

Tehnologija dijagnostike i nadzora stanja kugličnih ležajeva

Pavičić, Damjan

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:520548>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-21**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

DAMJAN PAVIČIĆ

**TEHNOLOGIJA DIJAGNOSTIKE I NADZORA STANJA
KUGLIČNIH LEŽAJEVA
ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

**TEHNOLOGIJA DIJAGNOSTIKE I NADZORA STANJE
KUGLIČNIH LEŽAJEVA**

**TEHNOLOGY OF DIAGNOSTICS AND CONDITION
MONITORING OF ROLLING BEARINGS**

**ZAVRŠNI RAD
BACHELOR THESIS**

Kolegij: Brodsaki strojni elementi

Mentor: mr. sc. Rikard Miculinić

Student: Damjan Pavičić

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112080266

Rijeka, rujan 2024.

Student/studentica: Damjan Pavičić

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112080266

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom
Tehnologija dijagnostike i nadzora stanja ležaja
(naslov završnog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom
mr.sc. Rikard Miculinić
(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom _____

stručnjaka/stručjakinje iz tvrtke _____
(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tude spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica

Damjan Pavičić
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice

Damjan Pavičić

Student/studentica: Damjan Pavičić
Studijski program: Brodostrojarstvo
JMBAG: 0112080266

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica – autor
Damjan Pavičić
(potpis)

Ime i prezime studenta/studentice
Damjan Pavičić

SAŽETAK

Ovaj rad istražuje napredak u razvoju tehnologija za dijagnostiku i nadzor kugličnih ležajeva, s posebnim naglaskom na primjenu umjetne inteligencije. U središtu pozornosti su moderni alati, poput konvolucijskih neuronskih mreža, koji omogućuju detaljnu analizu vibracijskih podataka u svrhu otkrivanja ranih znakova oštećenja. Precizna detekcija kvarova ključna je za poboljšanje pouzdanosti i sigurnosti rada rotirajućih strojeva, što doprinosi produljenju vijeka trajanja opreme i smanjenju troškova održavanja. Kroz rad se jasno pokazuje kako ove napredne metode omogućuju pravovremene intervencije, čime se smanjuje rizik od ozbiljnih oštećenja i iznenadnih kvarova.

Ključne riječi: primjena umjetne inteligencije, konvolucijska neuronska mreža, detaljna analiza vibracijskih podataka, poboljšanje pouzdanosti i sigurnosti rada rotirajućih strojeva.

SUMMARY

This final assignment will analyze the development and application of technologies for the diagnostics and monitoring of ball bearings, with a special emphasis on the application of artificial intelligence. The focus is on modern tools, such as convolutional neural networks, which enable detailed analysis of vibration data to detect early signs of damage. Precise fault detection is crucial for improving the reliability and safety of rotating machinery, contributing to the extension of equipment lifespan and the reduction of maintenance costs. Throughout the work, it is evident that these advanced techniques enable prompt interventions, which in turn lower the risk of significant damage and sudden failures.

Key words: application of artificial intelligence, as convolutional neural networks, detailed analysis of vibration data, improving the reliability and safety of rotating machine.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	I
SADRŽAJ.....	II
1. UVOD.....	1
2. KUGLIČNI LEŽAJ	2
2.1. RADIJALNI KUGLIČNI LEŽAJ	2
2.2. PRIKAZ VELIČINA RADIJALNOG KUGLIČNOG LEŽAJA	3
2.3. UČESTALOST KVAROVA KOD KUGLIČNIH LEŽAJA.....	4
2.4. OŠTEĆENJA DIJELOVA KUGLIČNOG LEŽAJA.....	7
3. RAZVOJ TEHNOLOGIJE NADZORA I DIJAGNOSTIKE KVAROVA	11
3.1. PRAĆENJE VIBRACIJA.....	11
3.2. POJAVA UMJETNE INTELIGENCIJE.....	12
4 SUSTAV ZA PRAĆENJE STANJA LEŽAJEVA.....	13
4.2. SINTETIČKI PODATCI ZA OBUKU	15
4.3. POSTAVKE SIMULACIJE.....	16
4.4. REZULTATI SIMULACIJE	17
4.5. IZMJERENI PODATCI.....	20
4.6. REZULTATI MJERENJA	22
5 KONVOLUCIJSKA NEURONSKA MREŽA (CNN).....	24
5.1. OBRADA PODATAKA	24
5.2. VALNA TRANSFORMACIJA i KOMPILACIJA SLIKA	25
5.3. STRUKTURA CNN MREŽE	27
5.4. REZULTATI	29
5.5. CNN TRENIRAN SA SIMULACIJSKIM PODATCIMA	29
5.6. CNN TRENIRANJE S IZMJERENIM PODATCIMA.....	32
6 ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA	35
SLIKE.....	36
POPIS SLIKA	37

1. UVOD

Kuglični ležajevi jedan su od ključnih dijelova rotirajućih strojeva. Naširoko se koriste u navigaciji, zrakoplovstvu, alatnim strojevima i drugim područjima. Učinak i kvaliteta valjkastih ležajeva izravno utječu na pouzdanost i vijek trajanja stroja u kojem se koriste. S razvojem valjkastih ležajeva u teoretskom istraživanju, konstrukcijsom dizajnu, procesu proizvodnje i drugim aspektima ležajeva, učinak i pouzdanost ležajeva znatno su se poboljšali. Istovremeno, s brzinom razvoja suvremene tehnologije, raste i snaga potiska motora kao i njegova opterećenja, zbog čega nam radni uvjeti ležajeva postaju sve složeniji. Stoga se postavljaju viši zahtjevi na učinak i pouzdanost ležaja.

Prema statistici, greške na ležajevima odgovorne su za 40% svih kvarova strojeva. Kvarovi nastaju zbog nepovoljnih uvjeta, kao što su problemi sa podmazivanjem, onečišćenje zbog lošeg brtvljenja, neusklađenost i veliko opterećenje. To sve može dovesti do povećanog trošenja i može uzrokovati greške na prstenovima ili kotrljajućim dijelovima ležaja u obliku pukotina. Tako dolazi do ablacije materijala i stvaranja jamica. Ove lokalne greške proizvode uzastopne impulse koji se mogu otkriti praćenjem signala vibracija ležajeva.

Na temelju praćenja signala vibracija razvila se tehnologija za nadzor i dijagnostiku kvarova ležajeva. Cilj tehnologije za praćenje stanja je smanjenje ekonomskih gubitaka promatrajući degradaciju stroja prije nego dođe do neočekivanog prekida rada. Zbog razvoja ove tehnologije, održavanje temeljeno na predviđanju kvakova postaje sve pouzdanije i točnije, stoga može perspektivno zamijeniti strategije održavanja temeljene na rasporedu.

2. KUGLIČNI LEŽAJ

Ležajevi su mehaničke komponente koje omogućuju rotaciju ili linearno kretanje između dva dijela stroja uz minimalno trenje. Koriste se u širokom rasponu primjena, od malih motora i alata do velikih industrijskih strojeva i vozila. Prema vrsti trenja, ležajeve dijelimo na:

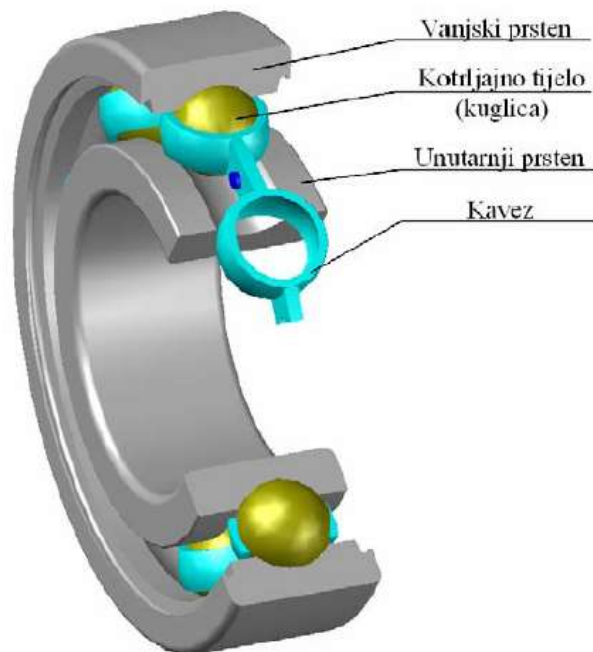
- klizne ležajeve, koji djeluju na principu trenja klizanja
- kotrljajuće (valjne) ležajeve, koji djeluju na principu trenja kotrljanja

Klizni ležajevi [1] ušli su u upotrebu pronalaskom kotača, dakle davno prije nove ere, a danas je to strojni dio koji nas prati na svakom koraku. Možemo ga naći unutar ručnog sata (promjeri od 0,3 do 0,6 mm, opterećenja od nekoliko mN) do ogromnih kliznih ležajeva (promjeri preko 1000 mm, opterećenja preko 40 kN). Između dijelova u relativnom gibanju nalazi se tanki sloj ulja ili uljni film, debljine reda veličine 2 do 50 μm .

Kotrljajući ležaj patentirao je Philip Vaughan 1794., a prvi puta je primijenjen u Francuskoj 1869., na pedalima za bicikl. Kod njih se između dijelova u relativnom gibanju (unutrašnjeg prstena vezanog za osovinu i vanjskog prstena vezanog za kućište) nalaze valjna tijela promjera reda veličine 2 do 50 mm.

2.1. RADIJALNI KUGLIČNI LEŽAJ

Radijalni kuglični [8] ležajevi (slika 1.) su u osnovi namijenjeni za prenošenje radijalnih opterećenja, iako neke izvedbe omogućavaju i prijenos aksijalnih opterećenja. Međusobno se razlikuju prije svega prema obliku valjnih tijela. Kotrljajuća tijela su jednostavnog geometrijskog oblika (kugla, stožac, valjak, i dr.), vođena u kavezu koji sprječava njihov međusobni dodir, a istodobno ih ravnomjerno raspoređuje po obodu ležaja. U praksi se najviše upotrebljavaju kuglični ležajevi u kojima su valjna tijela kuglice.



Slika 1. Radijalni kuglični ležaj [1]

2.2 PRIKAZ VELIČINA RADIJALNOG KUGLIČNOG LEŽAJA

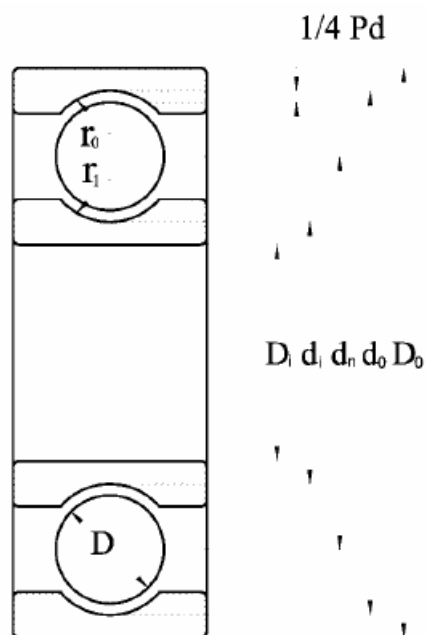
Promjer između osi kotrljajućih tijela d_n je prosječni promjer između unutarnjeg d_i i vanjskog prstena ležaja d_o , te je prikazan sljedećim izrazom:

$$d_n = \frac{1}{2} (d_i - d_o)$$

Dijametralno zračnost P_d prikazana je sljedećim izrazom:

$$P_d = d_o - d_i - 2D$$

Pojednostvljen prikaz glavnih mjera kotrljajućeg kugličnog ležaja prikazan je na slici 2.



