

# Dijagnostika stanja rotacijskih strojeva primjenom ultrazvuka

---

**Adamić - Golić, Lara**

**Undergraduate thesis / Završni 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:239231>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Lara Adamić Golić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak

Student:

Lara Adamić Golić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Dragutinu Lisjaku na prenesenom znanju, korisnim savjetima i uputama tijekom izrade rada.

Također, zahvaljujem asistentu, dr. sc. Davoru Kolaru na danim savjetima i pomoći prilikom provedbe praktičnog djela rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i bezuvjetnoj potpori tijekom dosadašnjeg studija.

Lara Adamić Golić



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 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lara Adamić - Golić** JMBAG: **0035225968**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dijagnostika stanja rotacijskih strojeva primjenom ultrazvuka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Diagnostics of the condition of rotary machines using ultrasound**

Opis zadatka:

Dijagnostika rane degradacije radne učinkovitosti rotacijskih strojeva vrlo je važna u industriji s pretežito rotacijskom tehnološkom opremom. Cilj je izbjegavanje neplaniranih i vremensko dugih zastoja u proizvodnji. Jedna od vrlo učinkovitih metoda za sprečavanje takvih stanja je primjena ultrazvučne dijagnostike. Metoda se bazira na kontroli praćenja promjenama ultrazvučnih frekvencija čije vrijednosti u konačnici označavaju veći ili manji stupanj degradacije funkcionalnosti opreme.

U radu je sukladno navedenom potrebno:

1. Opisati primjenu ultrazvuka kao metodu održavanja rotacijske opreme,
2. Prikazati primjere primjene u industriji,
3. Izvršiti laboratorijska mjerenja i dijagnosticirati stanje kotrljajućih ležajeva primjenom ultrazvuka.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD .....	1
2. FIZIKA ULTRAZVUKA .....	2
2.1. Osnove zvuka .....	2
2.2. Brzina zvuka .....	3
2.3. Refleksija .....	4
2.4. Refrakcija .....	5
3. OSNOVE ULTRAZVUČNE DIJAGNOSTIKE .....	8
3.1. Kontaktni senzori .....	8
3.2. Beskontaktni senzori .....	9
3.3. Heterodina transformacija .....	12
3.4. Karakterizacija signala .....	13
4. PRIMJENE ULTRAZVUKA U INDUSTRIJI .....	14
4.1. Propuštanja .....	14
4.2. Inspekcija ventila .....	16
4.3. Inspekcija sustava pare .....	17
4.4. Inspekcija pumpi .....	18
4.5. Inspekcija električnih instalacija .....	19
4.6. Inspekcija ležajeva .....	23
4.6.1. Uzroci kvarova ležaja i tipovi oštećenja .....	24
4.6.2. Podmazivanje ležajeva .....	25
4.6.3. Detekcija kvarova ležaja .....	27
5. EKSPERIMENTALNE METODE .....	28
5.1. SDT340 ultrazvučni uređaj .....	28
5.1.1. Mjerni ekran .....	30
5.1.2. Postavke mjerenja .....	31
5.2. Simulator kvarova ležaja .....	32
5.3. Kuglični ležaj ER12 .....	33
5.4. Oštećenja kugličnog ležaja ER12 .....	34
6. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA .....	36

---

6.1. Oštećenje unutarnjeg prstena ležaja.....	37
6.2. Oštećenje vanjskog prstena ležaja .....	39
6.3. Oštećenje kuglice ležaja .....	40
6.4. Normalno stanje ležaja.....	42
7. ZAKLJUČAK .....	44
LITERATURA.....	45



**POPIS SLIKA**

Slika 1. Pomicanje čestica različitih valova: (a) longitudinalni, (b) transverzalni [2] .....	2
Slika 2. Refrakcija zvuka (ultrazvuka) [5] .....	6
Slika 3. Snellov zakon [5] .....	7
Slika 4. a) igličasti kontaktni senzor, b) kontaktni senzor s navojem, c) dodaci za montažu i magnetsko spajanje [8][9] .....	8
Slika 5. a) fleksibilni senzor, b) parabolični senzor c) senzor proširene udaljenosti – EDS [10][3] .....	10
Slika 6. Tehnike mjerenja: a) zaklanjanje, b) pozicioniranje, c) prekrivanje, d) korištenje refleksije [1] .....	11
Slika 7. Heterodina transformacija [11] .....	12
Slika 8. Karakteristične vrijednosti signala [3] .....	13
Slika 9. Udaljenosti za detekciju propuštanja pomoću beskontaktnih ultrazvučnih senzora [15] .....	15
Slika 10. Aktivno ultrazvučno ispitivanje [3] .....	16
Slika 11. Ultrazvučna inspekcija parne zamke [10] .....	18
Slika 12. Kavitacija impelera [3] .....	19
Slika 13. Proces nastajanja ozona [3] .....	20
Slika 14. Mjesta na kojima se pojavljuje korona [3] .....	21
Slika 15. Vremenska domena signala korone [3] .....	21
Slika 16. Uzorak povezan s pojavom praćenja [3] .....	22
Slika 17. Vremenska domena signala praćenja [3] .....	22
Slika 18. Pojava električnog luka [3] .....	23
Slika 19. Vremenska domena signala praćenja [3] .....	23
Slika 20. Metode inspekcije ležajeva [11] .....	24
Slika 21. Podmazivanje ležaja slučaj 1 [3] .....	26
Slika 22. Podmazivanje ležaja slučaj 2 [3] .....	26
Slika 23. SDT340 komplet opreme [10] .....	28
Slika 24. Mjerni ekran SDT340 uređaja [10] .....	30
Slika 25. Postavke mjerenja SDT340 uređaja [10] .....	31
Slika 26. Simulator kvarova ležaja .....	32
Slika 27. Kuglični ležaj ER12 [19] .....	33
Slika 28. Stanje kugličnog ležaja: a) normalno stanje ležaja, b) oštećenje unutarnjeg prstena, b) oštećenje vanjskog prstena, d) oštećenje kuglice [20] .....	34
Slika 29. Postavke mjerenja u softveru Ultranalysis Suite 3 .....	36
Slika 30. Prijenos podataka s uređaja SDT340 na računalo .....	37
Slika 31. Vremenska domena signala ležaja s oštećenim unutarnjim prstenom .....	37
Slika 32. Frekvencijska domena signala ležaja s oštećenim unutarnjim prstenom .....	38



---

Slika 33. Vremenska domena signala ležaja s oštećenim vanjskim prstenom .....	39
Slika 34. Frekvencijska domena signala ležaja s oštećenim vanjskim prstenom .....	39
Slika 35. Vremenska domena signala ležaja s oštećenom kuglicom .....	40
Slika 36. Frekvencijska domena signala ležaja s oštećenom kuglicom .....	41
Slika 37. Vremenska domena signala ležaja normalnog stanja .....	42
Slika 38. Frekvencijska domena signala ležaja normalnog stanja .....	42

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Brzina zvuka u različitim materijalima [3].....	3
Tablica 2. Tehničke specifikacije kugličnog ležaja ER12 [19] .....	33
Tablica 3. Karakteristične vibracije ležaja ER12 [12].....	34

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$v$	m/s	brzina zvuka
$\lambda$	m	valna duljina
$f$	Hz	frekvencija
$E$	N/m <sup>2</sup>	modul elastičnosti
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$Z$	Ns/m <sup>3</sup>	akustična impedancija
$p$	N/m <sup>2</sup>	tlak
$U$	m <sup>3</sup> /s	volumni protok
$u$	m/s	specifični protok
$c$	m/s	brzina zvuka
$\alpha$	°	kut upadnog vala
$\beta$	°	kut reflektiranog vala
$D$	mm	najveća udaljenost između kotrljajućih elemenata
$d$	mm	promjer kotrljajućeg elementa

## **SAŽETAK**

Tema ovog završnog rada je dijagnostika stanja rotacijskih strojeva primjenom ultrazvuka. Rotacijski strojevi su uređaji koji koriste rotacijsko gibanje za obavljanje rada. Primjeri uključuju motore, generatore, pumpe, kompresore i turbine. Rad sadrži teorijski i praktični dio. Teorijski dio obuhvaća fiziku ultrazvuka, osnove ultrazvučne dijagnostike te primjene ultrazvuka u industriji. Ova teorijska osnova omogućuje razumijevanje praktičnog dijela u kojem se eksperimentalnim metodama detektira stanje ležaja. Eksperimentalne metode uključuju simulator kvarova ležaja i SDT340 ultrazvučni uređaj. Primjenom eksperimentalnih metoda ne samo da će se detektirati stanje ležaja, već će se i identificirati dijelovi na kojima se pojavljuje oštećenje. Ležajevi su ključni za održavanje pouzdanosti i dugovječnosti rotacijske opreme jer omogućuju glatko i stabilno funkcioniranje rotacijskih dijelova.

Ključne riječi: ultrazvuk, ultrazvučna dijagnostika, rotacijski strojevi, ležajevi.

## **SUMMARY**

The topic of this thesis is the diagnosis of the condition of rotating machinery using ultrasound. Rotating machinery refers to devices that utilize rotational motion to perform work. Examples include motors, generators, pumps, compressors, and turbines. The thesis consists of both theoretical and practical parts. The theoretical part covers the physics of ultrasound, the basics of ultrasonic diagnostics, and the applications of ultrasound in industry. This theoretical foundation enables the understanding of the practical part, in which the condition of bearings is detected using experimental methods. The experimental methods include a bearing fault simulator and the SDT340 ultrasonic device. By applying experimental methods, not only will the condition of the bearings be detected, but also the specific parts where damage occurs will be identified. Bearings are crucial for maintaining the reliability and longevity of rotating equipment as they ensure the smooth and stable operation of rotating components.

Keywords: ultrasound, ultrasonic diagnostics, rotating machinery, bearings.

## 1. UVOD

Ultrazvučna dijagnostika je zbog svoje preciznosti, neinvazivnosti i sposobnosti ranog otkrivanja kvara postala neizostavan alat u održavanju i inspekciji razne industrijske opreme. Povijest primjene ultrazvuka u industriji započela je sredinom 20. stoljeća, inspirirana medicinskom uporabom ultrazvuka. S vremenom, tehnologija je napredovala, omogućujući preciznije mjerenje i analizu stanja strojeva i opreme. Jedna od glavnih prednosti korištenja ultrazvuka je njegova sposobnost otkrivanja potencijalnih problema u ranoj fazi, prije nego što dođe do ozbiljnih kvarova. Upravo iz tog razloga postoji širok spektar primjene ultrazvučne dijagnostike u industriji. To uključuje inspekciju ventila, pri čemu se detektiraju propuštanja, blokiranja i problemi s kavitacijom. Inspekcija sustava pare fokusira se na praćenje stanja parnih zamki kako bi se osiguralo učinkovito uklanjanje kondenzata i održavanje čiste pare. Kod električnih instalacija ultrazvučna dijagnostika omogućuje detekciju pojave korone, praćenja i električnog luka, čime se sprječavaju potencijalno opasni kvarovi. Inspekcija pumpi također ima značajnu ulogu u održavanju industrijskih postrojenja, omogućujući rano otkrivanje problema kao što su neusklađenost spojeva, istrošenost brtvi i mehanička labavost. Dijagnostika stanja ležajeva od osobitog je značaja za povećanje učinkovitosti i trajnosti rotacijskih strojeva, budući da su ležajevi među najvećim uzročnicima kvarova istih. Adekvatno podmazivanje, podržano ultrazvučnom dijagnostikom, te mogućnost detekcije kvara na samom ležaju od iznimnog je značaja u preventivnom održavanju. Ultrazvuk se koristi i kao alat u eksperimentalnim metodama za dijagnostiku stanja opreme zbog svoje sposobnosti da precizno otkrije i analizira vibracije. Upotrebom simulatora kvarova moguće je simulirati stvarne situacije iz prakse, što stvara optimalne uvjete za obuku tehničara u sigurnom okruženju. Time se omogućava rano otkrivanje potencijalnih kvarova i sprečavanje većih problema u stvarnim radnim uvjetima. Mjerenja generiranog ultrazvuka na modulima simulatora pomoću ultrazvučnog uređaja osiguravaju preciznost i pouzdanost dobivenih rezultata. Također, ultrazvučni uređaji omogućuju detaljnu analizu signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni te spremanje podataka za praćenje trenda pogoršanja stanja.

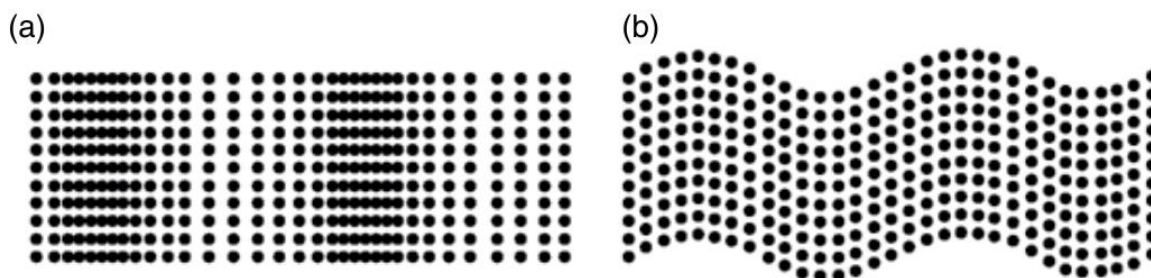
## 2. FIZIKA ULTRAZVUKA

Zvuk je mehanički val koji nastaje vibracijom molekula u raznim medijima. Ultrazvuk, s frekvencijom većom od 20 kHz, nečujan je za ljudsko uho. Propagacija ultrazvučnih valova može biti longitudinalna (kompresijska) ili transverzalna (smična), ovisno o smjeru oscilacija čestica. Brzina zvuka, koja se mjeri u metrima u sekundi (m/s), ovisi o gustoći i elastičnosti materijala te varira s promjenama temperature. Prilikom prolaska kroz različite medije, ultrazvučni valovi podliježu refleksiji i refrakciji, što je određeno akustičnom impedancijom medija. Razumijevanje ovih osnovnih principa zvuka i ultrazvuka ključno je za daljnje razumijevanje primjene ultrazvuka u dijagnostičkim i analitičkim postupcima.

