postoje i druge varijable koje se moraju uzeti u obzir kako bi se utvrdilo postoji li dovoljno turbulencije da proizvede ultrazvuk koji se može otkriti da bi se moglo pronaći curenje. [5]

#### b) Oblik otvora

Bez obzira na veličinu otvora, važno je zapamtiti da glatki otvor neće proizvesti toliko turbulencije kao nazubljeni otvor. Otvor s više rubova može utjecati na protok tekućine i

proizvesti više turbulencije, što se naziva "reed efekt". Uzak 'prorez' otvor, kao što je curenje putanje niti, neće proizvesti toliko turbulencije kao curenje 'pin hole'. [5]

#### c) Viskoznost fluida

Viskoznost fluida je njezin otpor protoku, mjera unutarnjeg trenja tekućine. Na primjer, ako usporedimo viskoznost vode s parom, voda ima veći otpor protoku. Čimbenici koji utječu na protok kroz mjesta curenja su viskoznost tekućine, razlika tlaka koja uzrokuje protok te duljina i presjek puta curenja. Na primjer, pri istom tlaku, zrak će propuštati kroz mjesto curenja znatno više nego tekućina poput vode ili ulja. Ovo je važno razumjeti ako se treba suočiti s curenjem u kojem tekućina ima visoku viskoznost, ali nedovoljan pritisak da izazove turbulentno curenje. Na primjer, kada postoji curenje vode ispod zemlje, promjena tekućine u plin uvelike će pomoći u lociranju curenja. [5]

#### d) Diferencijalni tlak

Razlika tlaka značajan je problem pri izvođenju većine testova curenja. Razlika tlaka nastaje kada se tlak kroz propuštanje mijenja i protok se mijenja proporcionalno razlikama kvadrata apsolutnog tlaka. Prilikom izvođenja ultrazvučne kontrole curenja iz zraka, važno je uzeti u obzir viskozni protok određene razlike tlaka koji djeluje na curenje. [5]

#### e) Udaljenost od propuštanja

Drugi čimbenik koji utječe na otkrivanje curenja je udaljenost od curenja. Intenzitet ultrazvučnog signala opada kako se povećava udaljenost od izvora koji šalje ultrazvuk. Intenzitet se odnosi na relativnu snagu zvučnog signala u određenoj točki.

Zbog kratkovalne prirode ultrazvuka, amplituda emisije eksponencijalno opada kako zvuk putuje od izvora. Udaljenost detekcije postaje faktor. Ako inspektor ne može doći na domet curenja, bit će ga teško pronaći. Važno je da mjesto curenja bude dostupno. Pod uvjetom da je sigurno, što se inspektor može približiti curenju, veće su šanse da ga otkrije i procijeni. Ako je curenje zakopano iza nekoliko struktura, imat će tendenciju odbijanja od različitih struktura. Ultrazvuk iz curenja zatim se šalje u drugim smjerovima, odbijajući se od jednog predmeta do drugog i posljedično zbunjujući inspektora gdje je izvor curenja. U nekim slučajevima ultrazvuk može pogađati materijal koji apsorbira zvučne valove. Što dalje curenje mora putovati, to je vjerojatnije da će curenje oslabiti i oslabiti. [5]

#### 4.2. Inspekcija ventila i sustava pare

Ventil i sustavi pare imaju tendenciju curenja. Kada se to dogodi, može se pokazati prilično skupim u smislu kvalitete proizvoda, sigurnosti i gubitka energije.

Rad ventila će utjecati na način na koji tekućina teče kroz sustav. Ventili se obično provjeravaju na curenje kontaktnom sondom na nizvodnoj strani. To se postiže tako da se prvo očita uzvodna strana i prilagodi osjetljivost za očitavanje otprilike polovice pune skale. Zatim se može izmjeriti nizvodna strana i usporediti intenzitet zvuka između njih. Ako je signal znatno niži nego uzvodno, smatra se da je ventil zatvoren. Ako je glasniji nego uzvodno i popraćen je zvukom jurnjave, smatra se da curi. [4]

Ultrazvuk se mjeri kontaktno (bezkontaktno samo u slučaju pneumatskih aktuatora) [6]



**Slika 11. Inspekcija ventila bezkontaktnim senzorom [2]**

Sustavi pare također se mogu lako pregledati ultrazvučnim translatorima (ultrazvučni instrumenti koji se prenose zrakom). Kontaktna sonda ponovno se koristi za pregled sustava pare. Slušanje rada zamke i promatranje mjerača može protumačiti stanje zamke. Brzina i jednostavnost ove vrste testa dopuštaju da se svaka zamka rutinski pregleda. Ventili i odvajači pare rade na različite načine. Ultrazvučni detektori olakšavaju prilagodbu ovim razlikama i lako određuju radne uvjete dok ventili i sifoni rade. [4]

Način na koji se mjeri ultrazvuk kod sustava pare može biti kontaktni i bezkontaktni. [6]

### 4.3. Ležaji i podmazivanje

Ultrazvuk se također uspješno primjenjuje u ranom otkrivanju kvarova na ležajevima. Ultrazvučni pregled ležajeva koristan je u prepoznavanju početka loma uslijed zamora, mrljanja površina ležaja, poplave ili nedostatka podmazivanja. U kugličnim ležajevima, kako se metal u kliznoj stazi, valjku ili kuglicama ležaja počinje zamarati, dolazi do suptilne deformacije. Ova deformacija metala će dovesti do povećanja emisije ultrazvučnih zvučnih valova. Prilikom testiranja, promjena amplitude od 12 do 50 puta veća od izvornog očitavanja pokazatelj je početnog kvara ležaja. Kada očitavanje premaši bilo koji od prethodnog očitavanja za 12 dB, može se pretpostaviti da je ležaj ušao u početak stanja kvara. Ovo se odnosi na praćenje ležajeva u frekvencijskom rasponu od 24–50 kHz. U slučaju nedostatka podmazivanja, razina buke se povećava kako se sloj maziva smanjuje. Porast od oko 8 dB iznad osnovne linije popraćen ujednačenim zvukom jurnjave ukazivati će na nedostatak podmazivanja. Kako biste izbjegli prekomjerno podmazivanje, nemojte podmazivati ako se održava osnovno očitavanje i osnovna kvaliteta zvuka. Ultrazvučne frekvencije koje detektira sustav reproduciraju se kao zvučni zvukovi. Ovaj signal može pomoći korisniku u određivanju problema s ležajem. Prilikom slušanja preporučuje se da se korisnik upozna sa zvukovima zdravog držanja, koji se često čuje kao jurnjava ili šištanje. Pucketanje ili grubi zvukovi ukazuju na to da je ležaj u fazi kvara. U nekim slučajevima, oštećena loptica emitira zvuk škljocanja, dok visok intenzitet, ujednačen i grub zvuk može ukazivati na oštećenu trku ili ujednačeno oštećenje loptice. Glasan zvuk jurnjave sličan je normalnom zvuku jurnjave zdravog ležaja, ali samo malo grublji može ukazivati na nedostatak podmazivanja. Moguće je i praćenje sporohodnih ležajeva. Zbog raspona osjetljivosti i podešavanja frekvencije sasvim je moguće slušati akustičnu kvalitetu sporohodnih ležajeva. Kod izrazito sporih ležajeva

(manje od 25 okretaja u minuti), često je potrebno zanemariti izlazni mjerač i slušati samo zvuk ležaja (slušalice). U tim ekstremnim situacijama ležajevi su obično veliki i podmazani mazivom visoke viskoznosti.[4]

Često se neće čuti zvuk jer će mast apsorbirati većinu akustične energije. Ako se čuje zvuk, obično pucketanje, to je pokazatelj kvara. Na većini sporohodnih ležajeva moguće je odrediti osnovnu razinu i pratiti u redovitim intervalima.

#### **4.3.1. Podmazivanje ležajeva**

Ispravno podmazivanje ležajeva ključno je za njihov zdrav rad i postizanje ciljanog životnog vijeka. Ultrazvuk mjeri trenje. Stoga je moguće izmjeriti količinu trenja povezanog s određenim ležajem. Podmazivanje bi trebalo smanjiti trenje. Pretjerano podmazivanje će umjesto toga povećati trenje. Stoga je važno imati uspostavljenu proceduru koja identificira previše podmazani ležaj. Senzor koji se koristi za mjerenje ultrazvuka je kontaktni senzor [6]