Slika 2. Glavne mjere kugličnog ležaja [1]

Kuglični ležaj je konstruiran tako da ima dijametralnu zračnost u neopterećenom stanju, zbog čega ležaj može doživjeti aksijalni pomak. Aksijalni pomak uzrokuje kosi kut s radijalnom plohom, koji se javlja između kuglice i prstena, zbog čega nam dodirni kut nije jednak nuli. Dodirni kut je prikazan izrazom:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(1 - \frac{pd}{2A} \right)$$

Gdje je A prikazan izrazom:

$$A = r_0 - r_1 - D$$

2.3 UČESTALOST KVAROVA KOD KUGLIČNIH LEŽAJA

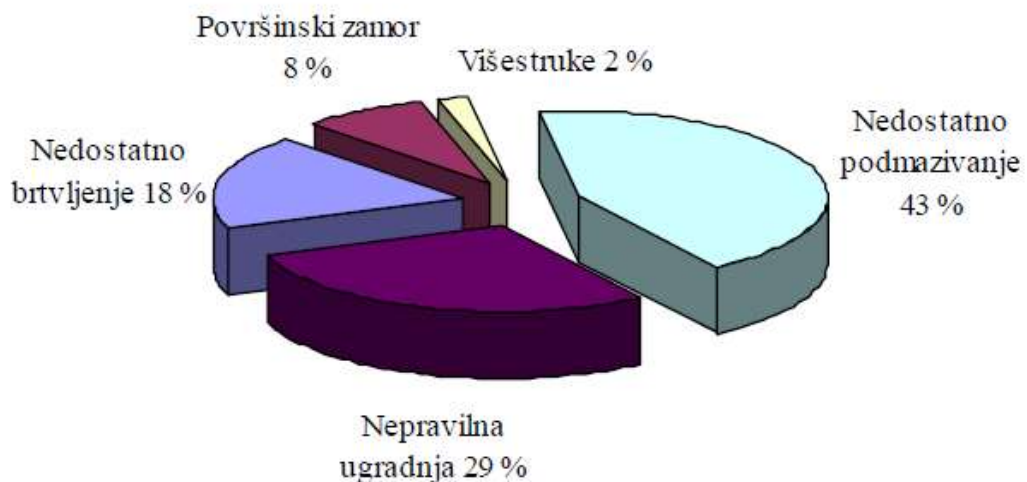
Tvrtka SKF provela je višegodišnje istraživanje o produženju životnog vijeka ležaja gdje je utvrđeno da samo 20% postojanosti ležaja ovisi o njegovoj kvaliteti. Ostali

parametri kao što su montaža, podmazivanje, redovito i pravilno održavanje u stvari imaju najveći utjecaj na rad ležaja.

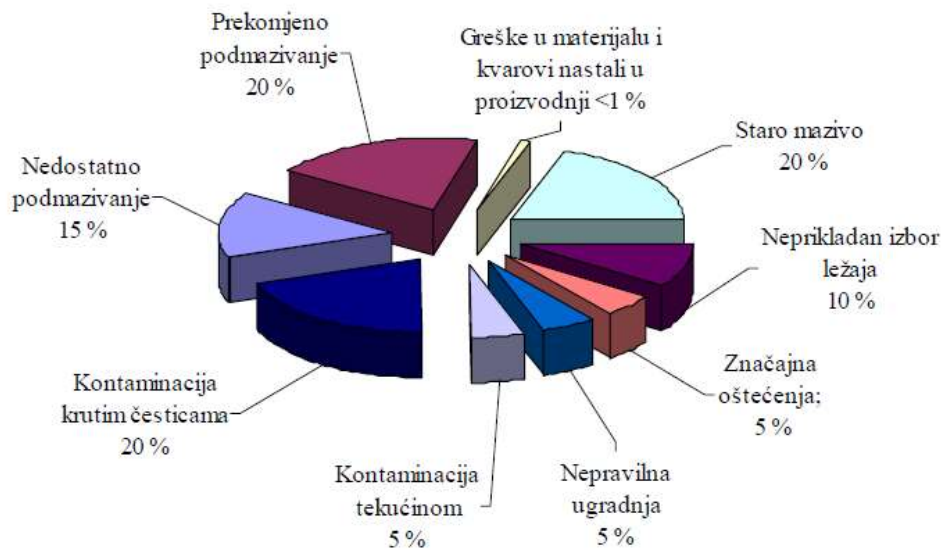
Prema [2], klasifikacija načina oštećenja koja se mogu pojaviti u kugličnim ležajevima je sljedeća:

- a) Nepravilna ugradnja čini 16% prijevremenih otkaza ležajeva. Uzrok oštećenja je korištenje grube sile ili krivog alata prilikom ugradnje. Za svaku montažu i demontažu ležaja potrebno je imati odgovarajuću mehaničku, hidrauličku i toplinsku potporu, koja ovisi o vrsti postrojenja.
- b) Nepravilno podmazivanje uzrok je otprilike 36% prijevremenih otkaza ležajeva. Uzrok je odabir pogrešnog sredstva za podmazivanje ili njegova kriva primjena.
- c) Kontaminacija uzrokuje otprilike 14% prijevremenih otkaza ležajeva točkom posljedica je nezaštićenost ležajeva i masti od zagađenja.
- d) Zamor uzrokuje otprilike 34 % prijevremenih otkaza ležajeva. Uzrok tome je preopterećenje stroja, te nepravilno ili nedovoljno održavanje.

Učestalost oštećenja na kugličnim ležajevima označeni su na slici 3., a učestalost kvarova na slici 4.



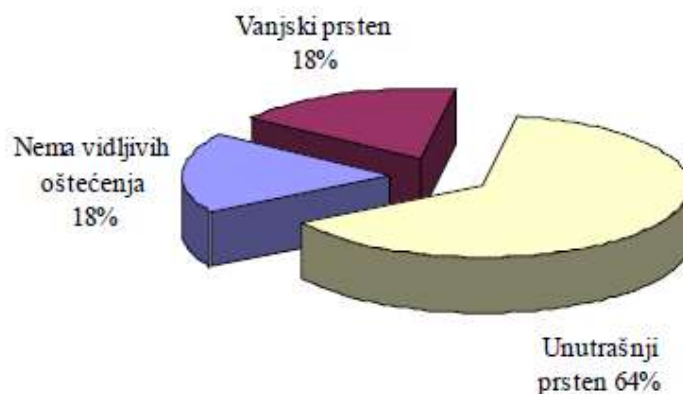
Slika 3. Prikaz uzroka oštećenja na kugličnom ležaju [1]



Slika 4. Prikaz uzroka kvarova kod kugličnih ležajeva [1]

Slika 5 prikazuje udio oštećenja unutarnjeg i vanjskog prstena kugličnog ležaja. Istraživanja pokazuju da je unutarnji prsten mnogu podložniji kvaru za razliku od vanjskog prstena ili kotrljajućeg elementa ležaja. Za to postoje za obrazloženja:

1. Rotacijska brzina kaveza po vanjskom prstenu nešto je viša nego po unutarnjem prstenu. Iz tog razloga, kinetički omjer (frekvencija) gibanja kuglice po unutarnjem prstenu ima od otprilike 29% veću učestalost u odnosu na gibanje kuglice po vanjskoj stazi.
2. Dodirna površina unutarnjeg prstena je manja zbog manjeg radijusa zakrivljenosti, zbog čega su naprezanje i dodirna sila veći.



Slika 5. Učestalost kvarova na vanjskom i unutarnjem prstanu ležaja [1]

2.4 OŠTEĆENJA DIJELOVA KUGLIČNOG LEŽAJA

[7] Oštećenja nastala zamorom materijala razvijaju se na dijelovima kugličnog ležaja bez obzira na njegove uvjete korištenja i njegovo održavanje. Oštećenja ovise o naprezanju dijelova ležaja te se najčešće javljaju kao pukotine na površini, a u rijetkim slučajevima mogu se razviti i ispod površine materijala. Uzrok oštećenja teško je prepoznati odmah, sve dok se ono ne poveća, a nastaje kao posljedica nedovoljnog podmazivanja ili kontaminacije ležaja. Zamor materijala može se prepoznati kao točkasto oštećenje unutar materijalu vanjskog prstena ležaja (slika 6.) ili unutarnjeg prstena ležaja (slika 7.).



Slika 6. Oštećenje nastalo zamorom materijala na vanjskom prstenu ležaja [2]



Slika 7. Oštećenje nastalo zamorom materijala na unutarnjem prstenu ležaja [2]

Oštećenje se može pojaviti i na kavezu ležaja u obliku deformacije (slika 8.) ili loma materijala (Slika 9.). Uzroci oštećenja mogu biti uzrokovani nepravilnom montažom ili prekoračenjem brzine vrtnje ležaja. Još mogu nastati kao rezultat trošenja materijala uslijed nepravilnog podmazivanja, uslijed prevelikog momenta opterećenja, prevelike zračnosti i dr.



Slika 8. Deformacija kaveza [2]



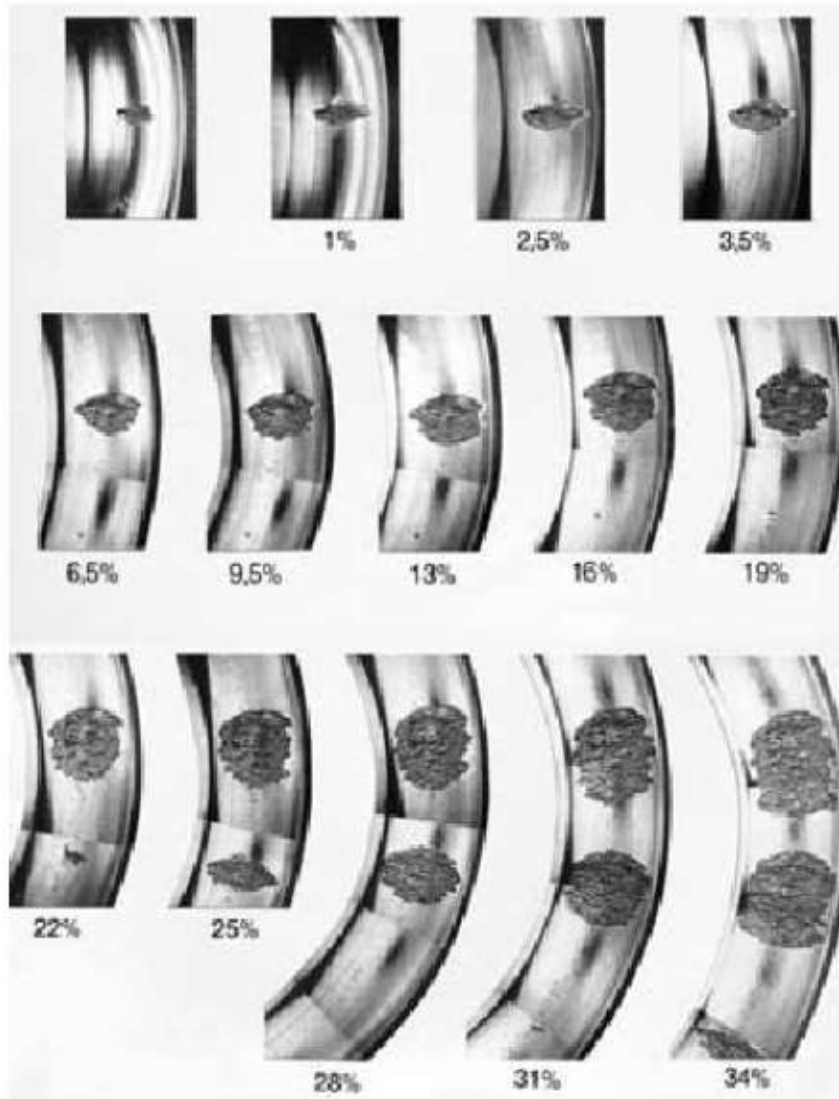
Slika 9. Lom kaveza [2]

Do oštećenja dolazi i prolaskom električne struje kroz ležaj (Slika 10.). Struja prelazi sa jednog prstena na drugi kroz kotrljajući element ležaja, a njegove dodirne površine pri tome su slične procesu zavarivanja električnim lukom. Ležajevi u stanju mirovanja znatno su podložniji oštećenjima uzrokovanim električnom strujom u odnosu na ležajeve koji se gibaju (koji su u radu). Veličina oštećenja ovisi o: jačini struje, trajanju prolaska struje, brzini vrtnje ležaja, vrsti maziva i dr. Jedini način za sprječavanje oštećenja prolaskom struje je da se spriječi dovod struje do ležaja.



Slika 10. Oštećenje ležaja nastalo prolaskom struje [1]

Oštećenje nastalo na prstenovima, kavezu ili kod kotrljajućeg elementu ležaja, progresivno će se povećavati sa daljnjom uporabom ležaja. Na slici 11. prikazane su fotografije periodičkih pregleda ležaja koje pokazuju razvoj oštećenja koji je izražen u postotku nominalnog životnog vijeka ležaja.