### 2.1. Osnove zvuka

Zvuk je mehanički val koji nastaje vibracijom molekula u elastičnim medijima poput plinova, tekućina i krutina. Zvuk se nalazi u širokom rasponu frekvencija, pri čemu karakteristike zvučnih valova variraju ovisno o frekvenciji. Ultrazvuk je zvučni val čija je frekvencija veća od 20 kHz, što ga čini nečujnim za ljudsko uho. To je visoko usmjereni val niske energije koji se generira pojavom trenja, udarca, turbulencije i ionizacije. [1]

Propagacija ultrazvučnih valova u mediju može poprimiti različite oblike. Najčešći tipovi valova propagacije su longitudinalni (kompresijski) i transverzalni (smični) valovi. U longitudinalnim valovima, čestice osciliraju u smjeru propagacije, dok u transverzalnim valovima čestice osciliraju normalno na smjer propagacije. Longitudinalni valovi mogu se širiti u bilo kojem mediju koji posjeduje volumensku elastičnost (čvrste tvari i tekućine), dok se transverzalni valovi šire samo u medijima koji posjeduju elastičnost oblika (čvrste tvari i neke visko elastične tekućine). Pored čisto longitudinalnih i transverzalnih valova, postoje valovi koji uključuju kombinaciju longitudinalnog i transverzalnog gibanja, poput fleksijskih valova, površinskih valova i torzijskih valova. [2]



Slika 1. Pomicanje čestica različitih valova: (a) longitudinalni, (b) transverzalni [2]



## 2.2. Brzina zvuka

Brzina zvuka određuje se kao mjera brzine kojom se zvuk širi kroz različite medije (plinove, tekućine ili čvrste tvari) i mjeri se u jedinicama brzine: metrima u sekundi (m/s) ili stopama u sekundi (ft/s). [3]

Brzina zvuka, označena kao:

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

gdje su:

$\lambda$  - valna duljina [m]

$f$  - frekvencija [Hz]

Brzina zvuka ovisi o gustoći materijala i njegovoj elastičnosti, što se matematički može izraziti kao:

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

gdje su:

$E$  - modul elastičnosti [N/m<sup>2</sup>]

$\rho$  - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]

Budući da se elastične karakteristike materijala i njegova gustoća mijenjaju s promjenama temperature (i tlaka u slučaju plinova), tako se mijenja i brzina zvuka. Na primjer, brzina zvuka u zraku na temperaturi od 0°C i tlaku od 1 bar iznosi 331 m/s, dok na temperaturi od 20°C iznosi 343 m/s, što predstavlja povećanje od 3,6%. Ako se generira zvuk iste valne duljine, resultantna frekvencija će se također povećati za 3,6%. [3]

**Tablica 1. Brzina zvuka u različitim materijalima [3]**

Materijal	Brzina zvuka [m/s]
voda pri 0°C	1403
voda pri 20°C	1481

voda pri 100°C	1543
bakar	4600
željezo	5130
čelik	6100
nehrđajući čelik	5790

### 2.3. Refleksija

Prilikom okomitog ulaska ultrazvučnog snopa u materijal koji se ispituje, na granici između dva medija dolazi do djelomične refleksije ultrazvučnih valova, kao i do njihovog prijelaza, tj. transmisije, u drugi medij. Ovo se događa pod uvjetom da akustične impedancije ( $Z$ ) oba medija nisu jednake.

Akustička impedancija je omjer akustičnog tlaka  $p$  i akustičnog volumnog protoka  $U$  te na određenoj frekvenciji pokazuje koliko se akustičnog tlaka generira određenom vibracijom zraka na toj frekvenciji. [3]

Akustična impedancija [ $\text{Ns/m}^3$ ], označena kao:

$$Z = \frac{p}{U} \quad (3)$$

gdje su:

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

$U$  - volumni protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Specifična akustična impedancija je omjer akustičnog tlaka i specifičnog protoka, odnosno protoka po jedinici površine. Često se definira i kao omjer gustoće materijala te brzine zvuka u materijalu. [3]

Specifična akustična impedancija [ $\text{Ns/m}^2$ ], označena kao:

$$z = \frac{p}{u} = \frac{\rho}{c} \quad (4)$$

gdje su:

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

$u$  - specifični protok [m/s]

$\rho$  - gustoća [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  - brzina zvuka [m/s]

Specifična Akustička Impedancija objašnjava ponašanje zvuka na barijeri između dva medija s različitim akustičnim svojstvima:

$$R = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2 \quad (5)$$

gdje su:

$R$  - amplituda reflektiranog zvuka

$z_1$  - specifična akustična impedancija medija 1

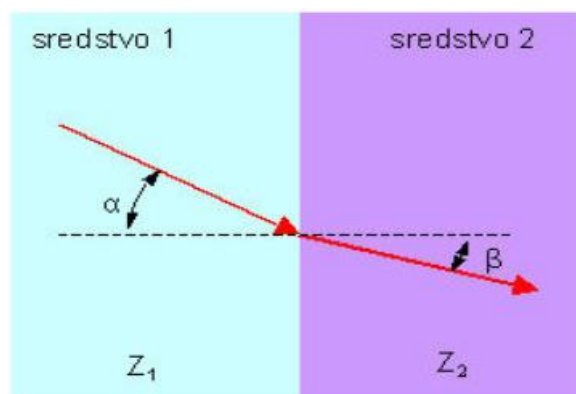
$z_2$  - specifična akustična impedancija medija 2

Pretpostavljajući očuvanje energije, amplituda transmitiranog zvuka će iznositi  $1-R$ . Kada dva medija s vrlo sličnim impedancijama dolaze u kontakt, refleksija na njihovoj granici je minimalna, što rezultira vrlo dobrom transmisijom zvuka. Veća razlika u impedancijama rezultira većom refleksijom zvuka, što smanjuje njegovu transmisiju. [3]

Prilikom korištenja ultrazvuka na ležajevima ili ventilima može postojati više materijala kroz koje ultrazvuk, koji generira ležaj ili trenje, mora proći do površine gdje se nalazi kontaktna sonda. Budući da svaka promjena materijala uzrokuje refleksiju i odgovarajuće smanjenje prenesenog ultrazvuka, potrebno je smanjiti istu. Uobičajen način je uzimanje očitavanja s metalne cijevi za mast. Ako bi čeličnu cijev za mast (specifična akustična impedancija 4,516) na čeličnom ležaju zamijenili sa aluminijskom cijevi za mast (specifična akustična impedancija 1,71), na granici između ležaja i cijevi reflektiralo bi se 20% ultrazvučnog signala. Ova promjena bi smanjila preneseni signal za 1,6 dB $\mu$ V. [3]

## 2.4. Refrakcija

Prilikom ulaska ultrazvučnog vala pod kutom različitim od 90°, reflektirani i transmitirani valovi mijenjaju svoj put i ne vraćaju se na svoje izvorno mjesto. Promjena putanje transmitiranih valova poznata je kao lom ili refrakcija. [4]



**Slika 2. Refrakcija zvuka (ultrazvuka) [5]**

Zakon refrakcije glasi [5]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (6)$$

gdje su:

$\alpha$  –kut upadnog vala [°]

$\beta$  –kut reflektiranog vala [°]

$Z_1$  -akustična impedancija materijala upadnog vala [Ns/m<sup>3</sup>]

$Z_2$  -akustična impedancija materijala prenesenog vala [Ns/m<sup>3</sup>]

### Snellov zakon

Veza između kuteva i brzine širenja ultrazvučnih valova dana je Snellovim zakonom, pri čemu vrijedi:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (7)$$

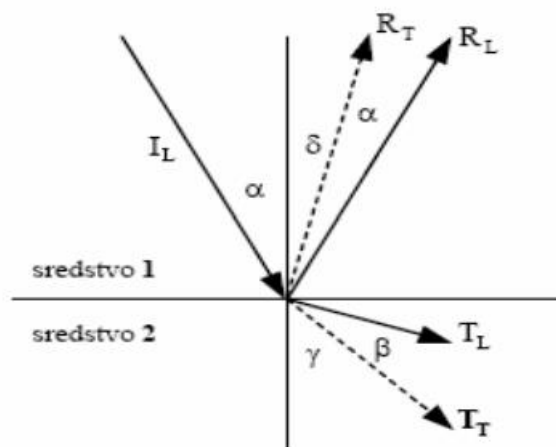
gdje su:

$\alpha, \beta$  - kutovi koje val zatvara s normalom na granicu sredstva [°]

$v_1, v_2$  - brzina odgovarajućeg vala u sredstvu u kojem se širi [m/s]

Za longitudinalni i transverzalni (reflektirani i lomljeni) val vrijedi [5]:

$$\frac{v_{L1}}{\sin \alpha} = \frac{v_{L2}}{\sin \beta} = \frac{v_{T1}}{\sin \gamma} = \frac{v_{T2}}{\sin \delta} \quad (8)$$



Slika 3. Snellov zakon [5]

Prema Snellovom zakonu, smjer reflektiranog i lomljenog vala određuje se brzinom vala u određenom mediju, stoga će odnos komponenti longitudinalnog i transverznog vala uvijek ovisiti o njihovim brzinama. Budući da je brzina transverznog vala približno polovica brzine longitudinalnog vala u istom mediju, transverzalni val će se reflektirati i lomiti pod kutom koji je otprilike upola manji od kuta longitudinalnog vala. [6]

### 3. OSNOVE ULTRAZVUČNE DIJAGNOSTIKE

Postoje dva načina snimanja signala ultrazvukom: online i offline. Online snimanje signala provodi se tijekom normalnog rada stroja, omogućujući kontinuirano praćenje bez potrebe za zaustavljanjem stroja. Offline snimanje signala obavlja se kada je stroj isključen, što omogućuje detaljniju analizu bez smetnji od rada stroja. Oba načina snimanja signala provode se kontaktnim i beskontaktnim senzorima. Kontaktni senzor, poput ručnog, magnetski spojenog ili trajno instaliranog, se uvijek nalazi u fizičkom kontaktu s objektom mjerenja, dok beskontaktni detektira signal koji se širi zrakom. Mogućnost slušanja snimljenog ultrazvučnog signala osigurava heterodina transformacija, koja nečujni ultrazvučni signal pretvara u čujni.

#### 3.1. Kontaktni senzori

Kontaktni senzor je u fizičkom kontaktu s objektom mjerenja te detektira, obrađuje i memorira signal koji se širi kroz kruti materijal. Najčešće se koristi kada je potrebno brzo skenirati stroj, sustav ili komponentu kako bi se utvrdilo gdje se nalazi anomalija ili kvar. Učinkovito se koristi i za pristup teško dostupnim prostorima. Za točke inspekcije koje su tek izvan dohvata, mogu se koristiti produžeci kontaktnih štapova. Pogodni su za detekciju ultrazvuka unutar kućišta ležaja, ventila ili parnih zamki te električnih strojeva poput transformatora i generatora.[7]



Slika 4. a) igličasti kontaktni senzor, b) kontaktni senzor s navojem, c) dodaci za montažu i magnetsko spajanje [8][9]

Postoje tri osnovne vrste kontaktnih senzora: ručni, magnetski spojeni ili trajno instalirani (kontaktni senzori s navojem). Senzori spojeni magnetima uklanjaju varijaciju mjerenja povezanu s ručnim kontaktnim senzorima, što ih čini idealnim u situacijama gdje je potrebno dugo vrijeme uzorkovanja ili gdje više inspektora obavlja mjerenja na istoj točki. Na primjer,

kod nadzora električnog transformatora blagi pokret kontaktnog senzora može zvučati vrlo slično parcijalnom pražnjenju unutar transformatora, što bi moglo uzrokovati lažnu indikaciju anomalije. [7]

### **Pozicioniranje kontaktnih senzora**

Kako bi mjerenja kontaktnim sensorima bila validna i usporediva, potrebno je posvetiti pažnju raznim faktorima koji utječu na rezultat. To uključuje osiguranje konzistentnosti pozicije senzora te korištenje istog senzora za sva mjerenja. Također, potrebno je uzeti u obzir opterećenje, brzinu i položaj strojnog dijela te druge fizikalne karakteristike poput slojeva boje i materijala površine koje mogu utjecati na točnost mjerenja. [1]

Za igličaste senzore bitno je precizno odrediti poziciju postavljanja i primijeniti odgovarajući pritisak kako bi senzor bio stabilan i pouzdan tijekom upotrebe. Važno je zapamtiti specifičnu akustičku impedanciju te osigurati što kraći put između izvora ultrazvuka i položaja senzora, s što manje promjena u materijalu. [3]

Prilikom korištenja magnetski spojenog ili trajno instaliranog senzora, važno je odabrati jasno označenu lokaciju te izbjegavati neuredne ili obojene površine. Ako je površina mjerenja obojena, bilo bi poželjno razmotriti mogućnost uklanjanja nekih ili svih slojeva boje kako bi se smanjilo prigušenje ultrazvuka uzrokovano bojom. U slučaju da se magnet treba pričvrstiti na površinu pomoću ljepila, potrebno je osigurati da ljepilo nije spužvasto, već čvrsto kako ne bi ograničavalo prijenos ultrazvuka. [3]

### **3.2. Beskontaktni senzori**

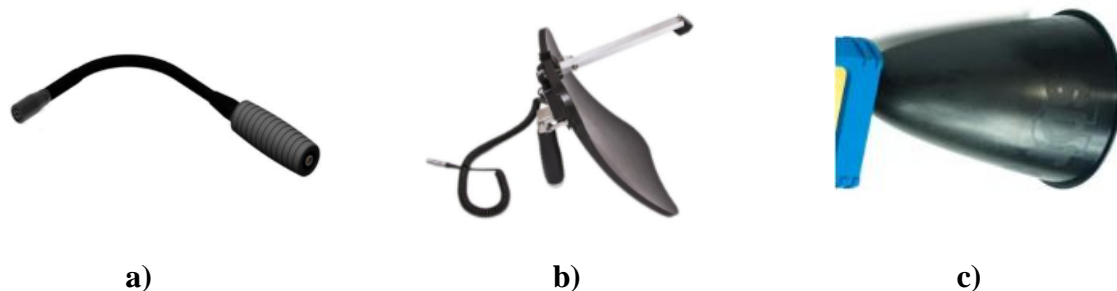
Beskontaktni senzor ne mora biti u fizičkom kontaktu s objektom mjerenja te detektira, obrađuje i memorira signal koji se širi zrakom.

Parabolični senzori su korisni za udaljene lokacije komponenata kao što su podignuti transporter, oprema, spremnici i vanjske podstanice, gdje je pristup ograničen, a stroj, sustav ili komponenta su na velikoj udaljenosti. Dizajniran je da koncentrira signale u centralnu točku, što omogućuje efikasnije prikupljanje i pojačanje ultrazvučnih signala s veće udaljenosti. Korisni su za precizno lociranje curenja u nadzemnim cijevima ili za određivanje u kojoj fazi na visokonaponskom električnom tornju dolazi do električnog pražnjenja. [7]



Akustična truba (senzor proširene udaljenosti – EDS) također je korisna za precizno lociranje specifičnih izvora ultrazvuka, posebno na većim udaljenostima. Akustična sirena ima oštar cilindrični odziv, što znači da može detektirati signale samo unutar otvora adaptera.

Fleksibilni senzor je optimalan za opću namjenu te za uporabu u prostorima s ograničenim pristupom. [3]



Slika 5. a) fleksibilni senzor, b) parabolični senzor c) senzor proširene udaljenosti – EDS [10][3]

### Pozicioniranje beskontaktnih senzora

Za primjenu beskontaktnih senzora u praćenju trendova, važno je zapamtiti da je stalna svijest o inverznom zakonu udaljenosti ključna za uspjeh programa održavanja. Inverzni zakon udaljenosti navodi kako će amplituda ultrazvuka biti prepolovljena, odnosno smanjena za 6 dB $\mu$ V, kada se udvostruči udaljenost između izvora zvuka i senzora. Ako se udaljenost prepolovi, amplituda ultrazvuka će se udvostručiti, što znači povećanje za 6 dB $\mu$ V. [1]

Također, veliku ulogu u točnosti mjerenja imaju i okolišni uvjeti poput smjera i brzine vjetera, vlažnosti, te prisutnosti čestica prašine, snijega ili pijeska u zraku. [3]

### Tehnike mjerenja beskontaktnim senzorima

Višestruki izvori ultrazvuka na terenu mogu otežati detekciju anomalija pomoću beskontaktnih senzora. Za rješavanje ovog problema koriste se tehnike poput zaklanjanja, pozicioniranja, prekrivanja i korištenja refleksije. [3]

Zaklanjanje je tehnika blokiranja poznatog izvora ultrazvuka tkaninom, krpom, pjenastim materijalom ili rukom (uz nošenje zaštitnih rukavica) kako bi se detektiralo mjesto propuštanja. Ova metoda je osobito korisna za lociranje mjesta propuštanja vakuuma.

Pozicioniranje uključuje korištenje vlastitog tijela za blokiranje poznatog ili neželjenog izvora kako bi se omogućila detekcija dodatnih pozicija.

