

Primjena vibro dijagnostike u održavanju industrijskih postrojenja

Vrbanac, Mateo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:307926>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



MATEO VRBANAC

**PRIMJENA VIBRO DIJAGNOSTIKE U ODRŽAVANJU INDUSTRIJSKIH
POSTROJENJA**

Diplomski rad

Pula, lipanj, 2024.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli



MATEO VRBANAC

**PRIMJENA VIBRO DIJAGNOSTIKE U ODRŽAVANJU INDUSTRIJSKIH
POSTROJENJA**

Diplomski rad

JMBAG: 9998001097, redovan student

Studijski smjer: Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Predmet: Održavanje industrijskih postrojenja II.

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

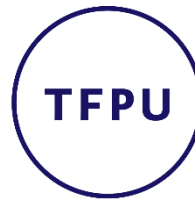
Mentor: doc. dr. sc. Jakov Batelić

Pula, lipanj, 2024.

doc. dr. sc. Jakov Batelić

(Ime i prezime nastavnika)

Održavanje industrijskih
postrojenja II.



Tehnički fakultet u Puli

(Predmet)

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

TEHNIČKI FAKULTET U PULI

ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA

Pristupniku/ci

Mateu Vrbancu

MBS: 9998001097

Studentu/ci sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za diplomski rad – tema diplomskog rada pod nazivom:

**PRIMJENA VIBRO DIJAGNOSTIKE U ODRŽAVANJU INDUSTRIJSKIH
POSTROJENJA**

Sadržaj zadatka: Potrebno je analizirati primjenu vibro dijagnostike u održavanju industrijskih postrojenja. Sukladno tome, potrebno je opisati strategije održavanja, fizikalno stanje te osnovne oblike mjerenja vibracija. Također, potrebno je navesti opremu kojom se provodi vibro dijagnostika te analizirati utjecaj vibracija na rad strojeva kao i problem povišenih vibracija kod ventilatora u industrijskom postrojenju. Provesti analizu povišenih vibracija, navesti osnovne karakteristike i način održavanja ventilatora te izvršiti proces balansiranja i usporedbe rezultata istraživanja.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

Strojarstvo/Redovni

Datum: 26. ožujka 2024.

Potpis nastavnika



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Mateo Vrbanac, kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, 27. lipnja, 2024. godine

Student



IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, Mateo Vrbanac, dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom „Primjena vibro dijagnostike u održavanju industrijskih postrojenja“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama. Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 27. lipnja 2024.

Student

Zahvala

Ovim putem želio bih se zahvaliti mentoru doc. dr. sc. Jakovu Bateliću na profesionalnom pristupu i pomoći prilikom izrade ovog rada kao i djelatnicima Rockwool Adriatic d.o.o. na ustupanju literature i podataka bez kojih ovaj rad ne bi bilo moguće napisati.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji i djevojci na ukazanom povjerenju, motivaciji i pruženoj podršci tijekom studija.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Hipoteza rada	1
1.2. Predmet istraživanja	1
1.3. Problem istraživanja	1
1.4. Ciljevi istraživanja.....	2
1.5. Metodologija istraživanja	2
1.6. Struktura rada.....	2
2. RCM STRATEGIJA ODRŽAVANJA.....	4
2.1. Komponente RCM strategije održavanja	4
2.1.1. Korektivno održavanje.....	5
2.1.2. Preventivno održavanje.....	6
2.1.3. Prediktivno održavanje	7
2.1.4. Proaktivno održavanje.....	9
3. UVOD U VIBRO DIJAGNOSTIKU.....	13
3.1. Fizikalno stanje vibracija.....	13
3.1.1. Oblici mjerenja vibracija	15
3.1.2. Frekvencija i amplituda	15
3.1.3. Frekvencija i period	16
3.1.4. Sinusni val.....	16
3.1.5. Kombinacija vibracijskih signala.....	17
3.1.6 Redovi.....	17
3.1.7 Odnos amplitude vibracija.....	18
4. OPREMA ZA VIBRO DIJAGNOSTIKU.....	20
4.1. Senzori	20

4.1.1. Senzor brzine	25
4.1.2. Senzor pomaka	26
4.1.3. Akcelerometri	28
4.2. Uređaji	29
5. ANALIZA I UTJECAJ VIBRACIJA NA NEPRAVILNOST RADA STROJEVA	32
5.1. Zupčasti prijenos	32
5.2. Klizni ležaj	35
5.3. Valjni ležaj	35
5.4. Ekscentričnost	39
5.4.1. Ekscentričnost kod remenskog prijenosa	41
5.4.2. Ekscentričnost ležaja	42
5.5. Rezonancija	43
5.6. Disbalans	44
5.7. Oslonci motora	46
6. ANALIZA PROBLEMA VENTILATORA ZONE HLAĐENJA	47
6.1. Opis problema	47
6.2. Karakteristike ventilatora	49
6.3. Balansiranje	54
6.4. Mjerenje vibracija nakon balansiranja	63
6.5. Održavanje ventilatora	64
7. ZAKLJUČAK	70
SAŽETAK	71
ABSTRACT	72
LITERATURA	73
POPIS SLIKA	74
POPIS TABLICA	76

1. UVOD

U ovom diplomskom radu opisuju se strategije održavanja, osnovni oblici vibracija, način korištenja vibro dijagnostike te analiza utjecaja vibracija na strojeve, a sve zbog mogućnosti provođenja jedne od metoda održavanja tj. radi potrebe balansiranja ventilatora.

1.1. Hipoteza rada

Polazna je hipoteza rada primjena vibro dijagnostike u industrijskom postrojenju. Potrebno je utvrditi uzrok povećanih vibracija pomoću kontinuiranog praćenja vibracija u Rockwool POP Utility programu, a zatim mjeriti trenutne vibracije te pomoću mjernog uređaja balansirati ventilator. To je potrebno odraditi na ispravan i siguran način kako bi se vibracije smanjile na dopuštenu razinu zbog povećanja efikasnosti i produljenja životnog vijeka trajanja ventilatora.

1.2. Predmet istraživanja

Predmet istraživanja rada temelji se na integraciji RCM¹ strategije i njezinih komponenata, zajedno sa primjenom vibro dijagnostike u održavanju suvremenog industrijskog postrojenja. U istraživanju se analizira utjecaj prethodno navedenih metoda na optimizaciju procesa, ali i poboljšanja sigurnosti opreme te smanjenja operativnih troškova.

1.3. Problem istraživanja

Iako primjena vibro dijagnostike u održavanju industrijskih postrojenja donosi mnoge prednosti, postoje određeni izazovi koje ta metoda uključuje. Prednosti takve metode

¹ RCM – Reliability Centered Maintenance (održavanje prema pouzdanosti)

uvelike prevladavaju njezine nedostatke, čime se potvrđuje njezina neizostavna uloga u suvremenom industrijskom postrojenju. Izazovi kakve ova metoda uključuje, većinom su lako rješivi putem stručne edukacije osoblja koje barata vibro dijagnostikom i njezinom opremom. U ovom radu će se prikazati kako se putem strateškog pristupa može maksimalno iskoristiti potencijal vibro dijagnostike u održavanju industrijskog postrojenja.

1.4. Ciljevi istraživanja

Cilj ovog rada je primjena vibro dijagnostičkih alata te razumijevanje fizikalnog stanja vibracija i njihovog utjecaja na nepravilnost rada strojeva zbog postizanja efikasnog i pouzdanog balansiranja ventilatora te smanjenja vibracija na dopuštenu razinu.

1.5. Metodologija istraživanja

Metodologija rada temelji se na istraživanju i analizi rezultata, a tijekom rada primijenjene su različite znanstvene metode zbog osiguravanja ponovljivosti odnosno uspješnosti rezultata. U radu su korištene metode poput matematičke metode, empirijske metode, metode analize i klasifikacije te metode komparacije potrebne za usporedbu rezultata dobivenih ovim istraživanjem.

1.6. Struktura rada

U uvodnom poglavlju navodi se hipoteza rada, predmet istraživanja, problem istraživanja, ciljevi istraživanja i metodologija istraživanja kako bi se čitatelja što bolje uvelo u problematiku ovog rada.

Drugo poglavlje opisuje važnost RCM strategije održavanja u industrijskom postrojenju. Također, navode se komponente održavanja kojima se provodi uspješno održavanje suvremenog industrijskog postrojenja i važnost primjene svih metoda zajedno.

Treće je poglavlje uvod u vibro dijagnostiku kojim se opisuju osnove fizikalnog stanja vibracija te oblici mjerenja i mjerne jedinice koje će biti korištene u nastavku istraživanja.

Četvrto poglavlje opisuje opremu kojom se provodi vibro dijagnostika. Tu se ubrajaju uređaji i senzori odnosno senzor brzine, senzor pomaka i akcelerometar za koje će biti objašnjen odabir i način montaže istih.

Peto poglavlje bavi se analizom i utjecajem vibracija na nepravilnost rada strojeva. To je poglavlje ključno za razumijevanje kako vibracije djeluju na pojedine komponente strojeva kako bi se moglo uspješno upravljati postrojenjem.

Šesto poglavlje bavi se analizom problema ventilatora zone hlađenja u industrijskom postrojenju. Slijedi opis problema i pregled karakteristika ventilatora radi utvrđivanja vibracija, a zatim balansiranje ventilatora i prikaz načina održavanja.

U sedmom se poglavlju navodi zaključak koji opisuje dobivene rezultate.

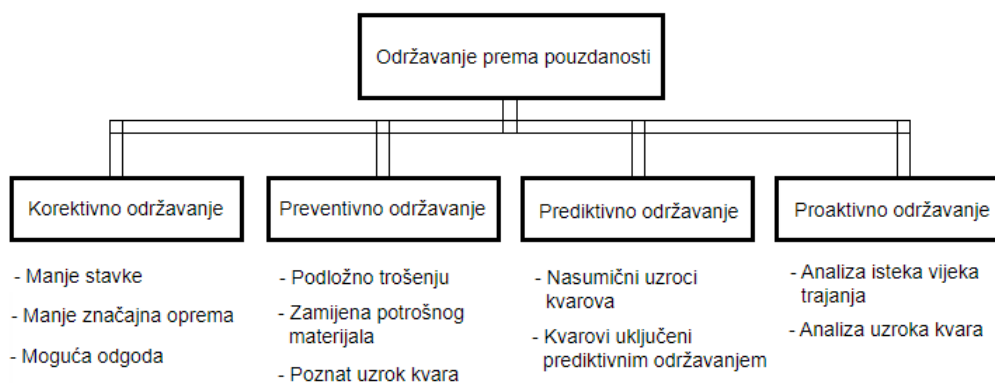
2. RCM STRATEGIJA ODRŽAVANJA

Održavanje industrijskih postrojenja kao i drugih sustava, temelji se na jednoj od strategija održavanja s ciljem osiguravanja pouzdanosti i dugotrajnosti opreme, a istovremeno minimizirajući troškove zastoja i održavanja. Odabir optimalne strategije održavanja pojedinog sustava ovisi o njezinim zahtjevima i potrebama, odnosno operativnim i ekonomskim faktorima.

Svaka od strategija teži produljenju vijeka trajanja strojne opreme te smanjenju zastoja i troškova. RCM strategija kombinacijom svih strategija traži optimum, tako da integracijom različitih komponenata ostvaruje prednost pojedinačnih snaga s ciljem povećanja efikasnosti, optimizacije opreme kao i umanjujući trošak održavanja opreme. RCM strategija zahtijeva da se odluke donesene u održavanju podupiru tehničkim, ali i ekonomskim opravdanjima uzimajući u obzir posljedice neuspjeha određenih komponenata.

2.1. Komponente RCM strategije održavanja

Održavanje prema pouzdanosti ili RCM strategija dijeli se na korektivno, preventivno, prediktivno i proaktivno održavanje. Primjenu nalazi u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji što ukazuje na njezinu pouzdanost, a u nastavku će biti detaljnije opisane njezine komponente koje ne mogu biti samostalno primjenjivane u suvremenom industrijskom postrojenju.



Slika 2.1. Komponente RCM strategije

2.1.1. Korektivno održavanje

Korektivno održavanje način je održavanja koji se još naziva i reaktivnim održavanjem ili popravkom nakon kvara. Primjenom ove metode, održavanje se odvija u trenutku prestanka rada opreme koja uzrokuje funkcionalni kvar. Takva vrsta održavanja pretpostavlja da je vjerojatnost kvara jednaka za bilo koji dio opreme ili komponente pojedinog sustava. U slučaju nastanka kvara, ako zamjenski dijelovi nisu dostupni, njihova se zamjena odgađa dok se isti dijelovi ne nabave.

Ukoliko bi se korektivno održavanje provodilo samostalno, to bi značilo visoki postotak neplanirane aktivnosti i nedovoljna iskorištenost resursa održavanja tijekom nastanka kvara što dovodi do povećanja zastoja, a samim time i troškova u proizvodnom procesu. Ovo je jedan od razloga zašto korektivno održavanje ne bi bilo dobro provoditi samostalno kao što je to navedeno kod pristupa RCM strategije održavanja.

Za razliku od preventivnog održavanja, kod ove se metode ne poduzimaju nikakve preventivne mjere za održavanje opreme prije nego dođe do kvara strojne opreme, pa će samim time i troškovi biti puno veći jer u slučaju popravka ili zamijene dijelova dolazi do većeg troška nego li je to kod preventivnog održavanja. Budući da se popravci većinom provode nakon kvara, potrebna je brža reakcija osoblja kako bi se oprema vratila u funkciju. Također, zbog toga što se oprema ne održava redovito, povećan je rizik od neočekivanog kvara koji može uzrokovati štetu na ostaloj opremi ili okolini.

Što se tiče prioriteta popravka kvara prema kriterijima baziranim za opremu, to su redom:

- hitan slučaj (onda kada dolazi do ugrožavanja sigurnosti ljudi i strojne opreme ili kod direktnog utjecaja na misiju i viziju postrojenja)
- bitan slučaj (nastavlja se proizvodnja, ali postoji mogućnost ugrožavanja operativnosti odnosno moguće su posljedice na poduzeće)
- prioriteta (u slučaju narušavanja kvalitete operativnosti)
- rutina (održivost kvalitete)
- manja važnost (kada se pažnja ne posvećuje na operativnost, već je bitna potreba za resursima)
- moguća odgoda (u slučaju normalnog funkcioniranja i bez potrebe za resursima).

Korektivno je održavanje efikasno onda kada se svjesno primijeni, te se na temelju analize, naknadno uspoređuju rizik i trošak kvara u ovisnosti s troškom potrebnim za održavanje opreme.

2.1.2. Preventivno održavanje

Preventivno je održavanje jedna od komponenti strategija održavanja, a primjenu nalazi u mnogim industrijama gdje je osnovna uloga smanjenje rizika od kvara i osiguranje pouzdanosti kako ne bi došlo do nastanka kvara, već se preventivno zamijeni određeni strojni dio.