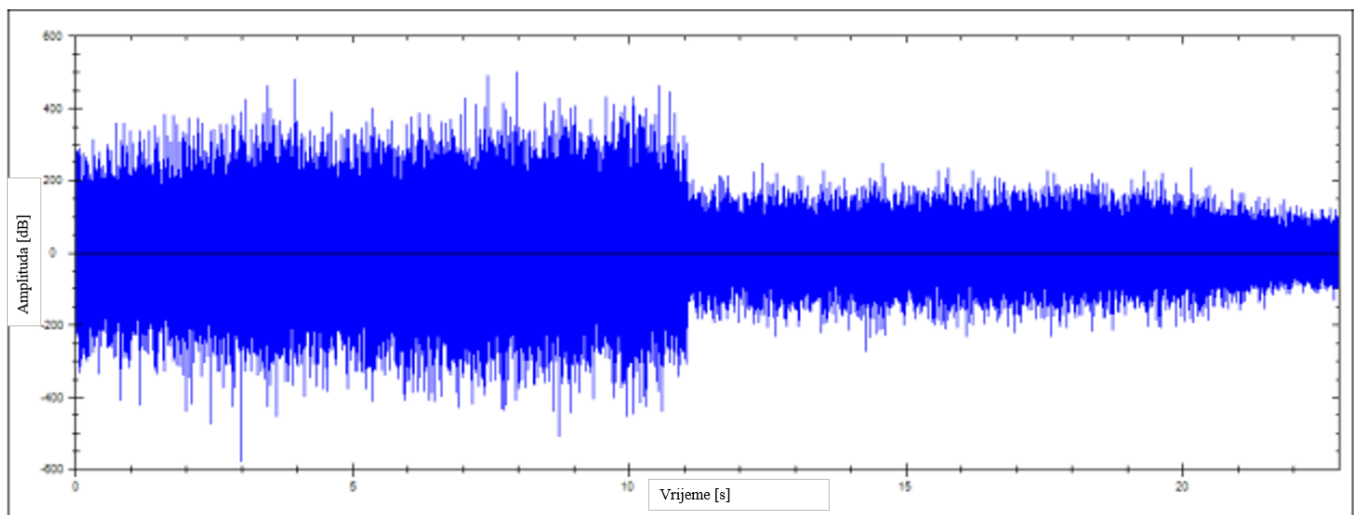
POSTUPAK:

1. Povezivanje preferiranog senzora sa ultrazvučnim instrumentom. Opcije:
  - a) Trajno instaliran senzor
  - b) Magnetni senzor
  - c) Ručni senzor
  - d) Adapter za podmazivanje
2. Treba pažljivo očistite adapter za podmazivanje na ležaju
3. Uklanjanje svih odvodnih čepova i provjeriti je li otvor čist
4. Uzimanje početnog očitavanja koje će se koristiti kao osnova za podmazivanje
5. Unjeti jednu dozu masti (teoretski je najbolje staviti 20-25% masti)
6. Čekanje da mast uđe u ležaj
7. Ako se ultrazvučni signal pojača, ležaj je previše podmazan
8. Ako se ultrazvučni signal smanji, treba dodat još maziva.
9. Proces ponoviti sve dok ultrazvučni signal počne rasti. [2]



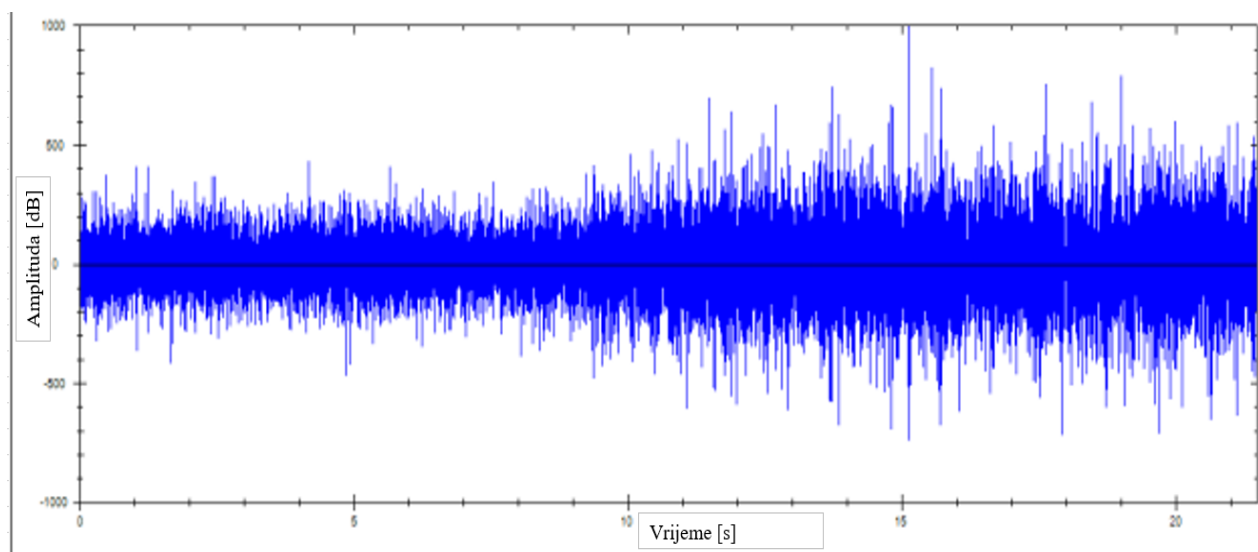
**Slika 12. Primjer loše podmazanog ležaja i krajnja posljedica [7]**

Dva postupka podmazivanja ležaja koji su digitalno snimljeni kao vremenski signali:



**Slika 13. Primjer vremenskog signala dobro podmazanog ležaja [2]**

U gornjem signalu, ležaj prima mlaz masti na oznaci od 11 sekundi i drugi mlaz na oznaci od 22 sekunde. Oba mlaz popravila su stanje na ležaju.



**Slika 14. Primjer vremenskog signala loše podmazanog ležaja [2]**

U ovom signalu ležaj je primio jednu dozu masti na oznaci od 9 sekundi i ultrazvučni signal se nije smanjio. Umjesto toga, signal se povećao, ukazujući na višu razinu trenja.

#### **4.3.2. Detekcija kvarova ležajeva**

Analiza vibracija odnosi se na 4 stupnja kvara ležaja, od kojih je prvi karakteriziran trenjem, a zatim povremenim škljocajima i pucanjima. Ovi događaji prve faze vidljivi su u ultrazvučnom frekvencijskom području. Kontaktni ultrazvuk ima ulogu u procjeni stanja ležaja. Postoje različite vrste kontaktnih senzora. Ako će više ljudi očitavati, razmislite o postavljanju magnetskih meta (imajući na umu rasprave o specifičnoj akustičkoj impedanciji) i korištenju magnetskog senzora umjesto ručnog senzora. Ovo će eliminirati varijacije u položaju senzora i primijenjenom tlaku koji mogu uzrokovati varijacije u izmjerenim signalima. Ultrazvuk iz zraka također ima ulogu u procjeni stanja ležaja. Ako je ležaj otvoreni ležaj na osovini - ovaj tip ležaja će proizvesti ultrazvuk koji se može otkriti pomoću senzora u zraku ili kontaktnog senzora. [4]



Na stranu, još jedan problem koji se može otkriti u zračnom načinu rada je labavi montažni vijak.

Kako se kvar ležaja pogoršava, mogu se razviti diskretne frekvencije kvara ležaja. Ove frekvencije kvarova ovise o geometriji ležaja i njegovoj brzini vrtnje.

Formule za različite frekvencije različitih kvarova ležaja; a) frekvencija kvara vanjskog prstena; b) frekvencija kvara unutarnjeg prstena; c) frekvencija kvara kuglice

$$a) \frac{n}{2} \times \left(\frac{rpm}{60}\right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \times \cos\theta\right] \quad (8)$$

$$b) \frac{n}{2} \times \left(\frac{rpm}{60}\right) \times \left[1 + \left(\frac{d}{D}\right) \times \cos\theta\right] \quad (9)$$

$$c) \frac{1}{2} \times \left(\frac{rpm}{60}\right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right) \times \cos\theta\right] \quad (10)$$

$\theta$  = kontaktni kut [rad/s]

$n$  = broj kotrljajućih elemenata

$d$  = promjer kuglice [mm]

$D$  = najveća udaljenost između kuglica [mm]

$rpm$  = broj okretaja u minuti [ $\text{min}^{-1}$ ]

Prilično je uobičajeno da se te defektne frekvencije mogu otkriti u ultrazvučnom signalu u njihovim ranijim fazama. Kako se ležaj nastavlja pogoršavati, visokofrekventni podaci počet će se smanjivati do stupnja u kojem više nema visokofrekventnih utjecaja. U ovoj fazi očitavanja niže frekvencije vibracija vjerojatno bi pokazala kvar, ali ultrazvuk možda ne bi. Ultrazvuk je stoga bolji u otkrivanju oštećenja u ranoj fazi nego u kasnijim fazama kvara – ovo je dobar razlog za kombiniranje ultrazvuka s vibracijom

#### 4.4. Inspekcija pumpi

Pumpe mogu imati problema s ležajevima, poravnanjem spojnicama, brtvama, kavitacijom i mehaničkom labavošću. Iznimno je važno zapamtiti da nije razumno promatrati crpku zasebno – stanje i radni uvjeti usisnih i ispusnih ventila mogu imati značajan utjecaj na radno stanje crpke. Stoga je dobra praksa uključiti pregled ovih ventila – zajedno sa svim nepovratnim ventilima ako postoji više od jedne pumpe na istom nosaču ili cjevovodu – kao dio pregleda pumpe. [2]

Kavitacija može biti veliki ubojica impelera pumpe.:



**Slika 15. Prikaz oštećenih impelera pumpe [2]**

Kavitacija je uzrokovana implozijom mjehurića pare. Ova implozija usisava materijal s površine impelera što rezultira oštećenjem koje se ovdje vidi. Ultrazvukom se jasno čuje nasumično pucanje mjehurića – čak i pri relativno niskim razinama kavitacije.[2]

