

Prediktivno održavanje brodskih pogona s osvrtom na pogonske električne motore

Vuković, Leo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:187:916892>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



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](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

LEO VUKOVIĆ

**PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE BRODSKIH POGONA S
OSVRTOM NA POGONSKE ELEKTRIČNE MOTORE**

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI**

**PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE BRODSKIH POGONA S
OSVRTOM NA POGONSKE ELEKTRIČNE MOTORE
PREDICTIVE MAINTENANCE OF MARINE PROPULSION
WITH REFERENCE TO THE PROPULSION ELECTRIC
MOTORS**

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Održavanje elektroničkih sustava

Mentor: doc.dr.sc. Robert Baždarić

Student: Leo Vuković

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112084169

Rijeka, rujan 2023.

Student: Leo Vuković
Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu
JMBAG: 0112084169

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE BRODSKIH POGONA S OSVRTOM NA POGONSKE ELEKTRIČNE MOTORE izradio samostalno pod mentorstvom doc.dr.sc. Roberta Baždarića.

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

Student



Leo Vuković

Student: Leo Vuković

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112084169

IZJAVA STUDENTA – AUTORA O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta 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 – autor



(potpis)

SAŽETAK

Pod savršenim uvjetima, rotirajući strojevi dizajnirani su za beskonačan život. Nažalost, savršeni uvjeti u praktičnoj primjeni ne postoje, stoga se nastoje proizvesti optimizirani radni uvjeti. Praćenje stanja ne poboljšava rad strojeva, ne odgađa kvar, međutim pruža ključne informacije o komponenti koja se prati kao što su cjelokupno stanje, moguće simptome kvara te njihovu ozbiljnost.

Tradicionalno, s prijenosnim izvan mrežnim uređajem, brodski operateri mogu pratiti stanje strojeva. Napredak ručnih sakupljača podataka učinio ih je vrlo isplativima i lakim za uporabu, tako omogućujući posadi bilo koje tehničke sposobnosti da sama prikuplja informativne podatke o strojevima. Danas se podaci mogu prikupljati i automatski u uređajima koji posjeduju bilježenje stanja sustava lokalno ili umreženo na zato predviđene memorijske medije. U svrhu praćenja stanja pogona, isto se tako putem interneta i satelitske komunikacije ovaka praćenja mogu izvršavati i daljinski u kompanijama koje su originalno i proizvođači opreme ili su registrirani upravo za daljinsku dijagnostiku te savjetovanje.

Klasificirana plovila upisana u program prediktivnog održavanja koja nisu imala program praćenja stanja tijekom pandemije izgubila su ključne podatke potrebne da ostanu uključena u moderne trendove optimizacije troškova u održavanju.

Prediktivno održavanje u pomorskoj industriji je još uvijek u početnoj fazi. Sa samo 2% registriranih plovila provodi programe praćenja u svrhu prediktivnog održavanja, tako da ovaj pristup održavanju možemo smatrati uglavnom nedovoljno istraženim. No kompanije koje se danas odlučuju na takav vid održavanja zasigurno prepoznaju financijsku dobrobit takvog održavanja, te zasigurno kroče u eru potpune autonomnosti pomorskih plovila.

Ključne riječi: brodski pogoni, električni motori, pogonski električni motori, prediktivno održavanje

SUMMARY

Under perfect conditions, rotating machines are designed for infinite life. Unfortunately, perfect conditions do not exist in practice, so efforts are made to create optimal working conditions. Condition monitoring does not improve machine operation or delay failure. It does, however, provide important information about the monitored component, such as its overall condition, possible failure symptoms and their severity.

Traditionally, ship operators can use a portable, off-grid device to monitor the condition of machinery. Advances in portable data acquisition devices have made them very inexpensive and easy to use, allowing crews to collect meaningful machinery data on their own, regardless of their technical skills. However, data can also be collected automatically today in devices that record the condition of the equipment locally or networked on designated storage media. Today, drive condition monitoring can be done remotely via the Internet and satellite communications in companies that are original equipment manufacturers or are specifically approved for remote diagnostics and consulting.

Classified ships participating in a predictive maintenance program that did not have a condition monitoring program in place during the pandemic lost critical data they needed to keep up with modern trends in optimizing maintenance costs.

Predictive maintenance is still in its infancy in the shipping industry. With only 2% of registered vessels conducting monitoring programs for the purpose of predictive maintenance, it is safe to assume that this approach to maintenance is still largely unexplored. But the companies opting for this type of maintenance today are undoubtedly realizing the financial benefits of such maintenance and are certainly entering the era of full autonomy for ocean-going vessels.

Keywords: marine propulsion, electric motors, propulsion electric motors, predictive maintenance

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. KOREKTIVNO ODRŽAVANJE	4
1.2. PREVENTIVNO ODRŽAVANJE.....	4
1.3. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE.....	5
1.4. PROAKTIVNO ODRŽAVANJE	5
2. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE - PRISTUP ODRŽAVANJU I NJEGOVI PREDUVJETI.....	8
3. DETEKTIRANJE GREŠAKA INDUKCIJSKOG ASINKRONOG MOTORA U BRODARSTVU I MODERNI TOKOVI MODELIRANJA.....	12
3.1. PRAĆENJE STANJA ISPRAVNOSTI ELEKTROMOTRA PUTEM IAS-a	13
3.2. GREŠKE ASINKRONOG MOTORA.....	13
3.3. SENZORI, SUSTAV SENZORA I NJIHOVI SIGNALI.....	15
3.4. METODE DIJAGNOZE	17
4. NEURONSKE MREŽE I ZNAČAJ PRI MODELIRANJU KOMPLEKSNIH BRODSKIH POGONA	22
4.1. TEORIJSKE ODREDNICE NEURONSKIH MREŽA	22
4.2. PRIMJERI NEURONSKIH MREŽA	26
4.3. PRIMJENA NEURONSKIH MREŽA U BRODARSTVU	27
5. DETEKCIJA GREŠKE NA ASINKRONOM ELEKTROMOTORU KORISTEĆI MJERENJA VIBRACIJA.....	29
5.1. MEHANIČKE VIBRACIJE I ANALIZA VIBRACIJSKIH SILA	29
5.2. IZVORI VIBRACIJA U ELEKTROMOTORIMA	30
5.2.1. <i>Vibracije baze motora</i>	30
5.2.2. <i>Vibracije ležaja</i>	31
5.2.3. <i>Vibracije poluge slomljenog rotora</i>	31
5.2.4. <i>Prenošenjem frekvencija protoka kroz poluge rotora</i>	32
5.2.5. <i>Vibracije dvostruke frekvencije napajanja</i>	32
5.2.6. <i>Neuravnoteženost motora</i>	32
5.3. METODE MJERENJA VIBRACIJE.....	33
5.4. ANALIZA VIBRACIJA ZA OTKRIVANJE GREŠAKA	34
6. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA	37
POPIS ILUSTRACIJA	41

1. UVOD

Razvojem moderne tehnologije razina automatizacije brodova i njene inteligentne nadogradnje se užurbano unaprjeđuje, te se tako tehnologija rada i održavanja¹ za brodske sustave i opremu² suočava s novim problemima. Sustav za praćenje broskog alarma³ se do sada oslanjao na ljudsko iskustvo i znanje no danas se u inženjerstvu održavanja traže procjene stanja prije alarmiranja.

Tradicionalni načini održavanja brodova karakterizirani korektivnim održavanjem⁴ i planiranim održavanjem⁵ ukazuju na nedostatke "prekomjernog popravka" i "nedostatka popravka" koji dovode do povećanja troškova rada brodova. Unapređenjem sveobuhvatnog praćenja opreme, procjene, prognostike i menadžmenta ispravnosti brodskih sustava i opreme temeljen na proaktivnijoj strategiji održavanja postupno je postao novi trend inteligentnog održavanja.

Dolazi do kontinuiranog razvoja tehnologije prognostike i menadžmenta ispravnosti (PMI)⁶, pristupa i aplikacija, a postupno se razvijaju odgovarajući objekti koji pokrivaju odnosno vrše nadzor nad vojnim prometima, civilnim zrakoplovima pa tako i u brodarstvu. Tehnologija prognostike i menadžmenta ispravnosti se pojavljuje i detaljnije proučava dijagnostiku kvarova⁷ i prognozu ispravnosti⁸ brodskih dizelskih motora te rotirajućih strojeva. Uspostavljena je tehnologija prognostike i menadžmenta ispravnosti broskog dizelskog motora te je ostvareno predviđanje performansi [1]. Različiti primjenjivi podaci i prikladne tehnologije integrirani su za tehnologiju prognostike i menadžmenta ispravnosti motora [2]. Tako se predlažu sveobuhvatni pregledi dizajna prognostike i menadžmenta ispravnosti za sustave rotacijskih strojeva, te je uslijedila primjena sustavne metodologije

¹ Q&M – engl. Operation and Maintenance

² MSAE – engl. Marine Systems and Equipment

³ AMS – engl. Alarm Monitoring Systems

⁴ CM – engl. Corrective Maintenance

⁵ PM – engl. Planned Maintenance

⁶ PHM – engl. Prognostics and Health Management

⁷ FD - engl. Fault Diagnosis

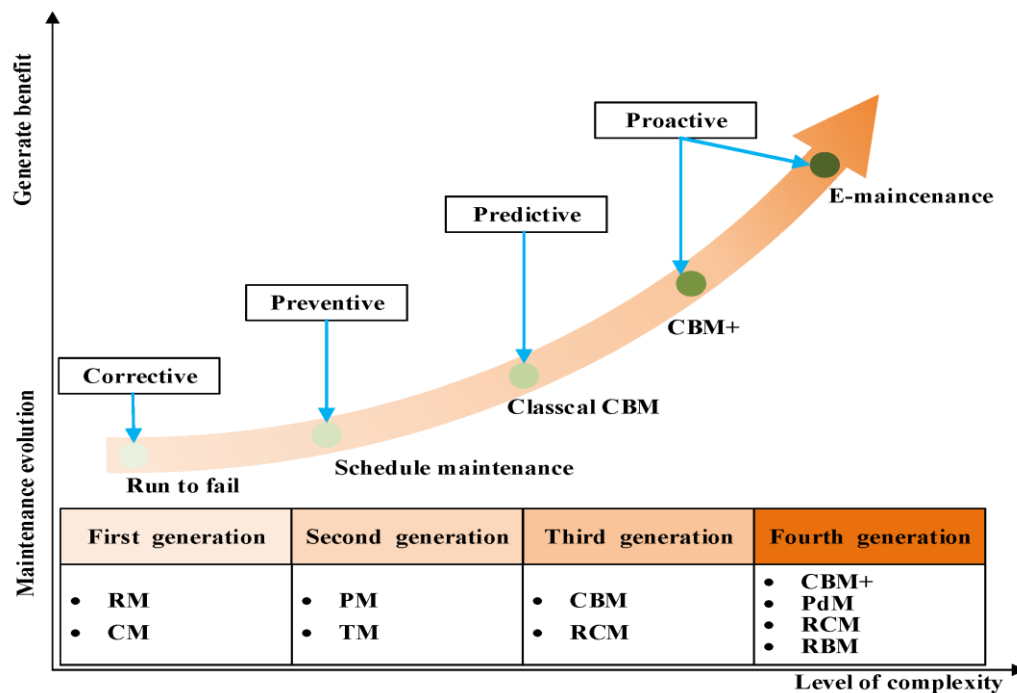
⁸ HP - engl. Health Prognosis

dizajna i pretvaranja informacija multivarijabilnih procesa u apstraktne prognostičke informacije [3].

Moderni brodski sustavi i oprema se smatraju složenim sustavom sastavljenim od više različitih tehničkih sustava međusobno povezanih u više podsustava opreme i komponenti. Iznimka bilo koje komponente može rezultirati promjenom stanja ispravnosti. Održiv okvir tehnologije prognostike i menadžmenta ispravnosti motora omogućuje praćenje stanja, rano otkrivanje kvarova i izolaciju neispravnosti informacijskog sustava. Ishod učinkovite tehnologije prognostike i menadžmenta ispravnosti motora pruža alat za praćenje stanja ispravnosti i pomoć u donošenju odluka u svezi s naporima u održavanju. Inteligentnim i bespilotnim brodovima hitnije je ostvariti tehnologiju prognostike i menadžmenta ispravnosti motora kako bi se poboljšalo integrirano upravljanje ispravnošću motora⁹, dijagnostikom, te predviđanjem ispravnosti i provedbe održavanja [4].