Prekrivanje je posebno korisna tehnika pri detekciji propuštanja vakuuma u prisutnosti curenja zraka. Ono uključuje korištenje tkanine ili plastične kante za prekrivanje poznatog izvora curenja i blokiranje ostalih signala.

Budući da se ultrazvuk odbija od zidova i čvrstih površina, ponekad izgleda kao da propuštanje dolazi iz zida. Potrebno je imati na umu da je upadni kut jednak kutu refleksije. [3]



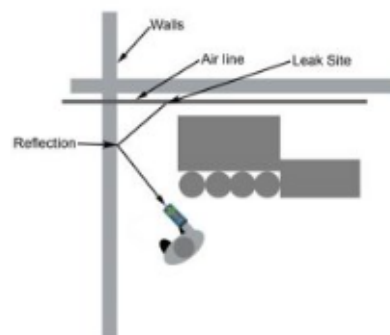
a)



b)



c)



d)

**Slika 6. Tehnike mjerenja: a) zaklanjanje, b) pozicioniranje, c) prekrivanje, d) korištenje refleksije [1]**

### 3.3. Heterodina transformacija

Heterodina transformacija pretvara nečujni ultrazvučni signal u čujni. Ona omogućuje slušanje ultrazvučnih događaja na odabranoj frekvenciji. Na taj način, ultrazvukom je moguće ne samo analizirati snimljeni zvuk, već i pridodati zvuku karakteristike prema onom što se čuje (krckanje, zveckanje, ponavljanje, brujanje i sl.). Karakterizacija signala matematički definiranim značajkama je važna, ali heterodina transformacija nam omogućuje i da ultrazvuk karakteriziramo i drugim, nekad opipljivijim značajkama. [12]

Osnova heterodine transformacije počiva na trigonometrijskoj jednadžbi koja predviđa da se miješanjem dviju različitih frekvencija stvaraju dvije nove frekvencije, jedna na frekvenciji zbroja, a jedna na razlici:

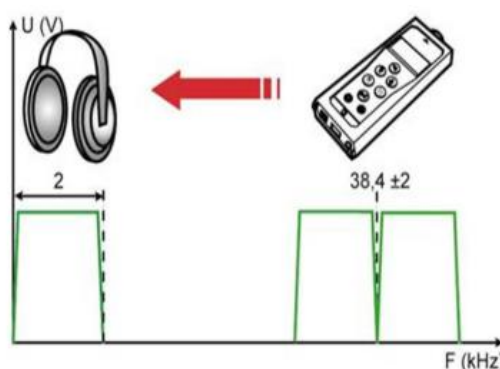
$$\sin \theta x \sin \varphi = \frac{\cos(\theta-\varphi) - \cos(\theta+\varphi)}{2} \quad (9)$$

gdje su:

$\Theta$  – frekvencija jednog signala [Hz]

$\varphi$  – frekvencija drugog signala [Hz]

Na primjer, miješanjem signala od 36kHz sa signalom od 38kHz nastaju signali od 2kHz i 74kHz. Dok je signal od 36kHz nečujan za ljudsko uho, signal od 2kHz je u rasponu koji ljudi mogu čuti. Osim toga, karakteristike originalnog signala, poput pucketanja, šištanja ili udaraca, ostaju nepromijenjene. [3]

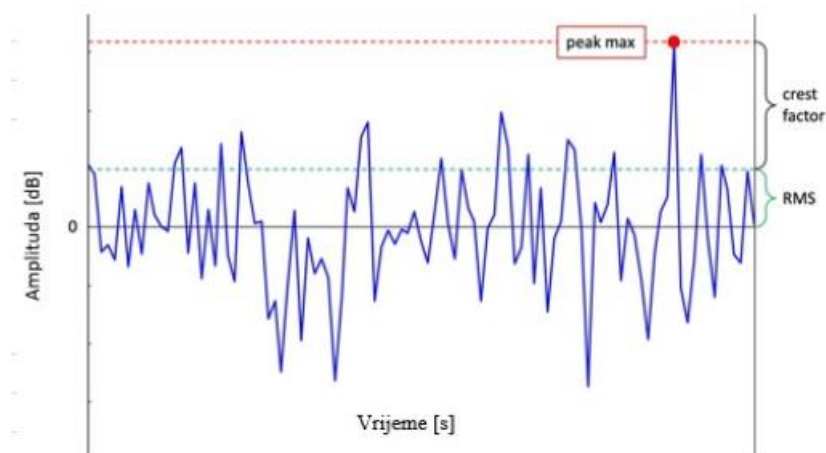


Slika 7. Heterodina transformacija [11]

### 3.4. Karakterizacija signala

Izmjereni ultrazvučni signal može se karakterizirati sljedećim vrijednostima:

1. Ukupni RMS - prikazuje prosječnu RMS vrijednost u  $\text{dB}\mu\text{V}$  za cijeli snimljeni uzorak. Pruža informacije o trenju.
2. Maksimalni RMS - snimljeni uzorak se podijeli na uzorke od četvrtine sekunde te najveći RMS u tim uzorcima predstavlja maksimalni RMS. Koristi se za utvrđivanje stabilnosti signala.
3. Vršna vrijednost - najveća izmjerena trenutna vrijednost amplitude zabilježena tijekom snimanja uzorka. Koristi se prvenstveno za detekciju udara uzrokovanih ranim fazama kvara ležajeva i zupčanika.
4. „Crest“ faktor - linearni omjer između vršne vrijednosti i ukupnog RMS-a. Za nasumični šum, „Crest“ faktor iznosi otprilike 3, a naglo se povećava u slučaju da signal ima mnogo vršnih vrijednosti. [3] [13]



Slika 8. Karakteristične vrijednosti signala [3]

## 4. PRIMJENE ULTRAZVUKA U INDUSTRIJI

Ultrazvuk ima široku primjenu u industriji zbog svoje sposobnosti otkrivanja i dijagnosticiranja različitih kvarova i nepravilnosti u rotacijskim strojevima i drugim sustavima. Primjena ultrazvuka uključuje otkrivanje propuštanja fluida, inspekciju ventila, sustava pare, pumpi, električnih instalacija i ležajeva. Za razliku od drugih metoda, poput vibrodijagnostike i termografije, ultrazvuk je izuzetno osjetljiv na promjene u trenju i turbulenciji. Omogućuje detekciju kvarova u njihovoj najranijoj fazi razvoja.

### 4.1. Propuštanja

Upotreba ultrazvuka za otkrivanje propuštanja fluida jedna je od najranijih primjena moderne ultrazvučne opreme, a ujedno i jedna od najrasprostranjenijih. Curenje se može definirati kao prijelaz fluida, bilo plina ili tekućine, iz područja visokog tlaka u područje niskog tlaka kroz otvor koji ne bi trebao postojati, što obično rezultira nepovratnim gubitkom energije. [3]

Troškovi energije čine 75% ukupnih troškova proizvodnje komprimiranog zraka. U EU, proizvodnja komprimiranog zraka čini oko 10% globalne industrijske potrošnje energije. Stopa curenja varira između 20% i 40% ukupne potrošnje zraka. Osim ekonomskog učinka, smanjenje gubitaka komprimiranog zraka značajno je i za okoliš. Smanjenje gubitaka smanjuje i potrebu za proizvodnjom, što samo po sebi smanjuje emisiju CO<sub>2</sub> i drugih štetnih tvari u atmosferu. [14]

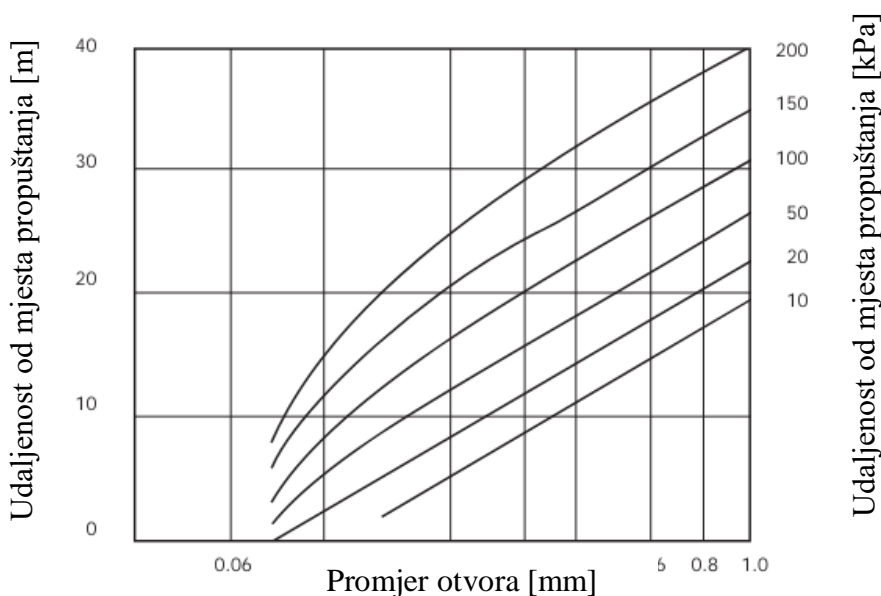
Propuštanje je čujno pomoću ultrazvuka kada curenje proizvodi turbulenciju. Ultrazvučna energija proizvedena turbulencijom koja nastaje tijekom protoka fluida generira mjerljiv akustički signal koji se može detektirati pasivnim ultrazvučnim ispitivanjem. Jačina ultrazvuka proporcionalna je intenzitetu turbulencije koja se stvara pri curenju. Turbulencija ovisi o:

- tlaku plina,
- protoku kroz mjesto curenja,
- fizičkim svojstvima plina,
- geometriji i obliku mjesta na kojem dolazi do curenja. [3]

Pasivno ultrazvučno ispitivanje uključuje detekciju ultrazvučnog signala prenesenog kroz zrak iz ispitnog objekta te detekciju ultrazvučnih signala izravnim kontaktom sa površinom ispitnog objekta.

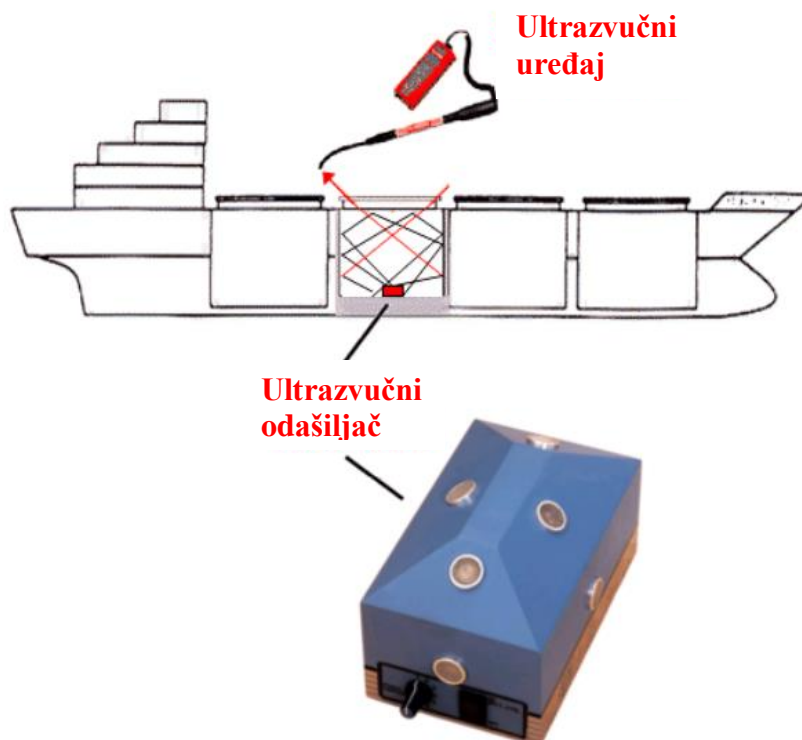
Na rezultate mjerenja mogu značajno utjecati svojstva ultrazvučnog uređaja poput osjetljivosti detekcije ultrazvuka te selektivnosti detekcija ultrazvuka. Vanjski čimbenici poput okolnih izvora ultrazvuka, udaljenosti od mjesta curenja (inverzni zakon udaljenosti) i pristupačnosti mjesta curenja također utječu na rezultate mjerenja.

Tehnika ultrazvučne detekcije i lociranja curenja primjenjiva je sve dok postoji dovoljan tlačni diferencijal u fluidu kako bi se stvorila turbulencija koja generira zvučnu energiju. Jedini zahtjev za primjenjivost je da curenje bude dovoljno veliko,  $10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  pri  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  ili više. Ultrazvučni signali koji nastaju propuštanjem lako se mogu detektirati na udaljenostima većim od 30 m. [15]



**Slika 9. Udaljenosti za detekciju propuštanja pomoću beskontaktnih ultrazvučnih senzora [15]**

Aktivno ultrazvučno ispitivanje koristi se kada sustav nije pod pritiskom. U tom slučaju koristi se ultrazvučni odašiljač koji generira ultrazvučni signal. Odašiljač se može postaviti unutar ili izvan sustava koji se ispituje, dok inspektor promatra vanjski ili unutarnji dio sustava pomoću ultrazvučnog uređaja. Inspektor traži mjesta s visokom amplitudom signala, što ukazuje na područja s razmakom, rupom ili lošim brtvljenjem. [15]



Slika 10. Aktivno ultrazvučno ispitivanje [3]

## 4.2. Inspekcija ventila

Ventili su izuzetno važan dio operativne imovine većine postrojenja budući da sprječavaju povratni tok te reguliraju tlak i protok. U industrijama kao što su čelična, industrija celuloze, prehrambena i farmaceutska industrija, ventili su instalirani na cjevovodima. Zakazivanje ili propuštanje ventila može dovesti do gubitka energije, smanjenja kvalitete proizvoda i potencijalnih zastoja u proizvodnji. [10]

Tipovi kvarova ventila

1. Blokirani ventili: Ako bi kroz ventil trebao prolaziti protok, a nema ga, ventil se smatra blokiranim. Nedostatak protoka prati nedostatak ultrazvuka u samom ventilu i cjevovodu, posebno nizvodno.
2. Propuštajući ventili: Ako ventil treba biti zatvoren, a još uvijek postoji protok, ventil propušta. U ovom slučaju prisutan je konstantan ultrazvučni signal bez obzira na položaj ventila.