Preventivno održavanje sastoji se od redovitih inspekcija, podešavanja, čišćenja, podmazivanja, zamijene dijelova, kalibracije te popravaka komponenti i opreme. Preventivno održavanje naziva se još i vremenski određeno održavanje odnosno održavanje na temelju intervala, a izvodi se bez obzira na stanje opreme. [2]

Najvažniji aspekt na kojem se temelji preventivno održavanje je upravo nadzor stanja opreme. Nadzor opreme omogućuje precizno praćenje i predviđanje stanja što dovodi do pravovremene intervencije prije nego dođe do nastanka kvara. Nadzor stanja opreme sastoji se od periodičnih mjerenja kojima je moguće identificirati potencijalne probleme u ranoj fazi, a time omogućujući održavanje na temelju stvarnih potreba umjesto fiksnog rasporeda.

Osim toga, primjenom statističkih metoda za određivanje vremenskih intervala između održavanja može se dobiti uvid u vjerojatnost kvara, odnosno životni vijek komponenti pa je samim time moguće preciznije preventivno planiranje održavanja prilagođeno specifičnostima opreme.

Vrlo je važno napomenuti da takav pristup može smanjiti neplanirane prekide u radu, koji u jednoj kontinuiranoj proizvodnoj liniji poput tvornice kamene vune Rockwool Adriatic d.o.o. imaju ključnu ulogu u održavanju konkurentnosti.

Prilikom razvoja strategije preventivnog održavanja postupak je moguće podijeliti u dva koraka:

- **Praćenje stanja strojne opreme** – glavni zadatak praćenja stanja opreme je identifikacija trenutnog stanja opreme te izrada analize o budućem stanju. Kako bi se to postiglo, potrebno je redovito prikupljanje podataka, a idealno je tri puta

prije predviđenog nastanka kvara. Metoda omogućava da se na temelju prva dva seta podataka definira trend, a treći set podataka služi za potvrdu identificiranog trenda. Kako bi se odredio početni interval, moguće se koristiti predviđanjem kvarova iz iskustva, statističkom distribucijom kvara ili konzervativnim pristupom odnosno nadziranjem stanja opreme jedanput tjedno ili mjesečno.

- **Provedba preventivnog održavanja** – u praksi postoji nekoliko metoda za planiranje rasporeda preventivnih intervencija, ali niti jedna nije efikasna bez znanja o pouzdanosti opreme ili sustava u vremenu. Ukoliko je riječ o novoj opremi, obično takve informacije nisu poznate pa se primjenjuje temeljita studija opreme sličnog tipa u industriji. Kako su komponente podložne trošenju, kvarovi ne nastaju nužno prema definiranom vremenskom rasporedu što uvelike otežava izradu plana preventivnog održavanja kojim bi se pravovremeno spriječili kvarovi. U tu svrhu, može se koristiti Weibullova distribucija koja nudi podatke o učestalosti kvarova kao što je npr. određivanje vijeka trajanja kod ležajeva.

2.1.3. Prediktivno održavanje

Prediktivno održavanje naziva se još i održavanjem prema stanju strojne opreme. Ono se temelji na stvarnom stanju opreme kako bi se predvidjeli potencijalni kvarovi prije nego se dogode. Strategija koristi dijagnostičke tehnike kojima se postiže praćenje parametara opreme u stvarnom vremenu, omogućavajući otkrivanje nepravilnosti koje bi mogle ukazivati na nadolazeći kvar.

Prediktivno održavanje koristi razne mjerne uređaje kojima se može utvrditi trenutno stanje opreme i organizirati potrebne korektivne mjere. Mjerenja se provode tijekom rada postrojenja i to na kritičnoj opremi. Mjerenja se isto tako mogu provoditi on-line, pri čemu je senzor trajno pričvršćen na mjesto mjerenja čime se omogućuje rana detekcija potencijalnih kvarova.

Sustav za nadzor stanja u tvornici kamene vune Rockwool Adriatic d.o.o. programiran je tako da upozori osoblje tvornice kada se premaši neka od unaprijed postavljenih granica. Ovisno o komponenti, definirane su postavke alarma na temelju stečenih iskustava ili mjerenjem određenih parametara. Alarm služi kao upozorenje na

postojanje neobične promjene pa je potrebno provesti analizu prikupljenih podataka. Redovito praćenje parametara omogućava identificiranje trendova koji predstavljaju normalne radne uvjete stroja, definirane postavkama alarma.

Metode obuhvaćene prediktivnim održavanjem su: [2]

- praćenje i analiza vibracija
- termografija
- ultrazvučno ispitivanje
- analiza trošenja i stanje maziva
- praćenje stanja električnih komponenti.

Sljedeća tablica prikazuje kojom se metodom nadzora može analizirati različita vrsta opreme.

Tablica 2.1. Primjena metode nadzora za pojedinu vrstu opreme [2]

TEHNOLOGIJA	PRIMJENA	Pumpe	Elektromotori	Diesel generatori	Kondenzatori	Teška oprema/dizalice	Prekidači	Ventili	Izmjenjivači topline	Električni sustavi	Transformatori	Spremnici, cijevi
Analiza vibracija		●	●	●		●						
Analiza goriva i maziva		●	●	●		●					●	
Analiza trošenja dijelova		●	●	●		●						
Analiza temperature ležaja		●	●	●		●						
Praćenje iskoristivosti		●	●	●	●				●		●	
Ultrazvučna detekcija buke		●	●	●	●			●	●	●	●	
Ultrazvučno ispitivanje protoka		●			●			●	●			
Termografija		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Ispitivanje bez razaranja					●				●			●
Vizualna inspekcija		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Izolacijska otpornost			●	●			●			●	●	
Analiza stanja motora			●									
Analiza strujnog kruga motora			●				●			●		
Indeks polarizacije			●	●						●		
Električno nadziranje										●	●	

2.1.4. Proaktivno održavanje

Proaktivnim se održavanjem poboljšava održavanje kroz bolje planiranje, projektiranje, instalaciju, postupke održavanja te izradu. Kako je cilj što više smanjiti ukupne kvarove, proaktivno održavanje nadopunjava prediktivno pa se osim reagiranja na moguće buduće kvarove, aktivno radi na izmjenama i poboljšanjima procesa.

Strategijom proaktivnog održavanja cilja se na produljenje trajanja opreme kao i smanjenje neplaniranih zastoja. Strategije su usmjerene na sprječavanje pojave kvarova i minimiziranje njihovih posljedica ukoliko dođe do njih.

Osnovne karakteristike proaktivnog održavanja su:

- modifikacije (promjene u projektima, remont opreme)
- praćenje stanja opreme
- analiza kvarova
- obuka osoblja
- optimizacija strategija održavanja
- kontinuirano poboljšanje procesa
- korištenje prediktivne analize.

Osim osnovnih karakteristika, proaktivno održavanje karakteriziraju tehnike koje se poduzimaju kako bi se maksimalno produžio vijek trajanja oprema, a to su:

1) Specifikacije nove/obnovljene opreme

Dizajn i izrada nove vrste opreme često ne uspijeva osigurati jednostavnost dobivanja pouzdanih podataka vezanih za stanje opreme tijekom rada. Jedna od sumnji je korištenje CAM/CAD programa koji ne zahtijevaju puno iskustva od strane korisnika, a standardi su obično nedovoljni ili obuhvaćaju općenite kriterije. Osim toga, povijest kvarova i troškovi životnog ciklusa proizvoda rijetko se dokumentiraju kada se radi o nabavi pa inženjeri moraju navesti potrebne karakteristike, testirati opremu i dokumentirati eventualne probleme. Dokumentiranje prethodno nastalih podataka kasnije omogućuje povjerljive karakteristike radi instalacije nove ili obnovljene opreme što predstavlja osnovu proaktivne analize.

2) Remont i puštanje u pogon

Pravilna instalacija opreme vrlo je bitna za kontrolu troškova, odnosno maksimalno povećanje pouzdanosti tijekom njezinog životnog ciklusa. Osoblje održavanja često se susreće s problemima zbog loše instalacije pa je zbog toga bitno implementirati opremu striktno se pridržavajući standarda. Kako teče sam proces instaliranja opreme, ona mora biti pregledana od strane osoblja iz održavanja kako bi se potvrdilo da je mehaničar obavio sve u skladu s propisanim mjerama instalacije određene opreme.

3) Analiza otkaza opreme

Analiza otkaza opreme proaktivan je pristup koji obuhvaća vizualan pregled neispranih dijelova opreme nakon njihovog uklanjanja kako bi se utvrdio glavni razlog njihovog kvara.

Ležajevi su dijelovi koji se smatraju najslabijom komponentom opreme. Većina ležaja ne ispunjava svoj predviđeni vijek trajanja, a uzrok kvara najčešće je povezan s neadekvatnom instalacijom, lošim provođenjem podmazivanja te neprimjerenim skladištenjem i manipulacijom. Nakon otkaza opreme, provodi se analiza neispravnog ležaja klasifikacijom nedostataka kao što su korozija, zamor materijala, zagrijavanje ležaja ili kontakt sa stranim česticama koji su ušli u ležaj i uzrokovali problem oštećenja poput ogrebotina.

4) Analiza osnovnih uzroka kvarova

Kada se oprema poput ležaja u industrijskom postrojenju često kvari, to se može smatrati uobičajenim za navedenu opremu. Ukoliko inženjer strojnog održavanja samo nastavi provoditi zamjenu, to će i dalje dovesti do učestalih popravaka što dovodi do visokih troškova, ali i postavljanja pitanja sigurnosti tijekom rada određenog stroja.

Analiza uzroka kvarova omogućuje otkrivanje kvarova u ranoj fazi kako ne bi došlo do nenadanog kvara opreme. Primjenom analize moguće je predviđanje kvara prije njegovog nastanka kako ne bi došlo do nepotrebnih popravaka i zastoja u radu što ima vrlo važnu ulogu u industriji koja ima jednu kontinuiranu liniju. To je analiza kojom se uzrok može riješiti učinkovito i ekonomično, a ne otklanja samo posljedicu, već i uzrok nastanka kvara i osigurava informacije kako se problem ne bi ponovio.

5) Inženjering pouzdanosti

Uz ostale metode proaktivnog održavanja, inženjerstvo pouzdanosti obuhvaća mijenjanje ili unaprjeđenje komponenata, kao i njihovu zamjenu s ostalim kvalitetnijim komponentama. [3]

U određenim je slučajevima dovoljno minimalno poboljšanje poput učestalijeg podmazivanja dok je nekad potreban potpuni redizajn pojedine komponente.

6) Kontrola vijeka trajanja

Kontrola vijeka trajanja jedna je od najvažnije komponente kada se radi o održavanju koje je usmjereno na pouzdanost. Takav pristup omogućava prilagodbu elemenata programa održavanja kako bi se postigao što efikasniji proces. Primjera radi, redoviti pregled ventilatora u industrijskom postrojenju važan je za održavanje optimalnog rada i učinkovitosti postrojenja odnosno proizvoda. Ventilator treba pregledavati u periodu ovisnom o preporuci proizvođača, a osoba tada treba detaljno pregledati mehaničke dijelove, poput ležaja ili lopatica ventilatora.

Osoba koja pregledava opremu koristi se listom procjene stanja kako bi se zabilježili eventualni znakovi trošenja, korozije ili drugih problema. Ti se podaci uspoređuju s podacima za upravljanje ventilatorom kao što su vibracije ili analiza ulja za podmazivanje mehaničkih dijelova. Ukoliko se utvrdi da su povećane vibracije, donosi se odluka o eventualnom skraćivanju intervala pregleda opreme kako bi se izbjeglo neželjeno otkazivanje ventilatora ili se može razmotriti promjena pojedinih komponenata kao i balansiranje ventilatora ukoliko je to potrebno.

Takvim se pristupom omogućuje razumijevanje degradacije opreme, a proaktivnim se održavanjem smanjuje rizik od kvara te se optimiziraju troškovi održavanja.

Kontrolom vijeka trajanja, analizira se primjenjivost aktivnosti održavanja na temelju sljedećih kriterija:

- tehnički sadržaj aktivnosti
- interval izvođenja zadataka
- grupiranje zadataka.

7) Kontrola učestalosti kvarova

Kontrola učestalosti kvarova nudi metodički pristup korištenja analize potrebne za uklanjanje problema s ponavljajućim kvarovima.

Ponavljajući kvar se opisuje kao stalan neuspjeh sustava, podsustava ili pojedine komponente da izvrši željenu funkciju, a to su:

- učestali kvar pojedinog komada opreme
- ponavljajući kvarovi unutar određenog sustava
- kvarovi iste ili slične komponente u različitim sustavima.

Kako bi se analizirali ponavljajući kvarovi, potrebno je:

- sustavno rješavanje kvarova na sustavu, komponentama i opremi
- analiza i procjena kvara
- učinkovito upravljanje resursima kako bi se otkrili i otklonili najveći najrizičniji kvarovi.

Kako bi se najbolje provela analiza ponovljivosti kvarova potrebno je analizirati problem i otkriti njegov uzrok, definirati prioritete i raspodjelu resursa, preporučiti korektivne akcije održavanja, nadzirati radne parametre opreme te identificirati ponovljivost otkaza komponenata.

3. UVOD U VIBRO DIJAGNOSTIKU

Vibracija je periodično kretanje odnosno kretanje koje se ponavlja nakon određenog vremenskog intervala. Takav se vremenski interval naziva još i period vibracije. Vibracije se opisuju pomoću amplitude, frekvencije i perioda, a osim njih, u nastavku ovog poglavlja bit će opisani i oblici mjerenja vibracija, sinusni val, redovi te kombinacija vibracijskih signala.

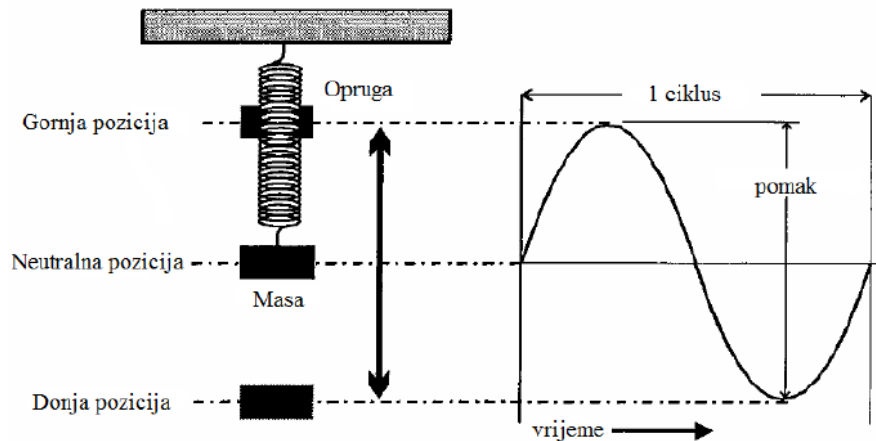
Vibracije su prisutne u svakodnevnom životu u okruženjima i sustavima i to od malih mehaničkih uređaja do velikih građevinskih konstrukcija i industrijskih postrojenja. Isto tako imaju različiti utjecaj poput onih korisnih kao što je generiranje zvuka na glazbenim instrumentima, do onih neželjenih kao što je oštećenje stroja. U industrijskom postrojenju, kontrola vibro dijagnostike vrlo je važna zbog očuvanja stabilnosti, značajki te sigurnosti strojeva i ljudi koji rade u takvom okruženju. Osim toga, vibro dijagnostikom se postiže povećanje produktivnosti, a smanjuju troškovi jer je identificiranjem i rješavanjem problema na vrijeme moguće postići smanjenje troškova popravaka, zamjene opreme, ali i vremena proizvodnje sirovine u industrijskom postrojenju. Također, smanjenjem vibracija produžava se životni vijek opreme i smanjuje potrošnja energije.