Odluka o održavanju određuje sveobuhvatno upravljanje i održavanje brodskih sustava te modernu viziju o održavanju nivoa ispravnosti i sigurnosti imovine kroz njen cijeli životni vijek. Nove vizije u održavanju tako usmjeravaju ka posebnim postupcima za otklanjanje prikrivenih grešaka na točno određenim komponentama, koji ne isključuju prethodni pregled, preventivna održavanja, te konačne obnove sustava. Sve se to obavlja sada i ciljano u svrhu poboljšanja učinkovitosti održavanja uz smanjenje troškova. Slika 1 prikazuje povijesni razvoj različitih strategija održavanja [5].

⁹ HCM – engl. Health Condition Motoring



Slika 1: Evolucija strategija održavanja u području pomorstva [4]

Metoda održavanja prve generacije funkcionira na način da proces održavanja radi dok se ne pokvari. Uobičajena praksa održavanja su rutinsko održavanje¹⁰ i korektivno održavanje [6].

Održavanje druge generacije uglavnom je preventivno održavanje. Sa sve većom složenosti tehnologije brodskih sustava i opreme, troškovi održavanja se povećavaju. Usvojene politike održavanja su planirano održavanje i održavanje na vremenskoj osnovi¹¹.

Strategije održavanja usvojene u vremenskom razdoblju od 1980. do 2000. godine nazivaju se održavanjem treće generacije. Najčešća vrsta održavanja korištena tijekom ovog razdoblja je prediktivno održavanje¹² i održavanje usmjereno na pouzdanost¹³ [4].

Tradicionalne metode održavanja pretvaraju se u proaktivnije tipove, a smatraju se održavanjem najnovije generacije. Navedenu generaciju karakterizira početak održavanja

¹⁰ RM – engl. Routine Maintenance

¹¹ TM – engl. Time-Based Maintenance

¹² CBM – engl. Condition-Based Maintenance

¹³ RCM – engl. Reliability Centered Maintenance

temeljenog na riziku¹⁴ uz održavanje usmjereno na pouzdanost, prediktivno održavanje i uz pomoć novo razvijenih tehnologija baziranih na umjetnoj inteligenciji.

1.1. KOREKTIVNO ODRŽAVANJE

Korektivno održavanje je strategija održavanja po nastanku kvara. Kada se oprema neočekivano pokvari, potrebno je poduzeti odgovarajuće korektivne mjere kako bi se vratila funkcionalnost opreme. Proces održavanja pretežito uključuje popravak ili zamjenu neispravnih dijelova, zato se navedena strategija primjenjuje samo na opremu čije posljedice kvara neće uzrokovati ozbiljne probleme. Ulaganje potrebno za provedbu navedene strategije održavanja znatno je niže u usporedbi s drugim strategijama održavanja, no kada se primjenjuje na kritičnu opremu, može doći do pojave dodatnih troškova održavanja i postojećih zastoja [7].

1.2. PREVENTIVNO ODRŽAVANJE

Trenutno broderske tvrtke još uvijek široko koriste planirani sustav održavanja¹⁵ temeljen na Međunarodnom kodu upravljanja sigurnošću¹⁶ [8]. Planirano održavanje je metoda preventivnog održavanja, a operativna oprema održava se na temelju određenog radnog intervala ili vremena. Navedenom metodom efikasno se izbjegava svaki potencijalni kvar ili ozbiljna degradacija koja može direktno utjecati na pouzdanost sustava i opreme u pomorstvu u kratkoročnom razdoblju.

Učestalost provedbe rada planiranog održavanja ovisi o iskustvu pomorskih inženjera ili uputama i preporukama proizvođača. Provedba strategije planiranog održavanja u sustavima i opremi u pomorstvu (SIOP) s visokom pouzdanošću može efikasno smanjiti stopu kvara i troškove te produžiti vijek trajanja u usporedbi s korektivnim održavanjem.

¹⁴ RBM – engl. Risk-Based Maintenance

¹⁵ PMS – engl. Planned Maintenance System

¹⁶ ISM – engl. International Safety Management Code

Planirano održavanje se trenutno prakticira u trgovačkim plovilima kao najpoželjnija strategija održavanja [9]. Slijedi da preventivno održavanje većinom ne uzima u obzir stanje ispravnosti, stoga potencijalno dovodi do nepotrebnih zastoja strojeva i prekomjernih problema s održavanjem, koji uključuju visoke troškove popravka i kvarove uzrokovane održavanjem [10].

1.3. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE

Prediktivno održavanje koristi suvremene metode percepcije stanja za praćenje stanja ispravnosti sustava i opreme u pomorstvu u stvarnom vremenu, realizaciju dijagnoze kvara i prognostiku kvara prema podacima, informacijama i znanju. Isto tako određuje donošenje smjernica pri odlučivanju o održavanju u kombinaciji sa stanjem ispravnosti, dijagnozom i rezultatima prognostike. Prediktivno održavanje je detaljnije objašnjeno u nastavku završnog rada.

Holistička strategija održavanja temeljena na načelima održavanja usmjerenog na pouzdanost se upotrebljava za povećanje operativne pouzdanosti brodova [11]. Također postoji uporaba analize održavanja usmjerenog na pouzdanost u smislu formiranja optimizacije zadataka održavanja i postizanja optimalne pouzdanosti plovila [12].

Unatoč primjenjivosti i potencijalnim prednostima održavanja usmjerenog na pouzdanost, trgovačka plovila imaju specifičan dizajn, stoga se u većini slučajeva uspješna primjena navedenog održavanja na jednom brodu ne može direktno primijeniti na drugi brod, a samim time je otežano usvajanje takve metode na brodovima.

1.4. PROAKTIVNO ODRŽAVANJE

Održavanje temeljeno na riziku je razvijen za pregled visokorizične opreme i komponenata, jačanje inspekcije i održavanja te smanjenje vjerojatnosti i posljedica kvara [6]. U načelu održavanje temeljeno na riziku su prihvatila pomorska regulatorna tijela.

Pojedini istraživači su predložili da se održavanje temeljeno na riziku upotrebljava za trupove i konstrukcije, a održavanje usmjereno na pouzdanost za mehaničke sustave [13].

Prilikom donošenja odluka o održavanju, održavanje temeljeno na riziku može efikasno unaprijediti raspoloživost plovila i optimizirati troškove održavanja. Potpuna implementacija održavanja temeljenog na riziku zahtijeva dovoljno resursa koji su potrebni odgovarajućim organizacijama u pomorskoj industriji za prikupljanje podataka, informacija i znanja.

Slijedi da se e-održavanje smatra sveobuhvatnim planom održavanja, koja uključuje poseban plan, vrstu održavanja (npr. prediktivno održavanje, održavanje usmjereno na pouzdanost, održavanje temeljeno na riziku) ili podršku održavanja [14]. E-održavanje je slično arhitekturi nekog poduzeća te uključuje različite grane kao resurse, usluge u održavanju ili konačno upravljački mehanizam u održavanju koji je strukturiran kako bi pridonio proaktivnom održavanju.

Prethodno navedena podrška, razvija dva strateška pravca - e-tehnologiju (informacijske i komunikacijske tehnologije, novi senzori, bežična komunikacija, itd.) i e-održavanje (e-praćenje, e-dijagnoze, i slično) istovremeno [15].

Kroz e-održavanje, odgovarajući podatci, informacije i znanje¹⁷ postaju dostupni i upotrebljivi na pravom mjestu, u pravo vrijeme za donošenje najbolje (predviđene) odluke o održavanju. Iako je e-održavanje rijetko primijenjeno na brodovima, ima široku mogućnost primjene u održavanju sustava i opreme u pomorstvu jer može bolje iskoristiti velike podatkovne baze i modernu informacijsku tehnologiju.

Različite metode održavanja posjeduju razne prednosti i nedostatke, zato odabir željene strategije održavanja ima veliku važnost u upravljanju ispravnosti sustava i opreme u pomorstvu. Strategija održavanja sustava i opreme u pomorstvu treba imati naprednu tehnologiju upravljanja održavanjem, a treba se temeljiti na e-održavanju kao okvirnom sustavu odnosno prediktivnom održavanju, održavanju usmjerenom na pouzdanost i održavanju temeljenom na riziku kao glavnoj vrsti održavanja.

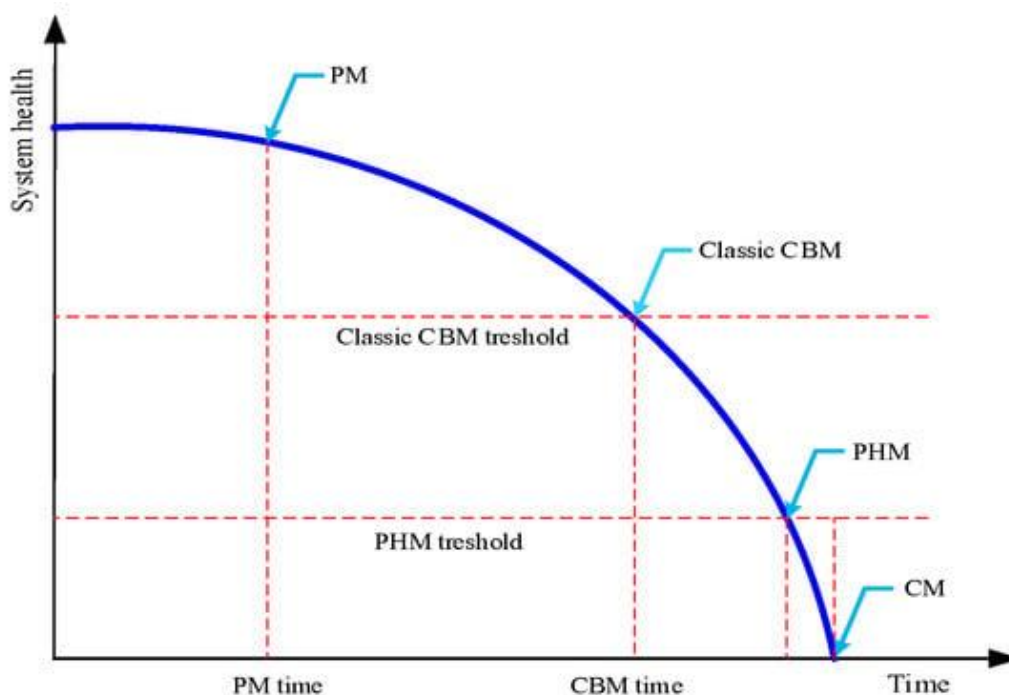
¹⁷ DIaK – engl. Data, Information and Knowledge

U nastavku rada bit će obrađena tema modernih detekcija grešaka kod asinkronih propulzijskih elektromotora, a neuronske mreže će biti predstavljene kao moderni alat u rješavanju navedenih problema.

2. PREDIKTIVNO ODRŽAVANJE - PRISTUP ODRŽAVANJU I NJEGOVI PREDUVJETI

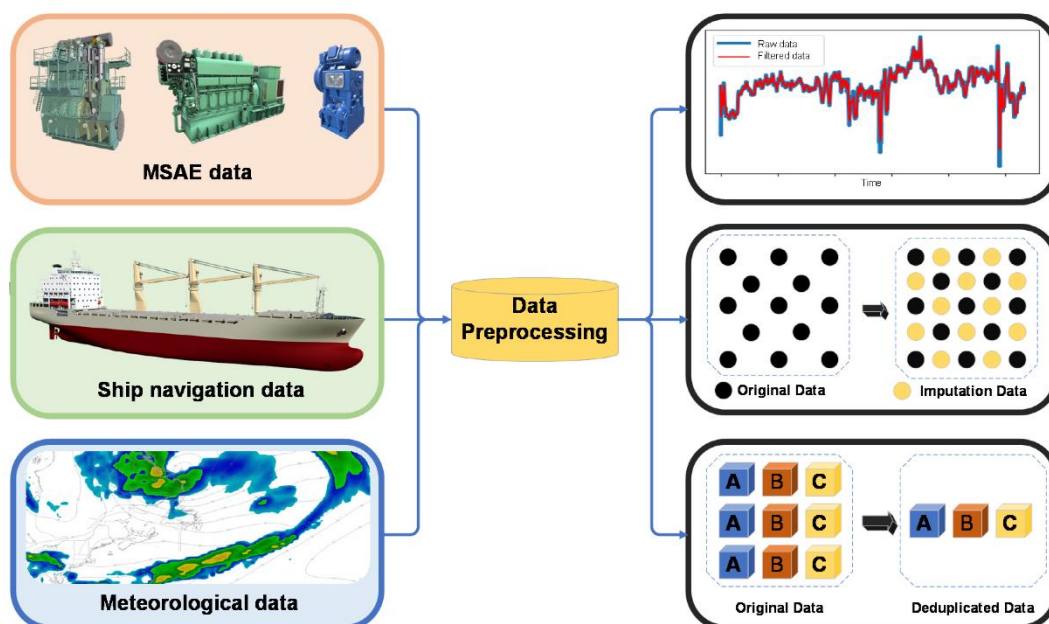
Kako je već ranije spomenuto, prediktivno održavanje upotrebljava suvremene metode percepcije stanja za praćenje stanja ispravnosti sustava i opreme u pomorstvu u stvarnom vremenu, realizaciju dijagnoze i prognostiku kvara prema trenutnim informacijama i histološkom znanju sustava primjenjujući strategiju u odlučivanju pri održavanju.