Slika 11. Razvoj oštećenja zamora materijala na unutarnjem prstenu [2]

Neki od uzroka oštećenja su:

- premala ili prevelika količina sredstva za podmazivanje
- primjena pogrešnog sredstva za podmazivanje
- korzija, vlaga, prašina
- zagrijavanje ležaja, prevelika temperatura okoline
- preopterećenje i dr.

3. RAZVOJ TEHNOLOGIJE NADZORA I DIJAGNOSTIKE KVAROVA

Sedamdesetih godina [3] prošlog stoljeća raspravljalo se o uporabi preventivnog i korektivnog održavanja. Do tada nije postojao sustav planskih pregleda i održavanja, već je svo održavanje bilo prepušteno posadi. To je rezultiralo štetama koje su se mogle spriječiti korištenjem sustava preventivnog održavanja [10]. Izrada plana održavanja pokazala se neizostavnom, kako bi se posadi omogućilo obavljanje svih hitnih podhvata održavanja u definiranom vremenskom razdoblju.

Istraživanje provedeno na brodskim dizelskim motorima pokazalo je da plansko održavanje rezultira povećanom pouzdanošću. Pa tako je 1964. godine, Lloyd Registe osnovao grupu za pronalaženje najboljih metoda održavanja dizel motora. Osamdesetih godina prošlog stoljeća počela se koristiti metoda preventivnog održavanja po stanju. Ova metoda se zasniva na temelju prikupljenih parametara koji su izmjerani tijekom rada motora, te tehničke dijagnostike kojom se određivalo stanje opreme i potrebni zahvati održavanja. Stanje motora utvrđivalo se uz pomoć:

- Analize ulja (kojom se može ustanoviti koncentracija čestica istrošenog materijala u ulju za podmazivanje)
- Uljne magle (metoda za određivanje koncentracije uljne magle radi sprječavanja eksplozije)
- Tribotehnologije (uvodi se koncept CP- analize, kojime se smanjuje potrošnja ulja za podmazivanje, trošenje tarnih površina, a samim time i potrošnja goriva)
- Praćenja vibracija

3.1 PRAĆENJE VIBRACIJA

Praćenje vibracija [6] je najčešće korištena metoda u preventivnom održavanju prema stanju. Za dijagnostiku stanja ležajeva koristi se metoda udarnih impulsa SPM (Shok Pulse Method). Ovom metodom se promatraju problemi vibracija i dinamičkih sila koje se javljaju u složenim brodskih reduktorima kod porivnog sustava koji ima tri dizel motora i jedan porivni vijak. To je jedan od najvećih problema koji se javljaju prilikom

raspodjele opterećenja kod zapčastih prijenosa, odnosno prijenosa snage. Promjenom opterećenja stroja dolazi do promjene njegovih vibracija.

Britanska tvrtka Aconstic Tehnology Limited razvila je program za praćenje vibracija pogonskog stroja. Korištenjem ovog računalnog programa pojavila se mogućnost predviđanja kvarova na stroju. Rad ovog programa bazire se na unaprijed određenom konceptu. On se sastoji od informacija koje su se prikupile iz prijašnjeg promatranja rada stroja, povijesti njegovih kvarova i održavanja kako bi se odredila najefikasnija metoda nadzora i dijagnostike istog. Sistem za praćenje zahtjeva program koji ima detaljne informacije o stroju koji se nadzire. To su tipovi njegovih kvarova i greške koje se mogu pojaviti. Iz tog razloga sustav za nadziranje kao i njegova preciznost znatno ovisi o detaljnom poznavanju karakteristika kvarova. Tvrtka MMC – podružnica BP Shipping razvila je računalni sistem CM koji koristi vibracije stroja za utvrđivanje njegovog stanja. Ovaj sistem koristi podatke prikupljene pri pokusnoj vožnji broda i vrši kontrolu po radovima na održavanju. Tvrtka Siemens AG 1976. godine proizvela je računalni program kojem je cilj bio dijagnosticiranje i kontrola koja je obuhvaćala cijeli pogon. Ispitivanje programa započelo je na pokusnom motoru MAN tima V65/65.

3.2 POJAVA UMJETNE INTELIGENCIJE

Osamdesetih godina pojavljuje se ekspertni sustav za održavanje što je predvodilo razvojem tehnologije umjetne iteligencije. Ovaj sustav se sastoji od teoretskih podataka i praktičnog znanja eksperata, koji umjetnoj inteligenciji postavljaju podlogu za otkrivanje i rješavanje određenih problema. U tom periodu razvija se sistem DECSP (Diesel Engine Software Processor) od strane Lloyd Register-a. DECSP je ekspertni sustav dijagnostike kvarova i analize goriva, a pruža i simulaciju potrebnog održavanja.

MAN B&W razvija sustav računalnog nadzora rada motora koji se naziva CoCoS (Computer Controlled Surveillance). On nam omogućava povećani nadzor rada motora, stvara plan održavanja i vodi evidenciju o stanju rezervnih dijelova. CoCoS MPS (The Maintenance Planning System) pruža nam cjelovit plan održavanja, potreban broj rezervnih dijelova i alata, kao i vrijeme potrebno za obavljanje predviđenog održavanja. CoCoS EDS (The Engine Diagnostic System) jedan je od četiri softverska programa, a sastoji se od bilježnja podataka, nadzora i dijagnostike. U slučaju pojave kvara, ovaj

program će ga detektirati i dati nam njegov uzrok kao i potrebne radnje za njegovo uklanjanje. CoCoS SPC (The Spare Parts Ordering System) vodi evidenciju o broju rezervnih dijelova, te sadrži sve potrebne skice i nacрте. CoCoS SPO (The Stock and Spare Parts Ordering System) pruža optimizaciju rezervnih dijelova, minimalan broj potrebnih rezervnih dijelova, opskrbljivače dijelova i alate, te njihove cijene.

Sulzer je razvio sustav pod nazivom MAPEX koji se koristi za dijagnostiku stanja brodskih motora. On se sastoji od baze podataka kojom se postigla optimizacija rezervnih dijelova i održavanja. Omogućen je pristup bilo kojeg dijela sustava, njegovim operacijama, informacijama o njegovom održavanju, količini rezervnih dijelova, itd. Tako je Sulzer na motor 4 RT X 54, primjenio svoj sustav za elektroničko upravljanje i nadzor u sklopu projekta Tehnology Demonstrator.

4 SUSTAV ZA PRAĆENJE STANJA LEŽAJEVA

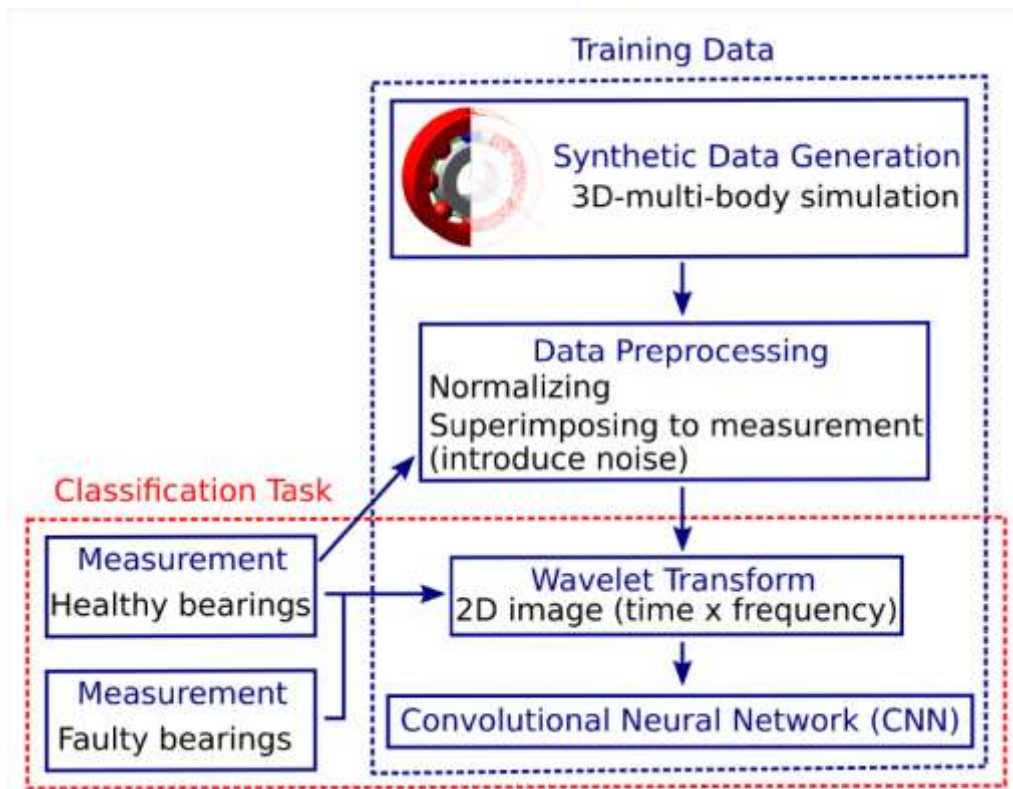
[5] Današnji sustavi za praćenje i otkrivanje grešaka na sustavima koriste inteligentnu dijagnostiku, koja ima veliku bazu prikupljenih podataka uz pomoć koje učinkovito i pouzdano daje rezultate dijagnoze nekog sustava. Postoje razne vrste inteligentne dijagnostike, a najviše se primjenjuju SVM (Support Vector Machine) i ANN (Artificial Neural Network), te se nadavno pojavila i tkz. deep learning metoda. SVM i ANN metode se zasnivaju na temelju znanja stručnjaka, dok deep learning metoda može automatski izvući značajke iz neobrađenih podataka.

Za uspješno treniranje sustava za praćenje stanja ležaja koji se temelji na inteligentnoj dijagnostici, potrebno je razviti algoritam strojnog učenja. On se sastoji od skupa podataka koji sadrže dovoljan broj informacija kako bi algoritam lakše prepoznao značajne uzorke bez pretjeranog prilagođavanja algoritma, što bi u suprotnom rezultiralo visokim stopama pogrešaka. Podatci se mogu dobiti eksperimentalno ili uz pomoć simulacije. Eksperimentalno prikupljanje podataka može biti vrlo ograničeno zbog samog provođenja mjerenja određenog ležaja. Izmjereni podatci se prikupljaju prilikom rada sustava, što znači da ćemo imati različita svojstva kvarova. Kvarovi nastaju kod ležajeva

različitih vrsta i različitih primjena, zbog čega ne postoji jamstvo da će algoritam biti obučen sa specifičnim podacima potrebnim za otkrivanje kvara. Ovaj problem se može riješiti s primjenom sofisticiranih simulacijskih modela, koji podatke mogu generirati u širem rasponu radnih uvjeta. Prikupljanje podataka pomoću ove dvije metode znatno je doprinjelo preventivnom održavanju, kalibriranju senzora, otkrivanju grešaka i praćenju procesa. Nadalje, podatci za obuku sustava za praćenje koji se sastoje od kombinacije simuliranih i izmjerenih podataka mogu čak i poboljšati inteligentnu dijagnostiku.

Cilj sustava za praćenje stanja je prepoznati karakteristike frekvencije kvara ležaja kako bi se procjenila ozbiljnost i tip kvara. Metode vremensko-frekvencijske analize, kao što su STFT (Short-Time Fourier Transform), HHT (Hilbert – Huang Transform), često se primjenjuju za prikaz lokacije kvara u vremenskom i frekvencijskom području. Ove metode se koriste kod deep learning metode koja koristi 2D CNN (convolutional neural networks), gdje se podatci izvlače iz slika tijekom procesa obuke.

Jednostavan 3D simulacijski model prikazuje kuglični ležaj u različitim uvjetima, odnosno prikazuje različite greške ležaja u obliku rupa na unutarnjem i vanjsom prstenu. Ovaj model je brz i efikasan način za stvaranje podataka koji se koriste za treniranje sustava za praćenje stanja. Pomaže nam prikupiti podatke za treniranje sustava koji se nebi mogli prikupiti sa metodom mjerenja (eksperimentalnom metodom). Osim toga, simulirati možemo različita naprezanja ležaja, čime se omogućava stvaranje baze podataka za različita stanje naprezanja. Uz to, HHT nam stvara sliku koja sadrži informacije o vremenu i frekvenciji, dok nam deep learning CNN još nije istreniran za to. Nadalje, dodatni CNN je obučen s mjerenim podacima (eksperimentalno prikupljeni podatci), kako bi se usporedila izvedba i točnost simuliranih podataka.