Problemi sa spojkama poput neusklađenosti, labavosti i istrošenosti također se mogu otkriti vrlo jednostavno i brzo pomoću ultrazvuka u zraku. Neusklađenost proizvodi povećanje trenja jednom po okretaju koje se može čuti zvučno pri maloj brzini i vidljivo u vremenskom signalu pri bilo kojoj brzini. Labavost, istrošenost i slabo trenje proizvode istu kontinuiranu jaku buku povezanu s trenjem - na primjer kao loše podmazan ležaj. Moguće je da loše stanje podmazivanja spojke može prikriti zlokobniji nedostatak kao što je istrošenost zuba u spojnici zupčanika.[2]

#### 4.5. Inspekcija elektroinstalacija

Ultrazvučna tehnika može se koristiti za otkrivanje problema u električnim aparatima kao što su izolatori, kabeli, sklopni uređaji, sabirnice, releji, kontaktori, razvodne kutije. U trafostanicama se mogu pregledati komponente kao što su izolatori, transformatori i izolatori. Kvar ovih komponenti je neprihvatljiv u industrijskim postrojenjima, prijenosu i distribuciji električne energije. Zbog toga ih je potrebno redovito nadzirati. U osnovi postoje tri vrste električnih problema koji se mogu otkriti ultrazvukom: [4]

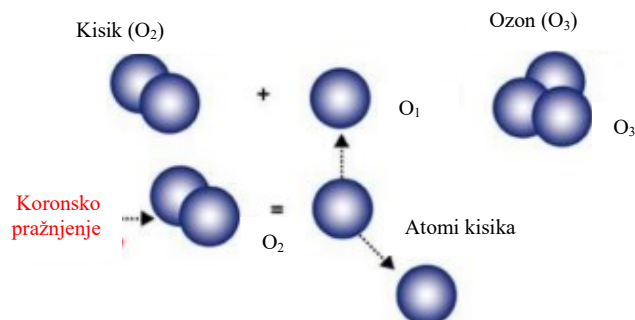
1. Električni luk: luk nastaje kada struja teče kroz prostor, npr. munja.
2. Corona: Kada napon na električnom vodiču, kao što je antena ili dalekovod visokog napona, premašuje vrijednost praga, zrak oko njega počinje se ionizirati stvarajući plavi ili ljubičasti sjaj.
3. Praćenje: Često se naziva "dječji luk", prati putanju oštećena izolacija. [4]

Iako se ultrazvuk može koristiti za mjerenje električnih problema u sustavima niskog, srednjeg i visokog napona, općenito se koristi u sustavima iznad 2 kV. Kada struja pobjegne u visokonaponskim vodovima ili kada preskoči prazninu u električnoj vezi, remeti molekule zraka oko sebe i stvara ultrazvuk. Ovaj zvuk će se često percipirati kao pucketanje ili zvuk prženja; u drugim situacijama čut će se kao zujanje. Metoda za otkrivanje curenja električnog luka i korone slična je postupku navedenom u otkrivanju curenja. Umjesto osluškivanja zvuka žurbe, korisnik će osluškivati pucketanje ili zujanje. Ovo je posebno korisno u identificiranju problema praćenja. U zatvorenim razvodnim uređajima, učestalost praćenja uvelike premašuje učestalost ozbiljnih kvarova identificiranih infracrvenim putem. Preporuča se da se oba testa koriste sa zatvorenim sklopnim uređajima.[4]

U sustavima nižeg napona, brzo skeniranje sabirnica često će otkriti labav spoj. Provjera razvodnih kutija može otkriti iskrenje. Kao i kod otkrivanja curenja, što se bliže mjestu curenja, signal je glasniji. Ako je potrebno pregledati dalekovode, a signal nije dovoljno intenzivan da bi se mogao detektirati sa zemlje, možete upotrijebiti koncentrador ultrazvučnog valnog oblika (parabolični reflektor), koji će udvostručiti udaljenost detekcije sustava i omogućiti preciznu detekciju.. Ova stanja proizvode ultrazvuk i mogu se otkriti ovom tehnikom. [4]

#### 4.5.1. Korona

Korona je uzrokovana ionizacijom molekula zraka blizu točke vrlo visokog naponskog potencijalnog gradijenta. Ionizacija razgrađuje zrak i stvara ozon i dušikov oksid. Oba plina imaju neugodan miris.[2]



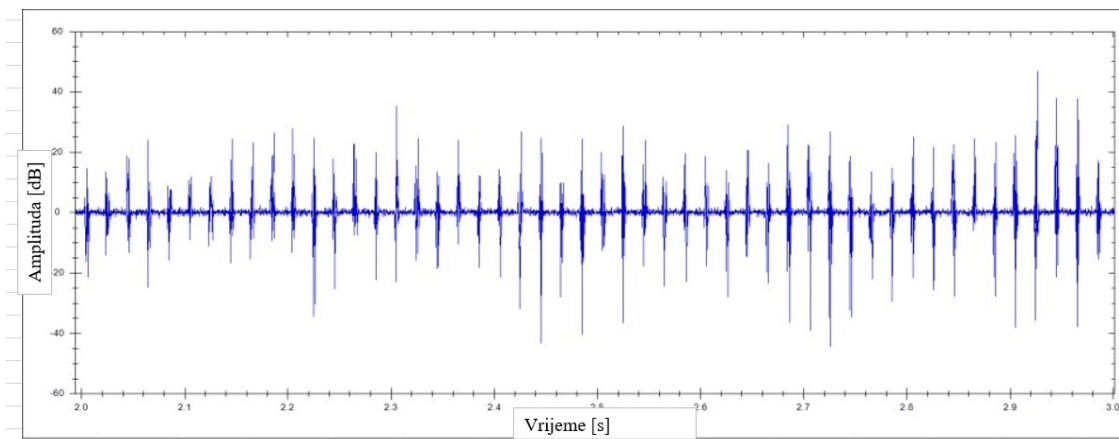
Slika 16. Proces nastajanja ozona [2]

Vlaga u zraku može reagirati s dušikovim oksidom i proizvesti blagu kiselinu. Prilično je uobičajeno vidjeti lokalizirane naslage praha ili kristala bijele ili plavo/zelene boje na mjestima Korone. Korona ne generira toplinu. [2]



Slika 17. Prikaz mogućih nastanka korone [2]

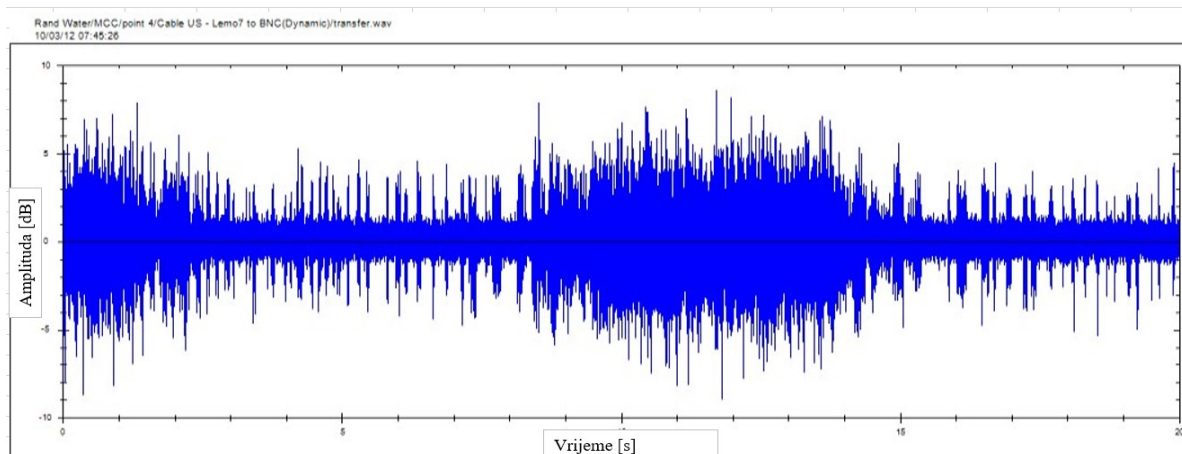
Corona će proizvesti konstantan zvuk kloketanja koji će biti ili na frekvenciji napajanja ili dvostrukoj frekvenciji linije. Gledajući vremenski signal, postojat će kontinuirani niz skokova:



**Slika 18. Prikaz vremenskog signala korone [2]**

#### 4.5.2. Praćenje

Praćenje je površinsko provođenje električne energije preko objekta, a ne kroz njega. Praćenje se može dogoditi na bilo kojem naponu i ne mora biti na vodiču. Budući da je praćenje površinski fenomen, samo površina mora biti vodljiva. Dakle, sve dok postoji vodljiva prašina ili vlaga, na izolatoru ili čak na kanalima, praćenje se može pojaviti.[2]



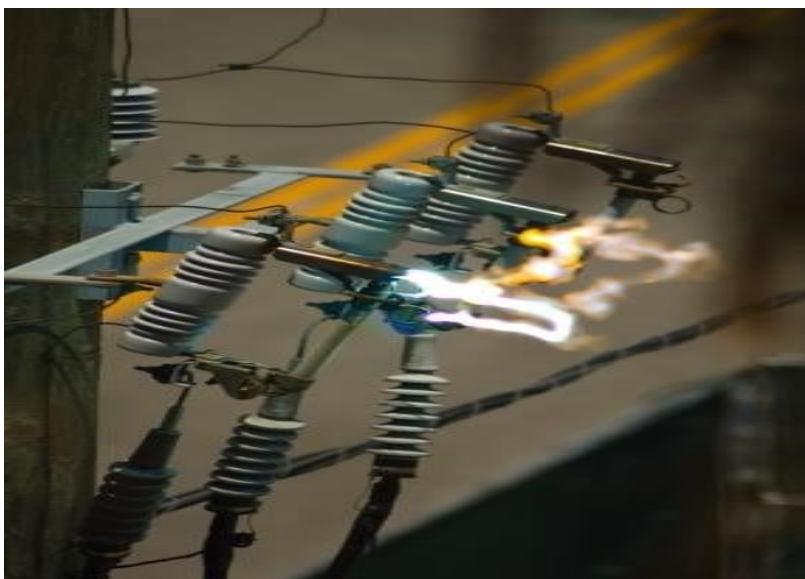
**Slika 19. Prikaz vremenskog signala praćenja [2]**

Karakterističan zvuk praćenja je niz kratkotrajnih pucketanja.