Slika 2 prikazuje progresiju ispravnosti po kojoj se provode različite metode održavanja. Cilj prediktivnog održavanja je smanjiti troškove rezervnih dijelova, zastoje sustava i vrijeme održavanja, što zahtjeva specijalistički odnos inženjera i djelovanje u točno određenom vremenskom periodu. Istraživanje ističe kako uporaba prediktivnog održavanja potencijalno produljuje cikluse remonta održavanja do 50% i uštedu 25% - 45% troškova održavanja [16].



Slika 2: Prognostička krivulja ispravnosti s naznačenim potrebama djelovanja [4]

Iako prediktivno održavanje može značajno uštedjeti troškove održavanja i smanjiti rizik od kvara, istraživanje pokazuje da samo 10% pomorske industrije upotrebljava prediktivno održavanje kao preferiranu strategiju održavanja [17]. Jedan od glavnih razloga ograničene primjene prediktivnog održavanja na brodovima je činjenica da je brod složeni sustav koji se sastoji od više različitih sustava, podsustava, opreme i komponenti, bilo da se radi o fizičkom procesu ili upravljačko komunikacijskim sustavima. Kada se radi o formuliranju donošenja odluka o održavanju, potrebni su profesionalci s visokom razinom tehničkog znanja.



Slika 3: Dijagram pretprocesiranja podataka [4]

Uz potrebnu profesionalnost, čovjekova uloga u upravljanju brodskim sustavima nije dostatna za procesiranje ogromne količine podataka ali je uz e-održavanje još uvijek potrebna u stvarnom vremenu. Iako je napredna tehnologija presudna i ona ima svoje nedostatke te razvojne procese unapređenja, jedna od osnovnih mana u prikupljanju informacija je točnost i sinkroniziranost informacije. Pogreške nastaju uzrokovane mjernom nesigurnošću, problemom ručnog snimanja, prijenosom, pogreškom procesa pohranjivanja i slično. Neispravni podaci mogu lako dovesti do pogrešne procjene stanja ispravnosti opreme u pomorstvu, što dovodi do pogrešnih odluka i katastrofalnih nesreća. Slika 3 prikazuje tipičnu problematiku prikupljanja podataka s potrebom pretprocesiranja.

Postoje tri metode pretprocesiranja, a to su:

1. Interpolacija podataka

Pod utjecajem različitih nesigurnosti, skupovi podataka iz sustava i opreme u pomorstvu obično sadrže veliku količinu podataka koji nedostaju [17]. Nedostatak podataka dovest će do odstupanja rezultata dijagnoze i predviđanja, što će utjecati na donošenje odluka o prediktivnom održavanju. Metoda interpolacije ključna je za povećanje kvalitete izvornog skupa podataka i poboljšanje donošenja odluka za inteligentni sustav rada i održavanja.

Cheliotis i suradnici su razvili novu metodu mješovite interpolacije za poboljšanje kvalitete podataka [18]. Mješovita metoda primjenjuje se u primarnom skupu podataka motora, a rezultati pokazuju da su prosječne pogreške manje od izvornog algoritma. Ispravljanjem podataka senzora iz integriranog automatskog sustava (IAS) za SIOP, navedeni algoritam mješovite interpolacije poboljšava kvalitetu izvornog skupa podataka. Dok se druge metode interpolacije primjenjuju na vjetroturbine [19] i praćenje klastera [20]. Učinci različitih metoda interpolacije podataka koji nedostaju, uspoređuju se s podacima dobivenih sa senzora sličnih teretnih brodova [2].

2. Otkrivanje odstupanja

Netipične vrijednosti u podacima izravno utječu na prosudbu ispravnosti stanja, stoga ih je potrebno unaprijed filtrirati tijekom analize. Nadalje, Jeon i suradnici objašnjavaju kako metoda analize praznina podataka omogućuje otkrivanje podataka o iznimkama na brodovima i pomorskim podacima u stvarnom vremenu [21]. Metoda prvo otkriva izvorne podatke nakon niza predobrade podataka, a zatim sekvencijalno otkriva abnormalne podatke u relativnom intervalu pogreške na temelju predviđenih podataka dobivenih iz modela učenja elemenata performansi broda.

Prema Wangu i suradnicima [22] upotrebljava se abnormalna shema otkrivanja koja direktno može koristiti u praćenju procesa ili kontroli procesa. U usporedbi s tradicionalnom metodom otkrivanja, pretpostavka programa je manja i prikladnija za suvremeni industrijski proces. Li i suradnici predlažu algoritam za čišćenje i praćenje podataka koji može pregledati abnormalne podatke uzrokovane prirodnim čimbenicima i ljudskim čimbenicima [23]. Dok Huyghues-Beaufond i suradnici predstavljaju hibridni okvir za otkrivanje i uklanjanje

opsežnih abnormalnih podataka [24]. Tako se model neuronske mreže¹⁸ u velikoj mjeri koristi za praćenje kontaminacije abnormalnih vrijednosti. Složeni model neuronske mreže¹⁹ ima temeljitu ekstrakciju značajki²⁰ jer zadržava izvorne informacije podataka [25]. Predložena metoda ima superiornost uspoređujući pokuse s tradicionalnim algoritmima za otkrivanje abnormalnih vrijednosti;

3. Brisanje suvišnih podataka

Suvišni podaci na brodu generirani će se većinom na dva načina:

1. U procesu prikupljanja i prijenosa podataka generirani će se duplicirani podaci radi utjecaja senzora, prijenosnih mreža i drugih čimbenika koji izravno utječu na njih.
2. Pojedini ciklusi prikupljanja podataka su kratki, a podaci se ne mijenjaju u vremenskom intervalu vrednovanja podataka.

Suvišni podaci će povećati količinu izračuna sustava te utjecati na učinak analize modela. Potrebno je reducirati ili odstraniti takve podatkovne nizove.

Predobrada podataka koristi se za poboljšanje kvalitete podataka i smanjenje signalnih smetnji. Postoji više vrsta senzora na brodu, a prikupljeni podaci imaju visoku rezoluciju i nelinearnoga su karaktera. Trenutno ne postoji opća metoda predobrade podataka prikladna za sve radne uvjete. Danas je većina metoda istraživanja izvanmrežna obrada, zato su u budućnosti potrebne efikasnije i stabilnije metode obrade podataka na brodu u stvarnom vremenu, kao što su automatska interpolacija i čišćenje podataka.

¹⁸ Neuronske mreže, poznate i kao umjetne neuronske mreže (ANN) ili simulirane neuronske mreže (SNN), podskup su strojnog učenja i u središtu se nalaze algoritmi za učenje. Njihov naziv i struktura inspirirani su ljudskim mozgom, oponašajući način na koji biološki neuroni šalju signale jedni drugima.

¹⁹ Složeni model NN podrazumijeva složenu hijerarhijsku strukturu slojeva koji se popularno nazivaju skriveni ili prikriveni slojevi NN.

²⁰ Radi se o ekstrakciji značajki ili pobliže ekstrakciji predstavnika grupe podataka te uspoređuje tipičnu krivulju opterećenja s neobrađenim podacima. Uklonjeni ekstremi imputirani su pomoću linearne transformacije tipičnog dnevnog uzorka. Predviđanja se izrađuju za neobrađene i prethodno obrađene skupove podataka testiranja.

3. DETEKTIRANJE GREŠAKA INDUKCIJSKOG ASINKRONOG MOTORA U BRODARSTVU I MODERNI TOKOVI MODELIRANJA

Prilikom povećanja veličine brodova i pomorske opreme, kao i onih koji upotrebljavaju električne pogonske sustave, dolazi do zamjetnog povećanja proizvodne snage i snage električnih pogona. Brodovi su autonomni sustavi koji se nalaze ili se udaljuju od obale, što postavlja veće zahtjeve na pouzdanost rada i servisiranja brodske električne opreme. Široku primjenu imaju sustavi nadzornog upravljanja i prikupljanja podataka²¹. Sustavi nadzornog upravljanja i prikupljanja podataka kontroliraju načine rada, stanje opreme, njegov zamor, identificiraju odstupanja parametara sustava i načina rada te doprinose sprječavanju nezgoda.

Inteligentni i visoko integrirani automatski sustavi (IAS) uključujući sustave komunikacije čovjek stroj (HMI) su razvijeni višeslojni informacijski sustavi u automatici koji omogućuju mjerenje, obradu, identifikaciju podataka o radu brodskih strojeva i električnih sustava. Spomenuti sustavi su univerzalni, autonomni, izgrađeni na modularnoj osnovi te jednostavni za implementaciju [26]. Mjere širok raspon signala, poput električnih, mehaničkih, akustičnih, toplinskih i drugih. Smatraju se otvorenim sustavima koji se razvijaju i proširuju s vremenom, odnosno omogućavaju lokalnu nadogradnju inženjera u procesu.

Jedan od glavnih zadataka naprednih IAS-a je dijagnostika kvarova pojedinih vitalnih komponenti broskog pogona pa tako i elektromotora pogotovo u smislu elektropropulzije. Za optimalan dizajn i rad sustava, potrebno je proučiti i analizirati različite pristupe, metode i alate za dijagnostiku kvarova asinkronog motora. U nastavku rada klasificiraju se dijagnostičke metode, pregled njihovih svojstava, načini realizacije te njihove prednosti i nedostaci.

²¹ SCADA – engl. Supervisory Control and Data Acquisition Systems

3.1. PRAĆENJE STANJA ISPRAVNOSTI ELEKTROMOTRA PUTEM IAS-a

Praćenje stanja od iznimne je važnosti za tehnički servis i za osiguravanje pouzdanosti i efikasnosti asinkronih motora. Takvo praćenje je sastavni dio IAS-a ili se dodatno nadograđuje na postojeće informacijske sustave u smislu unaprjeđenja senzorske širine mjerenja te u konačnici memoriranja podataka.