Praćenje vibracija može pomoći u predviđanju potrebnih održavanja i servisiranja opreme, poput otkrivanja ranih znakova trošenja ili oštećenja dijelova, što omogućuje planiranje održavanja i izbjegavanje neočekivanog zastoja proizvodnje koje je ključno kod proizvodnje u kontinuiranom proizvodnom pogonu.

3.1. Fizikalno stanje vibracija

Kretanje mehaničkih komponenti strojeva proizlazi iz djelovanja unutrašnjih i vanjskih sila. Unutrašnje sile su sile poput disbalansa i ekscentričnosti, a nastaju unutar strojeva. S druge strane, prisutne su vanjske sile koje utječu na rad strojeva izazivajući njihovo osciliranje pa je potrebno razumijevanje ovih sila radi održavanja stabilnosti i učinkovitosti strojeva pri različitim uvjetima rada.

Sljedeća slika predstavlja strojni dio kombinacijom mase i opruge. Naime, ako oscilirajuća sila poput disbalansa utječe na masu, rezultat će biti oscilacija gore dolje oko neutralne točke mirovanja.



Slika 3.1. Strojni dio - prikaz mase i opruge [5]

Primjera radi, ako se olovka postavi na oscilirajuću masu, povlačenjem papira konstantnom brzinom dobiva se sinusoida odnosno idealan sinusoidalni val. Takav je sinusoidalni val rezultat položaja mase u vremenu. Ukupna udaljenost prelaska mase je upravo udaljenost između najniže i najviše točke u prethodnom primjeru. Upravo ovo demonstrira kako mjerenje precizno opisuje događaje na stvarnom strojnom dijelu.

Struktura vibrira samo pod djelovanjem sile, a kada se ona ukloni, vibracija počinje opadati zbog trenja sve do postizanja nule u neutralnom položaju. Veličina vibracije odnosno amplituda, proporcionalna je sili koja na nju djeluje, tj. što je veća sila, to će biti veća vibracija.

Tri su osnovna tipa sile od kojih svaka izaziva različitu reakciju na stroju, a to su udarna, periodička i slučajna sila. Udarna sila je poput labavih dijelova koji udaraju u cjevovod ili kotrljajućih elemenata u ležaju. Periodička sila je sila koja se ponavlja poput disbalansa i ekscentričnosti. Slučajna sila varira s vremenom kao što je turbulencija u cjevovodu ili kavitacija pumpe i slično. [1]

3.1.1. Oblici mjerenja vibracija

Promatrajući tip mjerenja, vibracije se mogu podijeliti na tri osnovna oblika, a to su brzina, akceleracija i pomak.

Brzina se može definirati kao vremenska stopa promjene pomaka, a obično se izražava u m/s. Brzina je zapravo opis koliko se brzo pojedina komponenta vibracije kreće, umjesto koliko daleko, kao što to opisuje pomak. Brzina je korisna za otkrivanje problema vibracija prilikom umjerenih brzina vrtnje kao što su labavost, ekscentričnost ili disbalans. U većini slučajeva, vršne vrijednosti brzine koriste se podacima o vibracijama između 0 i 1000 Hz koji su dobiveni u frekvencijskoj domeni.

Akceleracija je definirana kao vremenska stopa promjene brzine, a izražava se u m/s^2 . Vibracijske frekvencije iznad 1000 Hz trebale bi biti izražene kao akceleracija. Također, važan je alat za analizu rotacijske opreme i korisna u otkrivanju ranog oštećenja ležaja i prijenosnika snage poput reduktora.

Pomak je promjena položaja odnosno udaljenosti u odnosu na referentnu točku, a mjerna jedinica je milimetar, dok se u praksi često koristi μm , jer već prilikom malog pomaka može doći do oštećenja primjerice osovine u rukavcu ležaja. To može biti aksijalno ili radijalno kretanje osovine u odnosu na središnju liniju, koristeći kućište stroja kao referencu. Podaci dobiveni mjerenjem pomaka osovine dobiveni od strane senzora najčešće su izraženi u navedenoj mjernoj jedinici za pomak, koja predstavlja mjeru od vrha do vrha. Obično se primjenjuje kod mjerenja vibracija na strojevima čija je frekvencija obično ispod 10 Hz.

3.1.2. Frekvencija i amplituda

Tijekom procesa analize vibracija istražuju se elementi signala vibracija, tj. frekvencija i amplituda.

Frekvencija je pokazatelj pojavljivanja ciklusa vibracija u određenom periodu. Frekvencija na kojoj se pojavljuju vibracije upućuje na vrstu nepravilnosti. Greška na stroju može generirati značajnu frekvenciju ili njezin uzrok, a njezinim identificiranjem pri kojoj se pojavljuje vibracija moguće je utvrditi uzrok greške stroja.

Amplituda se može definirati kao veličina signala vibracija. Što je veća, to će problem biti izraženiji. Također, podložna je varijacijama ovisno o karakteristikama stroja, ali se uvijek uspoređuje s razinom vibracija zadovoljavajućeg i novog stanja stroja.

3.1.3. Frekvencija i period

Tijekom procesa analize vibracija, uobičajeno je da se umjesto perioda preferira korištenje frekvencije. Ukoliko se promatra rotor koji je u disbalansu, promatranje rotora pomoću CPM (ciklusa u minuti) ili o/min znatno je lakše nego li je to pomoću perioda (vrijeme potrebno za jedan okretaj). Za analizu i praćenje stanja strojne opreme, najčešće se koristi frekvencijska jedinica o/min zbog povezanosti rotacije osovine. Prilikom napredne analize spektra, obično se frekvencija prikazuje u ciklusima po sekundi odnosno mjernom jedinicom Hz (Hertz). Radi izbjegavanja konfuzije, najčešće se koristi samo jedna mjerna jedinica tijekom cijelog procesa analize vibracija.

Kako bi se uvidjela povezanost između o/min i Hz, koristi se sljedeća jednadžba:

$$Hz = \frac{o/min}{60} \quad (3.1.)$$

Na primjer, ukoliko se osovina stroja okreće 1000 puta u minuti, frekvencija u Hz može se izračunati tako da se okretaji podijele sa 60 što je jednako 16.67 Hz.

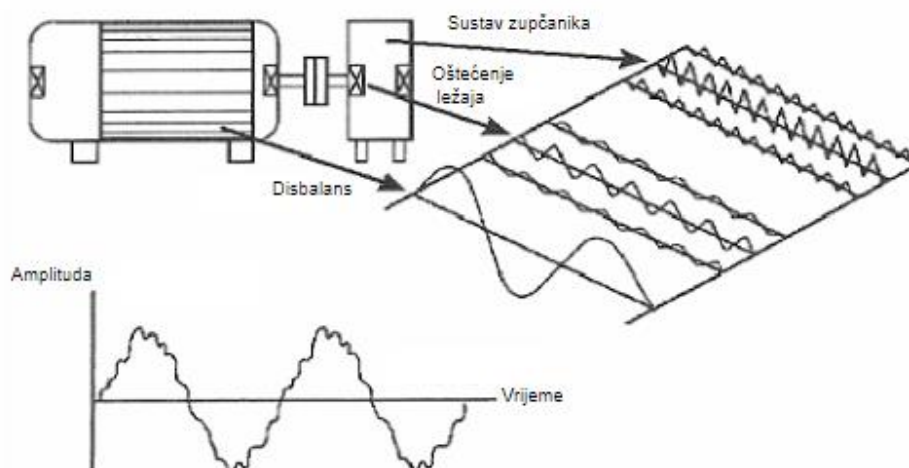
3.1.4. Sinusni val

Kada je prisutno čisto sinusoidalno gibanje, najveća amplituda ispod nulte linije jednaka je najvećoj amplitudi, odnosno vrijednosti iznad te linije. Proučavajući vibracije, potrebno je sagledati ukupan put koji primjerice osovina prijeđe unutar samog ležaja pa je iz tog razloga amplituda najčešće prikazana kao vrijednost od vrha do vrha. Promatrajući sinusoidalno gibanje počevši od početne vremenske točke odnosno nula, amplituda je isto tako jednaka nuli. Prolaskom sinusnog vala kroz pozitivni i negativni vrh te vraćanjem u početni položaj odnosno nulu, završava se jedan puni krug tj. ciklus.

Vrijeme koje protekne za dovršetak punog kruga vibracija naziva se periodom. Period ima važnu ulogu ukoliko je potrebno pronaći određeni događaj kada primjerice valjak udara ili se približava kućištu. Kada je poznato vrijeme između događaja, pronalazi se uzrok u signalu vibracije s karakterističnim periodom.

3.1.5. Kombinacija vibracijskih signala

Prilikom mjerenja vibracija na stroju, vrši se očitavanje kombinacije vibracijskih signala pomoću senzora. Svaka od komponenata generira vlastiti vibracijski signal koji se pojedinačno, a zatim i kombinacijom izvora može prikazati na sljedećoj slici.



Slika 3.2. Kombinacija izvora [1]

Signal koji nastaje kombinacijom izvora neće biti čisti sinusoidalni val, već će taj signal biti teže prikazati jer sadrži kombinaciju disbalansa, oštećenja ležaja te zahvata zupčanika. Niskofrekventni signali poput ekscentričnosti i disbalansa uzrokuju vibracijske signale pri frekvenciji jednakoj brzini vrtnje osovine, a vrlo često se za posljedicu pojavljuju više amplitude za razliku od problema poput oštećenja ležaja ili zupčanika.

3.1.6 Redovi

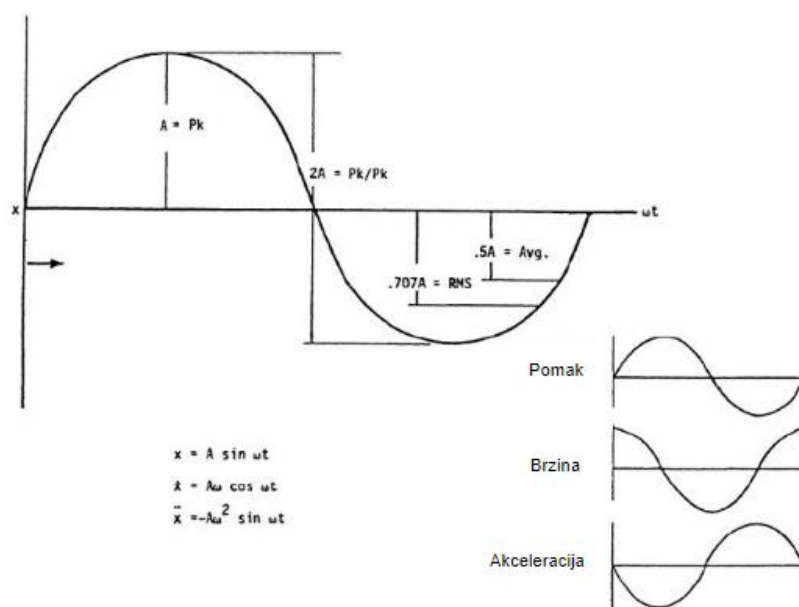
Frekvenciju je moguće izraziti pomoću bezdimenzijske vrijednosti, a to su redovi. Pomoću redova se olakšava vizualizacija povezanosti između frekvencija jer su redovi značajno manji od samih frekvencija. Primjer vibracije prvog reda može se povezati sa radnom brzinom vrtnje osovine motora koja se naziva još i osnovna frekvencija te ju je moguće označiti sa 1X.

Kao primjer, može se navesti ventilator sa šest lopatica koji je pogonjen motorom koji radi na 1750 o/min. Kada ventilator ne bi bio izbalansiran, stvarao bi vibracije na radnoj brzini od 1750 o/min. Ukoliko je tlačna strana previše zatvorena, ventilator može stvoriti pulzacije jednake broju okretaja pomnoženim sa brojem lopatica, tj. 1750×6 što bi bilo jednako 10,500 o/min. [1]

Prilikom uporabe redova, prednost je u tome što prilikom njihovog korištenja, frekvencija disbalansa za prethodni primjer, bila bi 1 za prvi red, a 6 za šesti red promatrajući frekvenciju prolaska lopatica. Osim toga, njihovom primjenom veza ostaje jednaka bez obzira na brzinu.

3.1.7 Odnos amplitude vibracija

Amplitude vibracija koje predstavljaju pomak, brzinu ili ubrzanje, imaju zajedničke elemente koji se mogu koristiti za opisivanje funkcije. Ti su zajednički elementi Peak-to-Peak, Zero-to-Peak i RMS (Root Mean Square).



Slika 3.3. Odnos amplitude vibracija [4]

Prethodna slika prikazuje krivulje vibracija tijekom vremena. Krivulje predstavljaju različite fizikalne veličine povezane s vibracijama, a to su pomak, brzina i akceleracija.

Prilikom mjerenja i usporedbe vrijednosti vibracija, važno je osigurati konzistentnost u faktorima koji utječu na omjere. Faktori koji se koriste pri mjerenjima vibracija su:

- **Peak-to-Peak** (vrh do vrha) – predstavlja ukupnu promjenu mjerenja od najviše točke (vrh) do najniže točke (dno). Pruža informacije o ukupnom rasponu vibracija i koristan je za određivanje ekstrema.
- **Zero-to-Peak** (nula do vrha) – mjerenje od nultog položaja (stanje mirovanja) do vrha krivulje (pozitivan ili negativan). Koristi se za procjenu maksimalne amplitude pomaka, brzine i akceleracije od neutralne pozicije.
- **RMS** (srednja kvadratna vrijednost) – mjera je veličine oscilirajuće količine koja se većinom koristi u tehničkim područjima poput ukupne analize vibracija ili u fizici. Korisna je jer daje uvid u prosječnu veličinu vibracija što je bitno za usporedbu intenziteta vibracija tijekom određenog perioda ili između različitih sustava.