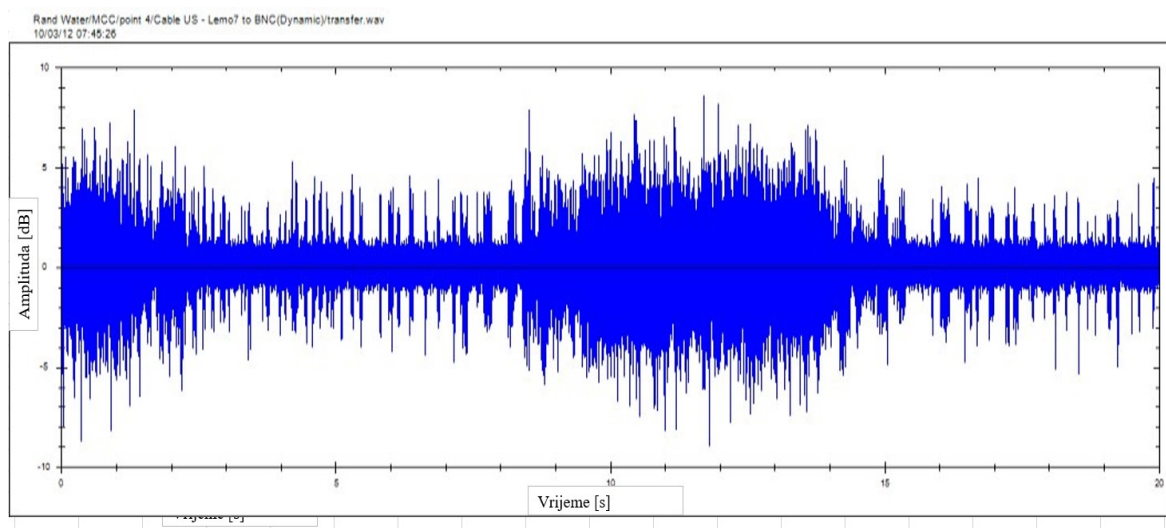
Glavna razlika između korone i praćenja je ta što signali kod praćenja nisu konstantni, kod korone jesu. [2]

### 4.5.3. Električni luk

Luk je jedini od ova tri nedostatka koji stvara toplinu. Događaj luka često može potrajati nekoliko sekundi. Luk proizvodi vrlo jak ultrazvučni signal.. Ovaj vremenski signal pokazuje kombinirani događaj lučenja i praćenja koji se odvija u ploči. Ovo jasno razlikuje dugotrajne lučne događaje s vrlo kratkim događajima praćenja. [2]



Slika 20. Prikaz nastanka električnog luka [2]



Slika 21. Prikaz vremenskog signala električnog luka [2]

## 5. Eksperimentalne metode

Eksperimentalne metode korištene u ovom radu za detekciju stanja ležajeva primjenom ultrazvuka su:

1. Sonavu kamera
2. Simulator kvarova ležajeva

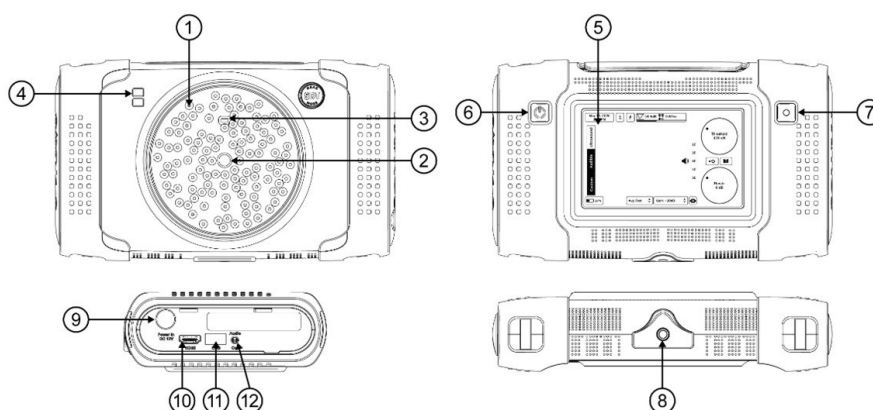
### 5.1. Sonavu kamera

SonaVu je multi frekventna kamera za akustičnu sliku koja podiže ultrazvučni pregled iz zraka na novu razinu. Ona snima kvarove na stroju i pokazuje visoke frekvencije kvarova. Opremljen sa 112 visoko osjetljivih zvučnih senzora i preciznom optičkom kamerom, SonaVu donosi snagu nadljudskog sluha za fokusiranje na svoj živopisni zaslon u boji osjetljiv na dodir. Otključava neograničene primjene za pouzdanost imovine, očuvanje energije i sigurnost uključujući upravljanje curenjem komprimiranog zraka, pouzdanost električne imovine i još mnogo toga.[8]

Visoke amplitude na kameri će pokazivati mjesto kvara zbog kojeg dolazi do buke. Kamera će prikazati na mjestu kvara boje, „toplije“ boje ako je veća buka, a „hladnije“ ako je buka nešto manja od maksimalne buke.



Slika 22. Sonavu kamera [8]

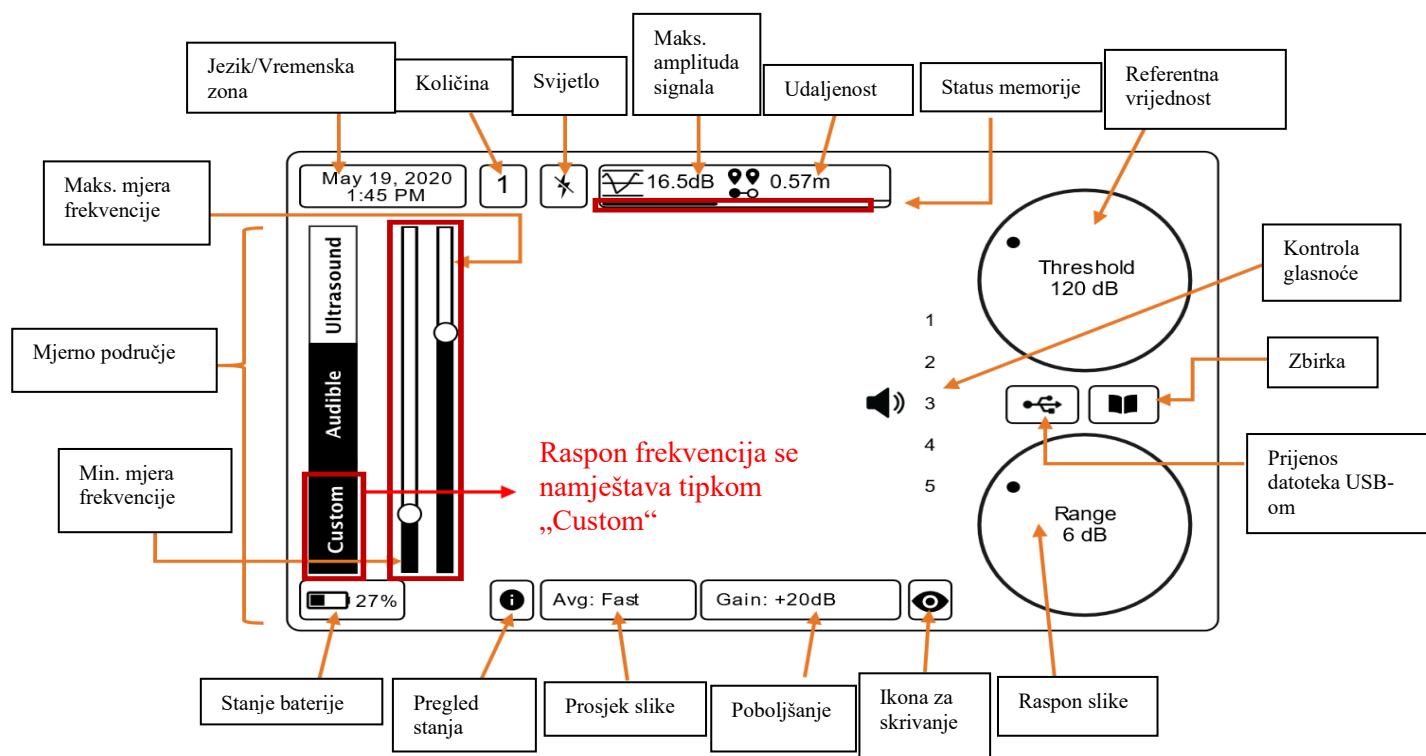


Slika 23. Prikaz funkcionalnosti ultrazvučne kamere [8]