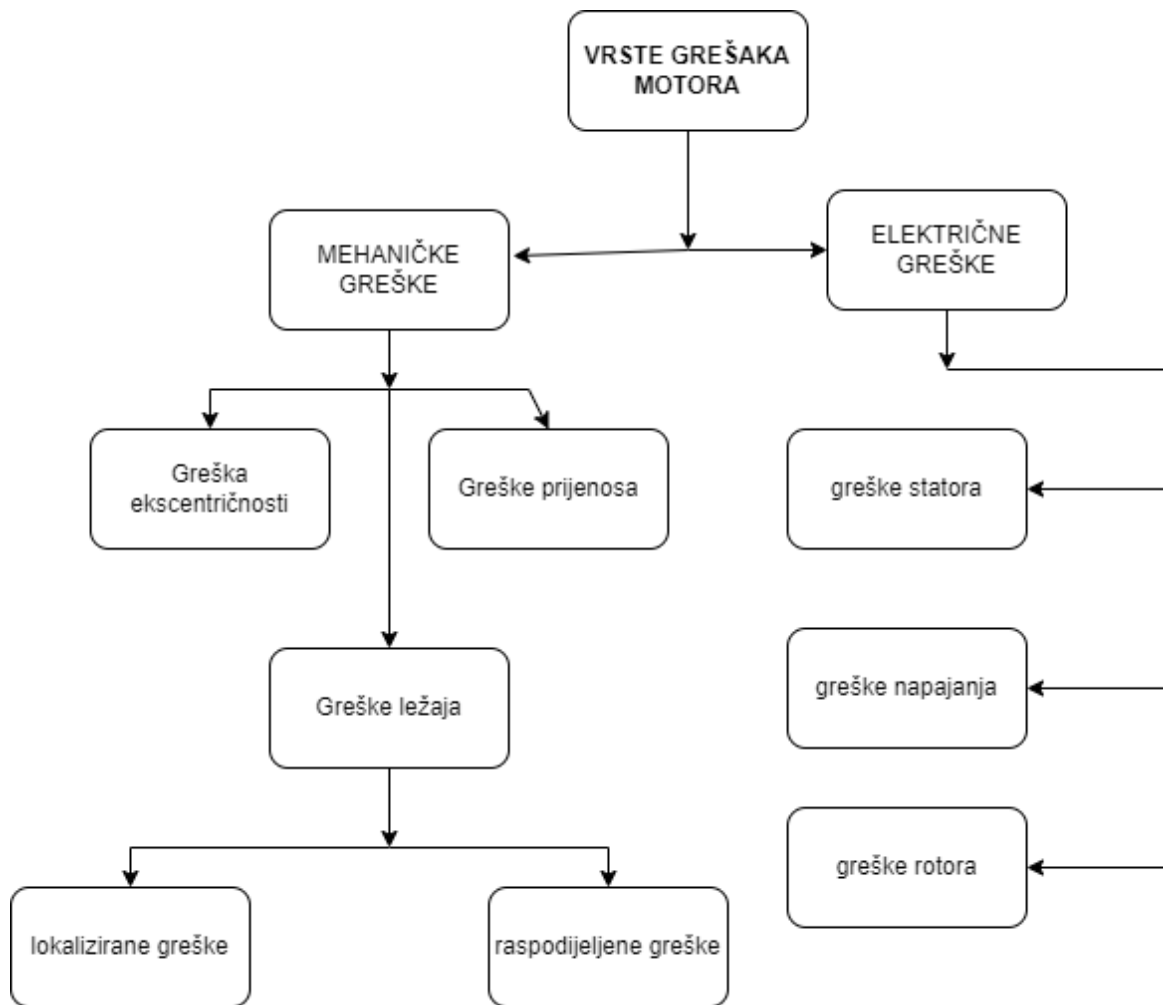
Učinkoviti sustavi nadzora minimiziraju neočekivane kvarove motora, smanjuju troškove servisa, a time ne dolazi do neplaniranih zastoja.

Sustav za nadzor prikuplja primarne informacije iz motora upotrebljavajući metode obrade ili analize podataka. Može se ustvrditi da su tradicionalni sustavi prije IAS-a imali veliki nedostatak u ljudskoj interpretaciji, stoga su uvedeni i uvode se automatizirani sustavi za nadzor i dijagnostiku. Takvi IAS-i zahtijevaju nadogradnju i korištenje inteligentnih sustava koji se temelje na umjetnoj inteligenciji, neizrazitoj logici, umjetnoj neuronskoj mreži i ekspertnim sustavima.

Provedena su brojna istraživanja uzroka i kvarova asinkronih pogona, parametara koji karakteriziraju njihovo stanje, metoda praćenja i dijagnostike, čiji su rezultati objavljeni u velikom broju radova, disertacija i monografija [27]. Predmetne studije omogućile su informacije o normalnom, tranzicijskom i hitnom načinu djelovanja na asinkroni motor, a to je u odnosu na njegovo stanje ispravnosti povezano sa mjerenim parametrima.

3.2. GREŠKE ASINKRONOG MOTORA

Slika 4 prikazuje tipove grešaka motora, koji se mogu podijeliti u dvije skupine: mehaničke i električne greške. Defekti ležajeva, ekscentričnost zračnog raspora i oštećenja reduktora ili spojke odnose se na mehaničke nedostatke. Kvarovi namota statora, kaveznog rotora i napajanja povezani su s električnim oštećenjima.



Slika 4: Dijagram vrste grešaka motora [28]

Većina kvarova motora događa se u ležajevima koji se sastoje od kuglica, prstenova i spojnih elemenata. Mehanički napori u motoru uzrokuju zamor ležajeva i lokalne nedostatke koji mogu uzrokovati njihovo uništenje. Distribuirani nedostaci također mogu nastati zbog proizvodnih odstupanja, onečišćenja koja neprestano mijenjaju kontaktnu silu i uzrokuju vibracije.

Druga vrsta mehaničkog oštećenja je ekscentričnost zračnog rasporeda, koja može biti statička, dinamička i mješovita. Ekscentričnost rezultira radijalnim silama i magnetskim privlačenjem, što uzrokuje trenje između statora i rotora i njihovo oštećenje.

Između motora i pogonskog mehanizma koriste se različite vrste reduktora odnosno spojki a tako i drugih tipova prijenosa električnog u mehanički moment. Mehanička

opterećenja uzrokuju različita oštećenja sustava, a pogotovo mehaničkog sustava prijenosa energije.

Najčešća oštećenja statora povezana su s oštećenjem izolacije namota statora, pri čemu velike struje teku gotovo sličnih vrijednosti strujama kratkog spoja. Do pogoršanja izolacije dolazi zbog pregrijavanja, onečišćenja te mehaničkih i električnih prenapona [28].

Nedostaci rotora su povezani s tehnologijom proizvodnje i korištenim materijalima:

- metalurška naprezanja pri izradi kaveznog rotora
- grijanje rotora pri startnim opterećenjima
- mehanička opterećenja zbog dinamike promjene momenta tereta.

Navedeni učinci mogu uzrokovati oštećenje kaveznog rotora i neravnotežu rotora. Zatim dolazi do asimetrije struja rotora, što zauzvrat može uzrokovati daljnja oštećenja rotora.

Također može doći do kvara u napajanju, kao što su nestabilan napon napajanja ili izvor struje zbog preopterećenja ili neuravnoteženog opterećenja, električnog stresa uzrokovanih pretvaračima s brzim izmjenama magnetnog toka ili nestabilnim temeljenjem izvora.

3.3. SENZORI, SUSTAV SENZORA I NJIHOVI SIGNALI

Tijekom praćenja stanja važni su senzori i sustavi temeljeni na sensorima.

Kako se greške na elektromotoru mogu očekivati u njihovom mehaničkom i električnom smislu tako se i mjerenja baziraju na mjerenju fizikalnih vrijednosti koje na to upućuju.

Za kontrolu stanja motora pri mjerenju i prikupljanju informacija takvih fizikalnih vrijednosti primjenjuju se dva pristupa [28]:

1. način lokalnog prikupljanja i dijagnostike i
2. način udaljenog prikupljanja i dijagnostike.

Slijedom navodimo fizikalne vrijednosti i pristupe njihovom mjerenju:

- a) vibracije

Vibracije koje nastaju zbog kvara motora uzrokovane su nekim mehaničkim ili elektromagnetnim efektom, a mjere se pomoću različitih senzora te mjesta na motoru.

b) elektromagnetsko polje

Kroz mjerenja elektromagnetskog polja mogu se utvrditi na primjer asimetrični statori i rotori. Asimetrični statori i rotori uzrokuju promjenu toka zračnog rasporeda, što se može izmjeriti pomoću zavojnice za traženje, smještene na osovini motora.

c) inducirani napon

U slučaju slomljenih šipki rotora, inducirani napon u statoru kada je napajanje isključeno, može se koristiti za označavanje kvara. S obzirom da te promjene ovise o opterećenju, temperaturi, inerciji i snazi koju nije moguće pouzdano izmjeriti, ova metoda se rijetko koristi.

d) akustična emisija

Zvuk se proizvodi promjenom dizajna motora i može se upotrebljavati za probleme s ležajevima i rotorom. Međutim, akustička mjerenja u bučnom okruženju broda mogu dovesti do pogrešne dijagnoze.

e) zakretni moment zračnog rasporeda

S neuravnoteženim namotajem statora i oštećenim rotorom, u zračnom rasporedu motora pojavljuju se harmonici zakretnog momenta. Međutim, teško je izravno izmjeriti moment zbog prirodne brzine motora, što uzrokuje razliku između izmjerenog pulsog momenta i stvarnog momenta.

f) trenutna kutna brzina

Trenutna brzina motora mijenja se tijekom jednog okretaja, što se može koristiti za kontrolu stanja rotora, pod pretpostavkom da je brzina konstantna, no većinom se brzina mijenja tijekom rada.

g) spektralna analiza struje motora

Mjere se struje statora koje se obrađuju kako bi se dobili profili spektra. Uz njegovu pomoć moguće je identificirati neispravnost. Oštećeni kavez rotora smanjuje magnetski tok i proizvodi asimetriju koja se očituje kao polje vrtnje unatrag različito od nule, zbog čega se induciraju harmonici u statorskim strujama.

h) toplinski nadzor.

Temperatura se može kontrolirati na bilo koji način mjerenjem ili procjenom. U slučaju kvara, temperatura statora se povećava, što može ukazivati na kvar motora. Koriste se dvije vrste toplinskih modela, a to su temeljeni na metodi konačnih

elemenata i toplinski modeli s paušalnim parametrima. Prva vrsta modela je točnija, ali zahtijeva veće računalne resurse. Drugu vrstu modela čine toplinski kapaciteti i otpori te gubici u njima. Točnost modela ovisi o broju toplinski uniformnih tijela s kojima je model prikazan.

Metode vibracija i elektromagnetskog polja su invazivne metode jer zahtijevaju senzore motora. Metoda koja koristi inducirano polje je autonomna metoda. Neinvazivne i online metode uključuju mjerenje akustične emisije, trenutnog zračnog raspora, trenutne brzine motora te primjenjuje analizu trenutne signature²².

Nekoliko ulaznih signala, poput struje i vibracija, koriste se zajedno. Kombinacija takvih ulaznih signala koristi se za praćenje stanja, klasifikaciju ekscentričnosti i fazne neravnoteže, identifikaciju grešaka u ležajevima i u rotorima, praćenje faznog pomaka između trofaznog napona i mrežnih struja te otkrivanje kratkih spojeva u namotajima.

3.4. METODE DIJAGNOZE

Održavanje je složen proces s obzirom da uključuje veliki broj varijabli od kojih je neke teško predvidjeti, skupo je i riskantno, stoga je potrebno [28]:

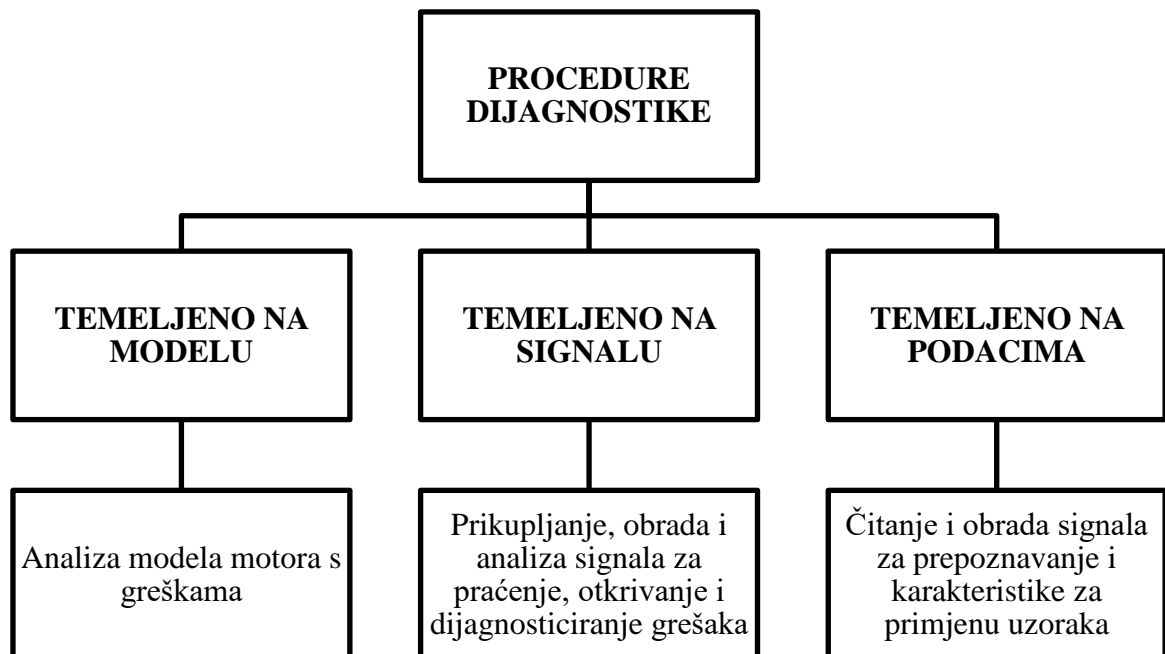
- precizno planiranje i kontrola
- optimizacija resursa
- primjena sigurnih radnih postupaka
- stalno istraživanje i razvoj alata integriranog upravljanja.