Slika 12. Prikaz predložene metode [3]

4.2 SINTETIČKI PODATCI ZA OBUKU

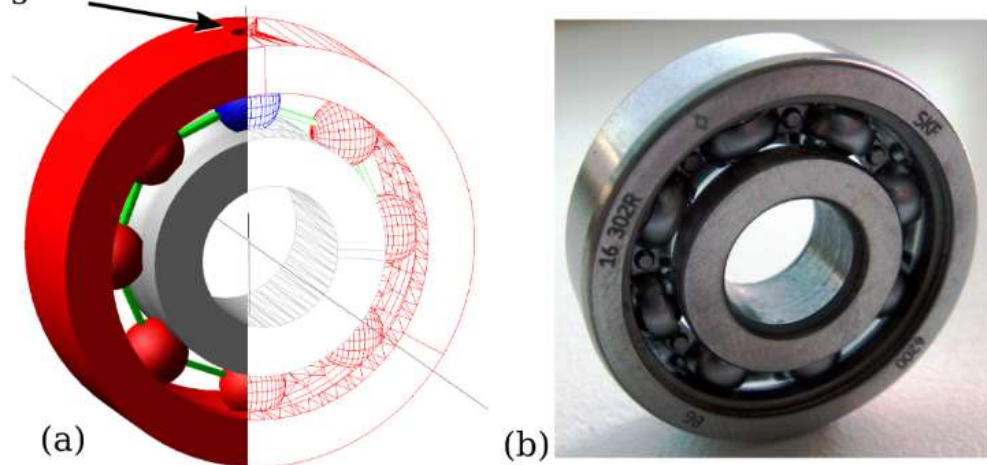
Postoje nekoliko načina za osiguravanje dovoljnog broja informacija za osposobljavanje CNN-a za dijagnosticiranje stanja kugličnog ležaja. Jedan od načina prikupljanja informacija je korištenje javno dostupnih podataka koji sadrže rezultate dobivene od raznih mjerenja [9]. Ovi javni podatci se baziraju na klasičnim vibracijskim signalima i fokusiraju se na umjetna oštećenja. Drugi način prikupljanja informacija je generiranje sintetičkih podataka, koji se mogu kreirati analitički pomoću jednostavnih funkcija, to jest, s Diracovom delta funkcijom i eksponencijalnim opadanjem za prigušenje, za modeliranje prolazne neravnoteže sila neispravnog ležaja, ili numerički dinamičkim rješavanjem zavisne jednačbe. Teorijski modul za simuliranje vibracija i različitih parametara kao što su opterećenje, frekvencija osovine, učinci neuravnoteženosti, zazor kaveza, znatno je poboljšán. Ipak, ovaj model je ograničen i ne obuhvaća sva dinamička naprezanja ležaja. Za detaljnije istraživanje koristi se dinamika ležaja koja uključuje dinamičko opterećenje, promjenu krutosti ležaja, nelinearno ponašanje opruke,

itd. Ovi se moduli temelje na diferencijalnim jednažbama drugog reda s metodom vremenske itegracije i uglavnom se razlikuju po broju DOF-a (degree of freedom) i proračunu dodira između dijelova ležaja (vanjski prsten, kotrljajući element, unutarnji prsten, vratilo, itd.).

4.3 POSTAVKE SIMULACIJE

Sintetički podatci [4] vibracije ležaja kreirani su uz pomoć softvera za dinamičko modeliranje MSCAdams. Dijelovi ležaja su pojednostavljeni kao kruta tijela, a kontaktna sila je numerički određene tijekom udara. Sila se definira po Hertzijevoj teoriji kontakta, uzimajući u obzir i kaznene regulacije. Omogućeno je trenje prema Coulombovom zakonu i postavljeno je kao kontakt podmazanog čelika u skladu sa svojstvima kontakta materijala MSCAdams. Osnovne dimenzije ležaja preuzete su sa stranice proizvođača (skf6200). Međutim, proizvođač nije specificirao sve dimenzije pa su sljedeći parametri postavljeni kao: promjer kuglice je 4,76 mm; polumjer zakrivljenosti utora unutarnjeg prstena je 2,43 mm, vanjskog prstena 2,48 mm; zazor ležaja postavljeni su po ISO klasi zazora C3 koja iznosi 20 μm . Da bi se smanjio stupanj slobode i time ubrzalo vrijeme računanja, kavez ležaja zamijenjen je krutom vezom kako bi se osigurao fiksni razmak, ali omogućila rotacija valjaka u 3D prostoru.

Outer ring defect



Slika 13. 3D prikaz ležaja i orginalni kuglični ležaj [3]

Vanjski prsten je opterećen vertikalno sa 100 N, a brzina od 3000 okretaja u minuti (50 Hz) primijenjena je na unutarnji prsten kako bi se približili stvarni uvjeti rada ležaja. Vremenski korak simulacije postavljen je na 10 μ s s vremenom simulacije od 1 minute, a ubrzanje vanjskog prstena ograničeno je samo na vertikalno gibanje. Provedeno je ukupno 25 simulacija, uključujući različite veličine oštećenja unutarnjeg i vanjskog prstena u obliku rupe, kako bi se osigurala dovoljna količina podataka za obuku i proučila učinkovitost dijagnostike oštećenja CNN-a. Veličine oštećenja odabrane su da budu 250, 500, 750 i 1000 μ m, uključujući dodatnu simulaciju bez oštećenja.

4.4 REZULTATI SIMULACIJE

Zamor ležaja proizvodi karakteristične frekvencije grešaka koje su povezane s dimenzijama ležaja. Te osnovne frekvencije oštećenja sažete su u jednadžbama (1)–(4) kao frekvencija prolaska kuglice preko vanjskog prstena (BPFO), frekvencija prolaska kuglice preko unutarnjeg prstena (BPMI), osnovna frekvencija kaveza (FTF) i frekvencija okretanja kuglice (BSF).

$$BPFO = f_s \frac{N_d}{2} \left(1 - \frac{N_d}{P_d} \cos \theta \right) \quad (1)$$

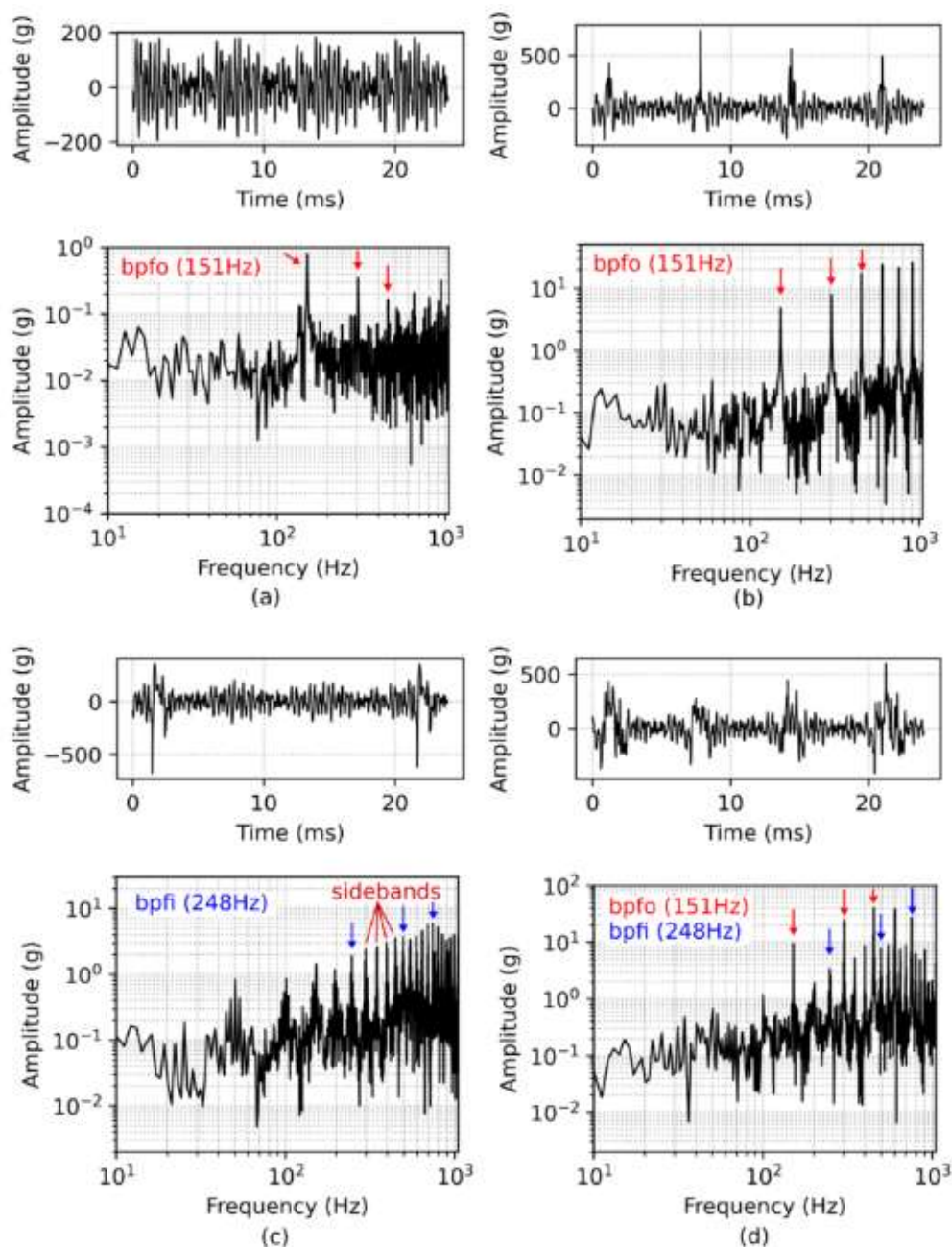
$$BPMI = f_s \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) \quad (2)$$

$$FTF = f_s \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) \quad (3)$$

$$BSF = f_s \frac{B_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right)^2 \right) \quad (4)$$

gdje je N_b broj kuglica, B_d promjer kuglice, P_d srednji promjer, θ kontaktni kut, a f_s frekvencija vratila.

Slika 14. prikazuje obrazac vibracija simuliranog ležaja bez oštećenja. Iako je ležaj modeliran bez ikakvih grešaka, vidljiv je mali vrh na BPFO i njegovim harmonijskim frekvencijama. Kada kuglica prođe kroz zonu maksimalnog opterećenja (gornji dio), on blago podiže vanjski prsten, a vanjski prsten se spušta kada izlazi iz zone opterećenja. Ova modulacija je prisutna u simulaciji zbog direktnog praćenja ubrzanja vanjskog prstena i podešavanja sankcija za udarce između komponenata ležaja. Redovni uzorci vibracija primjećeni su kod ležaja sa oštećenjem vanjskog prstena (slika 14b), prikazujući izražene vrhove prema BPFO ležaja. Spektar ležaja sa oštećenjem unutrašnjeg prstena prikazuje nekoliko harmonijskih vrhova BPFI i također je karakterističan po bočnim trakama, moduliranom frekvencijom vratila (slika 14c). Ovi bočni signali nastaju usljed amplitudne modulacije rotirajućeg unutrašnjeg prstena sa oštećenjima. U detaljima, oštećenja na unutrašnjem prstenu ulaze i izlaze iz zone opterećenja ležaja što uzrokuje varijaciju kontaktne sile između kuglica i prstena. Konačno, slika 14d prikazuje obrazac vibracija oštećenog ležaja sa dodatnim oštećenjima i na unutrašnjim i na vanjskim prstenovima. Detektirane osnovne frekvencije BPFO i BPFI odgovaraju izračunatim frekvencijama $BPFO=152,4$ Hz i $BPFI=247,6$ Hz iz jednadžbi (1) i (2), s parametrima postavljenim na $N_b=8$, $\theta=0$, $f_s=50$ Hz, $B_d=4,76$ mm i $P_d=20$ mm.