Tablica 2. Opis funkcionalnosti ultrazvučne kamere [8]

ID	Ime	Opis	Broj značajki
1	Senzor/Mikrofon	Niz ultrazvučnih senzora	112
2	Kamera	Kamera za snimanje fotografija i videa	1
3	Senzor udaljenosti	Senzor mjeri udaljenost od izvora do senzora	1
4	Dvojno svjetlo	LED rasvjeta za korištenje SonaVu u mračnim situacijama	2
5	LCD ekran	Display velik 12 cm osjetljiv na dodir (rezolucija 800x480)	1
6	Gumb za napajanje	Držati 3 sekunde da se kamera uključi	1
7	Gumb za snimanje	Za snimanje videa i slikanje	1
8	Nosač za tronožac	Navojni utor za pričvršćivanje kamere na tronožac	1
9	Ulaz za punjenje	Za povezivanje kamere na punjač ili dodatno napajanje baterijom	1
10	HDMI	Povezivanje kamere preko kabela na projektor	1
11	Ulaz za USB	Skidanje slika/videoa; Nadogradnja/ažuriranje firmvera	1
12	Zvučni priključak	Audio priključak. Slušanje uživo zvukova kamere	1





Slika 24. Prikaz zaslona za upravljanje ultrazvučnom kamerom[8]

## 5.2. Simulator kvarova ležaja

Simulator kvarova ležaja (eng. *Balancing and Bearing Fault Simulator-BBS*) je posebno dizajniran za demonstraciju i podršku proučavanju grešaka ležaja i neuravnoteženosti u kontroliranim uvjetima. BBS je stroj promjenjive brzine koji se može koristiti za generiranje svake vrste greške pojedinačno ili u kombinacijama, pružajući stabilnu platformu za proučavanje. Budući da su problemi vezani uz ležajeve vrlo česti, bitno je temeljito razumjeti pridružene znakove kvara koji se javljaju u različitim radnim uvjetima. Isto se može reći i za neuravnoteženost, gdje će ispravno uravnotežen stroj tvornici uštedjeti vrijeme zastoja stroja, zamjenske dijelove, zalihe i potrošnju energije. BBS pruža osnovne postavke za izvođenje eksperimenata i učenje vibracijskih znakova neuravnoteženosti i kvarova ležajeva. Detaljno istraživanje određenih i naprednijih fenomena vibracija zahtijevat će dodatne priključke i učvršćenja koji su dostupni putem opsijskih kompleta.[9]



**Slika 25. Simulator kvarova ležaja [9]**

Značajke simulatora:

- a) Prijenosni, isplativi simulator vibracija za ravnotežu i ležaj
- b) Idealno za podučavanje balansiranja u više ravnina s rotorima sa središnjim/visoko postavljenim rotorima
- c) Može se postaviti tako da pokazuje frekvencije kvara ležaja i dalje i bliže umnošcima brzine vrtnje vratila
- d) Razvijanje tehnike obrade signala za prepoznavanje frekvencija kvarova ležajeva u prisutnosti nedostataka, pri višestrukim brzinama vratila, bez korištenja spektra visoke rezolucije
- e) Koristi se za prepoznavanje spektra vibracija različitih grešaka ležaja [9]

### **5.2.1. Kuglični ležaj ER12**

Ležaj koji se koristi za terstiranje kvarova na simulatoru BBS je kuglični ležaj ER12.



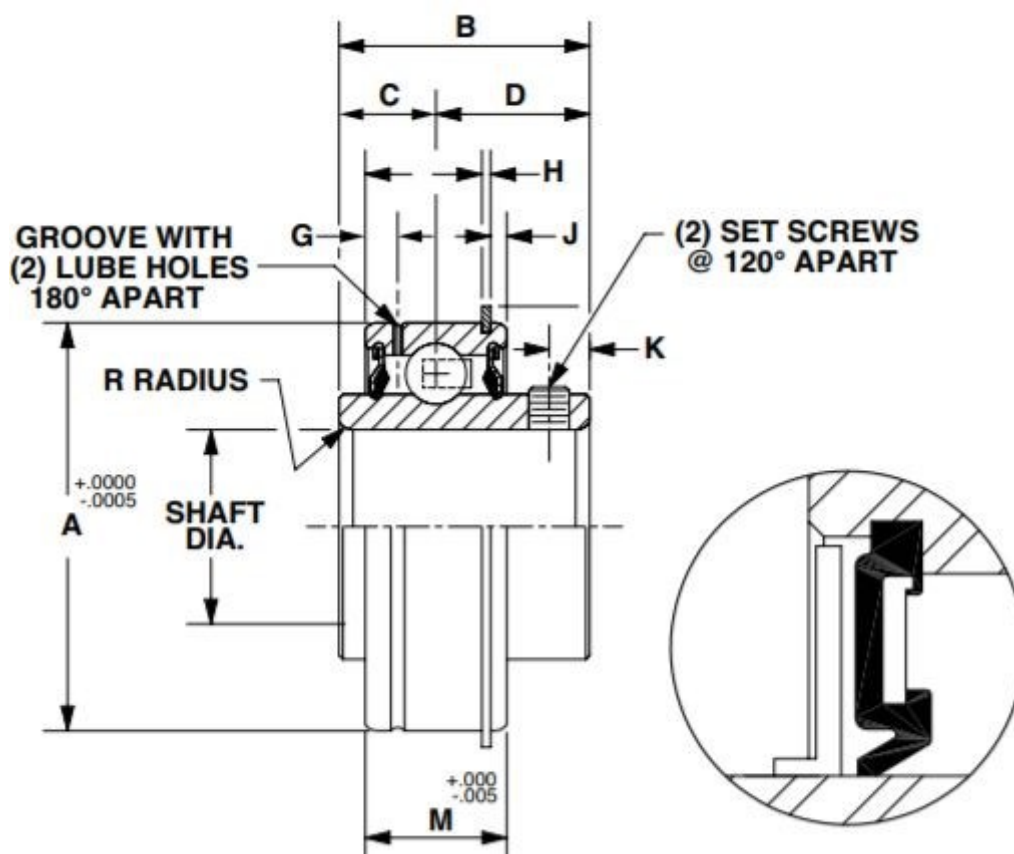
Slika 26. kuglični ležaj ER12 [10]

Tablica 3. Specifikacije ležaja ER12 [10]

<b>Promjer vanjskog prstena</b>	47.00 mm
<b>Promjer unutarnjeg prstena</b>	19.05 mm
<b>Dinamičko opterećenje (C)</b>	12722 N
<b>Statičko opterećenje (C<sub>0</sub>)</b>	6584 N
<b>Smjer opterećenja</b>	Radijalno
<b>Širina ležaja</b>	31.8 mm
<b>Materijal vanjskog prstena</b>	Čelik
<b>Materijal unutarnjeg prstena</b>	Čelik
<b>Materijal kuglice</b>	Čelik

PRINCIPLE DIMENSIONS												
BASIC BEARING NUMBER	SHAFT DIAMETER	WIDTH									RADIUS	
		O.D.										
		in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in		mm
		+0.000 -0.0005	+0.005 -0.005			+0.005 -0.005	+0.13 -0.13			+0.000 -0.005		+0.00 -0.13
		A	B	C	D	G	H	J	K	M	R	
ER10	5/8	1.850	1.219	0.406	0.813	0.141	0.047	0.094	3/16	0.625	0.040	
		47	30.96	10.32	20.65	3.57	1.19	2.38	4.76	15.88	1.02	
ER12	3/4	1.850	1.219	0.406	0.813	0.141	0.047	0.094	3/16	0.625	0.040	
		47	30.96	10.32	20.65	3.57	1.19	2.38	4.76	15.88	1.02	

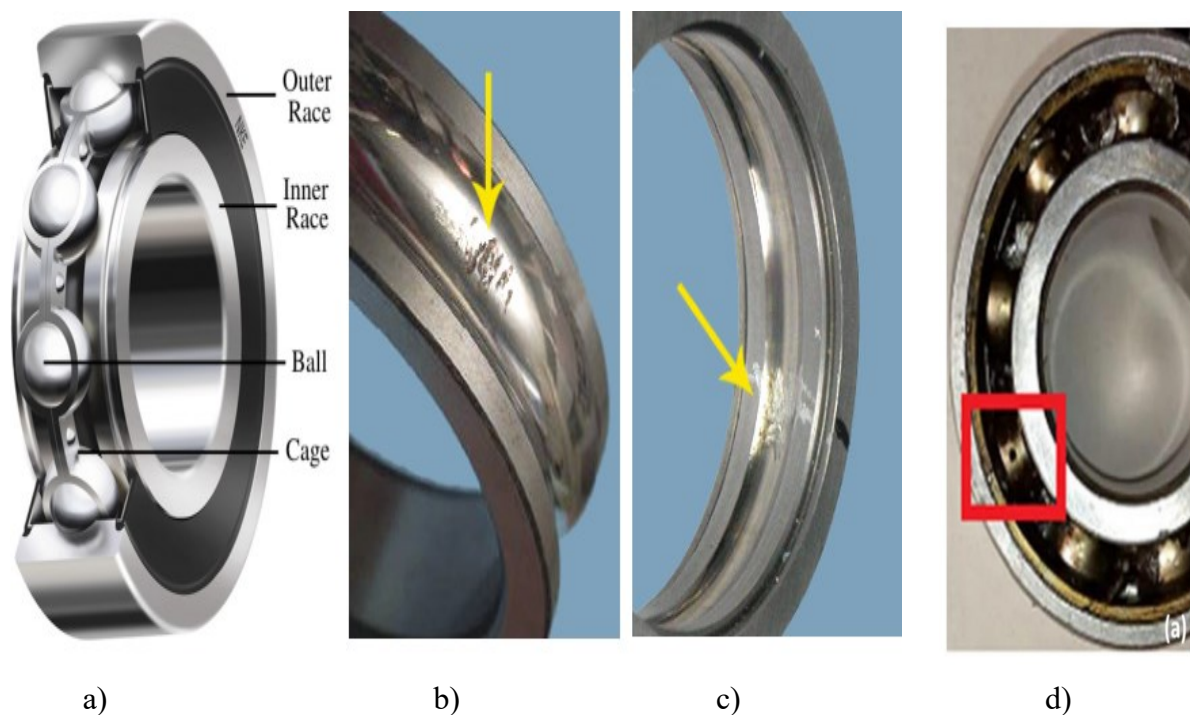
Slika 27. Dimenzije ležaja ER12 [11]