Pojednostavljuje se održavanje s obzirom na moderne tokove dijagnostike u one koji su profilirani dijagnostički te konačno proaktivni kada se pogleda slika 5.

Tradicionalno se koriste profilirani odnosno planirani i korektivni zahvati održavanja, no sada postoji tendencija korištenja prediktivne usluge za ranu identifikaciju mehaničkih i električnih kvarova na temelju metoda umjetne inteligencije. To podrazumijeva uporabu

²² Riječ je o spektralnoj analizi električnih signala većinom struje.

sredstava poput digitalne opreme visokih performansi, nove tehnologije praćenja, statičko modeliranje, kritičku analizu i posljedice kvarova te ekspertne sustave.



Slika 5: Dijagram podjele dijagnostike na asinkronom motoru [28]

Ispituje se pojam greške kod motora koji može uzrokovati kvar. Kod nastanka kvara taj sustav je ne upotrebljiv, no greška može biti prisutna kao odstupanje od očekivanog stanja tako da se ona istražuje.

Metode praćenja i otkrivanja grešaka dijele se na: [28]

1. temelju podataka:

- empirijski modeli koji koriste procesne podatke
- statističke metode, umjetna inteligencija
- umjetna neuronska mreža i neizrazita logika
- sprega neuronske mreže i neizrazite logike

2. temelju modela:

- eksplicitni model procesa (ulazno-izlazni modeli ili modeli prostora stanja)
- metoda procjene temeljena na parametrima
- na temelju odnosa pariteta
- metoda temeljena na observeru.

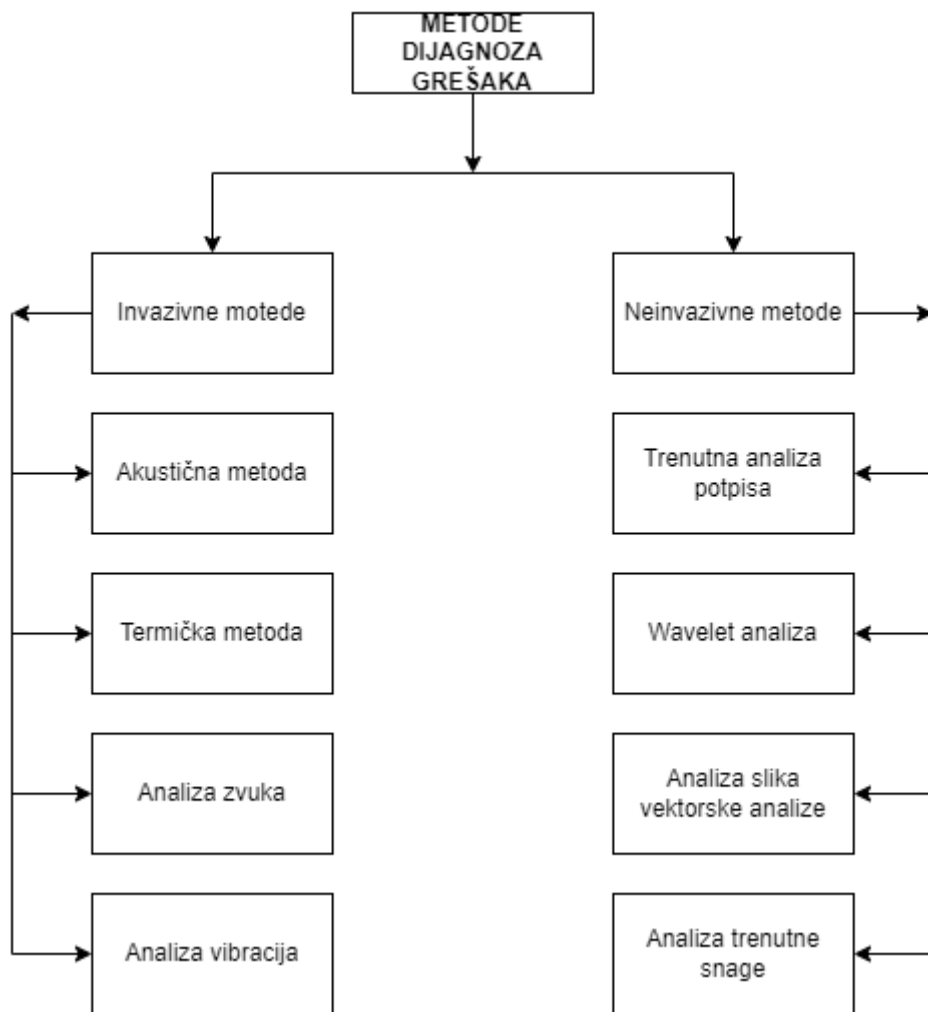
Također se koriste hibridne metode koje kombiniraju modele temeljene na bazi podataka i modela.

Neinvazivne metode koriste nekoliko matematičkih modela koji omogućuju obradu, dekompoziciju i analizu izmjerenih signala za prepoznavanje upozoravajućih stanja ispravnosti. Inteligentni sustavi, koji neovisno otkrivaju proizvoljna odstupanja od normalnih načina rada, treniraju se korištenjem prikupljenih podataka o greškama.

Suvremena analiza karakteristike strujnog spektra²³ jedna je od najpreciznijih i najpopularnijih metoda za otkrivanje kvarova u asinkronim motorima. Mjerenje struja i napona vrši se putem transformatora zaštite. Analiza karakteristike strujnog spektra uključuje metode parametarske analize (analiza funkcije signala u vremenskom prostoru, frekvencijski spektar) i metode visoke rezolucije ili potprostora (vrijednosti koje odgovaraju signalu i šumu). Signali dinamičkih procesa uglavnom koriste dijagnostičke metode temeljene na spektralnoj analizi višeg reda.

Svaki tip greške koji se javlja kod asinkronih motora ima poseban utjecaj na analizirani signal. Analiza karakteristike strujnog spektra utvrđuje razlike u obrascima signala (spektru) u normalnom i hitnom načinu rada. Na ovaj način moguće je pratiti i dijagnosticirati greške povezane s rotorom (slomljene šipke, ekscentričnost, ležajevi i vratila), probleme s ležajevima i kratke spojeve na statoru. Slika 6 prikazuje metode dijagnostike grešaka.

²³ MCSA – engl. Current signature analysis



Slika 6: Dijagram metoda dijagnoza grešaka [28]

Za održavanje temeljeno na ispravnosti koriste se inteligentni moduli za obuku modela dijagnostike. Navedeni modeli korisni su za praćenje asimetričnog motora raznim mjerenjima. Korisni modeli su neuronske mreže jer se mogu rekonfigurirati na temelju podataka koji ne zahtijevaju precizan model. Koriste se inteligentni modeli temeljeni na kombinaciji neuronskih mreža i neizrazite logike. Takvi modeli napredno kombiniraju neuronske mreže u ekstrakciji značajki problema greške te modelskom aproksimacijom baziranom na neizrazitoj logici. Ovi hibridni modeli rješavaju probleme klasifikacije podataka, uključujući online obuku modela za kratkoročno razdoblje i uspostavljanje nelinearnih granica odlučivanja. Veliki nedostatak hibridnih modela je nemogućnost objašnjenja njihovih predviđanja, poznato kao problem crne kutije. Ovaj problem se rješava različitim metodama ekstrakcije pravila [28].

Nadalje imamo metode koje su temeljene na korištenju struje povrata, koje se javlja u različitim stanjima, a ne samo u asimetriji statora. Budući da na brodovima postoje buka i vibracije različitih frekvencija (osobito u strojarnici), bilo bi poželjno koristiti samo jedan ulaz (statorske struje) za nadzor asinkronih motora. To omogućuje stvaranje ekonomičnog sustava za praćenje stanja.

4. NEURONSKE MREŽE I ZNAČAJ PRI MODELIRANJU KOMPLEKSNIH BRODSKIH POGONA

Neuronske mreže su nov i po mnogo čemu atraktivan informatički alat, napravljen po uzoru na strukturu mozga i zbog toga se u svojim pretpostavkama bitno razlikuje od računala koja svakodnevno koristimo. Ukratko, može se reći da su u većini aplikacija alat koji omogućuje prevladavanje mnogih prepreka i ograničenja koje je teško premostiti drugim metodama, a istovremeno su izuzetno praktični i učinkoviti. Zato su zanimljivi i istraživačima i praktičarima.

O neuronskim (ili bolje rečeno neuro-sličnim) mrežama napisano je mnogo znanstvenih radova, preglednih znanstvenih te znanstveno popularnih.

4.1. TEORIJSKE ODREDNICE NEURONSKIH MREŽA

Neuronske mreže pripadaju metodama umjetne inteligencije²⁴. Njihova svrha odnosi se na stimulaciju specifične biološke funkcije mozga. Neuron se definira kao osnovnom jedinicom moždane kore te se shvaća kao jednostavno računalo. Nadalje, mozak kompenzira brzinu velikim brojem neurona, stoga se smatra složenim sustavom paralelnih računala. Osim toga, važna karakteristika mozga je unaprijed ugrađeno znanje koje mozak razvija učeći na temelju iskustva. Na sličan način funkcioniraju i neuronske mreže. One tako prolaze kroz proces učenja na temelju ulaznih podataka te se pripremaju za primjenu na konkretnim problemima. Primarna uporaba neuronskih mreža je predviđanje rezultata. Iz navedenog proizlaze dva ključna problema, a to su problem pamćenja tijekom faze učenja i problem učenja tijekom faze primjene [29].

Topologija neuronskih mreža sastoji se od velikog broja neurona slično kao i ljudski mozak koji je služio kao model za neuronske mreže. Pri tome su sagrađene od umjetnih, odnosno znatno pojednostavljenih neurona u odnosu na izvorne, a također i mnogo

²⁴ engl. Artificial Intelligence

jednostavnije povezanih međusobno. Kad bi se pokušalo izgraditi umjetnu neuronsku mrežu po uzoru na strukturu stvarnog živčanog sustava, nastala bi tvorevina vrlo neprozirna, a uz to bi ju bilo teško kontrolirati.

Umjetna neuronska mreža je sustav za obradu informacija ili signala sastavljen od velikog broja jednostavnih elemenata za obradu, zvanih umjetni neuroni ili, jednostavnije, čvorovi. Neuroni su međusobno povezani izravnom vezom koju moramo utežiti po svojoj dominantnosti prema ostalim vezama. Takve utežene veze sa svojim signalima se zbrajaju u neuronu i podvrgavaju aktivacijskoj funkciji odluke u tom neuronu, a sve kako bi pridonijeli odluci na tom nivou.

Umjetne neuronske mreže rješavaju probleme na drugačiji način od konvencionalnih računala. Algoritamski pristup računala je izvršavanje niza instrukcija kako bi se riješio zadani zadatak. To ograničava njihovu upotrebu na probleme koje razumijemo i znamo kako riješiti. Neuronske mreže rade na sličan način kao i mozak. Treba, međutim, naglasiti da način rada neuronskih mreža i konvencionalnih računala nisu konkurentne, već komplementarne metode koje bi trebale pomoći u rješavanju mnogih zadataka koji se danas čine nemogućima [30].

Za razliku od konvencionalnih računalnih tehnika, neuronske mreže paralelno prihvaćaju više ulaza i obrađuju dobivene informacije na raspodijeljen način. Stoga je ključno osigurati pravilnu raspodjelu informacija unutar sustava kako bi se postiglo kvalitetno i ravnomjerno funkcioniranje. Informacija pohranjena u neuronskoj mreži, u nekim kompleksnim sustavima može biti raspoređena na više računalnih jedinica, što rezultira višestrukom pohranom na različitim mjestima. U tom primjeru konvencionalne računalne mreže pohranjuju informacije u memoriju tako da je svaka posebna informacija (podatak) spremljena u vlastiti memorijski prostor. Ovo svojstvo raspodijeljene pohrane informacija pruža neuronskim mrežama nekoliko prednosti, pri čemu je najvažnija redundantnost i otpornost na kvarove. Redundantnost je ključna prednost neuronskih mreža, budući da se čak i ako se uništi neki dio mreže, ona i dalje može biti funkcionalna ali s ograničenom točnošću. U konvencionalnim računalnim metodama, postizanje redundantnosti zahtijeva posebne prilagodbe, budući da se u području baza podataka redundancija smatra nepoželjnom. Međutim, kod neuronskih mreža, redundantnost je inherentno svojstvo, slično kao kod bioloških sustava.