3. Kavitacija i flashing: Ako postoji pad hidrostatističkog tlaka u ventilu, može doći do kavitacije. Kavitacija stvara karakteristične klikove i pucketanje koje se mogu detektirati na ventilu i maloj udaljenosti nizvodno. Ako nema poboljšanja nizvodno, vjerojatno dolazi do flashinga umjesto kavitacije. [3]

Prilikom inspekcije regulacijskog ventila treba uzeti u obzir tri ključna elementa ventila: aktuator, brtvu i tijelo ventila. Aktuator je često pneumatski, pa sve što je prethodno rečeno o propuštanju komprimiranog zraka vrijedi i za dovod zraka ventilu kao i za unutarnja curenja na membrani. Brtva može propuštati, mogu postojati mehanički problemi na klipu poput trenja ili zapinjanja, a mogući su i unutarnji problemi na samom tijelu ventila. Za potpunu inspekciju ventila potrebna su mjerenja ultrazvuka beskontaktnim i kontaktnim senzorima. [3]

### 4.3. Inspekcija sustava pare

Para je ključni resurs korišten u mnogim industrijskim procesima. Postrojenja koja koriste paru sadrže opsežnu mrežu cjevovoda, ventila, prirubnica i parnih zamki dizajniranih za isporuku čiste i vruće pare od kotlovnice do krajnje točke korištenja. Kretanjem čiste pare od kotlova do krajnje točke korištenja, dolazi do hlađenja iste, što rezultira nakupljanjem kondenzata i plinova. Parna zamka je automatski ventil dizajniran tako da omogućuje prolaz kondenzata, zraka i ugljičnog dioksida, ali sprječava prolaz pare. Kondenzati, zrak i ugljični dioksid moraju biti ispražnjeni iz parnog sustava kako bi se spriječili gubitci topline i potencijalno opasne situacije. Parne zamke unutar ovog sustava imaju svrhu ispuštanja otpada i kontaminanata, održavajući paru i parni sustav čistim. Parne zamke to postižu automatskim otvaranjem, zatvaranjem i moduliranjem, ispuštajući kondenzat čim se formira, osim ako je toplina iz kondenzata iskoristiva. [3]

Pravilno održavanje i redovita inspekcija parnih zamki ključni su za osiguranje učinkovitosti parnog sustava i sprječavanje gubitka energije. Ultrazvučna tehnologija omogućuje brzo i precizno otkrivanje problema, čime se smanjuju operativni troškovi i poboljšava sigurnost. [10] Ultrazvuk omogućava inspektoru da čuje što se događa unutar parne zamke. Prilikom ispravnog rada parne zamke tehničar može čuti fazu prikupljanja i faza ispuštanja ili pražnjenja. U fazi prikupljanja mogu se čuti mjehurići i kondenzat u slušalicama. Faza ispuštanja ili pražnjenja manifestira se kao kratak, oštar zvuk prolaska protoka. Parna zamka koja propušta proizvodi konstantan šum protoka, dok će parna zamka koja ne radi biti trajno tiha. [3]



Slika 11. Ultrazvučna inspekcija parne zamke [10]

#### 4.4. Inspekcija pumpi

Neispravan rad pumpe može biti posljedica je oštećenja ležaja, nepravilnog poravnanja spojki, neispravnih brtvi, kavitacije i mehaničke labavosti. Kako bi se procijenilo stanje pumpe, potrebno je promatrati i stanje, odnosno radne uvjete usisnih i ispusnih ventila jer isti mogu značajno utjecati na stanje pumpe. Stoga je u praksi preporučljivo u inspekciju pumpe uključiti i inspekciju usisnih i ispusnih ventila zajedno s nepovratnim ventilima ako postoji više od jedne pumpe na istoj platformi ili cjevovodu.

Kavitacija je uzrokovana implozijom mjehurića pare. Implozija uklanja materijal s površine impelera, što rezultira oštećenjem čiji je oblik vidljiv na slici 12. Ultrazvukom se može detektirati nasumično pucanje mjehurića čak i pri relativno niskim razinama kavitacije. [3]



**Slika 12. Kavitacija impelera [3]**

Pomoću ultrazvuka se vrlo jednostavno i brzo može otkriti i neusklađenost, labavost te istrošenost spojke. Neusklađenost rezultira povećanjem trenja, jednom po okretaju, koje je zvučno prepoznatljivo pri niskim brzinama i vidljivo u vremenskom signalu pri bilo kojoj brzini. Labavost, istrošenost i slabo trenje proizvode isti kontinuirani oštri zvuk povezan s trenjem. Moguće je da loše stanje podmazivanja spojke može prikriti ozbiljniji kvar poput istrošenosti zuba u zupčastoj spojci. [3]

#### **4.5. Inspekcija električnih instalacija**

Električni kvarovi predstavljaju ogromnu sigurnosnu prijetnju i mogu u potpunosti zaustaviti rad postrojenja. Industrijska postrojenja zahtijevaju mnogo energije za rad, a kao i strojevi potrebni za proizvodnju, njihovi električni sustavi također mogu zakazati. Kada se to dogodi, rezultati predstavljaju ozbiljne prijetnje proizvodnji i sigurnosti svih u postrojenju. Posljedice potpunog kvara električnog sustava su mnogo ozbiljnije od običnog mehaničkog kvara. Imaju potencijal oštetiti opremu, prekinuti protok energije i uzrokovati zastoje na više dana, ozbiljno ozlijediti ili ubiti radnike u neposrednoj blizini te čak utjecati na mrežu za opskrbu energijom u okolici. Tri osnovne elektrolučne opasnosti koje uzrokuju ozljede i smrt radnika su strujni udar, lučni bljesak te lučna eksplozija.[10]

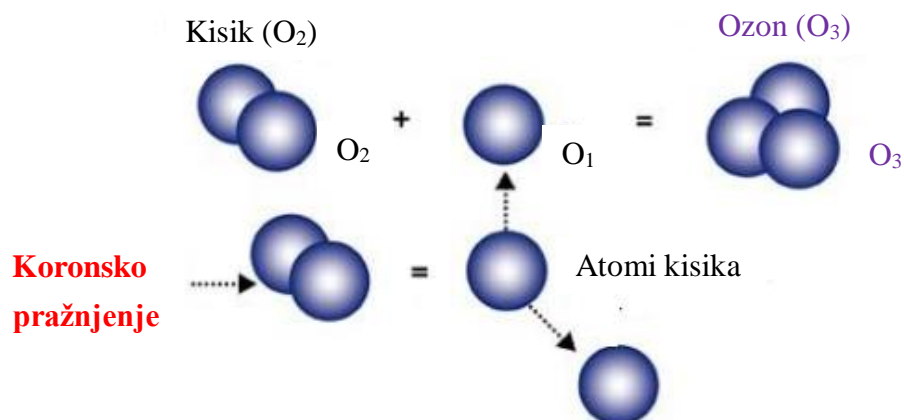
Ultrazvučne inspekcije mogu pomoći u otkrivanju kvarova na električnim sustavima u njihovim najranijim fazama i tako spriječiti katastrofalne posljedice. U prošlosti se za inspekciju električnih sustava najčešće koristila infracrvena kamera koja zahtjeva liniju vida do objekta koji se ispituje. To znači postavljanje infracrvenog prozora na vrata električnih ormara ili otvaranje vrata kako bi se pregledale stavke unutra. Ako unutar električnog ormara postoji električni luk, otvaranje vrata može biti izuzetno opasno. Zbog toga se danas najboljom

praksom smatra pregled panela pomoću ultrazvuka prije otvaranja vrata. Također, infracrvena kamera neće moći detektirati kvarove poput korone i praćenja, koji ne generiraju toplinu. Budući da korona i praćenje generiraju ultrazvuk, ovo nije prepreka za ultrazvučnu inspekciju. [3]

Postoje tri vrste električnih kvarova koji se mogu otkriti ultrazvukom: korona, praćenje i električni luk. [3]

## Korona

Korona je uzrokovana ionizacijom molekula zraka u blizini točke s vrlo visokim potencijalnim gradijentom napona. Ionizacija razgrađuje zrak i formira ozon i dušikov oksid. Oba ova plina imaju karakterističan neugodan miris.



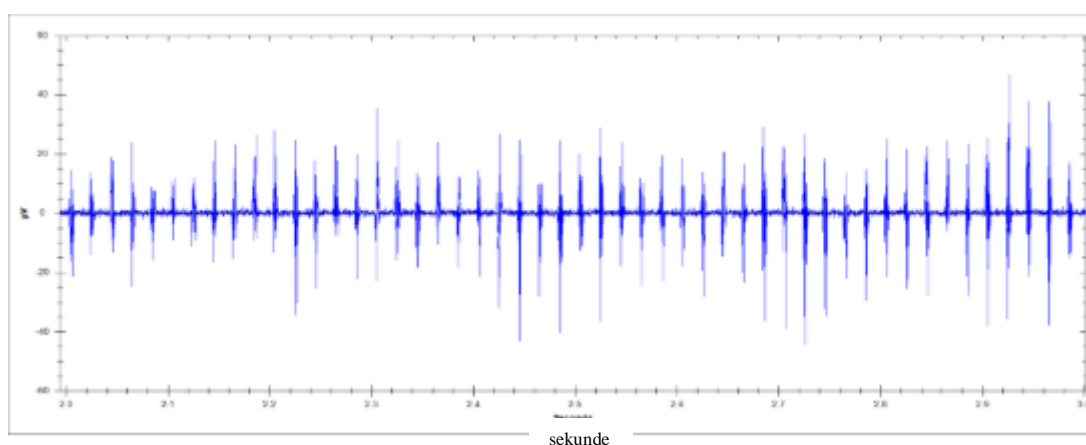
Slika 13. Proces nastajanja ozona [3]

Vlažnost u zraku može reagirati s dušikovim oksidom i proizvesti blagu kiselinu. Često je moguće vidjeti lokalizirane naslage u prahu ili kristalne naslage bijele ili plavo/zelene boje na mjestima gdje se pojavljuje korona. [3]



**Slika 14. Mjesta na kojima se pojavljuje korona [3]**

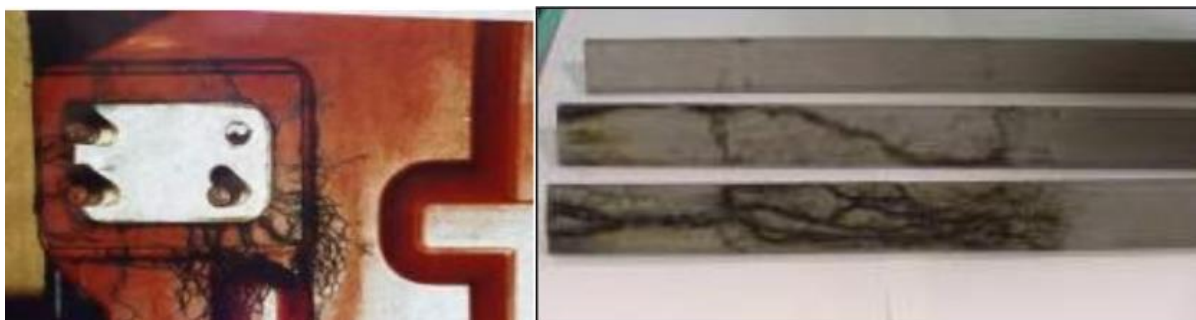
Korona će proizvoditi konstantan zvuk kлокotanja koji će biti na frekvenciji napajanja ili na dvostrukoj frekvenciji linije. Gledajući vremenski signal, postojat će kontinuirani niz impulsa:



**Slika 15. Vremenska domena signala korone [3]**

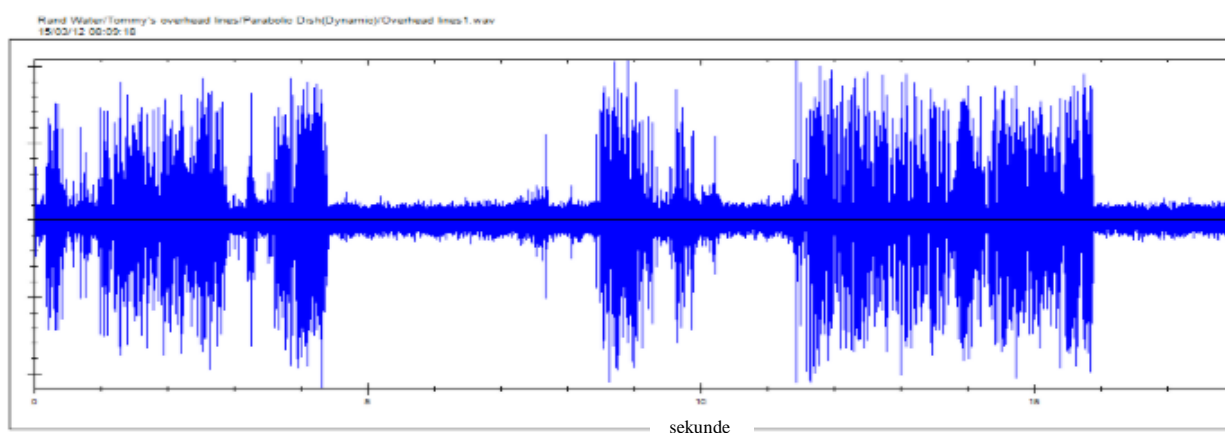
## **Praćenje**

Praćenje je površinsko vođenje električne energije po objektu, umjesto kroz njega. Praćenje se može dogoditi na bilo kojem naponu te ne mora biti na vodiču. Budući da je praćenje površinska pojava, samo površina treba biti vodljiva. Dakle, sve dok je prisutna vodljiva prašina ili vlaga, na izolatoru ili čak na kanalima, može doći do pojave praćenja. Praćenje proizvodi karakterističan uzorak koji je prikazan na slici 16. [3]



**Slika 16. Uzorak povezan s pojavom praćenja [3]**

Karakterističan zvuk praćenja je niz kratkotrajnih pucketanja. Za razliku od korone, signal praćenja nije konstantan. [3]



**Slika 17. Vremenska domena signala praćenja [3]**

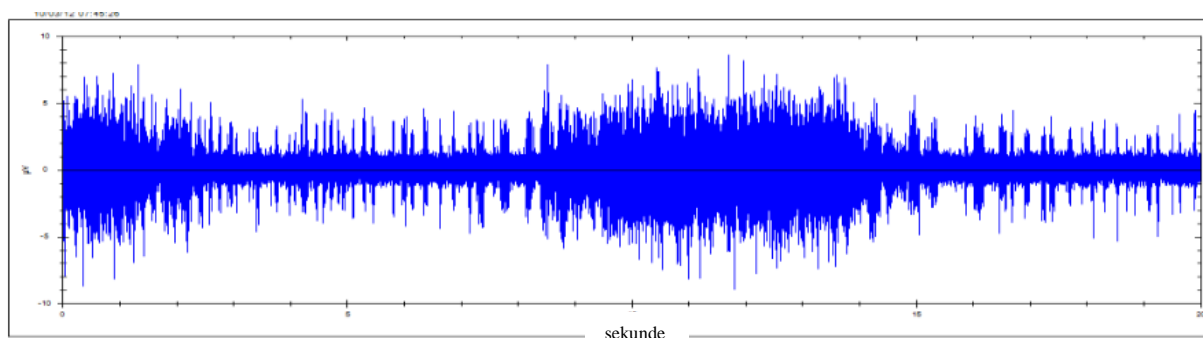
### Električni luk

Električni luk je jedini kvar koji generira toplinu. To je protok električne struje kroz zrak koji proizvodi vrlo jak ultrazvučni signal. Događaj luka često može potrajati nekoliko sekundi. Vremenski signal na slici 19 pokazuje kombinirani događaj lučenja i praćenja koji se odvija u ploči. Jasno je prikazana razlika između dugotrajne pojave električnog luka i vrlo kratkotrajne pojave praćenja.