Slika 28. Nacrt ležaja ER12 [11]

### 5.2.1.1. Oštećenja ležaja ER12

Vrste oštećenja koje se mogu pojaviti na ležaju, a ujedno su i razlog testiranja na simulatoru, su oštećenja vanjskog prstena, unutarnjeg prstena, kuglice itd. Kod rada nekog stroja, oštećenja će uvijek biti frekvencija visokih amplituda.



**Slika 29. Primjeri oštećenja kugličnog ležaja; a) Normalan ležaj; b) Ležaj sa oštećenjem vanjskog prstena; c) Ležaj sa oštećenjem unutarnjeg prstena; d) Ležaj sa oštećenom kuglicom ; [12]**

Svaki ležaj koji ima različiti kvar će pokazivati drugačije amplitude od ostalih kvarova.

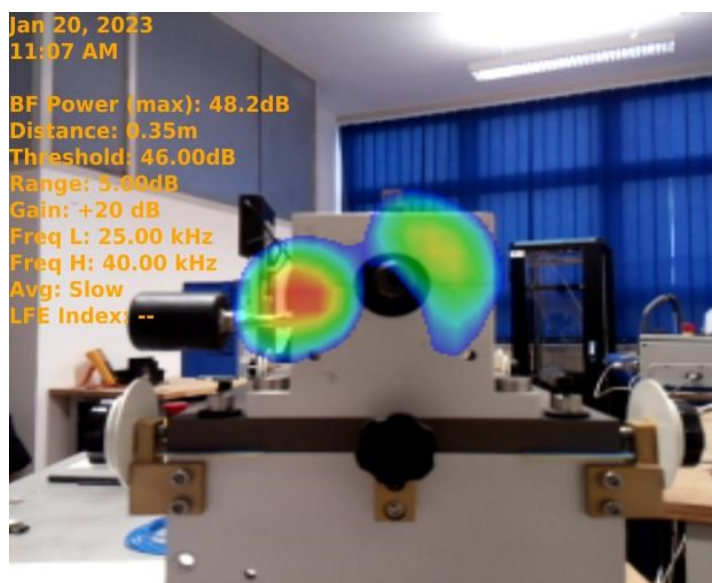
## 6. Rezultati mjerenja i diskusija

Praktični dio ovog rada je bio da se pomoću Sonavu kamere izmjere frekvencije kugličnih ležajeva pri različitim kvarovima na simulatoru kvarova ležaja:

1. Oštećenje vanjskog prstena ležaja
2. Oštećenje unutarnjeg prstena
3. Oštećenje kuglica
4. Kombinacija svih prijašnje navedenih kvarova

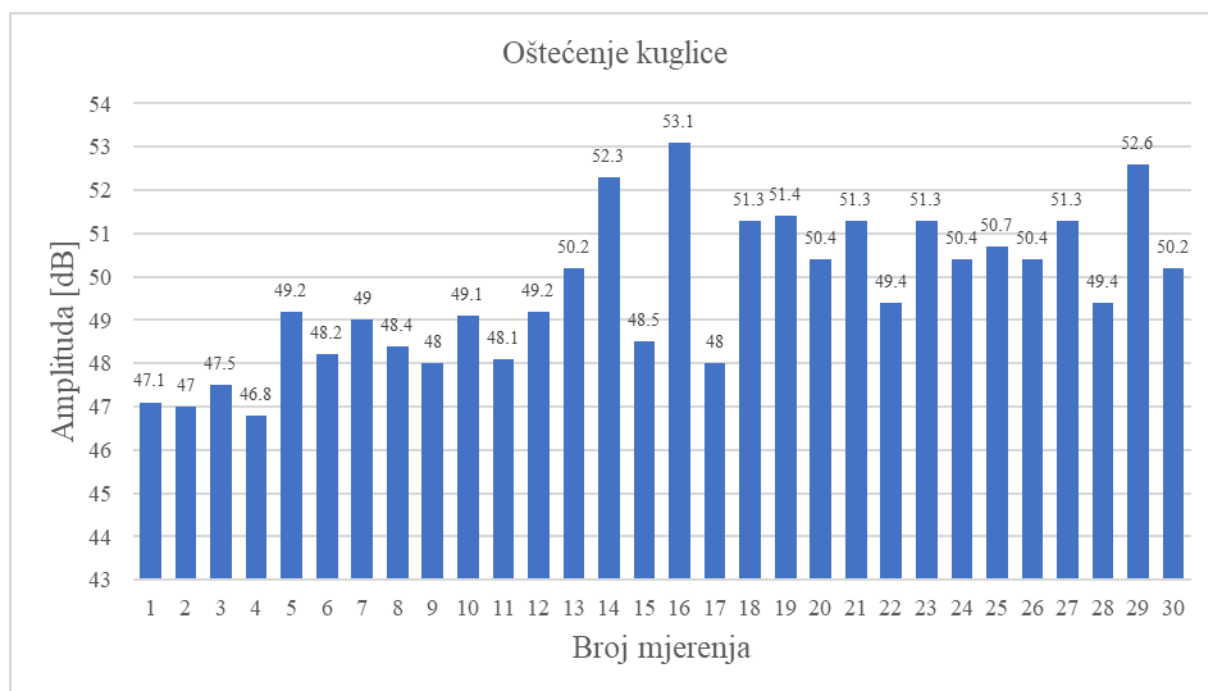
Napravljeno je po 30 snimanja za svaki tip kvara ležaja. Svako snimanje je trajalo jednu minutu. Brzina vrtnje simulatora je postavljena na 900 okretaja u minuti. Na kameri je postavljena referentna vrijednost amplitude na 46 dB za ležajeve sa oštećenim unutarnjim prstenom, oštećenom kuglicom i kombinacijom svih kvarova. Referentna vrijednost vanjskog prstena je postavljena na 42 dB jer je to jedini ležaj koji je na početku pokazivao „peakove“ ispod 46 dB. Da je ostavljena referentna vrijednost od 46 dB, kamera ne bi pokazivala nikakve frekvencije na ležaju dok se on vrti. Udaljenost kamere od izvora je bila 0.35 m.

### 6.1. Oštećenje kuglice



Amplituda	46.5 dB
Udaljenost	0.35 m
Referentna vrijednost	42 dB
Raspon	5 db
Dobitak	+20 dB
Najmanja frekvencija	25 kHz
Najveća frekvencija	40 kHz
Prosječna brzina	spora