Međuslojevi u mreži, poznati i kao skriveni slojevi²⁵, formiraju se s različitim brojem neurona ovisno o specifičnom tipu i aktivnosti koju neuronska mreža obavlja. Na primjer, različiti oblici neuronskih mreža koriste se za prepoznavanje oblika, za razliku od onih koje se koriste za aproksimaciju matematičkih modela. Tijekom procesa učenja, važno je napomenuti da se za svaki sloj neuronske mreže, osim za ulazni sloj, formira matrica težina i vektor pomaka [29].

Od prvih modela neuronskih mreža do danas razvijen je ogroman broj različitih mrežnih modela. Razlikuju se po funkciji, vrsti prihvaćenih podataka, strukturi, algoritmima učenja itd. Funkcija mreže je obrada informacija. Računalna snaga mreže proizlazi iz činjenice da svi povezani elementi istovremeno obrađuju podatke. Svaki element na svom ulazu ima određeni broj ulaznih signala čija je "valjanost" određena težinama, ima određenu aktivacijsku funkciju i jedan izlaz. Rad je određen arhitekturom mrežne veze, funkcijom aktivacije i pravilom učenja. Težine su podesivi parametri. Vrijednosno uteženi unos ulaznih signala je pobuda elementa. Za svaki model mreže razlikuju se tri osnovne faze [31]:

- faza učenja mreže,
- faza testiranja
- faza vrednovanja i
- faza korištenja mreže za rješavanje naučenog zadatka.

Faza učenja uvelike varira. Za perceptronske mreže sastoji se u višestrukom predstavljanju podataka za obuku, a zatim modificiranju težina u skladu s usvojenim algoritmom. Ovo je vrlo dugotrajan postupak. U Hopfield mreži ili u mobilnoj mreži, faza učenja temelji se na zadanom zadatku (podacima) izračuna vrijednosti težine, koje se nakon toga ne mijenjaju [30].

Faza testiranja sljedeća je faza u kojoj se koristi odvojeni skup podataka kako bi se procijenila performansa mreže. Testni skup podataka se prosljeđuje kroz mrežu, a zatim se uspoređuju stvarni izlazi mreže s očekivanim izlazima kako bi se izračunala točnost.

²⁵ engl. Hidden layer

U vrednovanju, rezultati se analiziraju. Ako je potrebno, vrši se optimizacija arhitekture i parametara kako bi se poboljšala performansa. Cilj je osigurati da je mreža uspješno generalizirana za nove podatke u obavljanju zadanih zadataka.

Faza korištenja mreže za rješavanje naučenog zadatka predstavlja primjenu obučene neuronske mreže na stvarnom problemu. Nakon što je mreža uspješno prošla faze učenja i testiranja, koristi se za obavljanje specifičnog zadatka. U ovoj fazi, ulazni podaci se provode kroz neuronsku mrežu te primjenjuje naučenu težinu i parametre kako bi generirala izlazne rezultate. Ovisno o vrsti problema, izlaz može biti u obliku klasifikacije, regresije, generiranja ili neke druge zadane funkcije [30].

Praktične prednosti neuronskih mreža sastoje se od pet osnovnih prednosti [30]:

- Sposobnost filtriranja (mala osjetljivost na šumove i nepotpune informacije)
- paralelna obrada informacija
- mogućnost prilagodbe
- modeliranja multivarijabilnih sustava,
- prikladne za obradu nekompletnih i nekonzistentnih informacija.

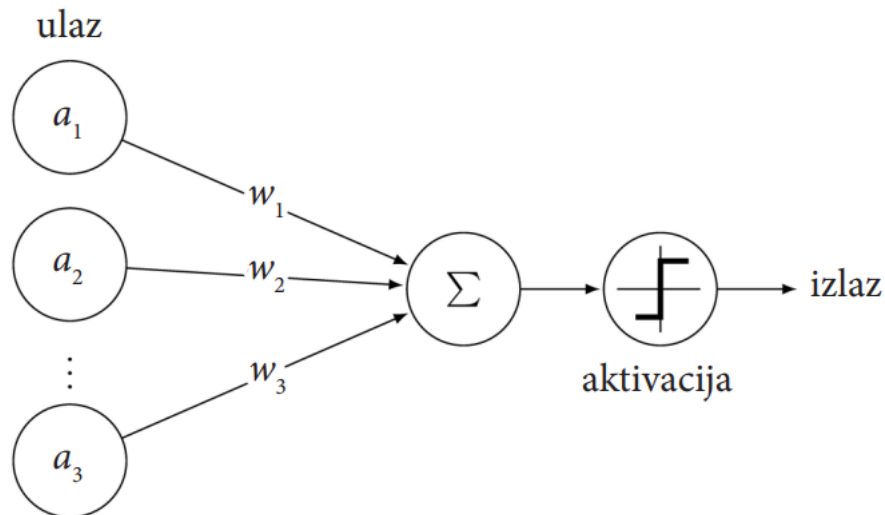
Prva prednost može se iskoristiti kada se neuronske mreže kreiraju kao specijalizirani uređaji, koji se koriste, primjerice, za vrlo brzu obradu slike, razumijevanje govora ili upravljanje mobilnim robotom. Svojstvo ove prednosti leži u činjenici da neuronska mreža izgrađena od mnogo zasebnih neurona, napravljenih, na primjer, kao elementi integriranog kruga, može raditi na način da svi ti neuroni rade istovremeno, rješavajući postavljeni zadatak kao uigran kolektiv. Zahvaljujući takvom "paralelnom" načinu rada čitavog skupa uključenih neurona, ne moramo dugo čekati rezultat njihovog rada kao u slučaju korištenja tipičnog računala za isti zadatak, u kojem sve aktivnosti mora izvoditi jedan procesor, zbog čega se izvode sekvencijalno, jedan za drugim tj. u nizu. Kod gore navedenog ne smijemo miješati izvođenje neuronskih mreža u jednom računalu ili strategiju izvođenja kompleksnih modela radom više računala pogotovo u smislu optimizacije ili distribucije kompleksne neuronske mreže.

4.2. PRIMJERI NEURONSKIH MREŽA

Perceptron je model McCullocha i Pittsa sa strategijom učenja te predstavlja najčešće korišten model neuronskih mreža u praksi danas. Perceptronsko učenje spada u skupinu učenja s učiteljem i sastoji se u takvom odabiru težina da izlazni signal bude najbliži očekivanoj vrijednosti. Strategija se temelji na ideji Rosenblatta, koja kaže da neuron uči na svojim greškama [33]. Svaki element izračunava uteženi zbroj ulaznih signala (obično s dodatnim bias²⁶ signalom), uspoređuje ga s aktivacijskim pragom i koristi aktivacijsku funkciju za generiranje izlaznog signala. Rosenblatt je otkrio jedno od zanimljivih svojstava perceptrona: ako postoji sustav težina pomoću kojeg perceptron ispravno preslikava skup standardnih ulaznih vektora u odgovarajući skup očekivanih izlaznih vrijednosti, tada postoji metoda treniranja ovog elementa koji jamči konvergenciju ovog procesa. Poseban zadatak je definirati ovaj algoritam učenja. Za jednostavan perceptron s unaprijed postavljenim težinskim vrijednostima (obično nasumično), signal učenja se primjenjuje na ulaz i izračunava se vrijednost izlaznog signala.

Do rezultata usporedbe trenutne vrijednosti izlaznog signala i očekivane vrijednosti na izlazu, dolazi na način da se težine ažuriraju prema pravilu u nastavku. Ako je izlazni signal jednak očekivanoj vrijednosti, tada težine ostaju nepromijenjene. Kada je izlazni signal netočan, težine se mijenjaju, odnosno povećavaju se kada je signal premali, a smanjuju se u suprotnom. Minsk i Pappert ističu da jednostavan jednoslojni sustav ima svoja ograničenja, a iz navedenog razloga se upotrebljavaju jednostavni elementi za izgradnju pravilne jednoslojne, često višeslojne strukture [33].

²⁶ Bias je očekivana greška ne modeliranog dijela prijenosa kod neurona.



Slika 7: Dijagram McCulloch-Pitts modela biološkog neurona [29]

Slika 7 prikazuje dijagram McCulloch-Pitts modela biološkog neurona. U višeslojnom perceptronu postoji ulazni sloj i izlazni sloj. Ostali se nazivaju skriveni slojevi. Perceptron ne sadrži veze između elemenata koji pripadaju istom sloju. Veze između slojeva su asimetrične i usmjerene prema svom redoslijedu, tj. od ulaznog sloja do prvog skrivenog sloja, zatim od prvog do drugog skrivenog sloja itd. do izlaznog sloja. Nema povratnih poziva. Za višeslojne mreže, najčešće korišteni algoritam učenja je algoritam povratne propagacije pogreške. Njegovo ime dolazi od činjenice da se nakon izračunavanja izlaznog signala mreže kao odgovora na zadani obrazac izračunava vrijednost gradijenta funkcije pogreške za neurone zadnjeg sloja. Težina tih neurona se zatim modificira. Sada se greška prenosi na prethodni (prethodni) sloj. Vrijednosti funkcije gradijenta za neurone iz ovog sloja izračunavaju se na temelju gradijenata izračunatih za neurone u sljedećem (tj. posljednjem) sloju. Na taj se način modificiraju težine sljedećeg sloja. Ovaj postupak se nastavlja do ulaznog sloja [29].

4.3. PRIMJENA NEURONSKIH MREŽA U BRODARSTVU

U posljednje vrijeme neuronske mreže pronalaze sve veću i značajniju primjenu u brodarstvu. Tradicionalne metode proračuna koje se koriste u brodogradnji i brodarstvu oslanjaju se uglavnom na statističke pristupe i regresijsku analizu. Relativno novi alat u ovom području je korištenje umjetnih neuronskih mreža. Umjetne neuronske mreže

pokazuju brojne prednosti koje ih čine posebno privlačnima u složenim problemima kao što je proces projektiranja broda.

Glavna prednost neuronskih mreža je njihova paralelna struktura, koja im omogućuje rješavanje složenih multivarijabilnih problema. Oni su izvrsni alati za predviđanje, posebno u slučajevima kada postoji malo informacija o odnosu između ulaza i izlaza problema. Osim toga, prikladni su za rješavanje problema iz stvarnog života, koji su vrlo nelinearni i teško ih je riješiti tradicionalnim tehnikama. Štoviše, neuronske mreže su prilagodljive i mogu poboljšati svoje performanse kada novi podaci postanu dostupni, koji se mogu koristiti za ponovno uvježbavanje mreže [34].

5. DETEKCIJA GREŠKE NA ASINKRONOM ELEKTROMOTORU KORISTEĆI MJERENJA VIBRACIJA

Postoje procesi otkrivanja grešaka temeljeni na informacijama o povijesti procesa. Različiti tipovi elektromotora prisutni u tehnologiji rada i održavanja te su važna i odlučujuća komponenta. Indukcijski motori rade u bučnom okruženju te proizvode buku. Vibracije uzrokovane time dovode do oštećenja. Tijekom rada mogu se pojaviti različiti kvarovi zbog mehaničke upotrebe ili električnih kvarova. Pouzdanost motora ima veliki utjecaj na pouzdanost sustava i opreme u pomorstvu.

Poznavanjem najvažnijih grešaka i posjedovanjem odgovarajuće tehnike otkrivanja grešaka problemi se mogu brzo izbjeći bez trošenja značajne količine vremena i novca. Praćenje i analiza vibracija na različitim mjestima motora dovodi do otkrivanja uzroka vibracije. Također je važno navedene probleme otkriti i riješiti na vrijeme. Ako se ne riješe na vrijeme, dolazi do značajne štete radi koje dolazi do kvara i trenutnog zastoja proizvodnje [35].

Analiza vibracija zahtijeva mnogo znanja o vrsti vibracije, izvoru, uzroku vibracije, što će se otkriti kroz vibraciju, sile koje se pojavljuju, kritičnu razinu vibracije i drugo. Također je važno znati koje su slabe točke sustava, gdje staviti akcelerometre i kakve podatke daju [36].