4. OPREMA ZA VIBRO DIJAGNOSTIKU

Oprema koja se koristi u vibro dijagnostici može se podijeliti na senzore i uređaje. Senzori uključuju senzore brzine, senzore pomaka i akcelerometre, čiji se odabir temelji ovisno o brzini vrtnje stroja, vrsti stroja ili vrsti ležaja. Također, postoji nekoliko metoda montaže senzora koje se odabiru ovisno o dostupnosti pristupa ili drugim tehničkim i ekonomskim faktorima.

Senzori i uređaji omogućuju rano otkrivanje problema prije ozbiljnijih kvarova, a osim toga i skupih popravaka. Pri analizi vibracija koriste se prijenosni mjerni uređaji ili on-line sustavi.

U nastavku ovog poglavlja biti će detaljnije opisan odabir i način montaže senzora, karakteristike senzora brzine, senzora pomaka i akcelerometra kao i uređaja koji se koriste prilikom mjerenja vibracija.

4.1. Senzori

Senzori predstavljaju specijalizirane uređaje koji se koriste prilikom mjerenja i analize vibracija na strojevima. Oni pružaju mogućnost osoblju da identificira i riješi problem prije nastanka kvara odnosno zastoja i skupih popravaka.

Odabir senzora

Prilikom odabira senzora, najvažniji parametar koji je potrebno uzeti u obzir je broj okretaja osovine u određenom vremenskom razmaku. To je faktor koji direktno utječe na frekvenciju vibracija koja postavlja temelj određivanja spektralnog raspona za efikasan rad senzora zbog osiguravanja pouzdanih podataka. Općenito je poželjno da senzor pruža točne informacije, a zatim se ovisno o vrsti ležaja ili stroja odabire odgovarajući senzor.

Osim brzine okretaja osovine, tijekom odabira senzora uzimaju se u obzir:

- Vrsta ležaja – kod opreme koja koristi klizne ležajeve, dovoljno je da senzor pruža točne podatke unutar spektra do deset puta većih od temeljne

frekvencije okretaja dok je prilikom korištenja kotrljajućih ležajeva, potrebno da senzor pokriva raspon i do 40 puta veći od frekvencije okretaja. Širi raspon ukazuje na složenije vibracije kao i moguću rezonanciju koje se pojavljuju prilikom korištenja kotrljajućih ležajeva.

- Tip stroja – strojevi kao što su motori, ventilatori i turbine imaju različita dinamička svojstva pa tako motori mogu raditi na visokim okretajima i generirati vibracije visokih frekvencija dok turbine mogu generirati vibracije niskih frekvencija. Strojevi koji rade pod velikim opterećenjem podliježu većim vibracijama pa je potrebno koristiti robusnije senzore koji mogu izdržati u takvim uvjetima. Osim toga, potrebno je obratiti pozornost i na okolišne uvjete kao što su visoke temperature ili korozivna okolina gdje je potrebno koristiti senzore koji će izdržati uvjete bez degradacije njihovih karakteristika. U takvim se uvjetima najčešće koriste akcelerometri.

Sljedeća slika prikazuje vezu između pomaka, brzine i akceleracije odnosno ovisnost brzine i akceleracije kada je pomak konstantan, odnos pomaka i akceleracije ukoliko je brzina konstantna i odnos između brzine i pomaka, ukoliko je prisutna konstantna akceleracija.



Slika 4.1. Odnos između pomaka, brzine i akceleracije [6]

Brzina vrtnje osovine istaknuta je kao najvažniji faktor pri odabiru senzora pa su tako na prethodnom grafu u sredini prikazani akceleracija i pomak u funkciji brzine, a unutar linija koje se sijeku definirano je uobičajeno radno područje stroja.

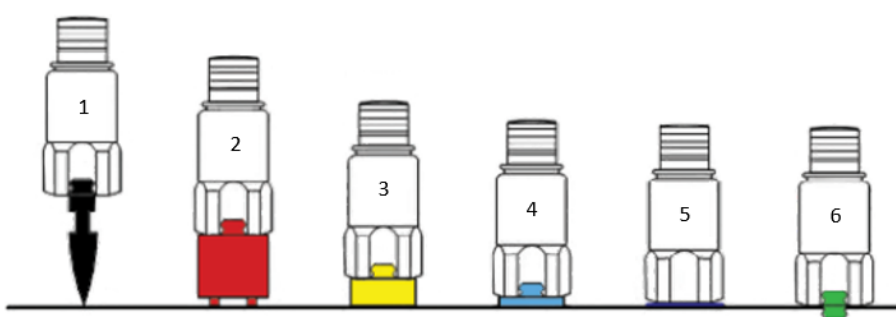
Načini montaže senzora

Odabir načina montaže senzora ovisi o nekoliko različitih faktora uključujući dostupnost pristupa površini na kojoj se senzor montira, prikladnost metode za specifičnu primjenu te ekonomske i tehničke aspekte. Važno je uvidjeti kako način montaže ima značajan utjecaj na frekvencijski odziv senzora pa je u praksi potrebno pažljivo razmotriti način montaže, kako bi senzor davao efikasne i točne podatke i detektirao frekvencijske promjene.

Mjesto montaže senzora bazira se na karakteristikama strojeva koji se nadgledaju. Dinamičke zahtjeve mjerenja poput amplitude i frekvencijskog odziva potrebno je procijeniti u odnosu na frekvencijski raspon metode montaže. Ovisno o metodi montaže, pojavljuju se odstupanja u frekvencijskom odzivu koja utječu na dobivene podatke pa je potrebno voditi računa o rezonanciji senzora u odnosu na spektar frekvencija koji je obuhvaćen mjerenjem.

Zbog osiguranja optimalnog odziva, najveća pažnja posvećuje se blizini izvora vibracija i površini kontakta, jer što je kontakt između senzora i stroja bliži, kvalitetnija je sposobnost spajanja i mjerenja visokih frekvencija.

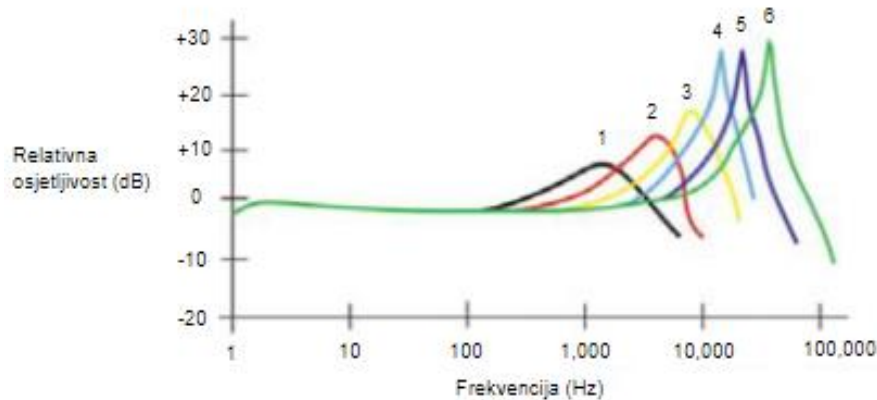
U nastavku su prikazani načini montaže senzora kao i maksimalni raspon frekvencija senzora.



	1	2	3	4	5	6
	Montažna sonda	Dvopolni magnet	Ravan magnet	Cementna pločica	Adhezivna montaža	Vijak
Maks. frekvencijski odziv	500 - 1,000 Hz	2,000 - 5,000 Hz	10,000 Hz	10,000 - 15,000 Hz	30,000 - 40,000 Hz	Maksimalan odziv senzora
	Prihvatljivo		Dobro		Najbolje	

Slika 4.2. Načini montaže senzora [7]

Osim načina montaže senzora, važno je prikazati i frekvencijski odziv koji se generira ovisno o načinu montaže pojedinog senzora.



Slika 4.3. Odziv senzora ovisno o načinu montaže [7]

1) Montaža vijkom

Montaža vijkom predstavlja najpouzdaniji način montaže jer omogućuje čvrstu i stabilnu vezu između senzora i stroja. Također, tim se načinom omogućuje postizanje maksimalnog frekvencijskog raspona koji senzor može detektirati pa se preporučuje prilikom permanentnog nadzora, testiranja visokih frekvencija i u otežanim uvjetima okoline poput prisutnosti prašine i visokih temperatura.

Senzori s izlazom na vrhu montiraju se korištenjem vijka tako da se jedna strana senzora umetne na vrh navoja, a druga u pripremljenu navojnu rupu na stroju. Prilikom montaže senzora s bočnim izlazom, koristi se vijak koji prolazi kroz tijelo senzora s navojima ispod baze koji imaju mogućnost izravnog uvrtnja u stroj.

2) Montažna pločica s cementom

Koristi se u slučaju kada mjesto koje se nadzire ne može biti bušeno. Prilikom pravilne instalacije dobiva se sposobnost mjerenja visokih frekvencija koja se približava razini montaže vijkom. Primjenu nalazi na strojevima gdje se mjeri više lokacija pomoću jednog senzora.

Takav način montaže pruža sigurno pričvršćivanje i primjenjuje se kao alternativna metoda umjesto montaže vijkom. Frekvencijski je raspon ipak smanjen jer cement apsorbira „udarce“ i smanjuje rezonanciju u usporedbi sa montažom pomoću vijka. Ipak, zamjena ili uklanjanje senzora nakon ove metode postavljanja je znatno teža nego kod drugih metoda pa je potrebno osigurati čvrstu montažu sa što manjim slojem cementa.

3) Montaža na magnetnu bazu

Magnetna baza omogućuje brzu i praktičnu montažu senzora na mjestima gdje nisu potrebne trajne izmjene na stroju, ali gdje je potreban povremeni obilazak. Zbog jednostavnosti upotrebe, magnetne su baze poželjne u slučajevima gdje je potrebno brzo postavljanje i uklanjanje senzora sa ravnih i zakrivljenih površina.

Prilikom korištenja magnetne baze, prisutan je drukčiji odziv na višim frekvencijama u usporedbi s prethodnim metodama. Kao najveći nedostatak moguće je navesti nižu rezonantnu frekvenciju, a veća masa može imati utjecaj na mjerenje laganih sustava upravo zbog opterećenja.

4) Montažna sonda

Sonda nalazi primjenu u situacijama u kojima je mjerenje potrebno obaviti na teško dostupnim lokacijama ili površinama koje nisu prikladne za standardne načine montaže senzora. Vrh sonde omogućava brzo prikupljanje podataka što je korisno prilikom mjerenja niskih frekvencija. Povezivanje sa uređajem za mjerenje vibracija ostvaruje se pomoću navoja 1/4-28 G.

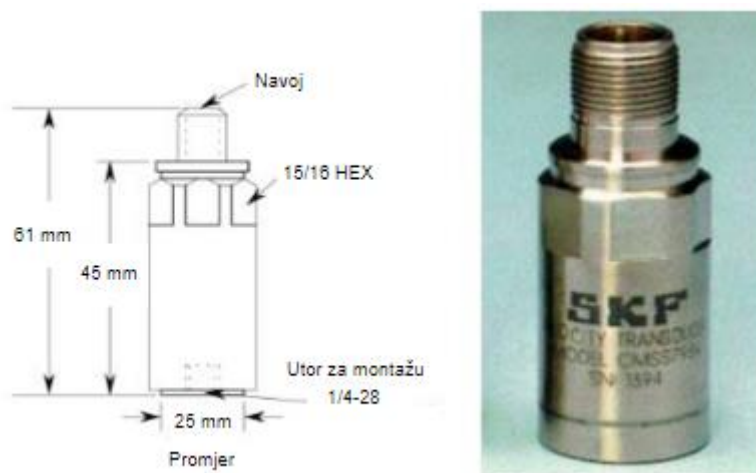
5) Adhezivna montaža

Adhezivna montaža uključuje montažu pomoću ljepila ili epoksida, a osigurava pričvršćivanje senzora bez potrebe za prevelikom prethodnom obradom površine. To je način koji ima prednost nad drugima kada se radi o situaciji gdje mehanička montaža nije moguća ili praktična, ali najveći su nedostaci ograničena temperaturna područja (do 150 °C), mogućnost montaže samo na ravne površine i smanjenje frekvencijskog raspona zbog djelovanja ljepila na način da prigušuje vibracije. [7]

4.1.1. Senzor brzine

Senzori brzina nazivaju se još i velometri, a primarna namjena im je mjerenje vibracija kućišta ležaja ili stroja. Elektronika koju posjeduje senzor omogućuje očitavanje brzine što se koristi za kontinuirani nadzor i održavanje željenog stanja stroja. Senzor brzine najčešće se koristi u nižem i srednjem frekventnom području gdje nudi pouzdane podatke.

Na slici je prikazan CMSS 793V piezoelektrični senzor brzine koji će biti detaljnije opisan u nastavku.



Slika 4.4. Senzor brzine [6]

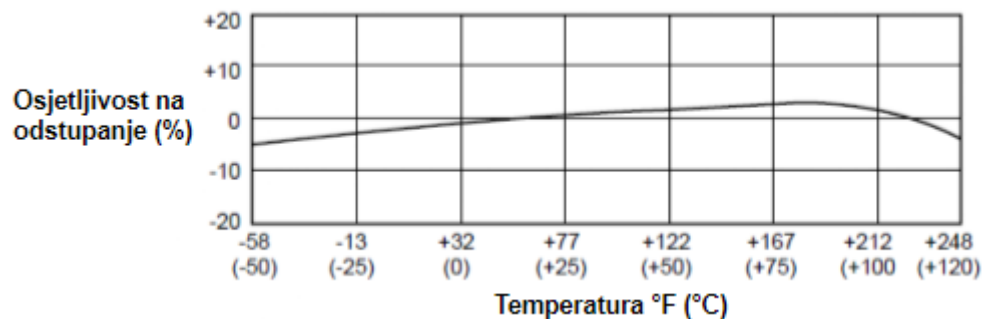
Specifikacije [6]

- Osjetljivost: $\pm 10\%$ od 3,94 (mV/mm)/sek pri 25°C
- Raspon brzine: 1,270 mm/sek
- Nelinearnost amplitude: 1%
- Frekvencijski raspon:
 - $\pm 10\%$; 2,0 – 3,500 Hz
 - ± 3 dB; 1,5 – 7,00 Hz
- Rezonantna frekvencija: 15 kHz
- Raspon temperature: -50°C do +120°C
- Težina: 145 grama
- Materijal: 316L nehrđajući čelik

- Način montaže: ¼ - 28 UNF – cijevni navoj
- Moment zatezanja pri montaži: 2,9 Nm
- Temperaturni odziv: vidljiv na grafu ispod

Navedeni senzor moguće je montirati na sljedeće načine:

- montaža vijkom
- montaža na magnetnu bazu
- montažna pločica s cementom.



Slika 4.5. Temperaturni odziv senzora brzine [6]

Slika prikazuje temperaturni odziv senzora brzine, gdje je prikazana ovisnost osjetljivosti senzora u odnosu na temperaturu. Prethodno je navedeno kako navedeni senzor ima osjetljivost $\pm 10\%$, a na slici se vidi kako je -5% pri minimalnoj radnoj temperaturi odnosno -50°C dok je $+5\%$ pri temperaturi od $+85^{\circ}\text{C}$.