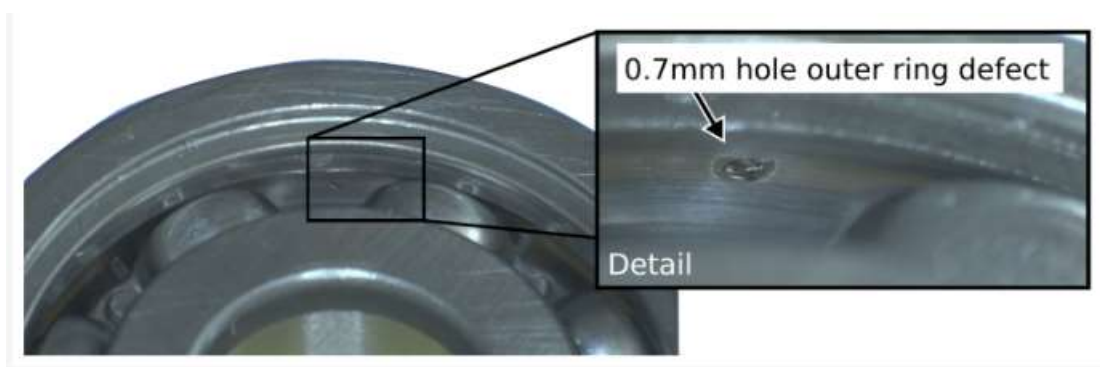


Slika 14. Obrazac vibracija simulacije [3]

Isječak podataka o vibracijama u vremenskom području i odgovarajući FFT iz simulacije prikazani su na vrhu i dnu svakog grafa za različite postavke simulacije. Vremenski niz i FFT ležaja bez oštećenja prikazani su u (a). Frekvencija ležaja s jednim oštećenjem vanjskog prstena od 500 μm i jednim oštećenjem unutarnjeg prstena od 750 μm karakterizira prisutnost harmonijskih vrhova, prikazano u (b) i (c). Slika (d) prikazuje vibracije i frekvencija simuliranog ležaja s oštećenjima oba prstena (vanjskog i unutarnjeg) od po 1000 μm.

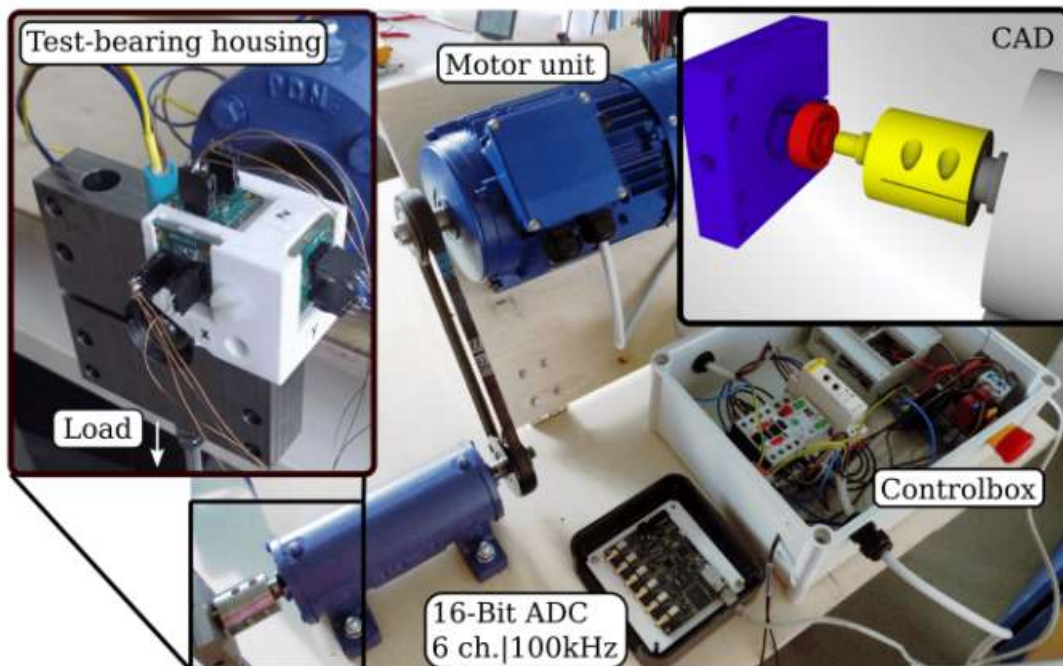
4.5 IZMJERENI PODATCI

Kuglični ležajevi imaju nisko početno trenje i uglavnom se koriste tamo gdje se odvijaju procesi zaustavljanja i pokretanja, kao što je u automobilskoj industriji. Ipak, ležajevi doživljavaju zamor, habanje, koroziju i deformacije uzrokovane radom u teškim uvjetima, neusklađenost, nedovoljnom podmazivanju, kontaminacijom i slično. Za prikupljanje informacija izabran je standardni kuglični ležaj skf6200 [35] detaljno je proučen kao zdravi ležaj i s umjetnim oštećenjem vanjskog prstena. Mikro bušilice od karbida korištene su za bušenje rupa kroz visokootporni vanjski prsten ležaja. Zbog poteškoća u bušenju, mogla su se postići samo oštećenja veličina 500, 700, 900 i 1200 μm , koja uglavnom pokrivaju raspon simuliranih veličina oštećenja. Osim toga, mala veličina unutarnjeg prstena ležaja onemogućila je stvaranje oštećenja bušenjem na tom dijelu. Slika 15. prikazuje ležaj s jednim oštećenjem vanjskog prstena od 0,7 mm.



Slika 15. Primjer ležaja s jednim oštećenjem na vanjskom prstenu [3]

Prilagođeni ispitni uređaj za prikupljanje podataka o ležaju iz mjerenja prikazan je na slici 16. Koristi se 2 kW indukcijski motor koji pokreće ispitni ležaj s konstantnom brzinom od 3000 o/min. Vanjski prsten ležaja pričvršćen je u kućištu ispitnog ležaja i opremljen je sa analognim MEMS akcelerometrima (ADX1002, Analog Devices, Norwood, MA, SAD). Analogno-digitalni pretvarač (ADC) kontinuirano uzorkuje pri 100 kHz i omogućuje snimanje do šest analognih senzora. Vanjsko opterećenje od 100 N primjenjuje se radialno na kućište. Tako se zona opterećenja razvija na gornjem dijelu ležaja. Oštećenje ležaja također se nalazi na vrhu, gdje je kontaktna sila između kuglice i prstena najveća.



Slika 16. Uređaj za mjerenje [3]

Uređaj za mjerenje se sastoji od kontrolne kutije koja uključuje jedinicu za zaštitu motora, uređaj za postepeno pokretanje motora i Raspberry Pi minikomputer koji upravlja procesom mjerenja i protokom podataka. Uvećeni CAD prikaz u gornjem desnom kutu prikazuje kućište ispitnog ležaja, jedinicu kugličnog ležaja i adapter osovine, obojene plavom, crvenom i žutom bojom. Umetak u gornjem lijevom kutu prikazuje sastavljeno kućište ispitnog ležaja s priključenim temperaturnim i MEMS akcelerometrima.

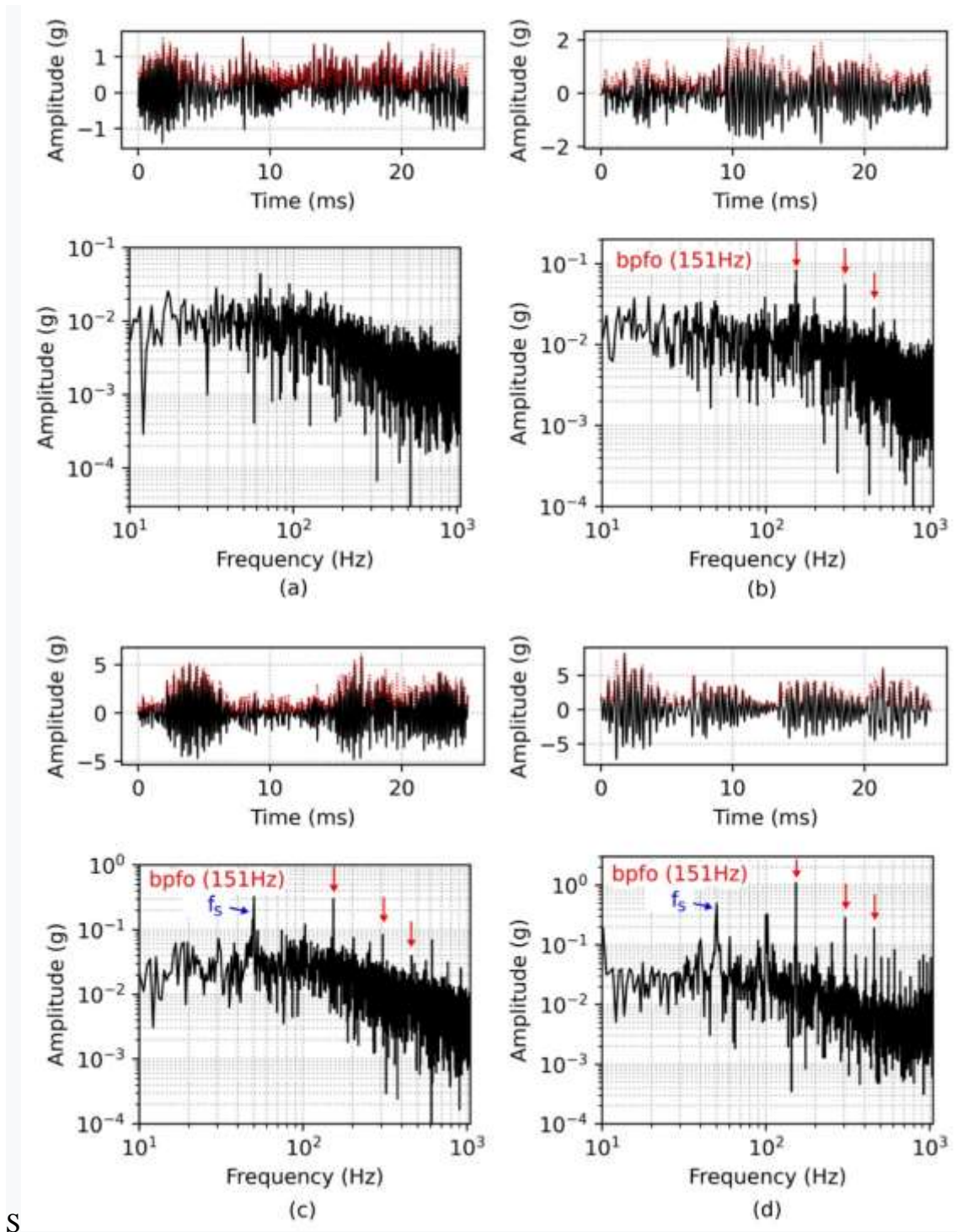
4.6. REZULTATI MJERENJA

Rezultati mjerenja za zdravi ležaj i ležajeve s različitim veličinama oštećenja vanjskog prstena prikazani su na slici 17. Oštećeni ležaj karakteriziraju niskofrekventne komponente generirane udarom kotrljajućeg elementa s greškom i visokofrekventne komponente koje predstavljaju prirodne frekvencije kotrljajućeg elementa, uključujući pozadinsku buku strojeva. Kada signal dominira buka, konvencionalne metode poput brze Fourierove transformacije (FFT) nisu prikladne za otkrivanje karakterističnih frekvencija kvarova. Stoga se primjenjuje demodulacija signala (enveloping) bazirana na Hilbertovoj transformaciji kako bi se izolirale te komponente i tako naglasio potpis kvara. Ova tehnika se intenzivno koristi u dijagnostici kvarova strojeva.

Slika 17. prikazuje rezultat envelope analize (crvene točkaste linije) iz mjerenja i odgovarajući FFT. Slika (a) prikazuje vremenski i frekvencijski domen zdravog ležaja. Vibracijski podaci i FFT neispravnog ležaja s veličinom oštećenja vanjskog prstena od 500 μm , 900 μm i 1200 μm prikazani su u (b–d), redom. Ovdje su prve tri harmonijska vrha označena crvenim strelicama. Frekvencija osovine, označena kao f_s (50 Hz), je istaknuta u (c, d).

Napomena: Envelope tehnika se koristi samo za jasnije izražavanje frekvencija kvarova, prikazano na slici 17. Spektri na slici 17b–d prikazuju porast amplitude na frekvenciji kvara BPF0, koja odgovara veličini oštećenja.

Možemo zaključiti da rezultati mjerenja jasno pokazuju kako se oštećenje vanjskog prstena ležaja manifestira u vibracijskim podacima. Korištenje envelope analize omogućava bolju detekciju i obradu frekvencija kvara unatoč prisutnosti buke. Promjene u amplitudi na karakterističnim frekvencijama BPF0 mogu se koristiti za procjenu veličine i ozbiljnosti oštećenja.