5.1. MEHANIČKE VIBRACIJE I ANALIZA VIBRACIJSKIH SILA

Mehanički sustavi su sastavljeni od mnogo dijelova koji su povezani na različite načine, reagiraju različito i uzrokuju pojavu ponavljajuće sile. Ponavljajuće sile su posljedica rotacije neuravnotežene ili neparavnate komponente. Neravnotežu uzrokuju korodirani, deformirani, slomljeni dijelovi, praznine, neujednačenost gustoće materijala i varijacije u veličinama komponenti. Neusklađenosti su uzrokovane netočnom montažom i izobličenjima. Istrošeni dijelovi također uzrokuju pojavu sile i neželjene vibracije [37].

Praćenje vibracija pomaže u pronalaženju problema koji bi se mogli pojaviti, u otkrivanju neželjenih vibracija i pravovremenom sprječavanju problema.

Vibracije karakteriziraju amplituda i frekvencija. Amplituda pokazuje koliko je jaka vibracija, a frekvencija pokazuje brzinu oscilacije vibracije. Ovo dvoje pruža informacije za prepoznavanje korijena vibracija. Analiza vibracija sastoji se od spektralne analize. Spektar je vrlo koristan analitički alat jer pokazuje frekvencije na kojima se javljaju vibracije. Razlučivost spektra utvrđuje detalje u spektru. Općenito, spektar brzine se koristi za određivanje komponente vibracijskog signala [38].

5.2. IZVORI VIBRACIJA U ELEKTROMOTORIMA

Postoji mnogo uzroka vibracija motora, koji se mogu grupirati u dvije kategorije, a to su električni uzroci i mehanički uzroci.

Električni uzroci su na primjer varijacija toka oko statora koja proizvodi varijaciju privlačne sile između statora i rotora. Drugi uzrok može biti slomljena poluga rotora ili kratki spoj dijela namota. Mehanički uzroci mogu biti na primjer neuravnoteženost motora, neodgovarajuća baza ili uporaba ležaja. Dodatno, bučno okruženje utječe na cjelokupnu vibraciju motora [38].

5.2.1. *Vibracije baze motora*

Standardi propisuju krutu podlogu za elektromotore što znači da vibracije u blizini nogu motora moraju biti manje od 30% vibracija izmjerenih na ležaju motora. Ako je baza motora slaba, dolazi do vibracija u vodoravnom smjeru. Frekvencija ove vibracije je dvostruka frekvencija napajanja ili dvostruka rotacijska frekvencija. Kako bi se utvrdila vrsta vibracije, mora se mjeriti u oba smjera, vodoravno i okomito. Vodoravna komponenta vibracije, zbog slabe baze, dodaje vlastitom motoru dodatnu vibraciju, što rezultira povećanjem razine vibracije.

To znači da se u prvom koraku moraju koristiti dva akcelerometra, jedan blizu ležaja i jedan na dnu motora. Oba bi trebala biti dvoosni akcelerometar. Kako bi se potvrdila slabost baze motora, treba izmjeriti horizontalne vibracije na dnu, u sredini i na vrhu baze te ih usporediti s razinom vibracija na ležaju motora.

Vibracija motora u danom trenutku ima dvije komponente, horizontalnu vibraciju samog motora i izračunatu horizontalnu vibraciju zbog slabe baze, koja ovisi o udaljenosti osi motora od baze i udaljenosti između nogu motora. Ako se tijekom rada pojavi frekvencija (od okoline ili brzine vrtnje motora) koja se poklapa s osnovnom rezonantnom frekvencijom, amplituda vibracija će se povećati, a s time dolazi i do velikih šteta [39].

5.2.2. Vibracije ležaja

Vibracije ležaja prisutne su u svim vrstama rotacijskih sustava i motora. Antifriksijski ležaji važan su dio motora. Upotreba ležaja utječe na cijeli rotacijski sustav. Ležajevi imaju sljedeći izvor greške: unutarnji prsten, vanjski prsten, vrtnju valjka i kavez ležaja. Sve navedeno dovodi do prepoznatljivih frekvencija grešaka. Budući da ne postoji dopuštena amplituda za ove frekvencije, treba pratiti prisutnost defektnih harmonika frekvencije [38].

5.2.3. Vibracije poluge slomljenog rotora

Ako je poluga rotora slomljena, u njoj neće biti struje niti magnetskog polja. To će stvoriti magnetsku neravnotežu između dvije suprotne strane motora, strane sa slomljenom polugom i strane s neslomljenom polugom. Takva neravnoteža stvara magnetsku silu koja rotira brzinom vrtnje i modulira na frekvenciji jednakoj frekvenciji klizanja umnoženu s brojem polova. Isto tako, ako jedna od poluga rotora ima drugačiju karakteristiku, pojavljuje se slična magnetska sila. Nadalje, ova promjena uzrokuje veće zagrijavanje oko rotora, rotor se savija i stvara ekscentrični rotor, zatim disbalans i magnetsku silu. To uzrokuje dvostruku frekvenciju vibracija [39].

5.2.4. Prenošenjem frekvencija protoka kroz poluge rotora

Visokofrekventne vibracije se pojavljuju kada se struja inducira u poluge rotora pod opterećenjem. Amplituda ove vibracije ovisi o opterećenju. Inducirana struja stvara oko poluge magnetsko polje, što stvara privlačnu silu s radijalnim i tangencijalnim komponentama na zube statora. Slijedi pojava vibracija. Ove visoke frekvencije vibracija mogu se mjeriti na okviru motora i kućištu ležaja. Također su povezane s električnom bukom i glavni su izvor buke. Ako je ta buka u granicama normale, ona ne uzrokuje štetu. Navedeni podatak se uzima u obzir tijekom projektiranja motora.

5.2.5. Vibracije dvostruke frekvencije napajanja

Tijekom rada motora dolazi do elektromagnetskih interakcija između rotora i statora. Kao rezultat pojavljuju se vibracije frekvencije napajanja ili dvostruke frekvencije napajanja. Neki električni i mehanički kvarovi uzrokuju vibracije iste frekvencije. Između statora i rotora postoji elektromagnetska sila zbog napajanja. Ova sila ima najveću amplitudu kada je struja u statoru najveća ili najmanja. Dakle, sila će imati dvostruku frekvenciju izvora energije. Navedena vibracija je osjetljiva na noge motora, okvir motora i krutost baze motora te na ravnomjernu procjenu zračnog rasporeda između rotora i statora.

Glavni uzrok vibracija dvostruke frekvencije napajanja je asimetrija zračnog rasporeda. Sila je najveća tamo gdje je zračni raspored minimalan. Rotor vuče u jednom smjeru, a stator u suprotnom smjeru što utječe na pravilan rad ležaja [39].

5.2.6. Neuravnoteženost motora

Svi rotirajući strojevi, kao i indukcijski motori moraju biti uravnoteženi kako bi imali lagan i tih rad. Rotor je važan dio asinkronih motora, a njegova ravnoteža utječe na cjelokupni rad motora. Rotor se sastoji od mnoštva dijelova, tako da se svi dijelovi moraju kontrolirati i proizvoditi s velikom koncentričnošću kako bi imali stabilnu ravnotežu. Rotor je balansiran bez ventilatora i sa montiranim ventilatorima. Korekciju ravnoteže treba izvršiti

na ili blizu točaka neravnoteže. Dvopolni i veliki četveropolni motori rade na jednoj brzini, to jest njihovoj radnoj brzini. U novije vrijeme indukcijski motori se koriste u aplikacijama s promjenjivom brzinom od 40% do 120% sinkrone brzine. U primjenama s promjenjivom brzinom potrebna je kruta osovina kako bi se spriječila neuravnoteženost s promjenom brzine. Sve promjene u rotoru, slomljena poluga, promjena elektromagnetske sile potencijalno utječu na promjenu ravnoteže.

Asimetričnim zagrijavanjem rotora dolazi do toplinske neravnoteže. Svaki rotor pokazuje promjenu vibracije na prijelazu iz hladnog stanja u vruće stanje. Za određivanje toplinske neuravnoteženosti, motor treba raditi do toplinske stabilizacije i zatim izvršiti postupak mjerenja [39].

5.3. METODE MJERENJA VIBRACIJE

Vibracija sustava može se izraziti kao pomak, brzina ili ubrzanje. Općenito se analizira spektar brzina. Električni i mehanički izvori vibracija različite su frekvencije i faznog kuta tako jedna vrsta vibracije može modulirati drugu vrstu vibracije te rezultirati vibracijom s promjenjivom amplitudom i fazom. Za asinkrone motore koristi se određivanje pomaka za mjerenje vibracija osovine i brzine za mjerenje vibracija kućišta. Ovisno o problemu koji treba identificirati, uzima se jedna ili druga vibracija.

Vibracije kućišta mjere se akcelerometrima magnetno fiksiranim. Vibracije osovine mjeri se induktivnim sensorima udaljenosti. Vibracija osovine je relativna vibracija u odnosu na kućište, a vibracija kućišta je apsolutna vibracija.

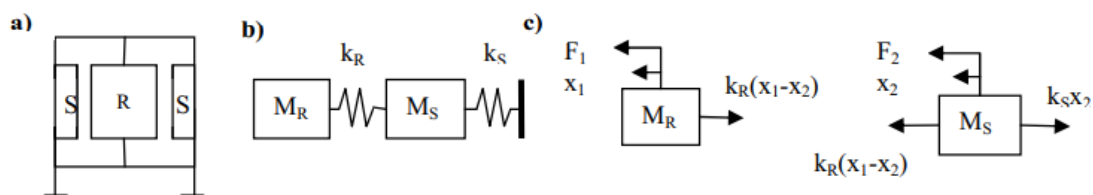
Vibracija se može izmjeriti u trenutku. Vibracijske komponente frekvencije i amplitude uspoređuju se sa ranijim mjerenjima. Dulja mjerenja vibracija od npr. 15 minuta koriste nam za analizu kojom utvrđujemo varijacije vibracija te njihove modulacije.

Za cjelokupnu analizu vibracija potrebno je prikupiti podatke u frekvencijskoj i vremenskoj domeni²⁷.

²⁷ Riječ je o matematičkim modelima o prostoru kompleksne frekvencije odnosno prostoru realnog vremena.

5.4. ANALIZA VIBRACIJA ZA OTKRIVANJE GREŠAKA

Električni motor ima dva glavna dijela, stator koji je fiksiran na kućište ili okvir i rotor koji se okreće oko osi. Pojednostavljena struktura mehaničkog modela električnog motora i ekvivalentnog sustava opružne mase prikazana je na slici 8 [38].



Slika 8: Pojednostavljena mehanička modelska struktura elektromotora (a), ekvivalentni sustav opruga-masa (b), dijagrami slobodnog tijela (c) [38]

M_R i M_S su simboli ekvivalentne mase rotora i statora. Simbol k_R predstavlja varijaciju magnetskog polja i sile između statora i rotora dok k_S predstavlja koeficijent opruge statora koji je fiksiran na okvir motora.

Iz ove pojednostavljene strukture može se promatrati modeliranje greške rotora sustava s dva stupnja slobode (slika 8b). Vibracija rotora bit će relativna u odnosu na stator. Za sustav s dva stupnja slobode mora se napisati diferencijalna jednačba za svaku masu, rotor i stator (1) [38]. Za ekvivalentni sustav opruga-masa mogu se nacrtati dijagrami slobodnog tijela i vanjske sile koje djeluju na mase (slika 8c). Jednačbe gibanja dvije mase pod vanjskim silama su:

$$\begin{aligned} M_S \frac{d^2 x_2}{dt^2} + x_2(k_S + k_R) - k_R x_1 &= F_2(t) \\ M_R \frac{d^2 x_1}{dt^2} + x_1 k_R - k_R x_2 &= F_1(t) \end{aligned} \quad (1)$$

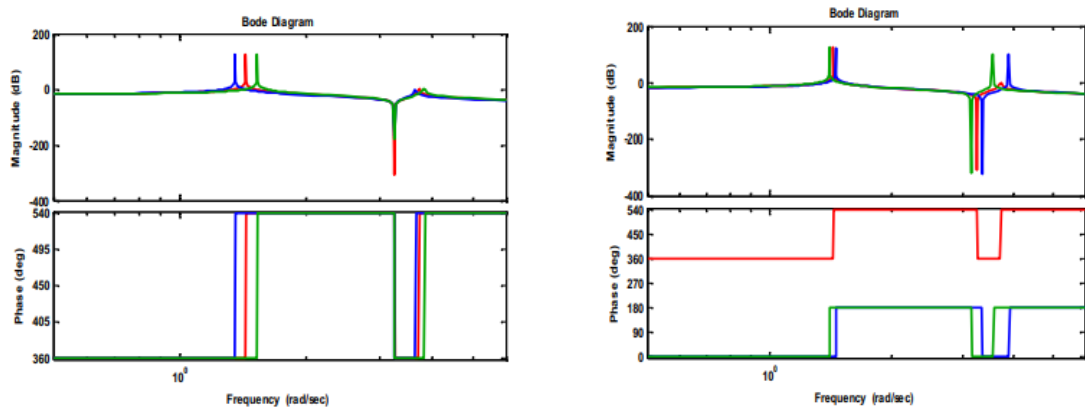
Vidljivo je da svaka jednačba sadrži varijable matematičkog prostora stanja x_1 i x_2 ili gibanja tijela. Jednačbe prostora stanja definiraju dvije nelinearne jednačbe drugog reda (1). To znači da će gibanje jedne mase utjecati na gibanje druge i obrnuto. Vanjska sila F_1

predstavlja magnetsku silu koja djeluje na rotor tijekom njegovog rada, a F_2 predstavlja silu koja se prenosi iz okoline kroz okvir motora.