4.1.2. Senzor pomaka

Senzori pomaka poznati su još i kao „eddy current probes“ odnosno senzori vrtložnih struja. To su uređaji dizajnirani za mjerenje vibracija, pozicije i zračnosti. Koriste se na mjestima gdje je potrebna preciznost i pouzdanost, a prednost im je pouzdan frekvencijski odziv u niskofrekventnom području. Postoje različite vrste odnosno induktivni senzori (eddy current), kapacitivni senzori, laserski senzori, magnetno – induktivni senzori i senzori pomaka koji rade uz pomoć „bijelog svijetla“ s mogućnošću visoko preciznog mjerenja udaljenosti i debljine.

Senzori pomaka rade na principu indukcije vrtložnih struja pa se konstrukcija senzora sastoji od namota fine žice prekrivenog izolacijskim slojem. Kroz zavojnicu prolazi visokofrekventna električna energija te se generira elektromagnetsko polje. To polje reagira na metalnu površinu u blizini pa promjena udaljenosti metalne površine i senzora označava zazor.

Sljedeća slika prikazuje induktivni senzor pomaka DT3005-S2 čije su specifikacije navedene u nastavku.



Slika 4.6. Senzor pomaka [8]

Specifikacije [8]

- Raspon mjerenja: 2 mm
- Temperaturno područje:
 - kućište (-20°C do +80°C)
 - senzor (-20°C do +125°C)
- Otpornost na pritisak: 10 bar
- Zaštita: DIN EN 60529 – IP 67
- Težina: 75 g
- Izvor napona: 24V nominalno (mogućnost 12 – 32 V)

Prethodno navedene specifikacije odnose se na navedeni induktivni senzor pomaka, dok ostali senzori pomaka mogu imati znatno različite karakteristike. U praksi se,

ovisno o potrebi, uzima senzor pomaka koji tehničkim i ekonomskim karakteristikama opravdava postavljanje na potrebno mjerno mjesto.

4.1.3. Akcelerometri

Akcelerometri su uređaji koji se koriste za mjerenje akceleracije, odnosno promjene brzine u vremenu. Piezoelektrični akcelerometri su sveprisutni u industriji, a koriste piezoelektrični kristal ili keramički element koji je opterećen masom ili oprugom. Tijekom vibracija, kristal se deformira i generira napon koji je proporcionalan sili koja na njega djeluje. Takvi senzori pružaju konstantan signal u širokom i u visoko frekventnom području, što ih čini primjenjivim u različitim vrstama vibro dijagnostike.

Ti su uređaji mali i lagani, a karakterizira ih jednostavna instalacija i mobilnost. Prednost im je također konstantan odziv kao i cijena i efikasnost.

Akcelerometar CMPT 2310 koji je prikazan na sljedećoj slici nalazi primjenu i u tvornici Rockwool Adriatic d.o.o. pa će u nastavku biti detaljnije opisan.



Slika 4.7. Akcelerometar [9]

Specifikacije [9]

- Osjetljivost: 100 mV/g
- Preciznost osjetljivosti: $\pm 10\%$ pri 24°C (-5% pri -50°C i $+5\%$ pri $+120^{\circ}\text{C}$)
- Frekvencijski raspon: ± 3 dB; 1,0 Hz – 10,0 kHz
- Rezonantna frekvencija: 18 kHz
- Izvor napona: 24 V DC nominalno (18 – 30 V DC)

- Zaštita:
 - izolirano kućište, zaštićeno s unutarnje strane
 - zaštita od previsokog napona: 18 V DC
- Temperaturno područje: -50°C do +120°C
- Težina:
 - bez kabela: 210 grama
 - s kabelom: 410 grama
- Materijal: 304 nehrđajući čelik
- Način montaže: M6 navoj ili ¼ - 28 UNF cijevni navoj
- Moment pri montaži: 6 Nm
- Povezivanje:
 - bijeli kabel (signal, napajanje), konstantno spojen na izvor napajanja
 - crni kabel (uzemljenje)
 - namotana žica (povezivanje sa uređajem)

4.2. Uređaji

Uređaji koji se koriste za mjerenje vibracija najčešće se dijele na prienosne instrumente i trajno montirane instrumente, a svaka od njih ima svoje prednosti i primjenu u industriji.

Trajno montirani instrumenti omogućuju kontinuirano praćenje stanja strojne opreme s pomoću senzora koji su pričvršćeni na opremu. To omogućuje stalan pristup podacima čime se omogućuje ranije otkrivanje kvarova, što je ključno u suvremenom industrijskom postrojenju. Očitane se vrijednosti kontinuirano prikupljaju i pohranjuju na računalo gdje se podaci mogu analizirati pomoću određenog softvera. Takvi su instrumenti ključni u današnjici kako bi se moglo prikupljati podatke i iskoristiti više vremena za njihovu analizu umjesto stalnog obilaska opreme. Također, veliku prednost nalaze u situacijama gdje je promatrana oprema na teško dostupnom ili opasnom mjestu.

Prijenosni su instrumenti fleksibilni odnosno relativno laki za korištenje, a imaju mogućnost spajanja u svaki program praćenja vibracija. Prijenosni instrumenti najčešće imaju kompaktne dimenzije kako bi uređaj bilo lako prenositi, ali i skladištiti

podatke na njemu pa tako može poslužiti kao odličan alat za periodičko održavanje po stanju. Uređaji mogu imati mogućnost izvršavanja različitih operacija poput mjerenja vibracija, temperature kao i balansiranja te grafičkog prikaza amplitude vibracija na ekranu.

Instrument kojim se mjere vibracije, ali i provode brojne druge operacije prikazan je na sljedećoj slici. Microlog MX CMXA 44 prijenosni uređaj biti će korišten tijekom postupka balansiranja, a njegove specifikacije prikazane su u nastavku.



Slika 4.8. Uređaj Microlog MX [10]

Specifikacije [10]

- Težina: 715 g
- Zaslون: ¼ VGA TFT (Thin Film Transistor) u boji
- Zaštita: IP 65 (vodootporan i otporan na prašinu)
- Radno temperaturno područje: -10°C do +50°C
- Procesor: 400 MHz Intel XScale PXA255
- Operacijski sustav: Windows CE Net v4.2
- Baterija: Li – ion

- Interna memorija: 64 Mb + SD kartica
- Ulazni signali: dva ulaza, AC/DC
- Frekvencijski raspon: 2 Hz do 40 kHz

Opisani prijenosni uređaj ima nekoliko mogućnosti poput FFT analize, testa usklađenosti, balansiranja i testa čekićem koje će biti opisane u nastavku.

Modul FFT analize koristi se za vizualizaciju i analizu vibracijskih podataka u FFT spektru odnosno identificiranje problema kao što su problemi s ležajevima i reduktorima, i detekciju disbalansa ili ekscentričnosti.

Test usklađenosti koristi se većinom prilikom preventivnog održavanja opreme omogućavajući prilagodbu korisniku prema potrebama opreme kao i povećanja preciznosti dobivenih rezultata. Ovim se modulom značajno može poboljšati pouzdanost budućih operacija.

Uz pomoć opcije balansiranja postiže se korekcija statičkog i dinamičkog disbalansa. Prilikom korištenja ove opcije, korisniku su detaljno prikazane upute koje mora slijediti. Time se postiže produljenje vijeka trajanja opreme odnosno poboljšanje karakteristika tako da se vibracije svedu na minimum.

Test čekićem je alat koji primjenjuje udarne impulse za otkrivanje pukotina te određivanje prirodne i rezonantne frekvencije. Korištenjem metode udarnog testiranja odnosno primjenom kontroliranog udarca, analizira se odziv stroja koristeći FFT analizu zbog dobivanja dinamičkih svojstava.

5. ANALIZA I UTJECAJ VIBRACIJA NA NEPRAVILNOST RADA STROJEVA

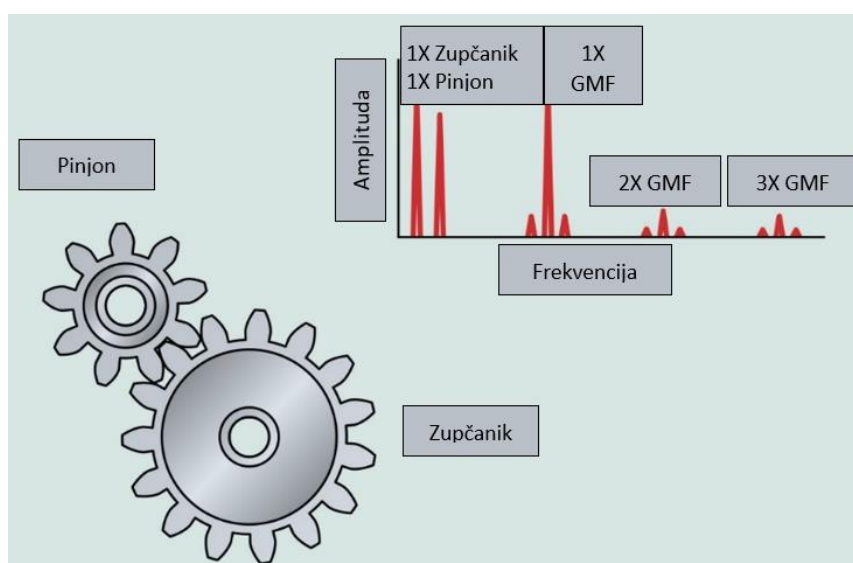
Vibracije su vrlo često neizbježne u svakoj industriji i općenito okolini te njihova pojava može značajno utjecati na efikasnost i vijek trajanja stroja. Iako su neizbježne, razumijevanje kako one utječu, ključno je kako bi se moglo provoditi kvalitetno održavanje.

U nastavku su prikazani najčešći problemi odnosno utjecaj vibracija u industriji kod zupčastog prijenosa, kliznih i valjnih ležajeva te je objašnjeno što je to ekscentričnost, rezonancija, disbalans i kako oslonci motora utječu na smanjenje vibracija.

5.1. Zupčasti prijenos

Zupčasti prijenos jedan je od sustava koji je potrebno analizirati, jer dolazi do problema sustizanja zuba, ekscentričnosti, preopterećenja pa i oštećenja istih. Određivanje vibracija odnosno frekvencije kod zupčanika zahtijeva poznavanje podataka o brzini rotacije osovine i broju zuba kod zupčanika.

Frekvencije koje se odnose na zupčasti prijenos su GMF (Gearmesh frequency), HTF (Hunting tooth frequency) i APF (Assembly phase frequency).



Slika 5.1. Normalan spektar tijekom kontakta zupčanika i pinjona [11]

Prethodna slika prikazuje normalan radni spektar tijekom kontakta zupčanika i pinjona. GMF ili frekvencija sustava zupčanika pojavljuje se u frekvencijskom spektru neovisno o stanju zupčanika, a amplituda ovisi o opterećenju kada se provodi proces mjerenja.

GMF se izračunava prema formuli:

$$GMF = Z \times o/min \quad (5.1.)$$

gdje je:

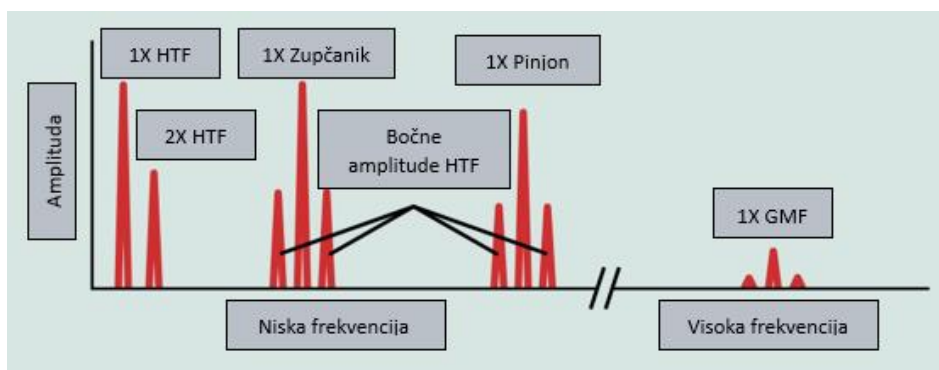
- Z – broj zuba
- o/min – brzina rotacije zupčanika

HTF ili frekvencija sustizanja zuba predstavlja frekvenciju kojom se zub zupčanika spaja sa istim zubom pinjona, a maksimalna vibracija nastati će u slučaju oštećenja, kada se dotaknu oba oštećena zuba. Takvu je frekvenciju najlakše detektirati u vremenskom spektru jer je ona u pravilu vrlo niska. HTF u određenom pogonu može biti vrijednost od jednom u deset ili dvadeset okretaja, a može se izračunati prema slijedećoj formuli:

$$HTF = \frac{GMF \times NA}{Z_p \times Z_g} \quad (5.2.)$$

gdje je:

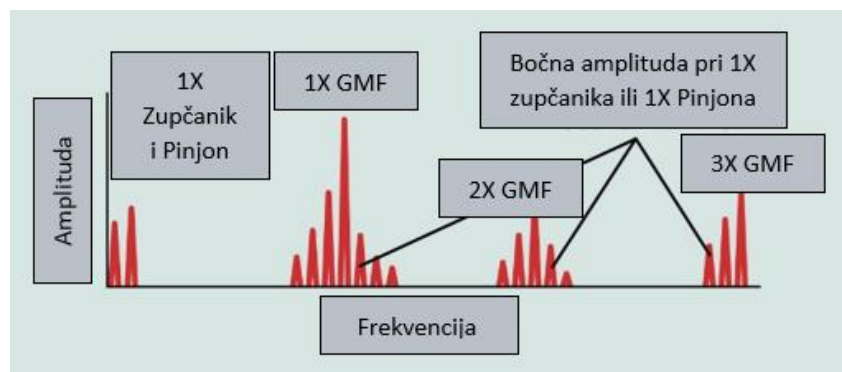
- NA – faktor faze
- Z_p – broj zuba pinjona
- Z_g – broj zuba zupčanika



Slika 5.2. HTF spektar [11]

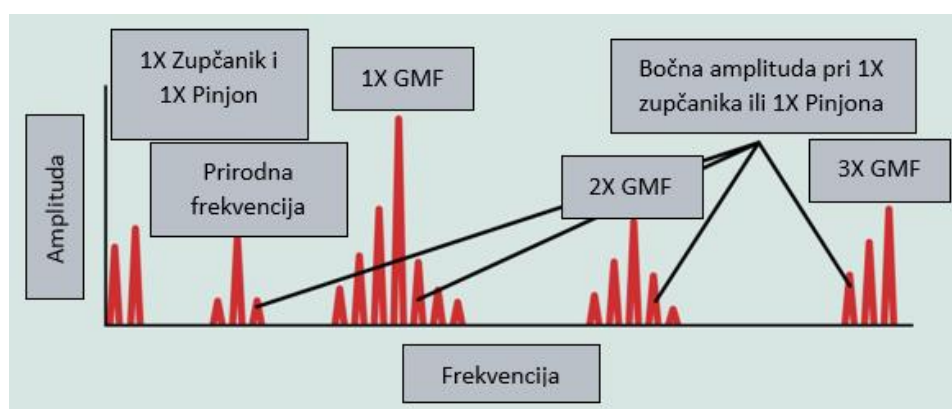
Gore navedena slika prikazuje spektar sustizanja zubi i povišene vibracije pri niskoj frekvenciji. Faktor faze N_A idealan je u slučaju vrijednosti 1 odnosno faktor faze biti će jednak 1 ukoliko zupčanik ima šest, a pinjon sedam zuba.