**Slika 30. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje kuglice ležaja**

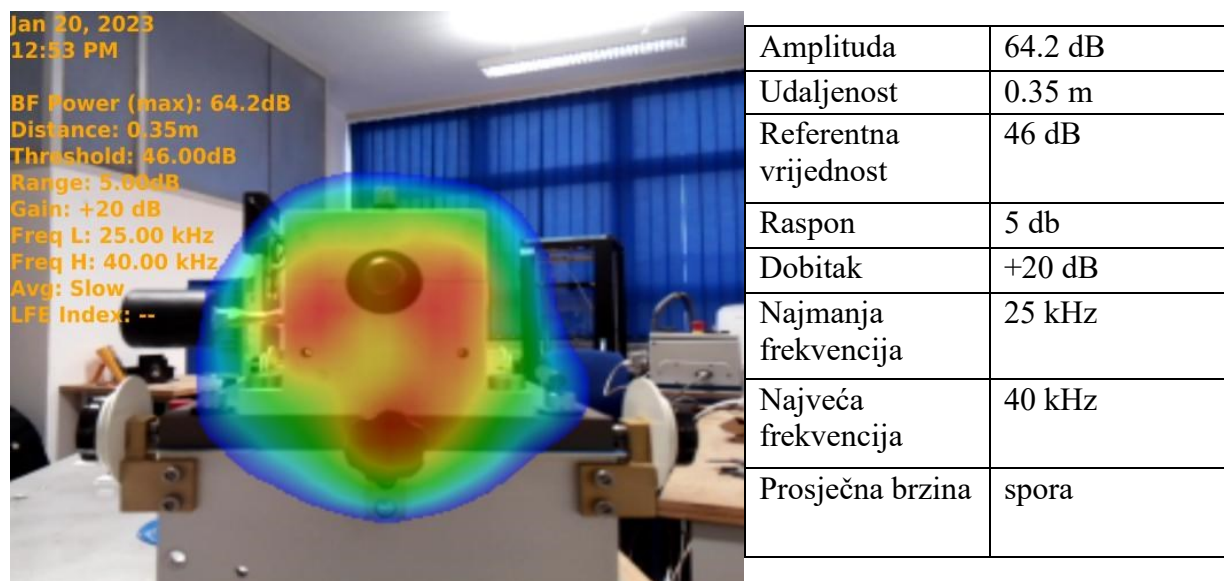


**Slika 31. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećene kuglice**

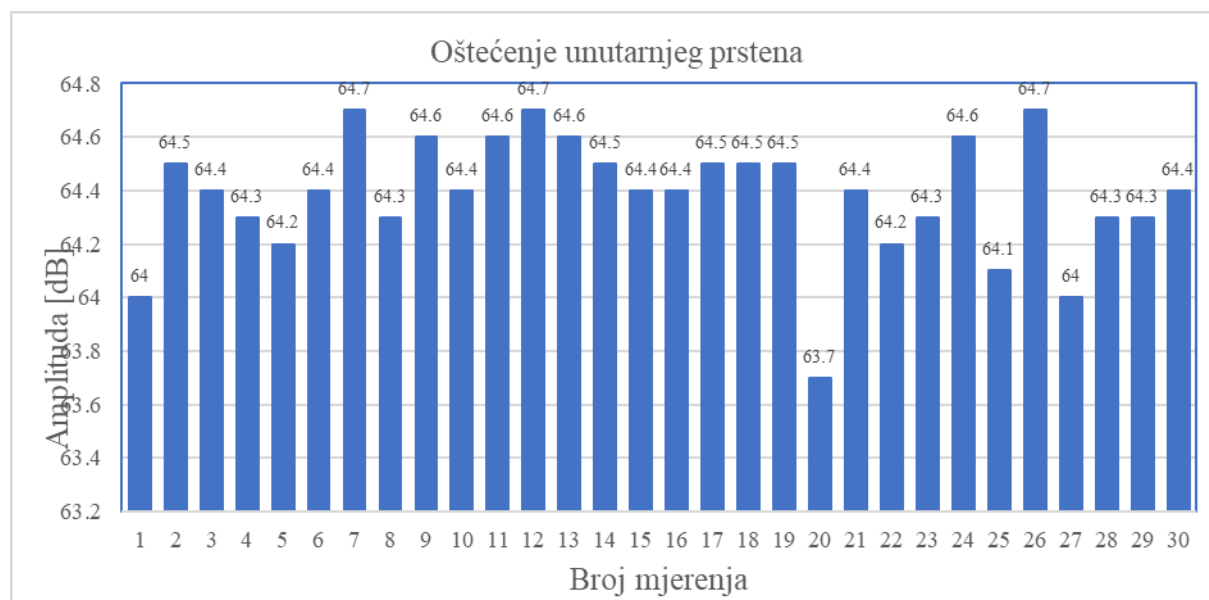
**Tablica 4. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećene kuglice**

Variable	Amplituda [dB]
Broj mjerenja	30
Aritmetička sredina	49.66
Raspon	6.3
Varijanca	2.942483
Standardna devijacija	1.715367
Medijan	49.4
Minimum	46.8
Maksimum	53.1

## 6.2. Oštećenje unutarnjeg prstena



Slika 32. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje unutarnjeg prstena ležaja



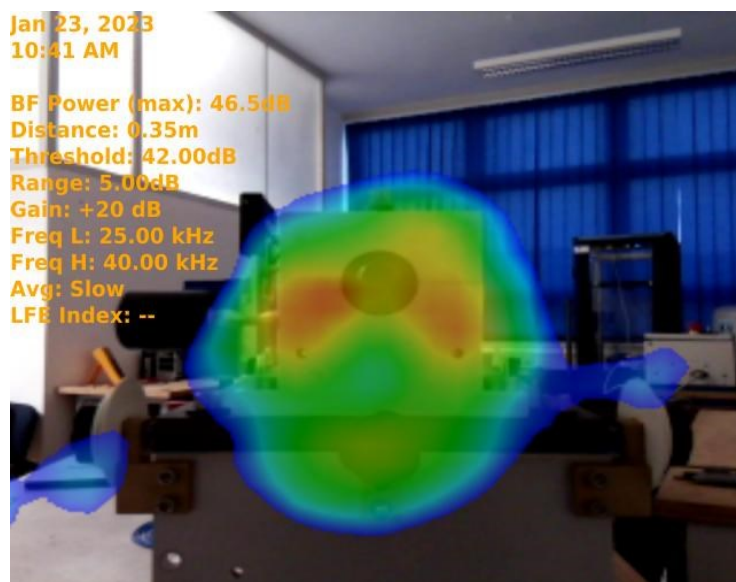
Slika 33. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećenog unutarnjeg prstena



Tablica 5. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog unutarnjeg prstena

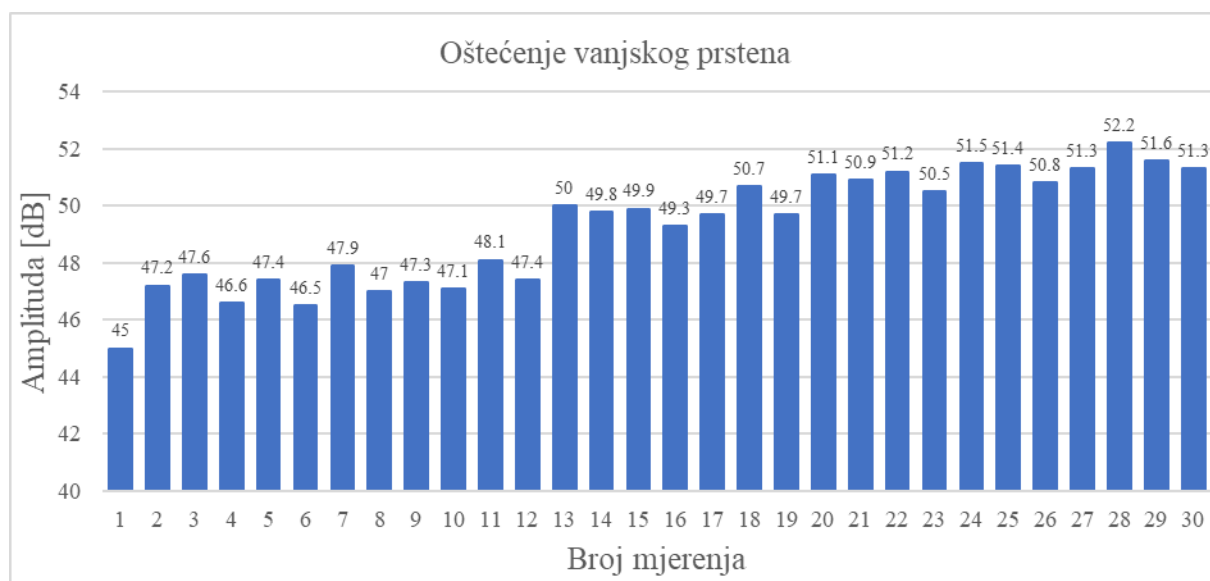
Varijable	Amplituda [dB]
Broj mjerenja	30
Aritmetička sredina	64.38333
Raspon	1
Varijanca	0.051782
Standardna devijacija	0.227556
Medijan	64.4
Minimum	63.7
Maksimum	64.7

### 6.3. Oštećenje vanjskog prstena



Amplituda	46.5 dB
Udaljenost	0.35 m
Referentna vrijednost	42 dB
Raspon	5 db
Dobitak	+20 dB
Najmanja frekvencija	25 kHz
Najveća frekvencija	40 kHz
Prosječna brzina	spora

Slika 34. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje oštećenje vanjskog prstena ležaja