Bodeov dijagram, prikazan na slici 9, je važan u analizi podataka [38].

Varijacija amplitude i faze u skladu s frekvencijom izvedene funkcije prijenosa proučavana je na Matlabu za varijaciju mase motora M_R i za varijaciju k_R . U oba slučaja dolazi do varijacije amplitude vibracijskog signala.

Slika 9a prikazuje amplitudno-kutnu frekventijsku karakteristiku i fazno-kutnu frekventijsku karakteristiku ako se M_R mijenja.



Slika 9: Bodeov dijagram za M_r (a) i k_r (b) varijaciju [38]

Slika 9b prikazuje Bodeov dijagram sustava kada se k_R mijenja. Na oba dijagrama mogu se uočiti dva vrha koji odgovaraju rezonantnoj frekvenciji masa.

U svim slučajevima praćenje amplitude i faze vibracije dovodi do identifikacije modifikacije u strukturi sustava koje može biti greška ili pogrešno funkcioniranje. Praćenje amplitude mora se izvršiti za svaku komponentu vibracijskog signala.

Također, vibracija se javlja kada je frekvencija vanjske sile jednaka frekvenciji vlastitog sustava frekvencija.

6. ZAKLJUČAK

Prediktivno održavanje je pristup održavanju koji koristi podatke i analitiku kako bi se predvidjeli budući kvarovi ili oštećenja opreme. Takva strategija u održavanju koristi senzore, uređaje za praćenje i analitičke alate kako bi se pratila performansa motora i identificirali potencijalni problemi. U tom kontekstu prediktivno održavanje omogućava održavanje prije kvara, što rezultira smanjenim troškovima popravka, smanjenjem zastoja i povećanjem raspoloživosti opreme. Značajno je također jer smanjuje i vrijeme koje brod provodi na remontu te omogućuje planiranje i prilagođavanje tog vremena u skladu s primjerice odmorima pomoraca.

Kako bi se poboljšale mogućnosti ovakvog pristupa, sve više se nastoji implementirati umjetna inteligencija, posebice korištena na neuronskim mrežama čime bi se omogućilo bolje analitičko pregledavanje velikog broja povratnih signala. To se posebice odnosi iz primjera ovog rada na vibracije motora i na taj način rješava pitanje održavanja na ekonomičan, pravovremen i uspješan način.

Senzori na motoru broda mogu pratiti različite parametre kao što su temperatura, tlak, brzina vrtnje, vibracije i druge relevantne vrijednosti. Ti podaci se potom prikupljaju i analiziraju uz pomoć naprednih algoritama neuronskih mreža te primjenom tehnika strojnog učenja ostvaruje se pravovremena i učinkovita identifikacija odstupanja koji ukazuju na potencijalne kvarove ili nepravilnosti.

Za cijelu problematiku trebaju izuzetna znanja pogona, znanja iz tehničkih znanosti, prirodoslovno matematičkih znanja, podatkovne baze te jaka računala za procesiranje što je sve skupa veliki problem za brodarku. Posljedično, oni se rijetko odlučuju takve sustave održavanja. No za razvoj autonomnih sustava u brodarstvu neizostavno trebaju takvi preduvjeti. Ono što današnji brodari mogu pomoći je ugradnja sustava koji pridonose sveobuhvatnom sinkroniziranom mjerenju potrebnih različitih signala.

LITERATURA

- [1] Lan, F.; Jiang, Y.; Wang, H.Y., Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine, In Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Applied Mathematics, Modeling and Simulation, 20–21, IOP Publishing: Bristol, UK, 2020; Volume 1670, Shanghai, China, 2020.
- [2] Volponi, A.J.; Brotherton, T.; Luppold, R.; Simon, D.L, Development of an Information Fusion System for Engine Diagnostics and Health Management, In Proceedings of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, 20–22, Chicago, US, 2004.
- [3] Lee, J.; Wu, F.; Zhao, W.; Ghaffari, M.; Liao, L.; Siegel, D., Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications, *Mech. Syst. Signal. Pr.*, 42, 2014.
- [4] Zhang, P.; Gao, Z.; Cao, L.; Dong, F.; Zou, Y.; Wang, K.; Zhang, Y.; Sun, P., Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy, *Machines* 2022, 10, 72, 2022.
- [5] Shafiee, M., Maintenance strategy selection problem: An MCDM overview, *J. Qual. Maint. Eng*, 21, 2015.
- [6] Arunraj, N.S.; Maiti, J., Risk-based maintenance—Techniques and applications. *J. Hazard. Mater*, 142, 2007.
- [7] Blache, K.M.; Shrivastava, A.B., Reliability and Maintainability of Machinery and Equipment for Effective Maintenance, SAE Technical Paper 930569, SAE International, volume 1, Warrendale, USA, 1993.
- [8] Pickthorne, M. International safety management code, *Uporedno Pomor. Pravo = Comp. Marit. Law*, 38, 1994.
- [9] Lazakis, I.; Raptodimos, Y.; Varelas, T., Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks, *Ocean Eng*, 152, 2018.
- [10] Selvik, J.; Scarf, P.; Aven, T., An extended methodology for risk-based inspection planning, *Reliab. Theory Appl.* 6, 2011.
- [11] Lazakis, I.; Turan, O.; Aksu, S.; Incecik A., Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy, *Ships Offshore Struc*, 6, 2011.

- [12] Conachey, R.M., ABS Technical Papers 2005 Development of Machinery Survey Requirements Based on Reliability-Centered Maintenance, 2014., <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.432.8321&rep=rep1&type=pdf> (20.08.2023.)
- [13] Baliwangi, L.; Ishida, K.; Arima, H.; Artana, K.B., Optimizing Ship Machinery Maintenance Scheduling Through Risk Analysis and Life Cycle Cost Analysis, In Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering, Volume 3, Hamburg, Germany, 2006.
- [14] Iung, B.; Levrat, E.; Marquez, A.C.; Erbe, H., Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms, *Annu. Rev. Control*, 33, 2009.
- [15] Muller, A.; Marquez, A.C.; Iung, B., On the concept of e-maintenance: Review and current research, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 93, 2008.
- [16] Abbas, M.; Shafiee, M, An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments, *Mar. Struct.*, 71, 2020.
- [17] Mulford, E.; Carrasquilla, J.; Moreno, G., Proactive Maintenance in the Azimuth Marine Propulsion: SCHOTTEL Condition Monitoring Solutions, In Proceedings of the VI International Ship Design & Naval Engineering Congress (CIDIN) and XXVI Pan-American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL), Cartagena, Colombia, 2019.
- [18] Cheliotis, M.; Gkerekos, C.; Lazakis, I.; Theotokatos, G., A novel data condition and performance hybrid imputation method for energy efficient operations of marine systems, *Ocean Eng.*, 188, 2019.
- [19] Qu, F.M.; Liu, J.H.; Ma, Y.J.; Zang, D.; Fu, M.R., A novel wind turbine., data imputation method with multiple optimizations based on GANs, *Mech. Syst. Signal Process.* 139, 2020.
- [20] Lin, J.; Li, N.H.; Alam, M.A.; Ma, Y.Q., Data-driven missing data imputation in cluster monitoring system based on deep neural network, *Appl. Intell*, 50, 2020.
- [21] Jeon, M.; Noh, Y.; Jeon, K.; Lee, S.; Lee, I., Data gap analysis of ship and maritime data using meta learning, *Appl. Soft. Comput.* 101, 2021.
- [22] Wang, B.; Mao, Z.Z., Outlier detection based on Gaussian process with application to industrial processes, *Appl. Soft. Comput.* 76, 2019.
- [23] Li, H.; Ma, D.; Yan, Z.; Fu, J.; Zeng, M.; Bao, W., Algorithm of Vehicle's Data Cleaning and Monitoring, *J. Phys. Conf. Ser.*, 1828, 2021.

- [24] Huyghues-Beaufond, N.; Tindemans, S.; Falugi, P.; Sun, M.Y.; Strbac, G., Robust and automatic data cleansing method for short-term load forecasting of distribution feeders, *Appl. Energy*, 261, 2020.
- [25] Sun, J.; Wang, F.; Ning, S., Aircraft air conditioning system health state estimation and prediction for predictive maintenance, *Chin. J. Aeronaut*, 261, 2019.
- [26] Enchev, G.; Djagarov, E.; Grozdev, Zh., Plug and play for monitoring of electrical and non-electrical data, XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies SIELA 2018, Bourgas, Bulgaria, 2018.
- [27] Chen, C.; Patton, R.J., Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [28] Djagarov, N.; Grozdev, Zh.; Enchev, G.; Djagarova, J., Ship's Induction Motors Fault Diagnosis, XVI-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems ELMA 2019, Varna, Bulgaria, 2019.
- [29] Banov, R.; Valent, A.; Anušić, J., Neuronske mreže za početnike, Poučak, 2022.
- [30] Tačković, K.; Boras, V.; Nikolovski, S., Kratkoročno prognoziranje opterećenja primjenom modela umjetne neuronske mreže, *Energija*, 2008.
- [31] Goksu, B.; Erginer, K. E., Prediction of Ship Main Engine Failures by Artificial Neural Networks, *Journal of ETA Maritime Science*, 2020.
- [32] Bolf, N.; Jerbić, I., Primjena umjetnih neuronskih mreža pri identificiranju i vođenju procesa, *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 2006.
- [33] Xu, M., Research on CAN Bus Based Ship Automation System and System Design, 53, *Shipbuild. China* 2012.
- [34] Gougoulidis, G., The Utilization of Artificial Neural Networks in Marine Applications: An Overview, *Naval Engineers Journal*, 2018.
- [35] Beginner's Guide to Machine Vibration, Commtest Instruments Ltd., 2006.
www.commtest.com (20.09.2023.).
- [36] Apple L.S. Chan, *Vibration Measurement*, 2008.,
<https://personal.cityu.edu.hk/bsapplec/control.htm> (20.09.2023.)
- [37] Brown, P., *Fundamentals of Vibration Measurement and Analysis Explained*, Lifetime Reliability Solutions, www.lifetime-reliability.com (21.09.2023.)
- [38] Agoston, K., Fault Detection of th Electrical Motors Based on Vibration Analysis, 8th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2014, Tirgu-Mures, Romania, 2014.

[39] Finley, W.R.; Hodowanec, M.M.; Holter, W.G., An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems, Siemens Energy & Automation Inc., Paper No. PCIC-99-20

POPIS ILUSTRACIJA

POPIS SLIKA

Slika 1: Evolucija strategija održavanja u području pomorstva	3
Slika 2: Prognostička krivulja ispravnosti s naznačenim potrebama djelovanja	8
Slika 3: Dijagram pretprocesiranja podataka	9
Slika 4: Dijagram vrste greške motora	14
Slika 5: Dijagram podjele dijagnostike na asinkronom motoru	18
Slika 6: Dijagram metoda dijagnoza grešaka	20
Slika 7: Dijagram McCulloch-Pitts modela biološkog neuona	27
Slika 8: Pojednostavljena mehanička modelska struktura elektromotora (a), ekvivalentni sustav opruga-masa (b), dijagrami slobodnog tijela (c)	34
Slika 9: Bodeov dijagram za <i>Mr</i> (a) i <i>kr</i> (b) varijaciju	35