Ekscentričnost, ali i prazan hod i neusklađenost, mogu rezultirati visokim amplitudama što je rezultat kada zubac kod zupčanika nije u centru osi rotacije. To dovodi do povećanja amplitude vibracija od 1X, 2X i 3X GMF. Primjer ekscentričnosti zupčanika što dovodi do povišenih vibracija moguće je vidjeti na sljedećoj slici.



Slika 5.3. Ekscenričnost kod zupčastog prijenosa [11]

Osim sustizanja zuba, neporavnatih zupčanika i ekscentričnosti, česti je slučaj napuknuće ili slomljen zub. Napuknuti ili slomljen zub može uzrokovati povišenu amplitudu vibracije pri 1X o/min u vremenskoj domeni. Kada slomljen zub uđe u zahvat, uočljiv je izraženi skok, a vrijeme između skokova biti će jednako obrnutom broju o/min oštećenog zupčanika što je vidljivo na sljedećoj slici.

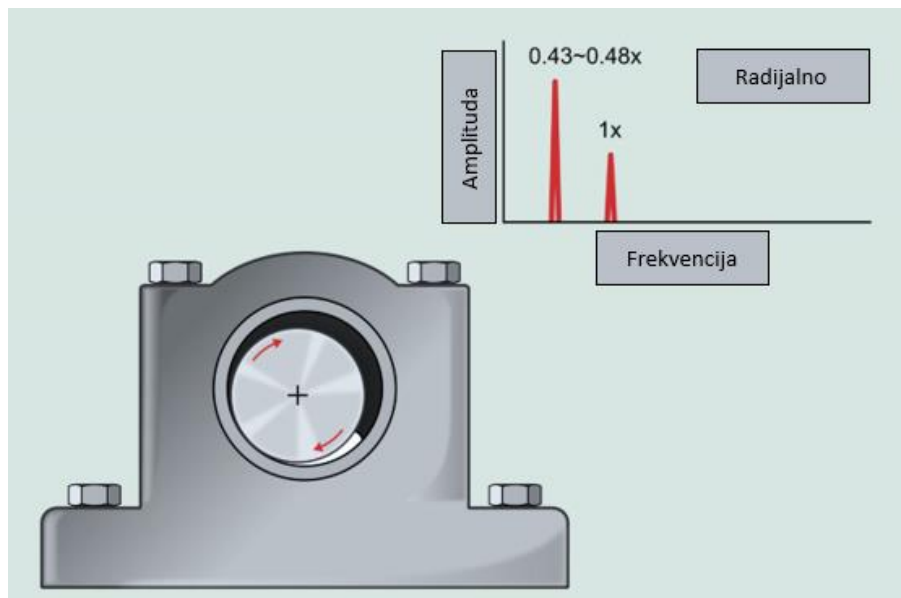


Slika 5.4. Spektralni prikaz napuknutog/slomljenog zuba [11]

5.2. Klizni ležaj

Klizni ležajevi su elementi koji imaju široku primjenu zbog mogućnosti prilagođavanja njihovog dizajna specifičnim uvjetima. Tipični problem kod takvih ležajeva odnosno u sustavima pod visokim tlakom je upravo uljni vrtlog. Vibracije koje tada nastaju u rasponu su od 0,40 – 0,48X što može rezultirati velikim kvarom, ukoliko je brzina vrtnje rotora dvostruko veća od kritične brzine izazivajući pobudu frekvencije rotora [14]. Takav fenomen se naziva uljni udar, a posljedica je gubitak sposobnosti podupiranja uljnog filma.

Uljni vrtlog i vibracije koje nastaju tijekom uljnog udara prikazane su na sljedećoj slici.

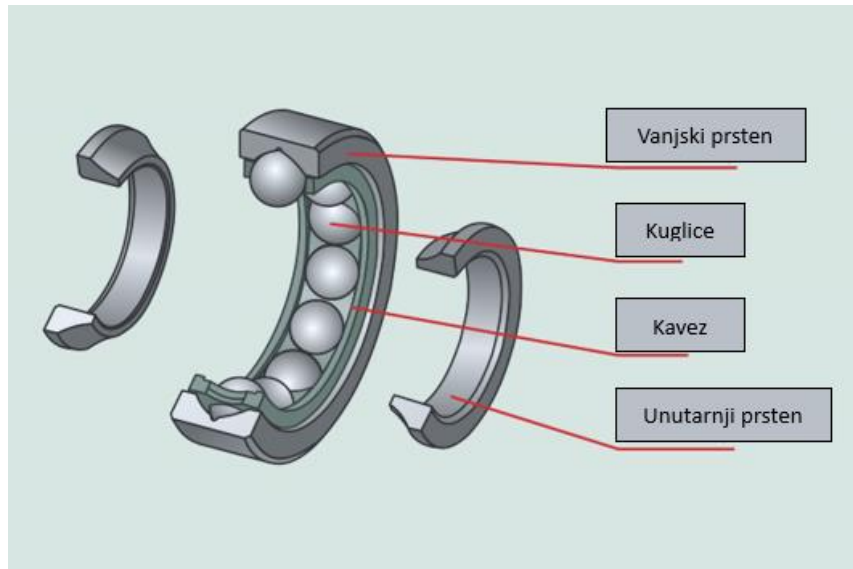


Slika 5.5. Uljni vrtlog [11]

5.3. Valjni ležaj

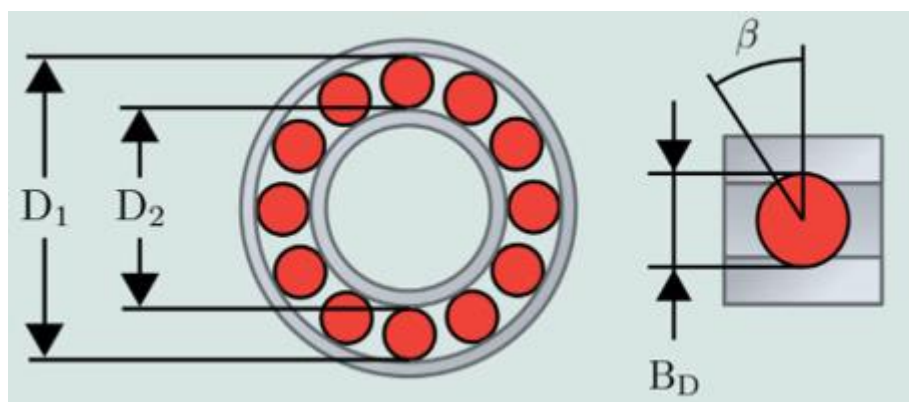
Valjni ležajevi se sastoje od nekoliko komponenata, a to su vanjski prsten, unutarnji prsten, kavez i kuglice. Oštećenje jednog od tih dijelova generirati će jednu ili više karakterističnih frekvencija u frekvencijskom spektru koje omogućuju relativno jednostavnu identifikaciju ukoliko su poznate definicije i formule BPFO (Ball Pass Frequency Outer), BPFi (Ball Pass Frequency Inner), BSF (Ball Spin Frequency) i FTF (Fundamental Train Frequency).

Na sljedećoj su slici prikazane komponente valjnih ležajeva zbog lakšeg razumijevanja problema vibracija koje će biti navedene u nastavku.



Slika 5.6. Komponente valjnih ležajeva [11]

Kod takvih je ležajeva ključno razumijevanje BPFO, BPFI, BSF i FTF kako bi se na vrijeme otkrio uzrok kvara i pristupilo jednom od strategija održavanja. Dolje navedena fotografija odnosi se na valjni ležaj s označenim mjerama D_1 , D_2 , B_D i β koje će biti primijenjene za izračun ovisno da li je riječ o oštećenju unutarnje staze, vanjske staze, kaveza ili kuglica.



Slika 5.7. Dimenzije valjnog ležaja [11]

Na gore navedenoj slici, P_D se izračunava kao $P_D = (D_1 + D_2)/2$. N_B označava broj kuglica, β je kut dodira kuglice s prstenom dok je B_D promjer kuglice.

BPFO je oštećenje vanjske staze koje odgovara broju kuglica ili valjaka koji prolaze kroz određenu točku vanjske staze svakog puta kada se osovina okrene za jedan krug, a može biti prikazano sljedećom formulom:

$$BPFO = o/min \times \frac{NB}{2} \times \left(1 - \frac{BD}{PD} \times \cos(\beta)\right) \quad (5.3.)$$

Kada je jedna od komponenti ležaja oštećena, u frekvencijskom spektru će se razlikovati osnovna amplituda od amplitude oštećenog elementa, no ukoliko takvi parametri nisu poznati, postoji empirijska formula koja omogućuje određivanje učestalosti kvarova prstena ležaja ili kaveza poznavajući samo broj kuglica i brzinu rotacije. To se može prikazati kao:

$$BPFO = 0,4 \times NB \times o/min \quad (5.4.)$$

BPFI označava oštećenje unutarnje staze. To je frekvencija koja nastane prilikom prolaska kuglica po unutarnjoj stazi, a pojavljuje se kada je prisutno oštećenje unutarnje staze. Frekvencija se može izračunati prema sljedećoj formuli:

$$BPFI = o/min \times \frac{NB}{2} \times \left(1 + \frac{BD}{PD} \times \cos(\beta)\right) \quad (5.5.)$$

Kao i kod oštećenja vanjske staze i u ovom slučaju može se odrediti učestalost kvara, ukoliko je poznat broj okretaja i broj kuglica i to kao:

$$BPFI = 0,6 \times NB \times o/min \quad (5.6.)$$

BSF ili oštećenje kuglica obično je posljedica preopterećenja, ekscentričnosti ili nedostatka podmazivanja. Većinom harmonici većih amplituda označavaju broj oštećenih kuglica unutar kaveza. Oštećenje kuglica može se prikazati sljedećom formulom:

$$BSF = o/min \times \frac{PD}{BD} \times \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \times \cos(\beta)\right)^2\right) \quad (5.7.)$$

FTF tj. oštećenje kaveza usko je povezano s oštećenjem staze. Frekvencija oštećenja staze dovodi do zbroja ili razlike frekvencija, a izračunava se prema formuli:

$$FTF = o/min \times \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{BD}{PD} \times \cos(\beta)\right) \quad (5.8.)$$

Kao i u prethodnim slučajevima, oštećenje kaveza može se empirijski odrediti kada je frekvencijski spektar nepoznat, samo uz poznavanje broja okretaja i to sljedećom formulom:

$$FTF = 0,4 \times o/min \quad (5.9.)$$

Osim oštećenja unutarnje staze, vanjske staze, kuglica i kaveza, kod valjnih ležajeva mogu nastati problemi poput labavosti, ekscentričnosti ili neadekvatnog podmazivanja. Kvarovi ležajeva mogu se promatrati kroz četiri stadija.

U prvom stadiju ležaj nema nikakvih oštećenja pa će analiza pokazati samo osnovnu rotacijsku frekvenciju ležaja i eventualno neke njene harmonike. Najraniji pokazatelji oštećenja mogu se otkriti pri ultrazvučnim frekvencijama.

Drugi stadij obuhvaća vibracijska očitavanja pri visokim frekvencijama što označava pogoršanje stanja ležaja. Takva se mjerenja postižu mjerenjem akceleracije u rasponu od 1 kHz do 20 kHz.

Tijekom trećeg stadija dolazi do pojave frekvencija i harmonika zbog oštećenja ležajeva. Kako oštećenje napreduje, pojavljuju se karakteristične frekvencije kvara kao što su BPFO, BPFI, BSF ili FTF. Amplitude takvih ležajeva u pravilu rastu pa je praćenjem promjena potrebno planirati zamjenu ležaja prije nego dođe do ozbiljnijeg kvara.

U zadnjoj fazi postaje vidljiv pozadinski šum dok amplituda osnovne rotacijske frekvencije od 1X sve više raste i dolazi do izražaja. Pojedine se frekvencije smanjuju ili nestaju jer ih zamjenjuju slučajni visokofrekventni šumovi.

5.4. Ekscentričnost

Ekscentričnost je jedan od najčešćih problema vibracija kod rotirajuće opreme, a posljedica može biti nemogućnost poravnanja dvaju rotora. Ekscentričnost se javlja u raznim slučajevima, a dijeli se na kutnu i paralelnu. Osim te dvije osnovne vrste, prisutna je još i ekscentričnost rotora, razne vrste ekscentričnosti kod remenskog prijenosa, ekscentričnost ležaja i ekscentričnost kod zupčastog prijenosa koja je opisana u poglavlju 5.1. U nastavku će biti opisane najčešće vrste ekscentričnosti.

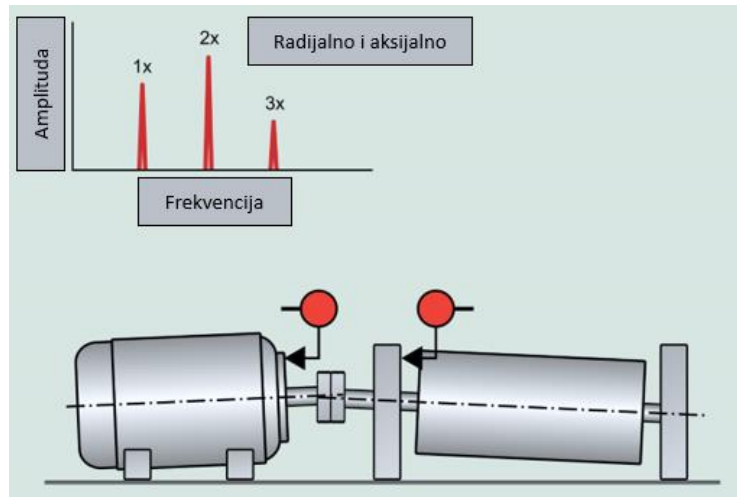
1) Kutna ekscentričnost

Kutna je ekscentričnost prisutna kada su središnje linije vratila jedna u odnosu na drugu razmaknute pod određenim kutom. Tada se pojavljuju visoke aksijalne vibracije pri 1X brzine što je karakteristično za kutnu ekscentričnost, a može biti popraćeno sa harmonicima brzine rotacije vratila s niskim amplitudama.