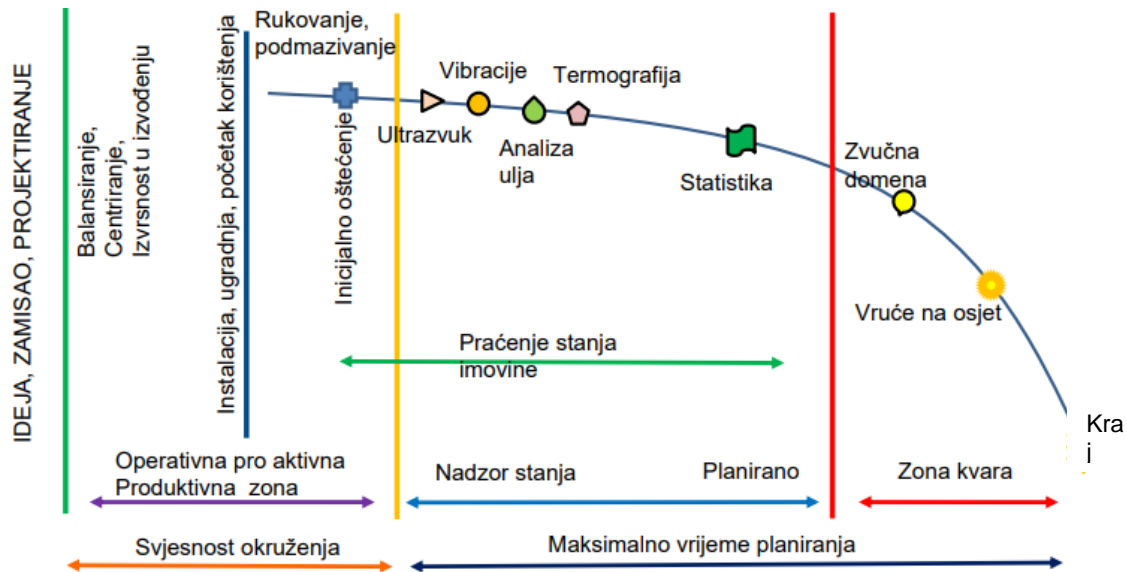
Slika 18. Pojava električnog luka [3]



Slika 19. Vremenska domena signala praćenja [3]

#### 4.6. Inspekcija ležajeva

Ležajevi s kotrljajućim elementima jedan su od najkritičnijih dijelova rotacijskih strojeva. Otprilike 40% kvarova električnih motora uzrokovani su kvarovima ležajevima, stoga ležajevi igraju ključnu ulogu u praćenju stanja strojeva. Metode za inspekciju i praćenje kvalitete ležajeva poznate su više od 40 godina te osim ultrazvučne dijagnostike uključuju i vibrodijagnostiku, termografiju te analizu ulja. [16]



Slika 20. Metode inspekcije ležajeva [11]

Kao što je vidljivo sa slike 11, upotrebom ultrazvuka moguće je u vrlo ranoj fazi detektirati neispravnosti ležaja. Ultrazvuk mjeri trenje, što omogućuje precizno praćenje trenda pogoršanja stanja ležaja. Također, ležaj bez maziva predstavlja skriveni problem u pogledu vibracija. Spektar vibracija postaje značajno poremećen kada nestane posljednja kap maziva. Rana detekcija mogućih problema od presudne je važnosti za zaštitu integriteta sustava. [16]

#### 4.6.1. Uzroci kvarova ležaja i tipovi oštećenja

Postoje brojni uzroci kvarova ležaja od kojih su najčešći: neadekvatno podmazivanje, izloženost većim opterećenjima od očekivanih, neispravna montaža, kontaminacija maziva zbog neadekvatnog brtvljenja te nedovoljan unutarnji zazor u ležaju zbog nepoštivanja traženih tolerancija rukavca ili kućišta. Svaki od spomenutih uzroka stvara određeni tip oštećenja. Takva oštećenja, poznata kao primarna, dovode do sekundarnih oštećenja. Čak i primarna oštećenja mogu zahtijevati zamjenu ležaja zbog povećanja unutarnjeg zazora, vibracija, buke i slično. Oštećen ležaj često pokazuje kombinaciju primarnih i sekundarnih oštećenja. [17]

Primarna oštećenja:

- habanje,
- utiskivanje,
- razmazivanje (smearing),
- površinska oštećenja,
- korozija,



- oštećenja izazvana prolaskom struje.

Sekundarna oštećenja:

- ljuštenje,
- pukotine.

#### 4.6.2. Podmazivanje ležajeva

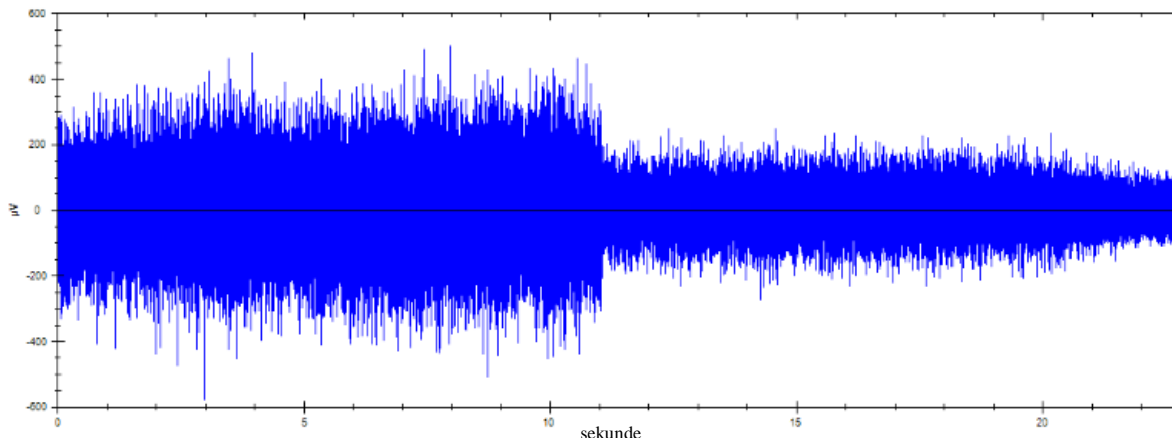
Podmazivanje ležajeva je praksa koja povećava učinkovitost, pouzdanost i trajnost rotirajućih strojeva. Ispravno podmazivanje minimizira kontakt površina strojeva smanjujući trenje, prekomjernu toplinu, metalni kontakt i trošenje. Podmazivanje štiti ležajeve od korozije i vanjskih elemenata. Masti su najčešći izbor jer se lako primjenjuju i pružaju zaštitni sloj.

Unatoč dugoj povijesti podmazivanja, mnogi prerani kvarovi ležajeva povezani su s neadekvatnim podmazivanjem. Otprilike 8% kvarova uzrokovano je pogreškama pri montaži, 12% zastarjelom opremom, a 80% neadekvatnim podmazivanjem.

Postoje 3 česte greške pri podmazivanju ležajeva:

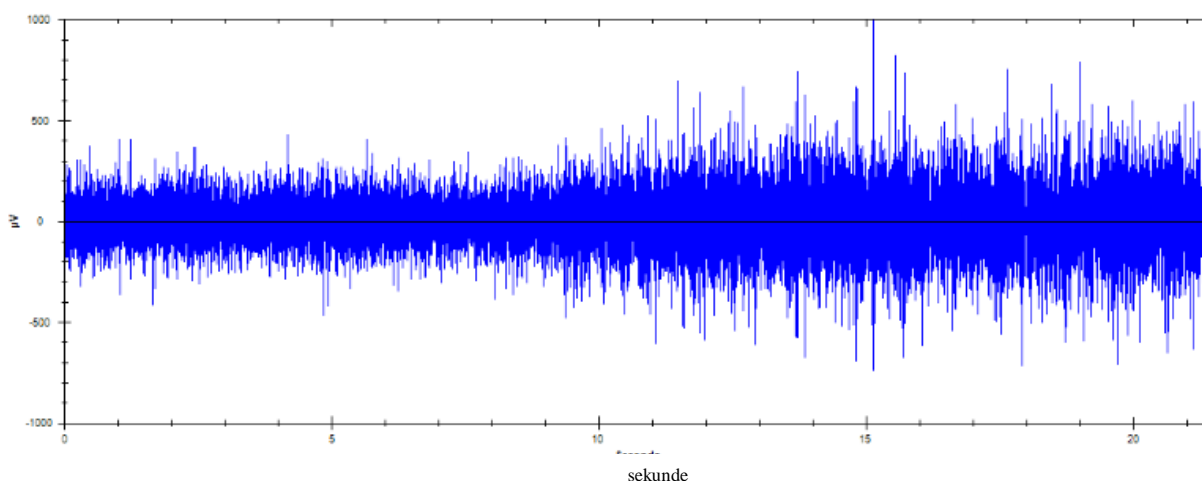
1. **Podmazivanje prema kalendaru** - ne uzimaju se u obzir svi faktori koji utječu na potrebu za mazivom kao što su opterećenje, okolina i temperatura.
2. **Prekomjerno i nedovoljno podmazivanje** - previše ili premalo maziva može uzrokovati trošenje ili prerani kvar. Prekomjerno podmazivanje uzrokuje povišenu temperaturu i trenje, dok nedovoljno podmazivanje uzrokuje metalni kontakt koji nakon nekog vremena može uzrokovati blokiranje ležaja.
3. **Samo slušanje** - slušanje bez mjerenja i snimanja je subjektivno i ne preporučuje se. Potrebna je usporedna analiza prije i poslije podmazivanja.

Vremenom, mazivo se degradira, a razine trenja rastu što se očitava povećanjem jačine generiranog ultrazvuka. Za produljenje vijeka trajanja i sprječavanje kvara, potrebno je obnavljanje maziva. Ultrazvučni uređaj omogućuje precizno praćenje ležaja tijekom podmazivanja, prikazujući audio i vizualne prikaze intenziteta signala. Kako se mazivo dodaje, amplituda signala će se smanjivati. Kada amplituda počne lagano rasti, postignuta je optimalna količina maziva. [10]



**Slika 21. Podmazivanje ležaja slučaj 1 [3]**

Kao što je uočljivo sa slike 21, ležaj dobiva dozu maziva u 11. sekundi, a zatim drugu u 22. sekundi. Obje doze značajno su poboljšale stanje ležaja.



**Slika 22. Podmazivanje ležaja slučaj 2 [3]**

Na slici 22 je vidljivo kako je ležaj dobio dozu maziva u 9. sekundi, ali da se amplituda ultrazvučnog signala nije smanjila. Umjesto toga, amplituda je porasla što ukazuje na višu razinu trenja. Ova pojava može ukazivati na to da je dodavanje maziva bilo nepotrebno te da je prekomjerno podmazivanje uzrokovalo povećanje trenja.

Prema ISO 29821 standardu za dijagnostiku strojeva, promjene u amplitudi ultrazvučnog signala mogu ukazivati na sljedeće:

- **+8 dB $\mu$ V** - upozorenje vezano uz podmazivanje,
- **+16 dB $\mu$ V** - upozorenje o oštećenju ležaja,
- **+24 dB $\mu$ V** - opasnost od oštećenja ležaja.

Ove promjene u amplitudi specifične su za ležajeve pri konstantnoj brzini i opterećenju te pomažu u ranoj identifikaciji problema kako bi se spriječili ozbiljniji kvarovi i produžio vijek trajanja strojeva. [1]

#### 4.6.3. Detekcija kvarova ležaja

Ležajevi s kotrljajućim elementima sastoje se od nekoliko jasno diferenciranih komponenti: unutarnje staze, kuglica ili valjaka, kaveza i vanjske staze.

Pogoršanje svake od ovih komponenti generirat će jednu ili više karakterističnih frekvencija kvara koje nam omogućuju brzu i jednostavnu identifikaciju. Četiri moguće frekvencije kvara ležaja su [3]:

- **BPFO (Ball Pass Frequency Outer)** - frekvencija kvara vanjske staze,
- **BPMI (Ball Pass Frequency Inner)** - frekvencija kvara unutarnje staze,
- **BSF (Ball Spin Frequency)** - frekvencija kvara kotrljajućih elemenata,
- **FTF (Fundamental Train Frequency)** - frekvencija kvara kaveza.

Formule za izračun istih glase:

$$BPFO = \frac{n}{2} \times \frac{rpm}{60} \times \left(1 - \frac{d}{D} \times \cos \emptyset\right) \quad (10)$$

$$BPMI = \frac{n}{2} \times \frac{rpm}{60} \times \left(1 + \frac{d}{D} \times \cos \emptyset\right) \quad (11)$$

$$BSF = \frac{1}{2} \times \frac{rpm}{60} \times \left(1 - \frac{d}{D} \times \cos \emptyset\right) \quad (12)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \times \frac{rpm}{60} \times \left(1 - \frac{d}{D} \times \cos \emptyset\right) \quad (13)$$

gdje su:

$n$  - broj kotrljajućih elemenata

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

$d$  - promjer kotrljajućeg elementa [mm]

$D$  - najveća udaljenost između kotrljajućih elemenata [mm]

$\emptyset$  – kontakti kut [rad/s]

## 5. EKSPERIMENTALNE METODE

Eksperimentalne metode korištene u ovom radu za detekciju stanja ležaja primjenom ultrazvuka uključuju SDT340 ultrazvučni uređaj i simulator kvarova ležaja. Kuglični ležaj ER 12 bit će predmet ispitivanja. Prednost primjene ultrazvuka u dijagnostici stanja ležaja leži u mogućnosti ne samo detekcije stanja ležaja, već i precizne identifikacije lokacije kvara bez potrebe za demontažom ležaja i zaustavljanjem pogona. Potrebu za identifikacijom lokacije kvara prepoznao je i proizvođač ležajeva Rexnord, koji tehničkim specifikacijama ležaja navodi karakteristične frekvencije kvara pojedinih dijelova ležaja (BPFO, BPFI, BSF, FTF). U postupku dijagnostike analizira se frekvencijska domena signala kako se identificirale frekvencije na kojima su detektirane najviše amplitude signala. Dobivene rezultate potrebno je usporediti sa osnovnom frekvencijom oštećenja pojedinog dijela ležaja kako bi potvrdila pojava oštećenja na upravo tom dijelu.

### 5.1. SDT340 ultrazvučni uređaj

SDT340 je alat za praćenje i dijagnostiku stanja imovine. Omogućuje detekciju, praćenje trendova i analizu ultrazvučnih i vibracijskih podataka, pružajući sveobuhvatno rješenje za prediktivno održavanje.



Slika 23. SDT340 komplet opreme [10]

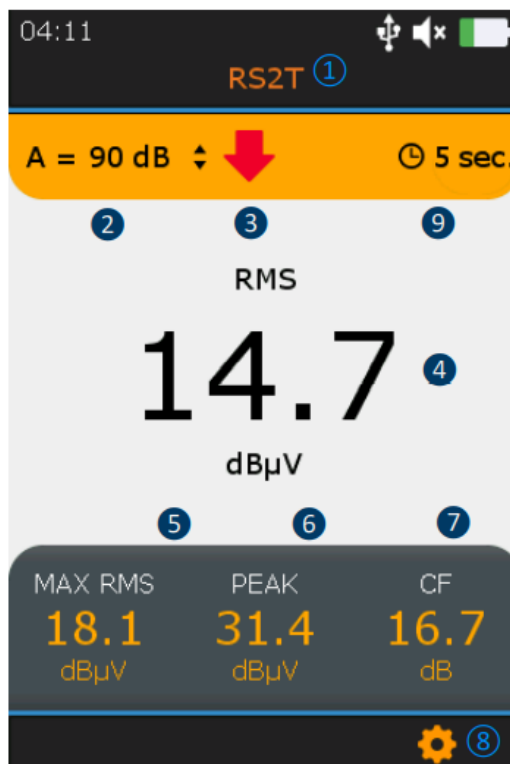
SDT340 komplet opreme sadrži SDT340 uređaj, žičane slušalice, spiralni kabel, USB tip C komunikacijski kabel, USB ključ sa korisničkim priručnicima i UAS Lite softverom, punjač baterija, strujni kabel, priključnu stanicu za baterije, naramenicu te višenamjenski odvijač. [10]

Ovaj uređaj je idealan za različite industrijske primjene, uključujući praćenje stanja ležajeva, detekciju curenja, inspekciju električnih sustava, testiranje parnih zamki i praćenje stanja ventila. SDT340 pomaže u prevenciji kvarova i produžavanju vijeka trajanja opreme kroz preciznu analizu i pravovremeno održavanje. [10]

Ključne značajke i mogućnosti SDT340 uređaja su:

- **mjerenje ultrazvuka i vibracija** putem dva ulazna kanala,
- **širok frekvencijski opseg** od 0 Hz do 100 kHz,
- **snimanje podataka** u trajanju do 10 minuta,
- **struktura baze podataka** u obliku stabla za organizirano pohranjivanje informacija,
- **prikaz signala u vremenskoj i frekvencijskoj domeni**,
- **mjerenje temperature i brzine rotacije** izravno na uređaju,
- **memorija za podatke** kapaciteta 6.5 GB,
- **dohvat povijesnih podataka** izravno na terenu,
- tablica maksimalnih vrijednosti za analizu vremenskog oblika signala (TWF) i frekvencijskog spektra (FFT),
- **mogućnost prikupljanja podataka** na ruti i izvan rute,
- **bluetooth** za bežični prijenos zvuka.