S

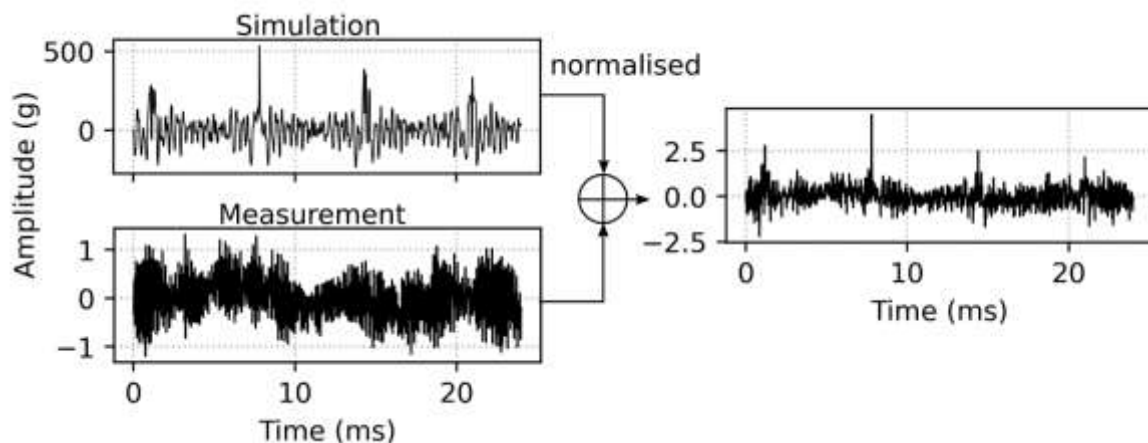
Slika 17. Obrazac vibracija simulacije [3]

5 KONVOLUCIJSKA NEURONSKA MREŽA (CNN)

Konvolucijska neuronska mreža (CNN) [5] izvodi ekstrakciju značajki i klasifikaciju slika unutar jedne mrežne arhitekture. Ovdje automatizirano učenje i optimizacija filtera tijekom faze treniranja nadmašuju ručno inženjerstvo značajki, koje je vremenski vrlo zahtjevno za složene podatke, a dodatno ne zahtijeva prethodno stručno znanje. U sljedećim poglavljima detaljnije su objašnjeni koraci prethodne obrade podataka, transformacija za pretvaranje vibracijskih podataka u 2D vremensko-frekvencijske slike te postavke CNN modela koristeći te slike kao podatke za treniranje.

5.1 OBRADA PODATAKA

Podaci o kvarovima ležaja iz simulacije su vrlo pojednostavljeni što se tiče podmazivanja, pozadinske buke i izračuna kontaktne sile tijekom sudara dijelova ležaja. Nadalje, izravno praćenje vanjskog prstena tijekom simulacije s zanemarenim prigušenjem iz kućišta, prijenosne funkcije senzora, elektroničkih gubitaka i slično, dovodi do neravnoteže simuliranih i mjerenih podataka o ubrzanju. Amplituda izmjereneog neispravnog ležaja (slika 17d) je otprilike 100 niža u usporedbi sa simuliranim oštećenjem (slika 14d). Stoga je sintetička vremenska serija pojednostavljena i dodana podacima zdravog ležaja kako bi se postigle slične razine amplitude. Ova simulacija također uvodi prirodnu buku iz mjerenja kako bi se generirali 'realističnije' sintetički podatci. Slika 18 prikazuje korake prethodne obrade podataka.



Slika 18. Koraci obrade podataka [3]

5.2 VALNA TRANSFORMACIJA I KOMPILACIJA SLIKA

Postoji nekoliko mogućnosti za pretvaranje jednodimenzionalne vremenske serije vibracijskih podataka u dvodimenzionalni oblik, koji može obraditi CNN: slaganjem podataka, kratkovremenska Fourierova transformacija (STFT) i valna transformacija. Kod slaganja podataka, jednodimenzionalni podaci se slažu red po red kako bi se formirala 2D ulazna matrica. To se postiže jednako razdijeljenim dijelovima iz vremenske serije, podacima dobivenim s više senzora koji se spajaju, ili prikupljanjem značajki iz vremenskih ili frekvencijskih domena primjenom statističkih metoda.

STFT i valna transformacija omogućuju analizu promijenjivih vibracijskih signala u vremenskim i frekvencijskim polju istovremeno, predstavljajući podatke u dvodimenzionalnom obliku. STFT primjenjuje Fourierovu transformaciju na jednolike dijelove vremenskog signala zbog fiksnog vremenskog prozora. Ovo ograničava analizu signala koji sadrže brze prolazne značajke, poput udara kuglice koja prelazi preko oštećenja. Da bi se prevladalo ovo ograničenje, uvodi se valna transformacija koja, pomoću translacije i dilacije valne funkcije, omogućuje dobru frekvencijsku rezoluciju i lošu vremensku rezoluciju pri niskim frekvencijama, dok je obrnuto za visoke frekvencije:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$$

gdje su s i τ parametri skale (dilacije) i translacije, a $\psi(t)$ je valna funkcija. Kontinuirana valna transformacija (CWT) i time vremensko-scalirana analiza signala $x(t)$ s analiznom valnom funkcijom $\psi(t)$, može se opisati kao konvolucija:

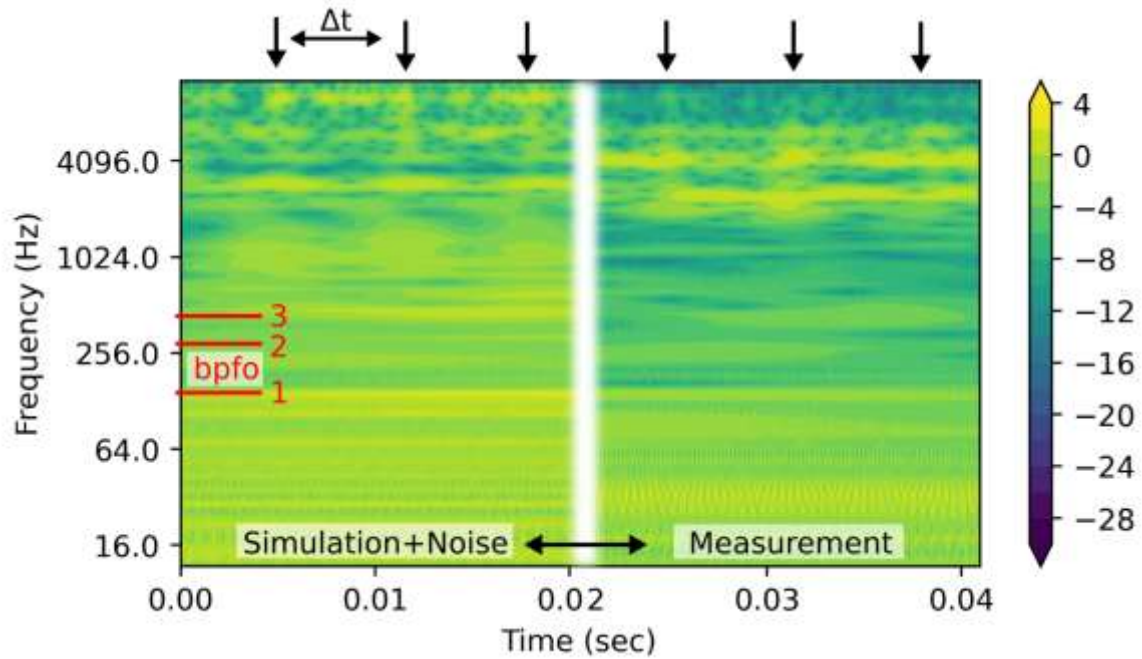
$$CWT(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt$$

gdje je ψ^* kompleksni konjugat od ψ . Postoji nekoliko tipova valnih funkcija kao što su Morlet, Daubechie, Haar, Gaussova itd. Njihov odabir ovisi o značajki koju treba izvući iz signala. Neki pristupi se oslanjaju na tehniku pokušaja i pogreške kako bi pronašli najbolju valnu funkciju za analizu signala. Ovdje se primijenila Morlet valna funkcija koja je definirana kao produkt kompleksne eksponencijalne funkcije i Gaussove funkcije, te stoga slična prolaznom signalu generiranom udarom:

$$\psi(t) = \sigma \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} e^{i\omega_0 t}$$

gdje je ω_0 središnja frekvencija prozora, a σ balansira stopu propadanja valne funkcije. Morlet valna funkcija vrlo dobro odgovara prolaznim vibracijskim signalima neispravnog kugličnog ležaja s rupama ili udubljenjima na stazi.

Slika 19 prikazuje snagu raspona gustoće simulacijskih i mjernih podataka nakon valne transformacije. Napomena, simulacijski podaci sadrže oštrije izražene vrhove, što rezultira višom koncentracijom snage pri visokim frekvencijama. Nadalje, harmonici su više ograničeni na frekvencijskoj razini u usporedbi sa širim pojavljivanjem frekvencijskih komponenti mjerenja. Strelice na vrhu označavaju pojavu visokofrekventnog uzorka kada kuglice prelaze preko oštećenja vanjskog prstena. Ovdje, $\Delta t = 6.6 \text{ms}$ odgovara BPFO. Prva tri harmonika BPFO su označena crvenim linijama na lijevoj strani. Napomena da je frekvencijska skala postavljena na binarni logaritam kako bi se povećala vidljivost komponenti niskih frekvencija.



Slika 19. graf raspona gustoće [3]

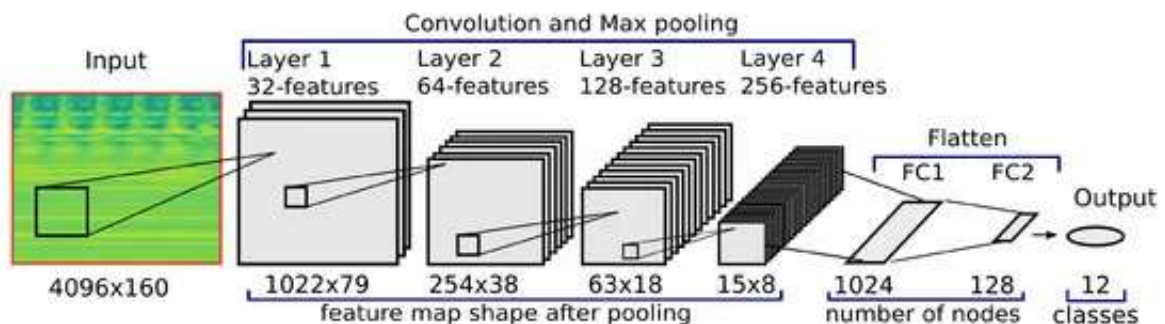
Slika 19 Prikazuje graf raspona gustoće vibracijskih podataka transformiranih valnom funkcijom. Podaci simuliranog ležaja s jednim vanjskim prstenom s oštećenjem od 500 μm su spojeni s pozadinskom bukom iz mjerenja (lijevo); te mjerenje neispravnog ležaja s vanjskim prstenom oštećenja veličine 900 μm (desno). Prve tri harmonijske frekvencije BPFO su numerirana 1–3. PSD slike simuliranih podataka i mjerenja se zatim unose u CNN za treniranje i otkrivanje kvarova.

5.3 STRUKTURA CNN MREŽE

CNN je dizajniran za izdvajanje značajki iz PSD slike simuliranih ležajeva. Ove generirane slike i naučeni uzorci koriste se za klasifikaciju stvarnih podataka o ležajevima dobivenih mjerenjem. Ukupno je dostupno 12 različitih izlaznih klasa (oznaka) iz simulacije, koje uključuju zdravo stanje, pojedinačno oštećenje unutarnjeg prstena, pojedinačno oštećenje vanjskog prstena i oštećenje oba prstena, sve s različitim promjerima rupa.

Ulazni oblik transformiranih podataka je 4096×160 piksela (vrijeme \times frekvencijske ljestvice). Ovo je ekvivalent podatkovnom isječku od 40,96 ms (uzorkovano na 100 kHz), i stoga sadrži najmanje šest 'udara' kuglica koje se kotrljaju preko oštećenja vanjskog prstena (BPF0 = 151 Hz). 160 frekvencijskih ljestvica raspoređeno je do 11 kHz, što odgovara linearnoj frekvenciji MEMS akcelerometra.