Karakteristike kutne ekscentričnosti [11]:

- visoke vibracije pri 1X brzine
- harmonici u aksijalnom smjeru pri 1X i 2X
- vibracije u radijalnom smjeru sa manjim amplitudama – 1X, 2X i 3X
- aksijalna fazna mjerenja sa obje strane spojke, fazno su pomaknuta za 180°.

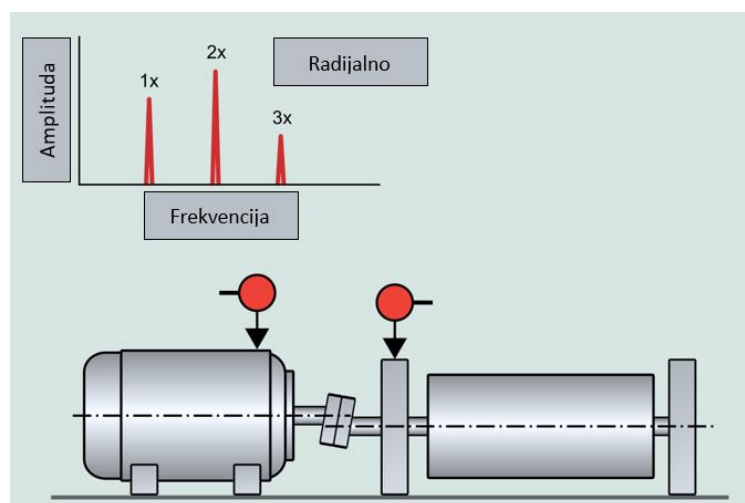
Na slici ispod prikazana je kutna ekscentričnost zajedno sa grafom ovisnosti amplitude i frekvencije.



Slika 5.8. Kutna ekscentričnost [11]

2) Paralelna ekscentričnost

Paralelnu ekscentričnost karakteriziraju dva vratila koja su paralelna i udaljena za određenu vrijednost. Paralelna ekscentričnost može biti vertikalna ili horizontalna. U pravilu, simptomi su slični kao i kod kutne ekscentričnosti, ali dolazi do povišenih radijalnih vibracija pri 180° izvan faze uzduž spojke. Sljedeća slika prikazuje opisanu paralelnu ekscentričnost.



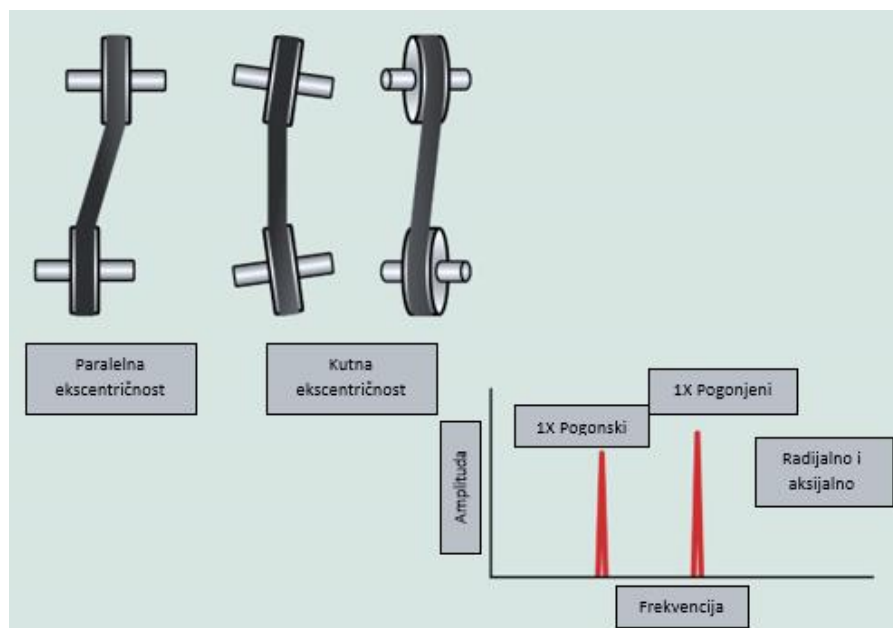
Slika 5.9. Paralelna ekscentričnost [11]

Kod paralelne su ekscentričnosti prisutne radijalne vibracije na 1X brzine sa 2X i 3X harmonicima. Također, 2X harmonik može doseći vrijednost veću ili jednaku od 1X.

5.4.1. Ekscentričnost kod remenskog prijenosa

U remenskom su prijenosu najčešći problemi ekscentričnost remenica i ekscentričnost remena dok je moguća i prisutnost rezonancije.

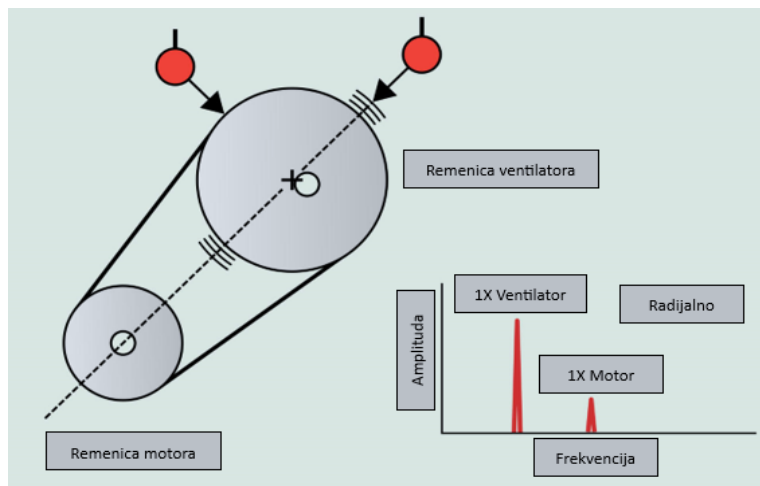
Ekscentričnost remenica smatra se problemom kada remenice nisu postavljene u istoj ravnini što rezultira visokim aksijalnim vibracijama na 1X brzine kod pogonskog, a većinom pogonjenog sustava. Osim ekscentričnosti, vibracije se kod remenskog prijenosa pojavljuju kada su remenice istrošene pa je važno kontinuirano provjeravati njihovo stanje. [11]



Slika 5.10. Ekscentričnost remenica [11]

Gore navedena slika prikazuje primjer paralelne i kutne ekscentričnosti remenica. Vibracije u aksijalnom smjeru znatno su više od onih u radijalnom smjeru pa je posljedično tome, prisutno neujednačeno trošenje remena i remenica u aksijalnom smjeru. Problem ekscentričnosti kod remena može se usporediti s disbalansom, ali s povišenom amplitudom vibracija na frekvenciji okretaja remenice u radijalnom smjeru. Prilikom utvrđivanja disbalansa problem je moguće ispraviti postupkom balansiranja.

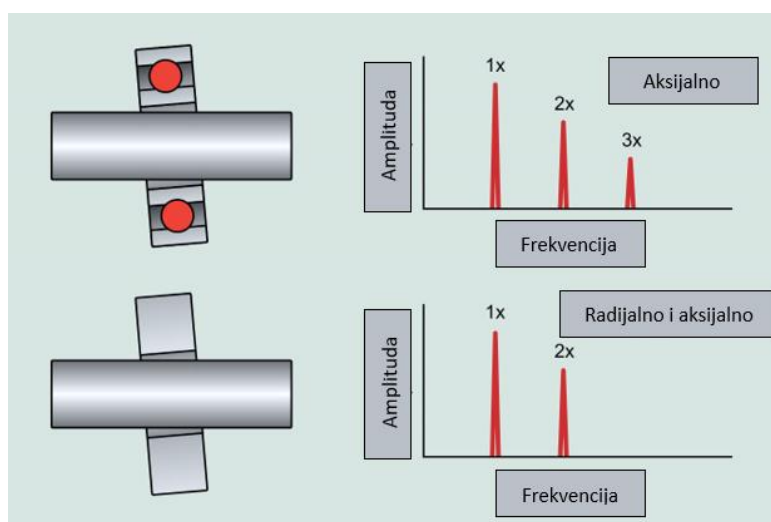
Ekscentričnost ipak ovisi o opterećenju pa ukoliko je opterećenje promjenjivo, tada su vibracije sklone povećanju čak i nakon balansiranja odnosno umetanja podloške ispod vijka zateznog konusa. Takva se ekscentričnost može prikazati sljedećom slikom.



Slika 5.11. Ekscentričnost remena [11]

5.4.2. Ekscentričnost ležaja

Ekscentričnost ležaja često nastaje zbog nepravilne instalacije odnosno nepravilnog poravnjanja, ali bez obzira na to, može doći do ekscentričnosti ležaja. Posljedica ekscentričnosti ležaja može biti neravna ploča temelja pa će se zatezanjem vijaka, također prouzročiti ekscentričnost. Osim toga, vrlo je bitna krutost konstrukcije što će biti više objašnjeno u poglavlju 5.7.



Slika 5.12. Ekscentričnost ležaja [11]

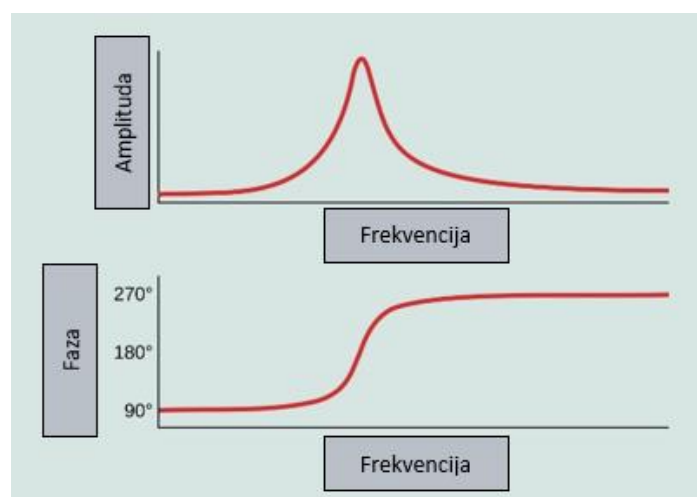
Prethodna slika prikazuje ekscentričnost ležaja zajedno sa grafovima vibracija. Vibracije se kod ležaja mogu pojaviti na 1X, 2X i 3X brzine ili množenjem brzine rotacije sa brojem kuglica kao što je to objašnjeno u poglavlju o valjnim ležajevima. Harmonici od 2X u aksijalnom smjeru mogu doseći vrijednosti od 1X.

5.5. Rezonancija

Rezonantna frekvencija sustava je frekvencija sa sklonošću vibriranja. Svaki pojedini sustav ima jednu ili nekoliko prirodnih frekvencija, a njezinim poticanjem dolazi do osjetnog povećanja vibracija. Formula kojom se određuje prirodna frekvencija je [15]:

$$FN = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (5.10.)$$

gdje m predstavlja masu, a K krutost. Iz formule je moguće zaključiti da ukoliko se masa povećava, prirodna će se frekvencija smanjiti, ali ukoliko se krutost povećava, porasti će i prirodna frekvencija. Primjer rezonancije prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 5.13. Rezonancija [11]

Prirodnu se frekvenciju ne može eliminirati, ali se njezin učinak može smanjiti tako da se smanji ili eliminira sila poticanja frekvencije što se postiže balansiranjem, zamjenom

istrošenih dijelova i sl. Ukoliko je dopušteno, to se može postići promjenom brzine rotacije sustava, dodavanjem prigušenja (anti vibracijski oslonci) ili izoliranjem sustava kako bi se izbjegao kontakt sa drugom osjetljivijom opremom. Uglavnom, cilj je odvojiti radnu frekvenciju od prirodne minimalno $\pm 20\%$.

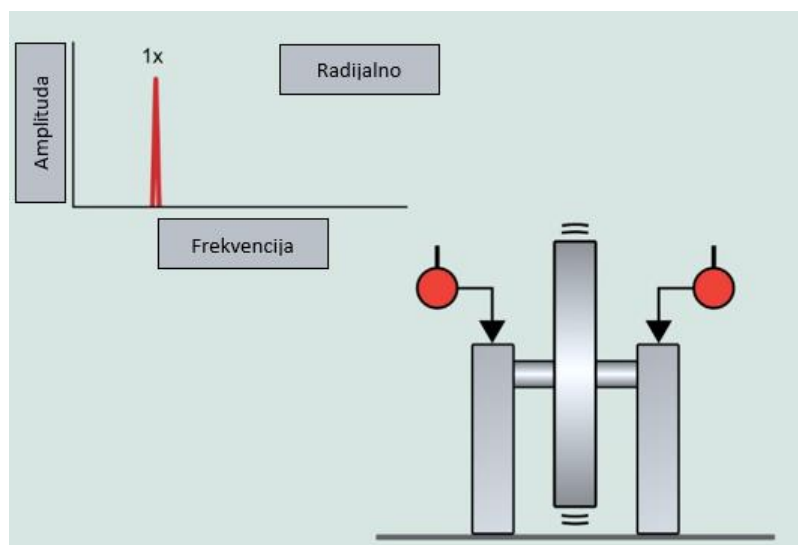
5.6. Disbalans

Postoje dvije osnovne vrste disbalansa, a to su statički i spregnuti disbalans. Njihova je kombinacija dinamički disbalans koji je najčešće prisutan u praksi. Osim statičkog i spregnutog disbalansa, u nastavku će biti opisan još i disbalans ovješnog rotora.

1) Statički disbalans

Statički disbalans je problem koji se relativno lako dijagnosticira, a obično je posljedica nejednolikog radijalnog trošenja rotora. Posljedica toga je centrifugalna sila koja prouzrokuje pomak osi rotacije. Statički disbalans stvara sinusoidalni val pa će spektar prikazivati vibracije s frekvencijom jednakom 1X brzine rotora.

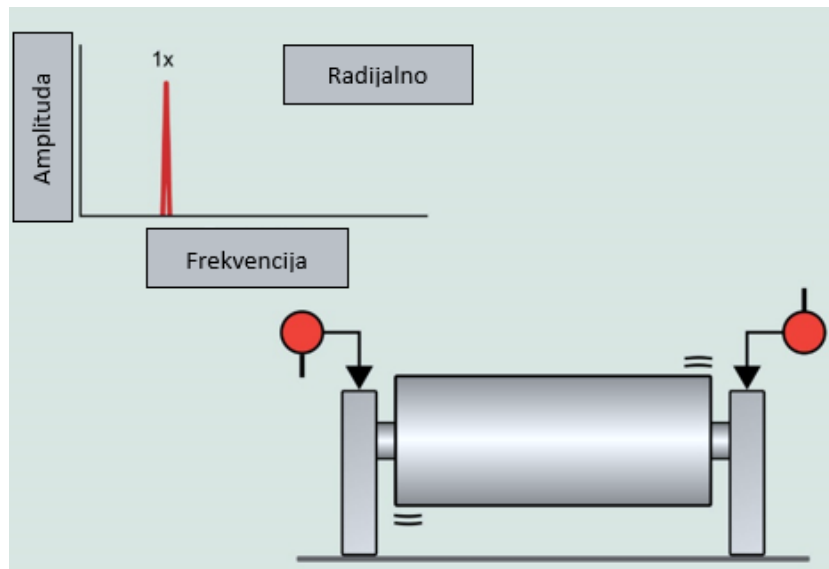
Kako bi se ispravio problem, moguće je pristupiti balansiranju rotora koje se izvodi pomoću mjernog uređaja i kasnijim zavarivanjem utega na unaprijed utvrđenu kutnu poziciju. Primjer statičkog disbalansa moguće je vidjeti na slici ispod.