### 5.1.1. Mjerni ekran



Slika 24. Mjerni ekran SDT340 uređaja [10]

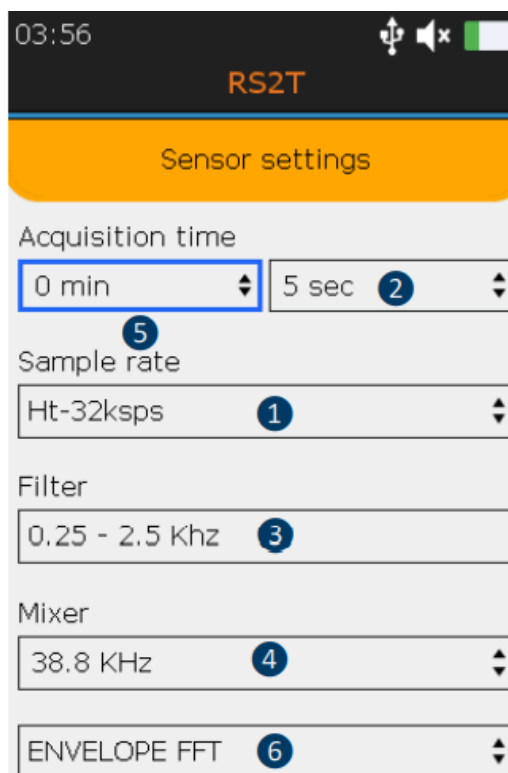
Na mjernom ekranu ultrazvuka vidljive su različite informacije o trenutnom mjerenju te o stanju senzora. U gornjem dijelu ekrana prikazan je **kod senzora u upotrebi** (1), što potvrđuje koji senzor je trenutno aktivan.

Tipke za navigaciju omogućuju podešavanje pojačanja (2) u rasponu od 30 dB do 90 dB. Ovo omogućuje prilagodbu osjetljivosti uređaja kako bi se optimalno detektirali ultrazvučni signali različitih jakosti. Moguće je podešavati pojačanje sve dok se **indikator podešavanja pojačanja** (3) ne ukloni s ekrana. [10]

Tijekom mjerenja, ekran prikazuje četiri karakteristične vrijednosti stanja:

- **trenutni RMS** (4) - automatski se osvježava dva puta u sekundi.
- **trenutni maksimalni RMS** (5) - ručno se osvježava prilikom promjene pojačanja.
- **trenutnu vršnu vrijednost** (6)
- **trenutni Crest faktor** (7) - ručno osvježava prilikom promjene pojačanja.

### 5.1.2. Postavke mjerenja



Slika 25. Postavke mjerenja SDT340 uređaja [10]

Elementi koji se pojavljuju u postavkama mjerenja:

- **Brzina uzorkovanja (1)** - određuje koliko uzoraka signala uređaj prikuplja u sekundi. Može se podešavati u rasponu od 32,000 do 256,000 uzoraka po sekundi (sps). Viša brzina uzorkovanja omogućuje detaljniju analizu signala.
- **Vrijeme akvizicije (2)** - trajanje jednog ciklusa mjerenja. Može se postaviti od 1 do 600 sekundi. Duže vrijeme akvizicije omogućuje prikupljanje više podataka za detaljniju analizu.
- **Preostali filter (3)** - automatski se odabire prema odabranoj brzini uzorkovanja i sensorima. Ovaj filter pomaže u uklanjanju neželjenih komponenti signala kako bi se dobili jasniji podaci.
- **Mikser (4)** - prilagodba frekvencije miksera dostupna je samo pri brzini uzorkovanja od 32,000 sps. Mikser pomaže u obradi signala za bolju analizu.

- **FFT ili FFT omotač (6)** - FFT (Fast Fourier Transformation) pretvara vremenski oblik signala u frekvencijski spektar, dok FFT omotač omogućava napredniju dijagnostiku.

## 5.2. Simulator kvarova ležaja



Slika 26. Simulator kvarova ležaja

Slika 17 prikazuje simulator kvarova SpectraQuest Fault Simulator Expert koji se nalazi u Laboratoriju za održavanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Simulator kvarova ležaja se koristi za proučavanje kvarova ležajeva i neuravnoteženosti rotacijskih komponenti pod kontroliranim uvjetima. To je uređaj s promjenjivom brzinom koji se može koristiti za generiranje svake vrste kvara pojedinačno ili u kombinaciji, pružajući stabilnu platformu za proučavanje. Simulator omogućava vanmrežno osposobljavanje osoblja i eksperimentiranje, smanjujući zastoje u proizvodnji bez negativnog utjecaja na stvarnu proizvodnju i dobit. [18]

Značajke simulatora:

- Prijenosni, robusan i isplativ simulator vibracija za balansiranje i ležajeva.
- Idealan za podučavanje balansiranja u više ravnina s rotorima sa središnjim ili visoko postavljenim rotorima.
- Može se postaviti tako da pokazuje frekvencije kvara ležaja u odnosu na brzinu vrtnje vratila.



- Razvija tehnike obrade signala za prepoznavanje frekvencija kvara ležaja u prisutnosti nedostataka, pri višestrukim brzinama vrtila, bez korištenja spektra visoke rezolucije.
- Omogućuje prepoznavanje vibracijskog spektra različitih kvarova ležajeva.

### 5.3. Kuglični ležaj ER12



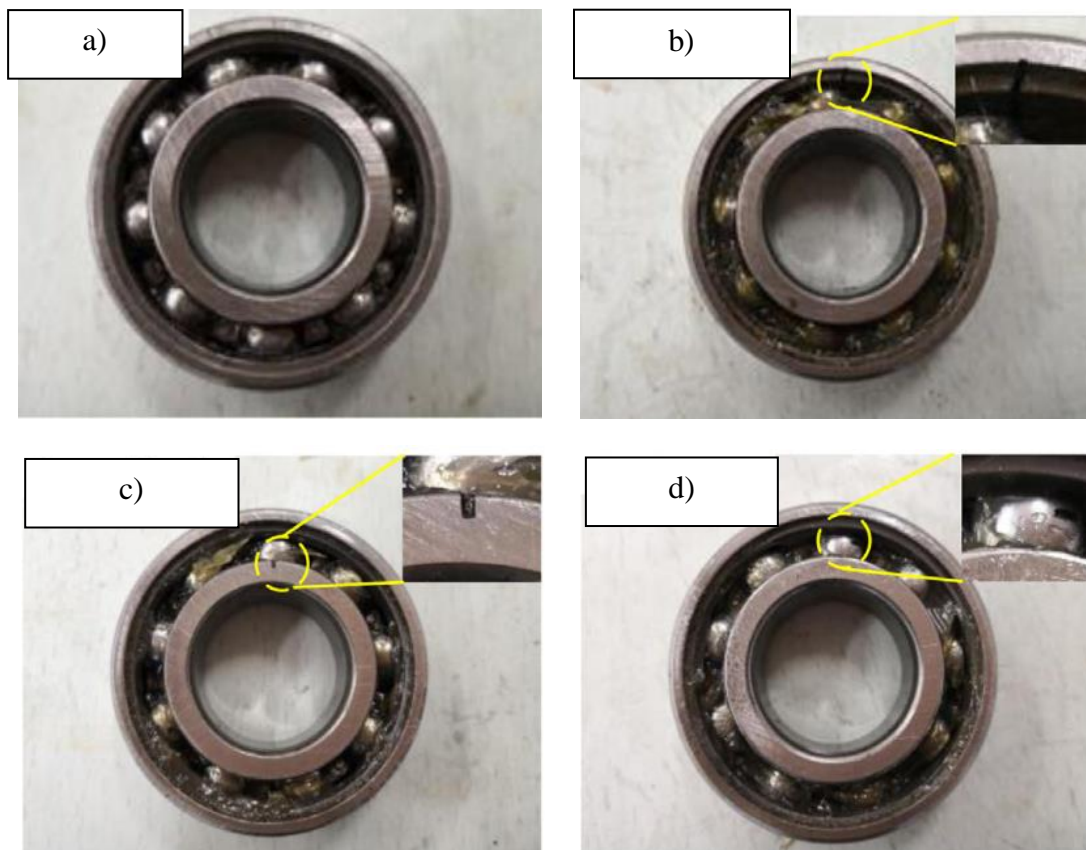
Slika 27. Kuglični ležaj ER12 [19]

Tablica 2. Tehničke specifikacije kugličnog ležaja ER12 [19]

<b>Duljina provrta</b>	31,35 mm
<b>Širina ležaja</b>	63,50 mm
<b>Promjer unutarnjeg prstena:</b>	29,31 mm
<b>Promjer vanjskog prstena:</b>	46,99 mm
<b>Dinamička nosivost (C<sub>0</sub>)</b>	1303 kg
<b>Statička nosivost (C)</b>	671 kg
<b>Smjer opterećenja</b>	radijalno
<b>Materijal unutarnjeg prstena</b>	čelik
<b>Materijal vanjskog prstena</b>	čelik

<b>Materijal kuglice</b>	čelik
--------------------------	-------

#### 5.4. Oštećenja kugličnog ležaja ER12



Slika 28. Stanje kugličnog ležaja: a) normalno stanje ležaja, b) oštećenje unutarnjeg prstena, b) oštećenje vanjskog prstena, d) oštećenje kuglice [20]

Proizvođač kugličnog ležaja ER12, uz ostale tehničke specifikacije, navodi frekvencije koje ukazuju na prisutnost oštećenja na određenim dijelovima ležaja. Poznavanje ovih frekvencija omogućuje ranu dijagnostiku kvarova, što može spriječiti veće probleme i produžiti vijek trajanja opreme.

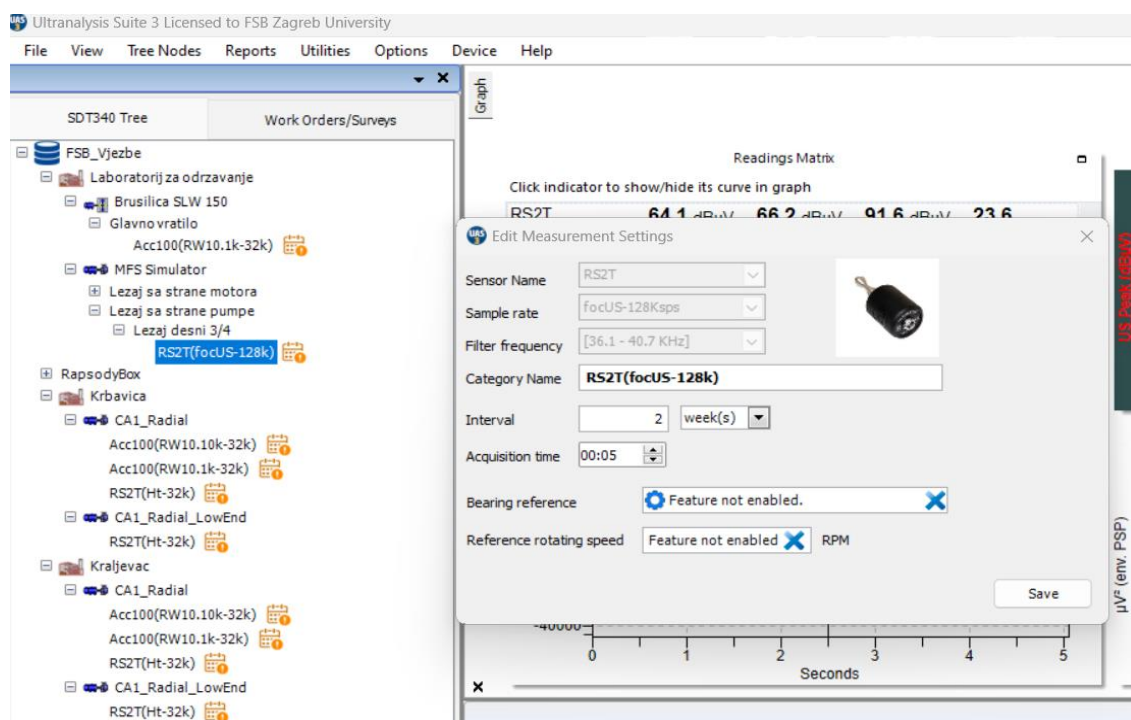
Tablica 3. Karakteristične vibracije ležaja ER12 [12]

<b>Frekvencija vibracije osnovnog sklopa</b>	0,0063 Hz
<b>Frekvencija vibracije kvara unutarnjeg prstena</b>	0,0825 Hz
<b>Frekvencija vibracije kvara vanjskog prstena</b>	0,0508 Hz

<b>Frekvencija vibracije kvara kuglice</b>	0,0332 Hz
--	-----------

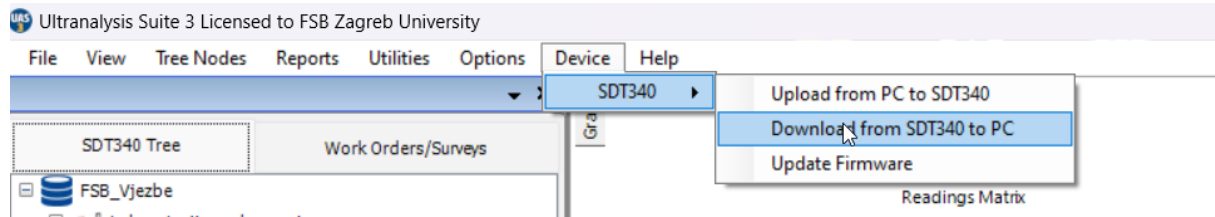
## 6. REZULTATI MJERENJA I RASPRAVA

U praktičnom dijelu ovog rada provodilo se mjerenje frekvencija vibracija kugličnog ležaja na simulatoru kvarova pomoću ultrazvučnog uređaja SDT320 pri pojavi različitih kvarova. Na simulator kvarova ugrađivala su se četiri različita kuglična ležaja ER12: jedan s oštećenjem na unutarnjem prstenu, jedan s oštećenjem na vanjskom prstenu, jedan s oštećenjem na kuglici, te jedan bez oštećenja. Nakon svake ugradnje provedeno je pet mjerenja, u trajanju od 5 sekundi, pri brzini vrtila od 1000 okretaja u minuti. Za mjerenja je korišten kontaktni senzor povezan s ultrazvučnim uređajem, kao što je prikazano na slici 17.