Za treniranje mreže koristi se skup od 18.000 slika za treniranje i 6000 slika za utvrđivanje ispravnosti iz simulacije. Ove slike obrađuju se kroz četiri konvolucijska i naknadno max-pooling sloja. Broj značajki naučenih tijekom konvolucije povećava se u svakom konvolucijskom sloju, a složenost se smanjuje pomoću max-pooling slojeva. Aktivacija za skrivene slojeve definirana je pomoću funkcije rektificirane linearne aktivacije (ReLU). Prijelaz između ekstrakcije značajki i zadatka klasifikacije odvija se „izravnavanjem” mreže, čime se stvara potpuna neuronska mreža. Slika 20 sažima arhitekturu CNN mreže .



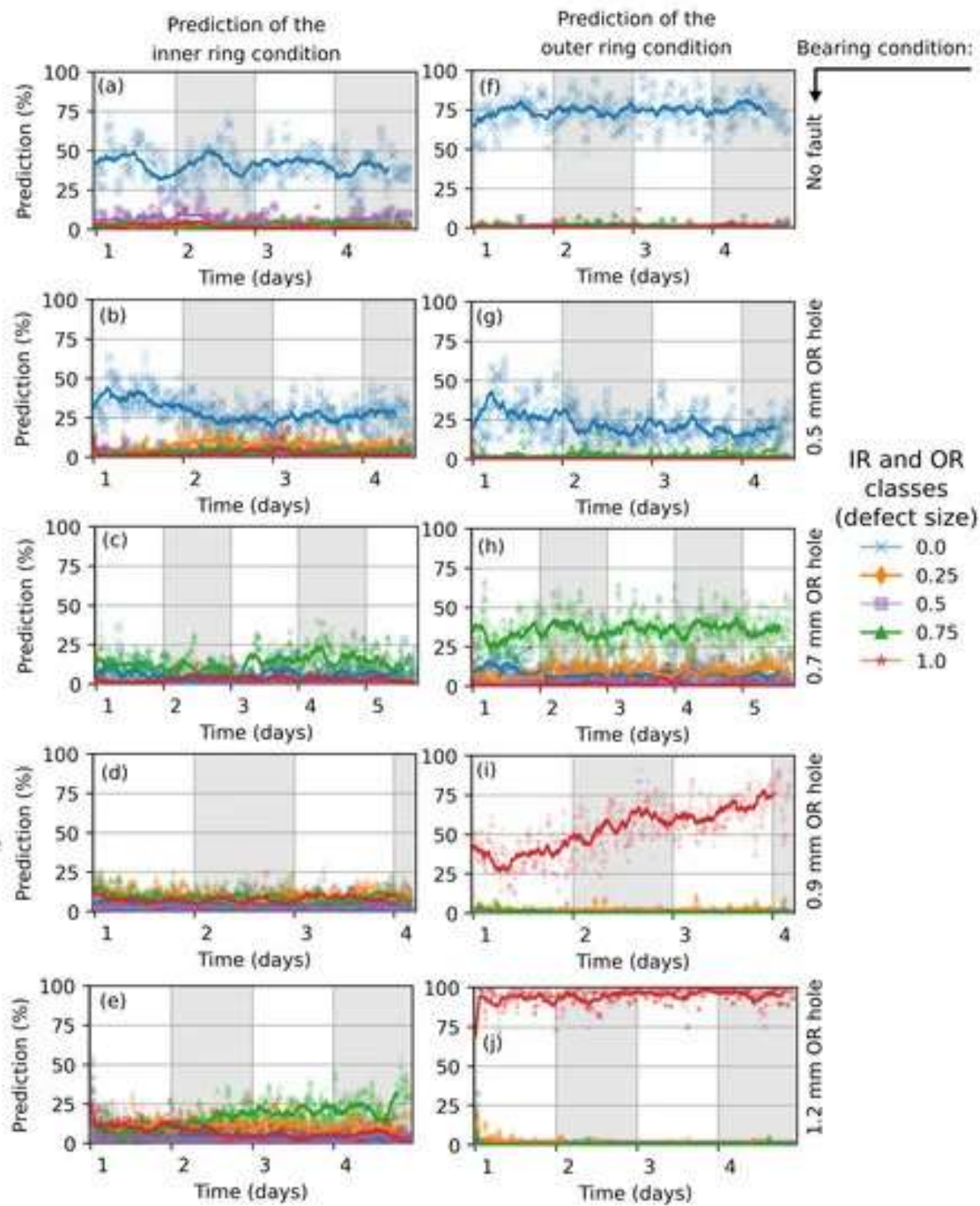
Slika 20. Šematski prikaz strukture CNN mreže [3]

5.4 REZULTATI

Dizajnirane su dvije CNN mreže; jedna trenirana sa simulacijskim podacima, koji su prilagođeni i kombinirani s podacima izmjerenim sa zdravog ležaja, a druga trenirana s čistim izmjerenim podacima. Usporedba obje mreže pokazuje točnost klasifikacije mreža u zavisnosti od treniranih skupova podataka. Mreža trenirana sa simulacijskim podacima konstruirana je prema opisu u odjeljku 5.3. Druga mreža ima isti broj slojeva (dubinu mreže) i značajki, ali se sastoji samo od pet izlaznih klasa. Ove klase opisuju pet stanja ležaja iz mjerenja, to jest, jedan zdravi ležaj i četiri ležaja s jednim oštećenjem vanjskog prstena veličine od 0,5 do 1,2 mm. Sve slike prikazuju predikciju stanja ležaja tijekom dugoročnih mjerenja od nekoliko dana.

5.5 CNN TRENIRAN SA SIMULACIJSKIM PODATCIMA

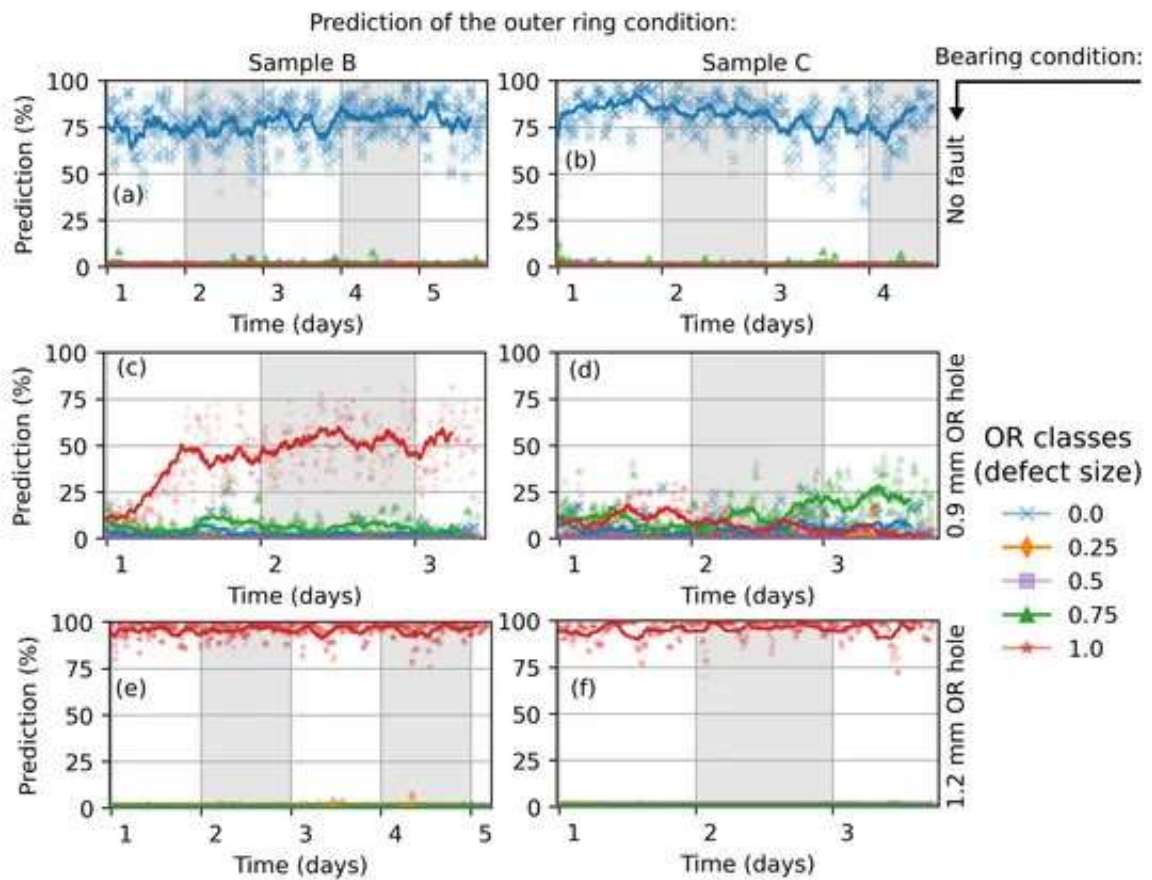
Vremenska zavisnost procjene mreže trenirane sa simulacijskim podacima prikazana je na slici 21. Procjena a u postotku daje vjerojatnost postojanja određene veličine rupe u unutarnjem ili vanjskom prstenu. U većini slučajeva ostaje konstantna. U nekim slučajevima ponašanje ukazuje na promjene oštećenja (npr. slika 21i). Procjena stanja vanjskog prstena zdravog ležaja (f) i ležajeva s ozbiljnim oštećenjima veličine rupe od 0,9 mm (i) i 1,2 mm (j) vrlo su dobro klasificirani. Važno je napomenuti da se veličine oštećenja iz mjerenja blago razlikuju od simuliranih oštećenja koja čine izlazne klase. Ležaj s oštećenjem vanjskog prstena veličine 0,5 mm (g) nije točno predviđen i karakteriziran je nižim vrijednostima stanja zdravog ležaja. Stanje ležaja s oštećenjem veličine 0,7 mm (h) označeno je s oko 40% vjerojatnosti za prisutnost oštećenja veličine 0,75 mm. Vjerojatnost ostalih oštećenja je znatno niža.



Slika 21. Procjena stanja ležaja tijekom mjerenja [3]

Budući da nije uvedeno oštećenje unutarnjeg prstena, stanje unutarnjeg prstena trebalo bi biti klasificirano kao zdravo stanje. Procjena djelomično funkcionira za zdravi ležaj (a) i ležaj s oštećenjem veličine 0,5 mm (b). Postoji pogrešna klasifikacija s gotovo 0% (<25%) vjerojatnosti za sve klase oštećenja u slučajevima (c), (d) i (e).