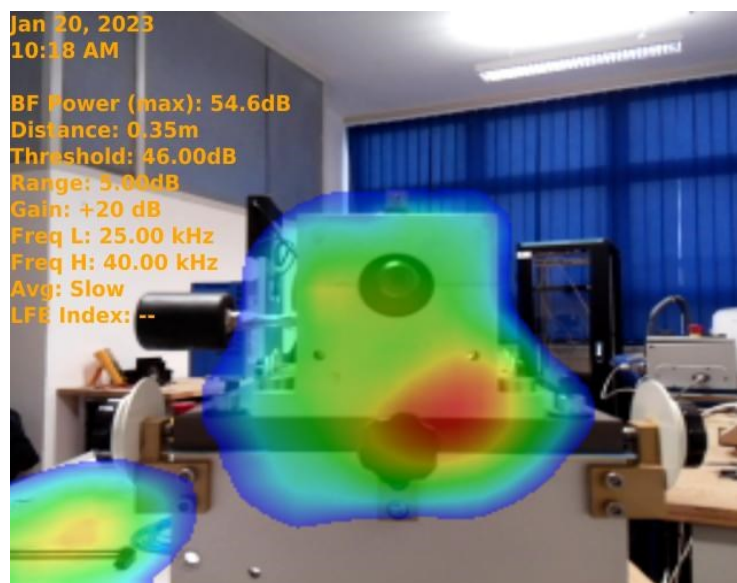


**Slika 35. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja oštećenog vanjskog prstena**

**Tablica 6. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog vanjskog prstena**

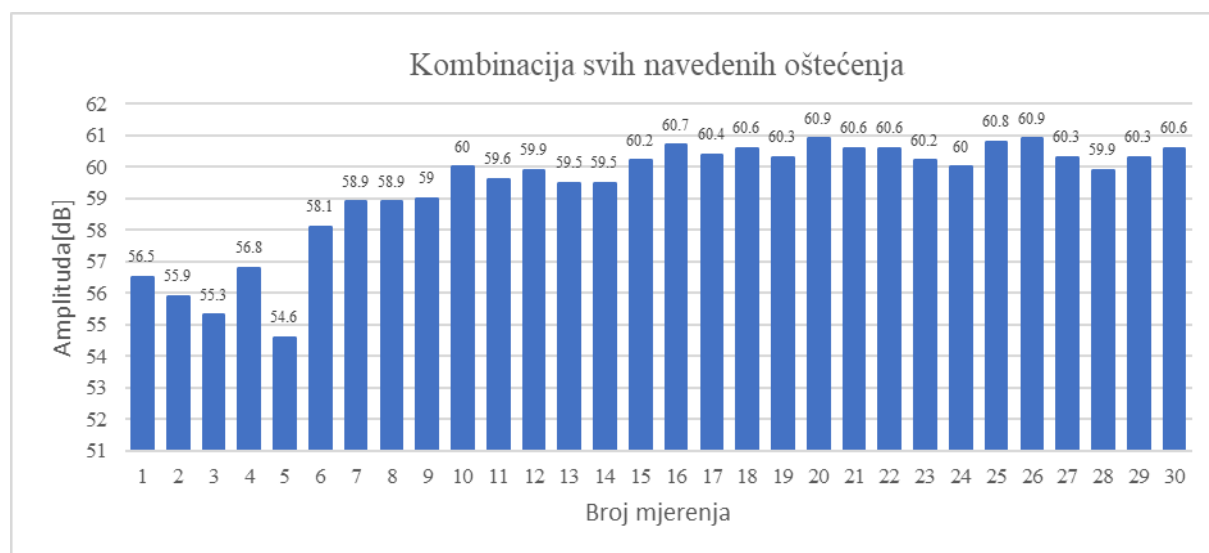
Varijable	Amplituda [dB]
Broj mjerenja	30
Aritmetička sredina	49.26667
Raspon	7.2
Varijanca	3.898851
Standardna devijacija	1.974551
Medijan	49.75
Minimum	45
Maksimum	52.2

#### 6.4. Kombinacija svih oštećenja



Amplituda	54.6 dB
Udaljenost	0.35 m
Referentna vrijednost	46 dB
Raspon	5 db
Dobitak	+20 dB
Najmanja frekvencija	25 kHz
Najveća frekvencija	40 kHz
Prosječna brzina	spora

Slika 36. Prikaz na Sonavu kameri koji prikazuje kombinaciju svih oštećenja



Slika 37. Graf vrijednosti mjerenja amplitude ležaja svih kvarova

**Tablica 7. Statističke vrijednosti amplituda ležaja oštećenog sa sva tri kvara**

<b>Varijable</b>	<b>Amplituda [dB]</b>
Broj mjerenja	30
Aritmetička sredina	59.32667
Raspon	6.3
Varijanca	3.081333
Standardna devijacija	1.755373
Medijan	60
Minimum	54.6
Maksimum	60.9

## 7. ZAKLJUČAK

Ultrazvuk se definira kao "zvučni valovi koji imaju frekvenciju iznad granice ljudskog sluha, ili više od 20.000 ciklusa u sekundi. Mnogi fizički događaji uzrokuju zvuk na zvučnim i/ili ultrazvučnim frekvencijama, analiza tih frekvencija često može ukazati na ispravan ili neispravan rad).

Ultrazvučno praćenje stanja je tehnika koja koristi zračne (beskontaktne) i strukturne (kontaktne) ultrazvučne instrumente za primanje visokofrekventnih ultrazvučnih emisija koje proizvodi radna oprema, električnih emisija i curenja itd. za praćenje stanja opreme koja se testira .

Ultrazvučni pretvornici elektronički prevode ultrazvučne frekvencije kroz proces koji se naziva heterodinizacija, sve do čujnog raspona uz zadržavanje kvalitete zvuka tijekom prijelaza. Ovi se signali promatraju na razinama intenziteta i/ili dB za analizu.

U pasivnim tehnikama ultrazvuk koji se detektira instrumentima u zraku ili konstrukcijama proizvodi se fizičkim procesom, tj. komponentom koja se analizira. Pasivni ultrazvuk koristi se uglavnom za kontaktne metode nadzora kao što su kvarovi na ležajevima, problemi s podmazivanjem, oštećenje zupčanika i kavitacije pumpe" i beskontaktne metode nadzora kao što su curenje u kotlovima, kondenzatorima i izmjenjivačima topline, električno pražnjenje i korona u visokonaponskoj opremi itd. Ultrazvuk u zraku detektira visokofrekventni zvuk koji proizvodi mehanička oprema, električna pražnjenja i većina curenja koja su po prirodi iznimno kratkovalna. Ovi kratkovalni signali obično su prilično usmjereni i lokalizirani što ih čini vrlo lakim za odvajanje od pozadinskih zvukova biljaka i otkriti njihovu točnu lokaciju.

S druge strane, aktivni ultrazvuk je pristup u kojem se precizno vođena zraka ultrazvuka prenosi na fizičku strukturu kako bi se analizirali površinski i pod površinski diskontinuiteti kao što su raslojavanja, odvajanja, pukotine i poroznost u ranim fazama.

Eksperimentalne metode pomoću simulator kvarova ležaja i Sonavu kamere su jedan od primjera beskontaktne metode mjerenja ultrazvuka na oštećenom ležaju. Praktičnim djelom se utvrdilo da ležaj sa oštećenim unutarnjim prstenom proizvodi najveću buku i stvara visoke frekvencije i amplitude. Iz tog razloga će kamera prikazivati najviše boja na mjestu kvara. Ležaj sa oštećenim unutarnjim prstenom pokazuje najmanju razliku između najveće i najmanje vrijednosti amplitude stoga se može reći da je vrijednost konstantna. Najmanju buku

proizvode ležaji sa oštećenom kuglicom i vanjskim prstenom sa srednjom vrijednošću oko 49.5 dB. Ono što ih razlikuje od ležaja sa oštećenim unutarnjim prstenom je razlika između minimalne i maksimalne vrijednosti koja iznosi 7.2 (za ležaj sa oštećenim vanjskim prstenom) i 6.3 dB (za ležaja oštećenom kuglicom). U konačnici se testirao ležaj sa sva tri navedena kvara koji također pokazuje veliku amplitudu srednje vrijednosti oko 59 dB i kojemu je razliku između maksimalne i minimalne vrijednosti 6.3 dB. Prednost ove metode je ta što je bezopasna jer se mjeri beskontaktnim senzorom pa opasnost zbog mjerenja ne postoji. Nedostatak ove metode bi bio taj što nam beskontaktna metoda ne daje točan uvid u rezultate jer izmjerena amplituda na kameri ne mora nužno biti takva u stvarnosti zbog zakona o obrnutoj udaljenosti. Rješenje za takav nedostatak još uvijek ne postoji pa će se vjerojatno u kasnijoj budućnosti pomoću različitih softvera riješiti taj problem,

## LITERATURA

- [1] Krstelj, V.: Ultrazvučna kontrola, 2002.
- [2] SDT Ultrasound Solutions; Level 1 Ultrasound inspector training, 2022.
- [3] ISO 29821, Condition monitoring and diagnostics of machines — Ultrasound — General guidelines, procedures and validation, 2018.
- [4] Cornelius Scheffer Paresh Girdhar, Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance, 2004.
- [5] Mobius Institute; <https://www.cbmconnect.com/>
- [6] Lisjak, D: Ultrazvuk u nadzoru stanja, 2022.
- [7] <https://www.machinerylubrication.com/Read/1863/lubricant-failure>
- [8] <https://sdt.help/Sonavu/sonavu-manual/>
- [9] <https://spectraquest.com>
- [10] <https://www.rexnord.com/products/er12>
- [11] <https://us.misumi-ec.com>
- [12] <https://www.semanticscholar.org/paper/Vibration-Based-Bearing-Fault-Diagnosis-Using-of-Heydarzadeh-Nourani>
- [13] Novinc, Ž., Halep, A.: Tehnička dijagnostika i monitoring u industriji, Kigen, 2010.
- [14] Davies, A.: Handbook of condition monitoring, 1998.
- [15] Lisjak, D.: Predavanje iz kolegija Održavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [16] <https://www.gemeasurement.com/inspection-ndt/ultrasound/krautkramer-usm-36portable-flaw-detector>
- [17] Omelić, M.: Ultrazvučna metoda-UT (osnove praktičnog rada)
- [18] DyLab, Inc. Hansin S-meca B108, 1359 Kwanpyung Dong, Yuseong Gu, Deajeon, Korea BTS-P Bearing Test Simulator - Prognostics User Manual
- [19] Nenad Bolf, MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA, str. 262.
- [20] Alsgolbal.com, Best Practice Bearing Grease Management using Ultrasound