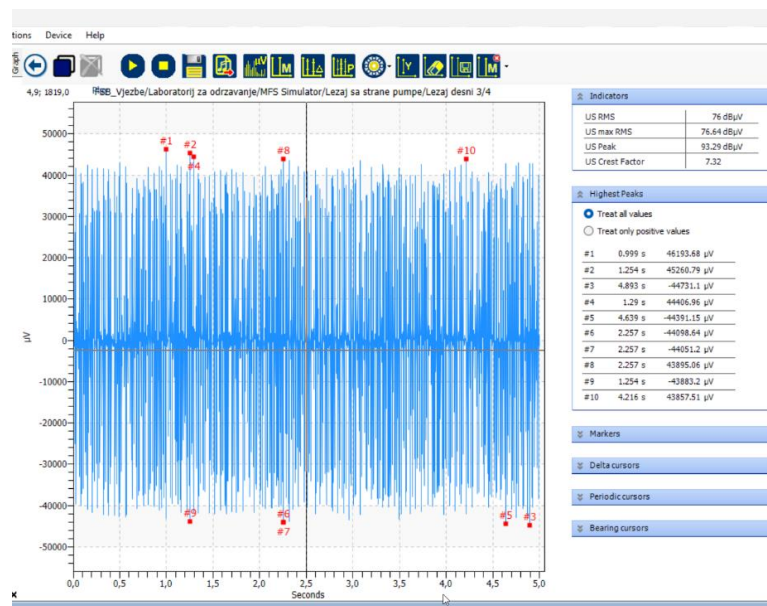
Slika 29. Postavke mjerenja u softveru Ultranalysis Suite 3

Nakon što su provedena sva potrebna mjerenja, SDT340 uređaj povezan je s računalom. Zatim je slijedilo postavljanje parametara u softveru Ultranalysis Suite 3. U softveru je odabran senzor RS2T (focUS-128k), s kojim su provedena mjerenja, te su postavljeni parametri kao što vrijeme akvizicije i brzina prikupljanja. Vrijeme akvizicije, odnosno vrijeme prikupljanja podataka, postavljeno je tako da odgovara vremenu prikupljanja podataka tijekom mjerenja (5 sekundi) te uz korištene brzine prikupljanja podataka od 128 Hz. Nakon postavljanja ovih parametara, podaci su prebačeni s uređaja na računalo.



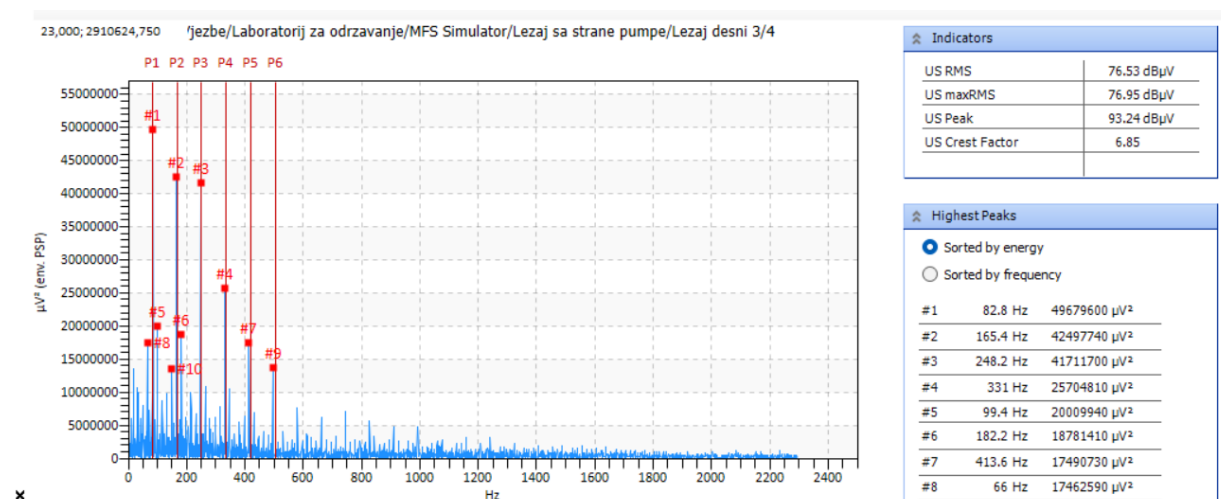
Slika 30. Prijenos podataka s uređaja SDT340 na računalo

## 6.1. Oštećenje unutarnjeg prstena ležaja



Slika 31. Vremenska domena signala ležaja s oštećenim unutarnjim prstenom

Na grafu u vremenskoj domeni prikazane su promjene amplitude signala u vremenu. Vidljivi su visoki impulsi i promjene u amplitudi koje se ponavljaju u određenim intervalima, što ukazuje na prisutnost oštećenja na unutarnjem prstenu ležaja. Ponavljajući uzorci i impulsi u signalu predstavljaju prolasku kuglica ležaja preko oštećenog dijela unutarnjeg prstena. Za detaljnu analizu, provodi se Fourierova transformacija (FFT) vremenskog signala kako bi se dobila frekvencijska domena.



Slika 32. Frekvencijska domena signala ležaja s oštećenim unutarnjim prstenom

Oznake #1, #2, #3 itd. na grafu predstavljaju najviše vrhove amplituda signala u frekvencijskoj domeni, koji su označeni radi lakše identifikacije i analize. Te oznake se koriste kako bi se istaknule specifične frekvencije na kojima su detektirani značajni vrhovi u spektru. Svaka od tih oznaka označava vršnu vrijednost amplitude signala na određenoj frekvenciji. Kako bi se identificirale frekvencije koje ukazuju na kvar unutarnjeg prstena ležaja, koristi se poznata frekvencija kvara izražena u Hz (Tablica 3) pomnožena s brojem okretaja u minuti. Izračun osnovne frekvencije oštećenja:

$$\text{Frekvencija oštećenja} = 0.0825 \times 1000 = 82.5 \text{ Hz} \quad (14)$$

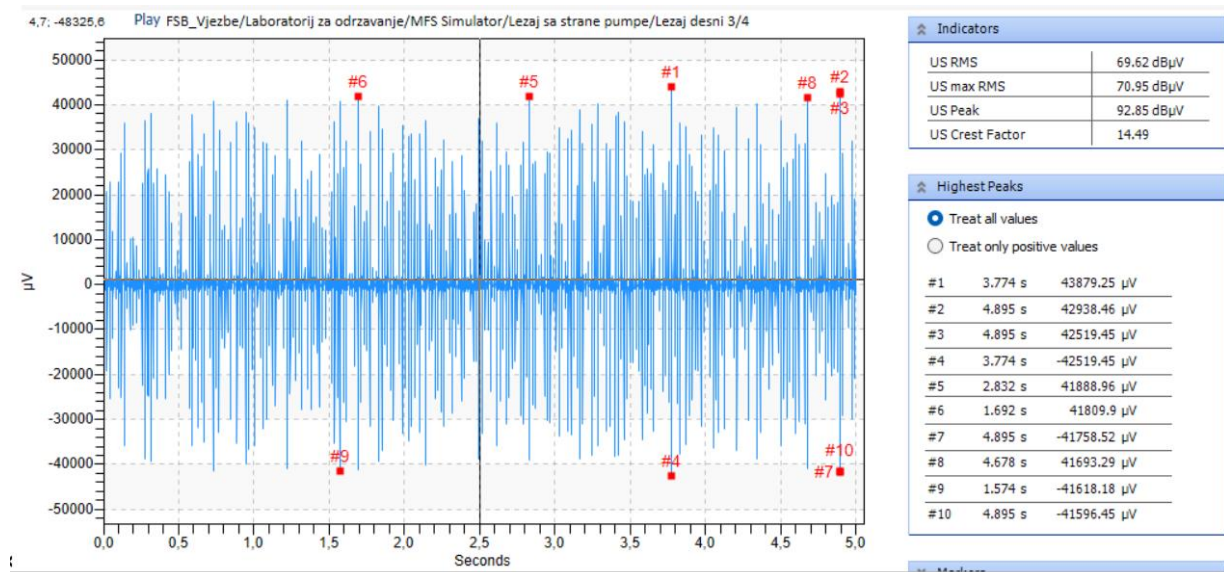
Osim osnovne frekvencije oštećenja, u frekvencijskoj analizi također mogu biti vidljivi harmonici te frekvencije. Harmonici su višekratnici osnovne frekvencije:

1. harmonik = 82.5 Hz (odgovara vrhu #1)
2. harmonik =  $2 \times 82.5 \text{ Hz} = 165 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #2)
3. harmonik =  $3 \times 82.5 \text{ Hz} = 247.5 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #3)
4. harmonik =  $4 \times 82.5 \text{ Hz} = 330.1 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #4)

Rezultati pokazuju da su identificirane frekvencije u skladu s očekivanim harmonicima frekvencije kvara unutarnjeg prstena ležaja. Ova analiza potvrđuje prisutnost kvara unutarnjeg prstena ležaja.

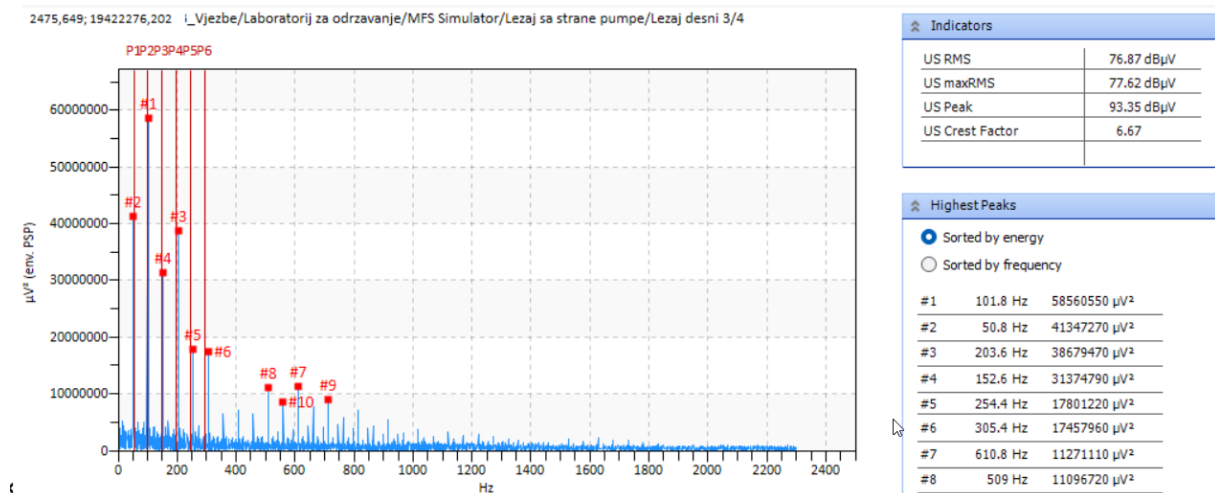


## 6.2. Oštećenje vanjskog prstena ležaja



Slika 33. Vremenska domena signala ležaja s oštećenim vanjskim prstenom

Za razliku od oštećenja unutarnjeg prstena ležaja, gdje su impulsi često visoki i koncentrirani, oštećenje vanjskog prstena ležaja pokazuje ravnomjernije raspoređene udarce i niže amplitude. Zbog većeg radijusa vanjskog prstena, kuglice ležaja rjeđe dolaze u kontakt s oštećenim dijelom.



Slika 34. Frekvencijska domena signala ležaja s oštećenim vanjskim prstenom

Izračun osnovne frekvencije oštećenja:

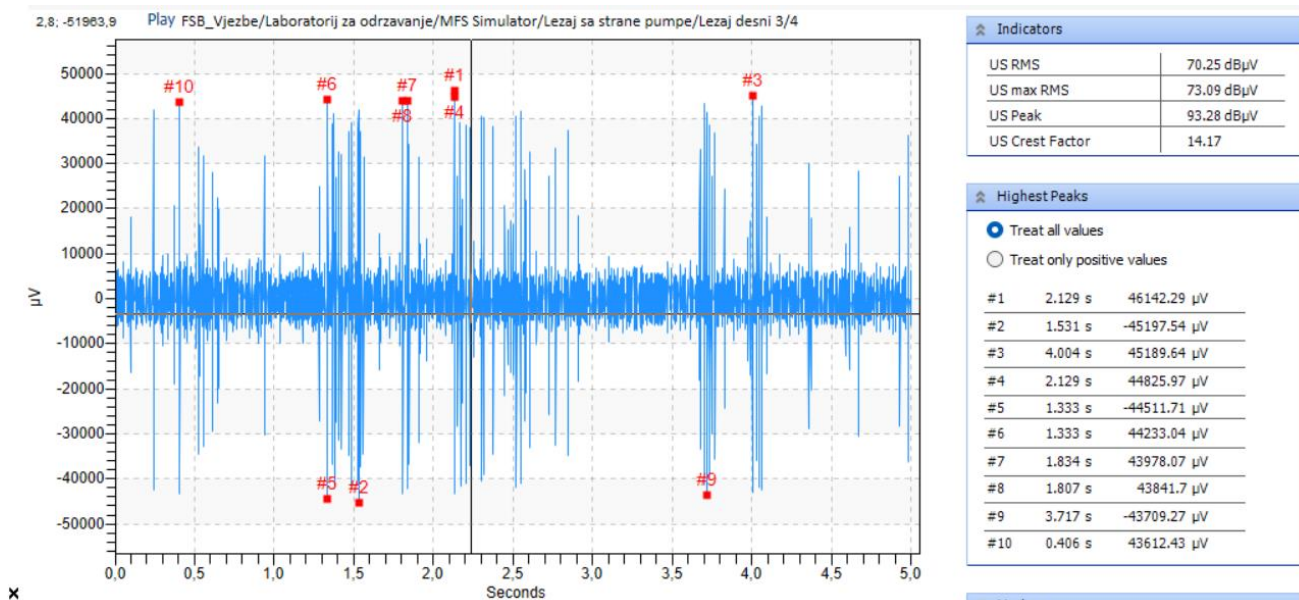
$$\text{Frekvencija oštećenja} = 0.0508 \times 1000 = 50.8 \text{ Hz} \quad (15)$$

Harmonici kao višekratnici osnovne frekvencije:

1. harmonik = 50.8 Hz (odgovara vrhu #2)
2. harmonik =  $2 \times 50.8 \text{ Hz} = 101.6 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #1)
3. harmonik =  $3 \times 50.8 \text{ Hz} = 152.4 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #4)
4. harmonik =  $4 \times 50.8 \text{ Hz} = 203.2 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #3)

Unatoč činjenici da prvi harmonik ne odgovara vrhu #1, višekratnici osnovne frekvencije jasno su vidljivi na višim frekvencijama što ukazuje na to da su identificirane frekvencije u skladu s očekivanim harmonicima frekvencije kvara vanjskog prstena ležaja. Ova analiza potvrđuje prisutnost kvara vanjskog prstena ležaja.