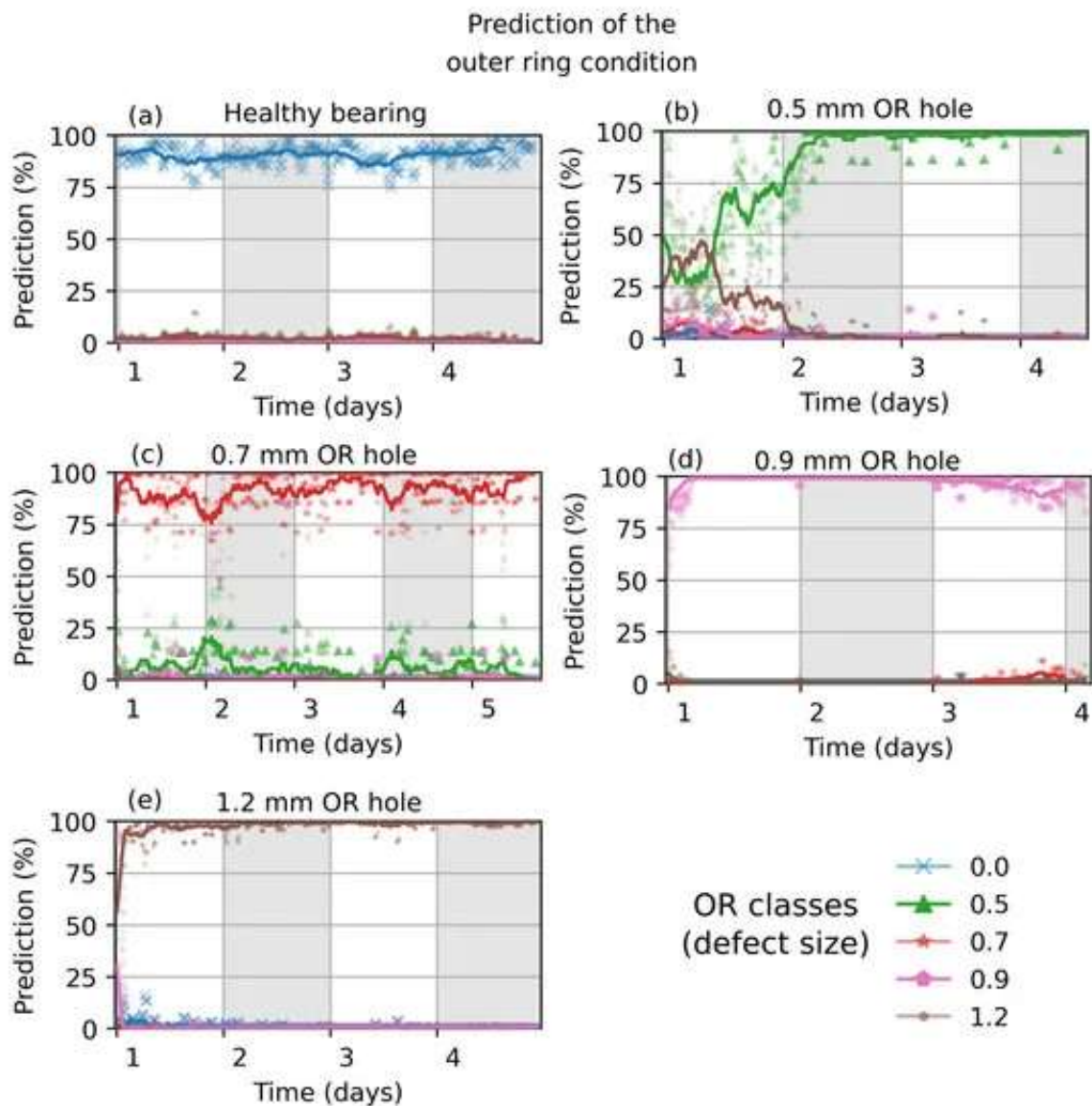
Dodatnim mjerenjima istražena je ponovljivost klasifikacije. Mjerenja su provedena na zdravim ležajevima i ležajevima s oštećenjima vanjskog prstena veličine 0,9 mm i 1,2 mm (slika 22). Mreža pruža vrlo pouzdanu klasifikaciju zdravih ležajeva i ležajeva s oštećenjem veličine 1,2 mm, slično kao što je prikazano na slici 21. Postoji faza uhadavanja vidljiva kod kugličnog ležaja s oštećenjem veličine 0,9 mm (slika 22c) sve dok se predikcija mreže ne stabilizira na 50%. To također smanjuje pojavu jasnog popisa oštećenja, koji se može izmjeriti vibracijskim senzorima. Uzorak C s oštećenjem veličine 0,9 mm (slika 22d) loše je klasificiran (sva oštećenja < 25%). Ovdje bi moguća odstupanja u preciznosti bušenja mogla imati utjecaj na točnost klasifikacije.



Slika 22. Procjena stanja vanjskog prstena ležaja [3]

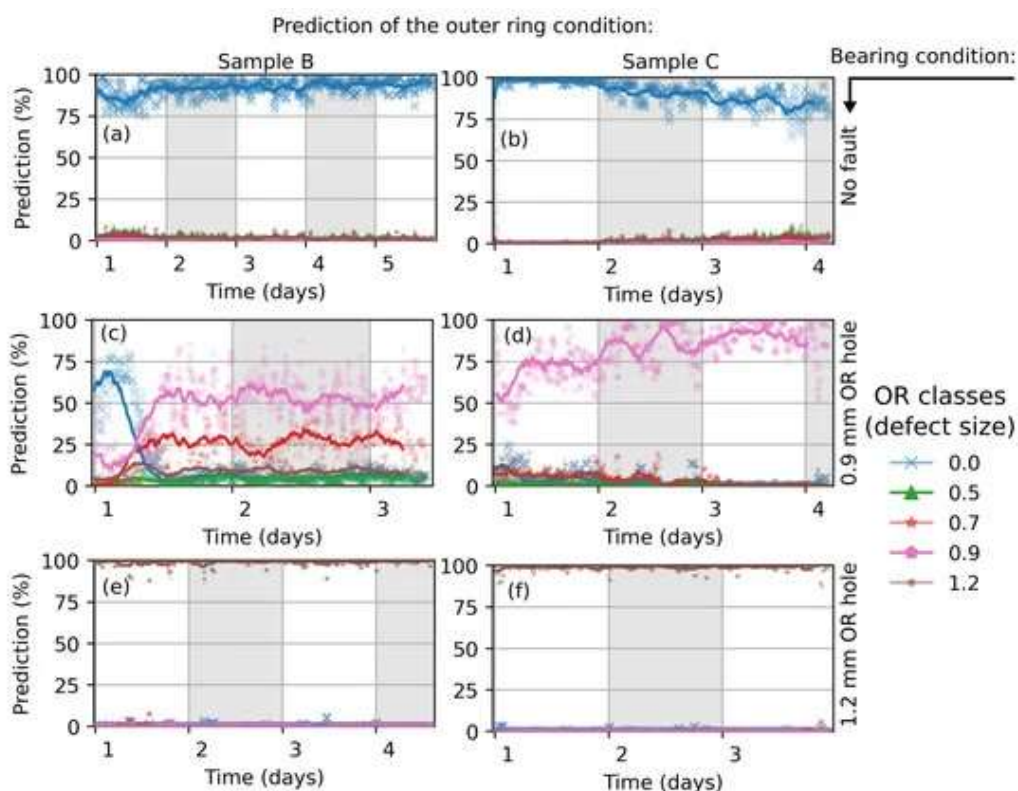
5.6 CNN TRENIRANJE S IZMJERENIM PODATCIMA

Slika 23 prikazuje predikciju mreže trenirane s 4096×160 slikama podataka mjerenja transformiranih pomoću wavelet transformacije. Za treniranje, izvučeno je 2000 uzoraka svake klase iz mjerenja danih uzoraka ležaja. Ova skupina podataka izolirana je za zadatak klasifikacije. Slika 12b prikazuje dužu fazu uhodavanja dok trenirana mreža ne postane vrlo pouzdana u predikciji veličine oštećenja vanjskog prstena od 0,5 mm.



Slika 23. Procjena stanja vanjskog prstena ležaja uz pomoć mreže trenirane s izmjerenim podacima [3]

Klasifikacija dodatno izmjerenih ležajeva prikazane su na slici 24. Predviđeno stanje zdravih ležajeva i ležajeva s oštećenjem od 1,2 mm je vrlo pouzdano, dok je ležaj s oštećenjem veličine 0,9 mm karakteriziran fazom uhodavanja i također pokazuje malu vjerojatnost prisutnosti oštećenja veličine 0,7 mm (slika 24c). To može biti posljedica varijacija u kutu bušenja, odstupanja u lokaciji bušenja, ostataka bušenja ili žare, varijacija u kutu opterećenja (kontaktna sila između kuglica i prstena) i količine podmazivanja.



Slika 24. Procjena stanja vanjskog prstena dodatno izmjerenih kugličnih ležajeva [3]

6 ZAKLJUČAK

Primjena novih senzora u tehnologiji dijagnostike i nadzora stanja kugličnih ležajeva omogućila je značajne prednosti u industriji. Rana detekcija kvarova omogućuje pravovremeno održavanje, čime se smanjuje rizik od ozbiljnih oštećenja i visokih troškova popravaka. Precizna dijagnostika i planiranje održavanja samo kada je to potrebno pomaže u smanjenju troškova održavanja i povećava ukupnu pouzdanost sustava, smanjujući neplanirane zastoje i povećavajući učinkovitost operacija.

Međutim, postoje i značajni nedostaci. Visoki početni troškovi za instalaciju naprednih senzora i analitičkih sustava i složenost analize podataka zahtijeva visoku stručnost, dok redovita kalibracija senzora može biti zahtjevna i skupa. Nedostaci uključuju i potrebu za stalnim ažuriranjem softverskih alata i integracijom s postojećim sustavima, što može dodatno zakomplicirati i povećati troškove sustava.

Unatoč tim izazovima, tehnologija se razvija u smjeru povećane automatizacije, što omogućuje sustavima da samostalno detektiraju probleme i automatski prilagode operativne parametre. Ova automatizacija smanjuje potrebu za ljudskim nadzorom i minimalizira mogućnost ljudskih pogrešaka. Daljnja unapređenja obećavaju dodatno poboljšanje preciznosti i učinkovitosti sustava, čime će se unaprijediti ukupna funkcionalnost i smanjiti troškovi održavanja u budućnosti.

LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Le%C5%BEaj>
- [2] https://enciklopedija.cc/wiki/Valjni_le%C5%BEaj
- [3] Slavko R., doktorski rad (2009.), Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u ekskluzivnoj atmosferi, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [4] FAG Kugelfischer AG, Rolling Bearing Damage Recognition of damage and bearing inspection, Publ. No. WL 82 102/2 EA
https://rolling.hu/pdf/FAG/FAG_meghibasodas.pdf
- [5] A. Bukša et. al., (2009) Ship Machinery Maintenance Concept Adjustment and Design, Strojarstvo 51 (3) 227-238 <https://hrcak.srce.hr/file/67956>
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Preventivno_odr%C5%BEavanje
- [7] Šegulja, I., Bukša, A., (2006) Održavanje brodskog pogona, Pomorski fakultet u Rijec <https://hrcak.srce.hr/file/10438>
- [8] Han-Yun C., 1, Ching-Hung L., 2021., 'Deep Learning Approach for Vibration Signals Applications'
<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3929#B1-sensors-21-03929>
- [9] Huang, H., Baddour, N. (2019) Bearing Vibration Data under Time-varying Rotational Speed Conditions <https://data.mendeley.com/datasets/v43hmbwxpm/2>
- [10] Matthias K., Gabor K., Markus L., Hubert B., (2022.) 'Condition Monitoring of Ball Bearings Based on Machine Learning with Synthetically Generated Data'
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2490#B4-sensors-22-02490>

SLIKE

- [1] Slavko R., doktorski rad (2009.), Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [2] FAG Kugelfischer AG, Rolling Bearing Damage Recognition of damage and bearing inspection, Publ. No. WL 82 102/2 EA
https://rolling.hu/pdf/FAG/FAG_meghibasodas.pdf
- [3] Matthias K.,Gabor K.,Markus L., Hubert B., (2022.) 'Condition Monitoring of Ball Bearings Based on Machine Learning with Synthetically Generated Data'
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/7/2490#B4-sensors-22-02490>

POPIS SLIKA

Slika 1. Radijalni kuglični ležaj.....	3
Slika 2. Glavne mjere kugličnog ležaja.....	4
Slika 3. Prikaz uzroka oštećenja na kugličnom ležaju.....	5
Slika 4. Prikaz uzroka kvarova kod kugličnih ležajeva.....	6
Slika 5. Učestalost kvarova na vanjskom i unutarnjem prstanu ležaja.....	6
Slika 6. Oštećenje nastalo zamorom materijala na vanjskom prstenu ležaja.....	7
Slika 7. Oštećenje nastalo zamorom materijala na unutarnjem prstenu ležaja.....	7
Slika 8. Deformacija kaveza.....	8
Slika 9. Lom kaveza	8
Slika 10. Oštećenje ležaja nastalo prolaskom struje.....	9
Slika 11. Razvoj oštećenja zamora materijala na unutarnjem prstenu.....	10
Slika 12. Prikaz predložene metode.....	15
Slika 13. 3D prikaz ležaja i originalni kuglični ležaj.....	16
Slika 14. Obrazac vibracija simulacije.....	19
Slika 15. Primjer ležaja s jednim oštećenjem na vanjskom prstenu.....	20
Slika 16. Uređaj za mjerenje.....	21
Slika 17. Obrazac vibracija simulacije.....	23
Slika 18. Koraci obrade podataka.....	25
Slika 19. grafikon spektralne gustoće.....	27
Slika 20. Šematski prikaz strukture CNN mreže.....	28
Slika 21. Procjena stanja ležaja tijekom mjerenja.....	30
Slika 22. Procjena stanja vanjskog prstena ležaja.....	31
Slika 23. Procjena stanja vanjskog prstena ležaja uz pomoć mreže trenirane s izmjerenim podacima.....	32
Slika 24. Procjena stanja vanjskog prstena dodatno izmjerenih kugličnih ležajeva.....	33