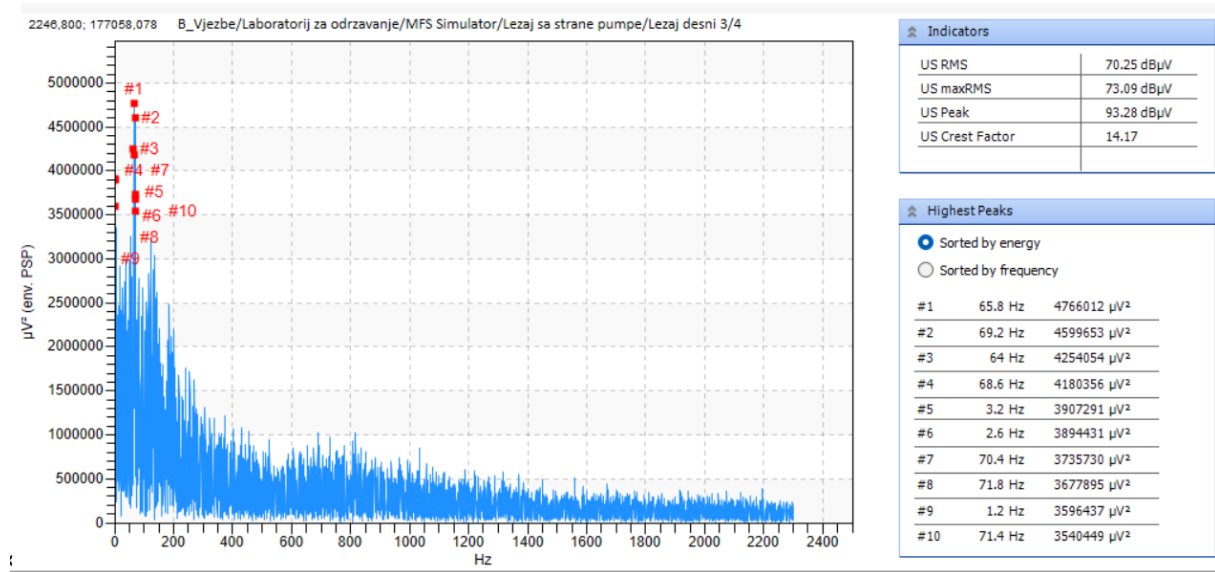
### 6.3. Oštećenje kuglice ležaja



Slika 35. Vremenska domena signala ležaja s oštećenom kuglicom

U vremenskoj domeni signala uočljivi su impulsi koji se pojavljuju periodično. Ovi impulsi predstavljaju prolazak kuglice preko njenog oštećenog dijela. Svaki prolazak kuglice preko oštećenja generira kratki, ali visoki impuls u signalu, što je karakteristično za oštećenja kuglica. Amplitude ovih impulsa su značajno više u odnosu na ostatak signala, što omogućuje njihovu jasnu identifikaciju. Ponavljajući obrasci impulsa u signalu ukazuju na konstantno prisutno oštećenje koje se manifestira pri svakom kontaktu kuglice s oštećenim dijelom tijekom rotacije ležaja.





Slika 36. Frekventijska domena signala ležaja s oštećenom kuglicom

Izračun osnovne frekvencije oštećenja:

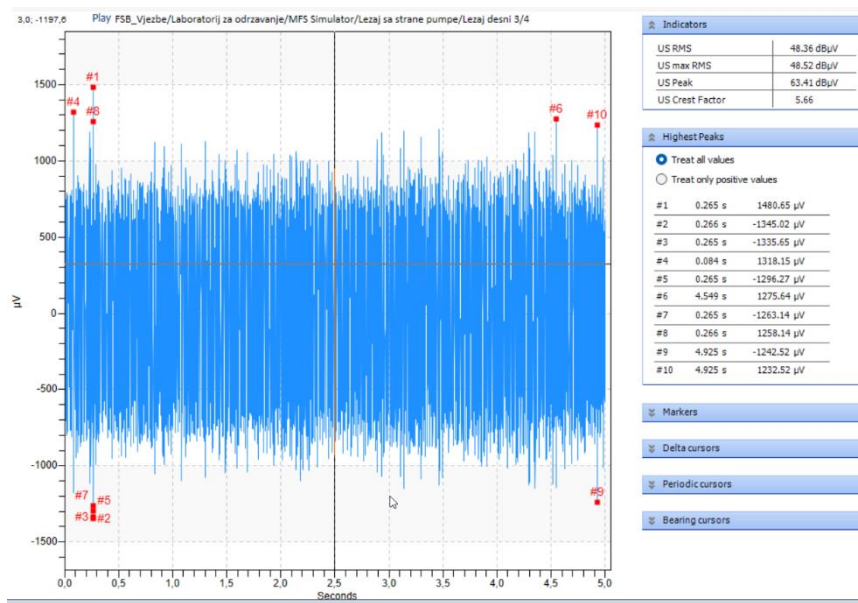
$$Frekvencija\ oštećenja = 0.0332 \times 1000 = 33.2\ Hz \quad (16)$$

Harmonici kao višekratnici osnovne frekvencije:

1. harmonik = 33.2 Hz
2. harmonik =  $2 \times 33.2\ Hz = 66.4\ Hz$  ( približno odgovara vrhovima #1, #2, #3 i #4)
3. harmonik =  $3 \times 33.2\ Hz = 99.6\ Hz$
4. harmonik =  $4 \times 33.2\ Hz = 132.8\ Hz$

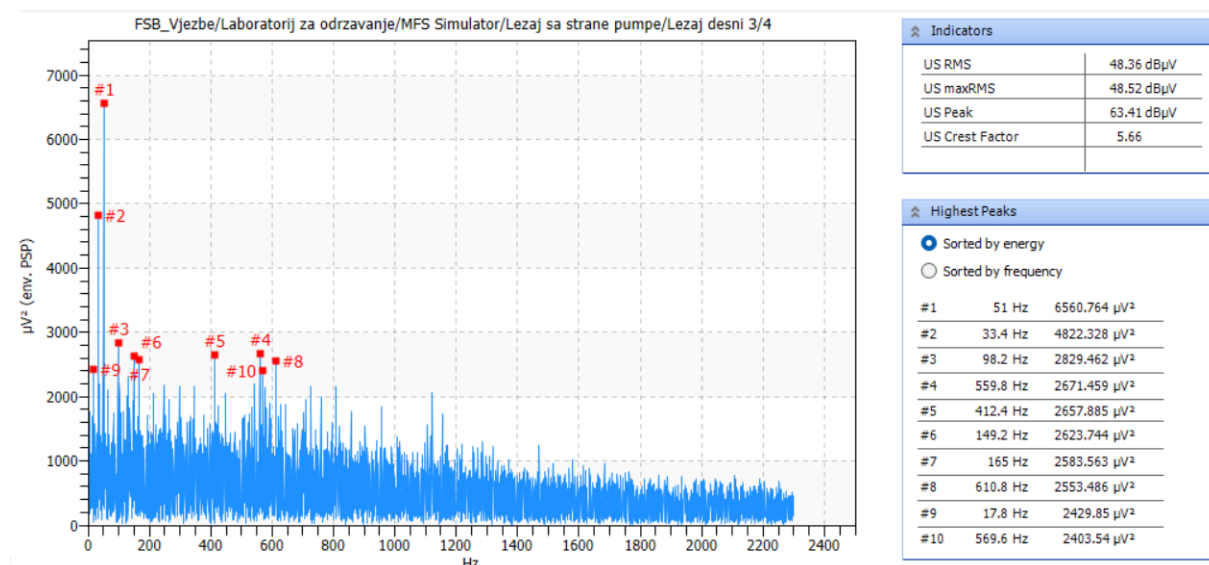
Iako nisu jasno vidljivi prvi, treći i četvrti harmonik, prva četiri vrha (#1, #2, #3 i #4) imaju približne frekvencije drugom harmoniku osnovne frekvencije oštećenja kuglice ležaja. Ova pojava može ukazivati na prisutnost dva oštećenja na kuglici ležaja. Mogući razlog za nepojavljivanje ostalih harmonika može biti i nedovoljno dugo vrijeme snimanja signala. Unatoč tim odstupanjima, možemo zaključiti da frekventijska analiza potvrđuje prisutnost oštećenja kuglice ležaja. Prisutnost višekratnika osnovne frekvencije u spektru, iako ne savršeno usklađena, i dalje ukazuje na prisutnost oštećenja kuglice ležaja.

## 6.4. Normalno stanje ležaja



Slika 37. Vremenska domena signala ležaja normalnog stanja

U slučaju ležaja normalnog stanja, amplituda signala je relativno stabilna, bez značajnih impulsa ili nepravilnosti. Odsutnost visokih, ponavljajućih impulsa u signalu ukazuje na to da ležaj nema vidljivih oštećenja. Svaka promjena amplitude u vremenskoj domeni može biti pokazatelj potencijalnog oštećenja, u ovom slučaju, stabilnost amplitude pokazatelj je ispravnog funkcioniranja ležaja.



Slika 38. Frekvencijska domena signala ležaja normalnog stanja

Izračun osnovne frekvencije oštećenja:

$$\text{Frekvencija oštećenja} = 0.0063 \times 1000 = 6.3 \text{ Hz} \quad (17)$$

Harmonici kao višekratnici osnovne frekvencije:

1. harmonik = 6.3 Hz
2. harmonik =  $2 \times 6.3 \text{ Hz} = 12.6 \text{ Hz}$
3. harmonik =  $3 \times 6.3 \text{ Hz} = 18.9 \text{ Hz}$  (približno odgovara vrhu #9)
4. harmonik =  $4 \times 6.3 \text{ Hz} = 25.2 \text{ Hz}$

Prva četiri harmonika ne poklapaju se sa vrhovima u tablici, osim približnog poklapanja vrha #9 sa 3. harmonikom. To može biti posljedica nekoliko čimbenika, uključujući nedovoljno dugo vrijeme snimanja signala, šum u podacima ili varijacije u stvarnom stanju ležaja. Kako bi se utvrdilo stanje ležaja, potrebno je usporediti harmonike viših frekvencija s vrhovima u spektru.

Viši harmonici:

5. harmonik =  $5 \times 6.3 \text{ Hz} = 31.5 \text{ Hz}$  (približno odgovara vrhu #2)
8. harmonik =  $8 \times 6.3 \text{ Hz} = 50.4 \text{ Hz}$  (odgovara vrhu #1)
16. harmonik =  $16 \times 6.3 \text{ Hz} = 100.8 \text{ Hz}$  (približno odgovara vrhu #3)
89. harmonik =  $89 \times 6.3 \text{ Hz} = 561.3 \text{ Hz}$  (približno odgovara vrhu #4)

Zaključno, iako neki od viših harmonika nisu savršeno usklađeni s vrhovima na grafu, većina vrhova se podudara s višekratnicima osnovne frekvencije. Ovo potvrđuje da je ležaj u dobrom stanju bez značajnih oštećenja, jer su frekvencije u skladu s normalnim radnim uvjetima.

## 7. ZAKLJUČAK

Ultrazvuk je zvučni val frekvencije iznad 20 KHz što ga čini nečujnim za ljudsko uho. Slušanje ultrazvučnog signala, omogućeno heterodinom transformacijom, uz vremensku i frekvencijsku analizu daje potpunu sliku stanja promatranog elementa. Ultrazvuk je val kratke valne duljine i niske energiju, što znači da ne može putovati na velike udaljenosti ili kroz objekte bez značajnog prigušenja. No, zahvaljujući njihovoj visokoj frekvenciji, ultrazvučni valovi su vrlo usmjereni, što olakšava njihovo filtriranje iz drugih akustičnih signala i lociranje izvora. Primjena ultrazvuka uključuje otkrivanje propuštanja fluida u tlačnim i vakuumskim sustavima, inspekciju ležajeva za rano otkrivanje oštećenja i problema s podmazivanjem, otkrivanje propuštanja na parnim zamkama, ventilima i brtvama te detekciju korone, lučnih pražnjenja i praćenja u električnim sustavima. Prednost ultrazvuka nad drugim metodama, poput vibrodijagnostike (0-10 kHz) i termografije, je ta što kvarovi postaju vidljivi u ultrazvučnom spektru (>20 kHz) puno ranije.

Za ultrazvučnu dijagnostiku koriste se razni uređaji poput SDT340 ultrazvučnog uređaja, opremljenih s kontaktnim i beskontaktnim sensorima. Beskontaktni senzori koriste se za otkrivanje propuštanja i električnih kvarova, a kontaktni senzori za praćenje stanja ležajeva i drugih mehaničkih dijelova, kao i za inspekciju ventila i parnih zamki. Odabir odgovarajućeg senzora ovisi i o pristupačnosti mjesta na kojem je potrebno snimanje signala, udaljenosti od izvora, te eventualnoj zaklonjenosti drugim strojevima ili uređajima.

U ovom radu na simulatoru kvarova korišteni su kuglični ležajevi s različitim vrstama oštećenja. Nakon mjerenja signala svakog ležaja, provedena je analiza dobivenih podataka. Analiza vremenskog signala pokazala je da je oštećenje unutarnjeg prstena ležaja rezultiralo vidljivim visokim impulsima i periodičnim promjenama amplitude, oštećenje vanjskog prstena karakteriziralo se koncentriranim impulsima niže amplitude, dok je oštećenje kuglice rezultiralo periodičnim impulsima čije su amplitude znatno više u odnosu na ostatak signala. Frekvencijska analiza prepoznala je harmonike osnovne frekvencije specifične za određene vrste oštećenja, čime je potvrđeno postojanje oštećenja unutarnjeg prstena, vanjskog prstena te kuglica ležaja. Iako su rezultati mjerenja bili zadovoljavajući, mogući su još bolji rezultati uz dulje vrijeme provođenja mjerenja i korištenje dodatnih senzora. Kombinacija ultrazvuka s drugim dijagnostičkim metodama može pružiti još potpuniji uvid u stanje rotacijske opreme, a tako i povećati pouzdanost i dugovječnost iste.

## LITERATURA

- [1] Lisjak D: Vježbe iz Održavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2020
- [2] Juan A. Gallego-Juárez, Basic principles of Ultrasound
- [3] SDT Ultrasound Solutions; Level 1 Ultrasound inspector training, 2022
- [4] Hwang, J. H., & Kimmey, M. B.: Principles of Ultrasound. Endosonography, 2011, str: 2–12.
- [5] Mihljević, Deklaracija zavara u metalnim šavnim cijevima, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2007
- [6] Krstelj, V.: Ultrazvučna kontrola, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2002
- [7] ISO 29821, Condition monitoring and diagnostics of machines — Ultrasound -General guidelines, procedures and validation, 2018
- [8] <https://www.indiamart.com/proddetail/steam-trap-health-checker-23318287997.html>  
(datum pristupa 10. lipnja 2024)
- [9] <https://www.directindustry.com/prod/sdt-ultrasound-solutions/product-30375-449182.html> (datum pristupa 13. lipnja 2024)
- [10] <https://sdtultrasound.com/support/downloads/sensors-datasheets/> (datum pristupa 14. lipnja 2024)
- [11] D. Dubranović, Upravljanje stanjem imovine počiva na mjernim metodama; mrežna stanica: <https://hrcak.srce.hr/file/233701> (datum pristupa 15. lipnja 2024.)
- [12] <https://www.hdkbr.hr/wp-content/uploads/2023/06/HDKBR-info-2015.-No-16.pdf> str.18,  
(datum pristupa 20. lipnja 2024.)
- [13] [https://www.stle.org/files/TLTArchives/2021/01\\_January/Best\\_Practices.aspx](https://www.stle.org/files/TLTArchives/2021/01_January/Best_Practices.aspx) (datum pristupa 21. lipnja 2024.)
- [14] S. Dubić, I. Ignjatović, D. Šešilija, V. Blagojević, M. Sojiljković; Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography, Measurement 45-7, 2012
- [15] C. N. Jackson, C.N. Sherlock, P. O. Moore; Nondestructive testing Handbook, Third edition, Volume 1, American Society for Nondestructive Testing, 1998

- 
- [16] G. Šiniković, N. Gubelj, E. Veg, M. Regodić, D. Jagarinec, I. Medojević, Z. Jeli; Rolling Bearing Fault Detection in the Range of Ultrasound; 2023 Mrežna stranica: <https://hrcak.srce.hr/file/433798> (datum pristupa 23. lipnja 2024.)
- [17] G. B. Šiniković; Detekcija oštećenja ležaja u ultrazvučnom domenu, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu
- [18] <https://spectraquest.com/simulators/details/bbs/> (datum pristupa 24. lipnja 2024.)
- [19] [rexnord.com/products/bearings/ball-bearings/unmounted-replacement-bearings/er/er12](https://rexnord.com/products/bearings/ball-bearings/unmounted-replacement-bearings/er/er12) (datum pristupa 25. lipnja 2024.)
- [20] Xu Wanga, Changqing Shena, Min Xiab, Dong Wangc, Jun Zhud, Zhongkui Zhu; Multi-scale deep intra-class transfer learning for bearing fault diagnosis , 2020