Slika 5.14. Statički disbalans [11]

2) Spregnuti disbalans

U ovom slučaju, izvor disbalansa nije jedna, već više sila. Točnije rečeno, riječ je o dvije sile jednakih jačina, ali suprotnih smjerova. Isto kao i u slučaju statičkog disbalansa, problem se rješava balansiranjem, ali ovoga puta u dvije ravnine sa prethodno izračunatom masom utega koja se zavaruje na rotor.

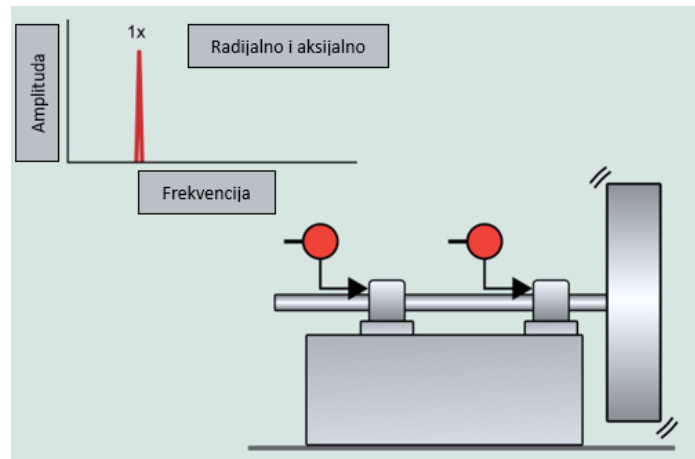


Slika 5.15. Spregnuti disbalans [11]

Prethodna slika prikazuje spregnuti disbalans s karakteristikama radijalnih vibracija na 1X brzine. Razlika u fazi između vertikalne i horizontalne orijentacije ležaja je oko 90° s mogućnošću varijacije od $\pm 30^\circ$. Također, mjerenjem u radijalnom smjeru utvrđuje se fazni pomak na oba kraja osovine za 180° . [14]

3) Disbalans ovješnog rotora

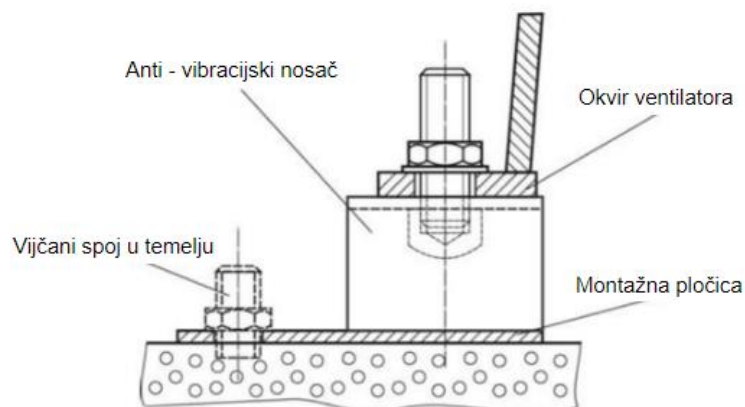
Disbalans ovješnog rotora nastaje trošenjem rotora ili savijanjem osovine. Prisutne su visoke vibracije na 1X brzine rotora koje su vidljive u radijalnom i u aksijalnom smjeru. Aksijalna očitavanja većinom nisu sinkronizirana dok radijalna očitavanja mogu biti nestabilna. Kod ovješnog rotora, većinom se javljaju statički i spregnuti disbalans koji zahtijevaju korekciju postupkom balansiranja odnosno postavljanja korekcijskih utega radi uklanjanja disbalansa. Na sljedećoj je slici prikazan disbalans ovješnog rotora s ranije spomenutom amplitudom od 1X brzine u radijalnom i aksijalnom smjeru.



Slika 5.16. Disbalans ovješnog rotora [11]

5.7. Oslonci motora

Oslonci motora važna su stavka kod dizajniranja stroja što potvrđuje i praksa. Oslonci su nužni kako bi se minimizirale vibracije i ostala naprezanja koja uvelike smanjuju životni vijek stroja. Nepravilan dizajn najčešće rezultira niskom krutošću odnosno njezinom visokom vrijednošću što dovodi do rezonancije. Kada je moguće, oprema bi trebala biti montirana na betonsko postolje jer je prirodno krutije od čeličnog i smještena što bliže razini tla kako bi se maksimalno smanjila mogućnost nastanka rezonancije. Također, preporuča se postavljanje anti vibracijskih oslonaca. Na sljedećoj je slici prikazan primjer anti-vibracijskog nosača zajedno sa okvirom ventilatora, montažnom pločicom i vijkom koji spaja montažnu pločicu sa temeljem.



Slika 5.17. Oslonci motora

6. ANALIZA PROBLEMA VENTILATORA ZONE HLAĐENJA

U sljedećim će poglavljima biti objašnjen problem zbog kojeg se pristupilo navedenoj temi ovog rada, odnosno balansiranju ventilatora i navedene karakteristike ventilatora, proveden postupak balansiranja, prikazani grafovi vibracija, održavanje ventilatora te navedeni postupci različitih strategija održavanja kojima se zaokružuje ciklus uspješnog poslovanja suvremenog postrojenja.

6.1. Opis problema

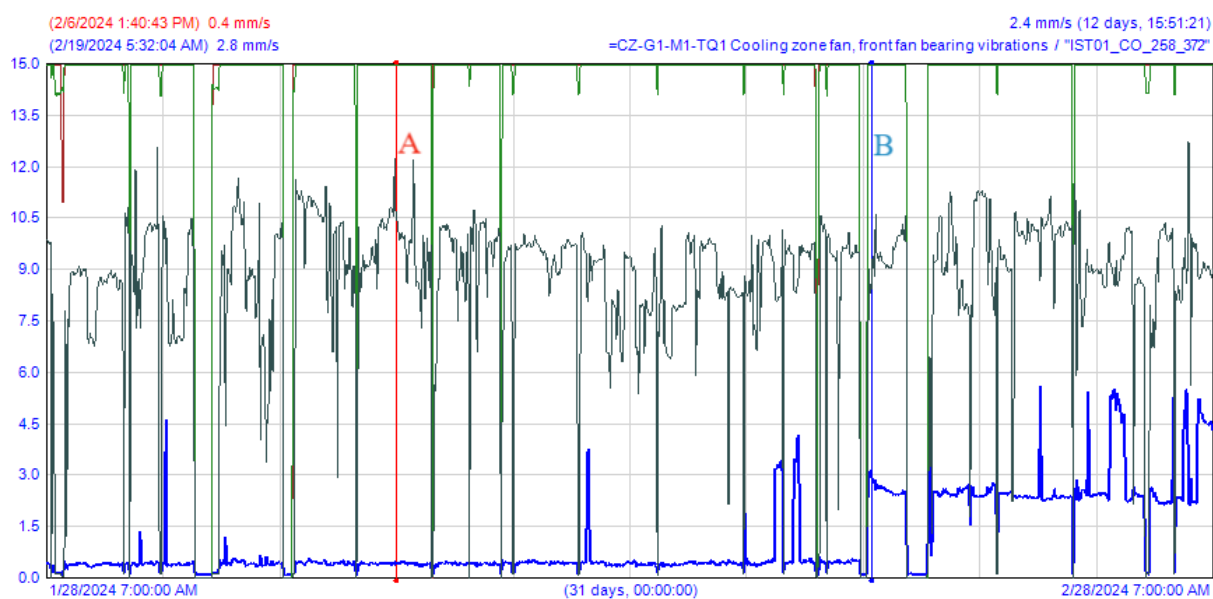
Ventilatorom zone hlađenja postiže se hlađenje kamene vune nakon peći za kaljenje. Kamena vuna se također koristi u filtru kako bi se postiglo filtriranje zraka prije odvođenja u cjevovod, a zatim ventilator zone hlađenja i dimnjak. U filteru je došlo do havarije i to zbog prevelike prisutnosti ulja, veziva i drugih dodataka potrebnih za postizanje željene kvalitete kamene vune. Posljedica toga je prisutnost sitnih čestica, kako u cjevovodu, tako i na impeleru ventilatora zone hlađenja. Nakon čišćenja sitnih čestica i otklanjanja kvara utvrdilo se da nema većih oštećenja, odnosno kako nije potrebno zamijeniti dijelove koji se odnose na promatrani ventilator.

Nakon ponovnog stavljanja u pogon i pristupom strategija održavanja tj. mjerenjem vibracija, utvrdilo se kako su vibracije nakon toga porasle. Vibracije su povećane s 0,4 mm/s na prosječnih 2,8 mm/s. Na temelju tablica vibracija vidljivo je kako su vibracije od 2,8 mm/s još uvijek zadovoljavajuće za promatrani ventilator, iako nisu poželjne za dugotrajan rad. Nisu poželjne jer su to prosječne vibracije dok najveće vibracije idu do 5,8 mm/s što je na granici upozorenja za promatrani ventilator.

Za potrebe praćenja vibracija u tvornici kamene vune Rockwool Adriatic d.o.o. u Potpićnu, koristi se Rockwool POP Utility sustav pomoću kojeg je u svakom trenutku moguće pratiti vibracije na željenom stroju gdje je postavljen mjerni senzor. Senzor je postavljen u vertikalnu radijalnu ravninu na prednji ležaj ventilatora.

Sljedeća slika prikazuje podatke sa mjernog senzora mjerene tijekom mjesec dana gdje su plavom bojom prikazane vibracije (mm/s), crvenom bojom brzina okretaja ventilatora (o/min), zelenom bojom struja (A) i sivom bojom snaga (kW). Kursor A

prikazuje podatke na dan 6.2.2024. gdje su prisutne vibracije od 0,4 mm/s pri okretajima od 1313 o/min. Kursorom B dani su podaci na dan 19.2.2024. gdje je vidljivo kako su vibracije od toga dana na dalje povišene dok prosjek iznosi 2,8 mm/s za razdoblje od 10 dana od dana nastanka havarije. Nakon gašenja stroja pristupilo se čišćenju filtera, cjevovoda te impelera ventilatora te je zatim ventilator ponovno stavljen u pogon. Nakon toga, pristupilo se kontinuiranoj analizi vibracija pomoću Rockwool POP Utility programa temeljem čega je uočeno da su vibracije značajno porasle i tijekom dužeg vremenskog perioda mogu negativno utjecati na rad stroja.



Slika 6.1. Vibracije prije i nakon nastanka havarije

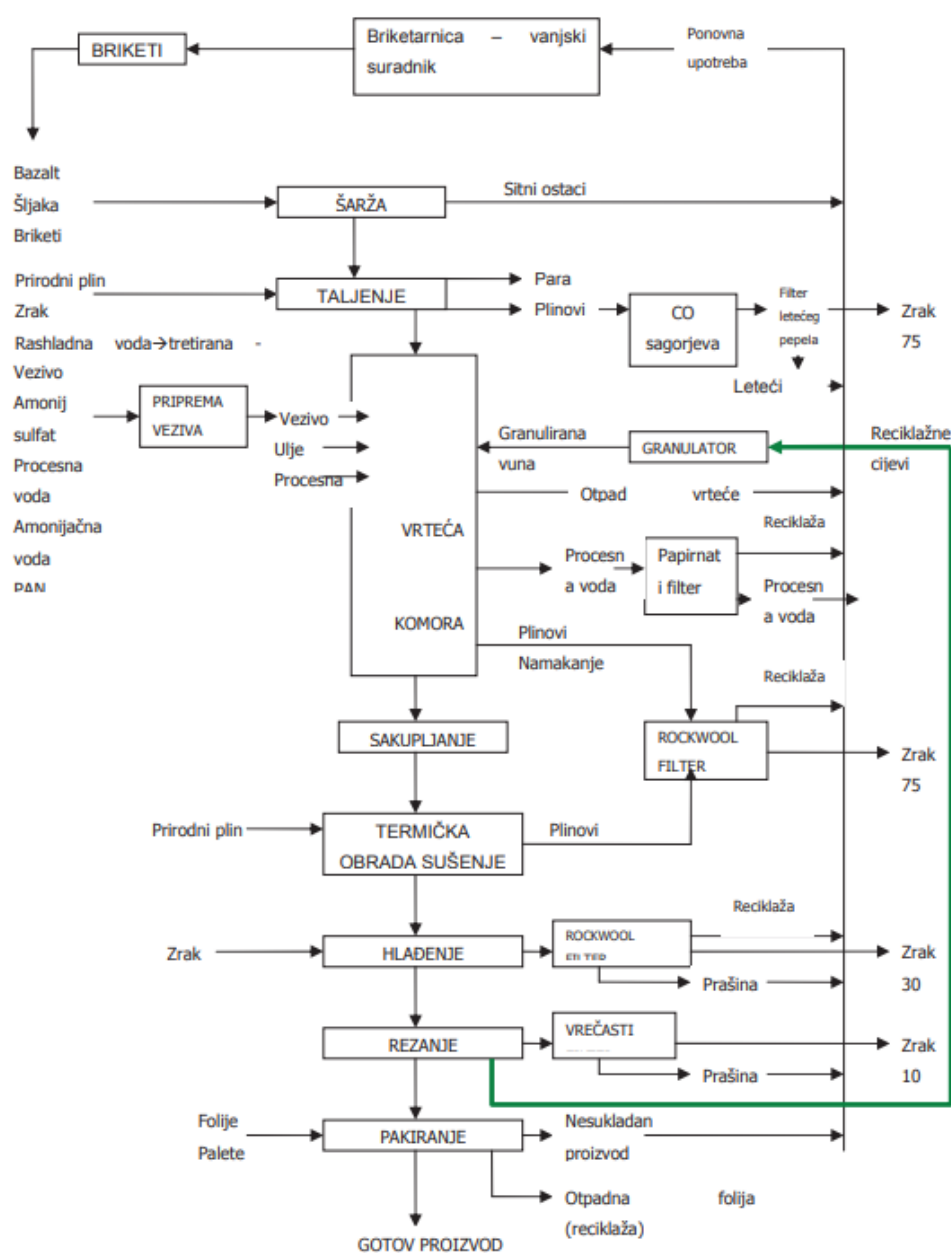
Na prethodnoj je slici prikazan graf vibracija uz koje su prikazani brzina okretaja, struja i snaga. Kursor A prikazuje parametre prije nastanka havarije gdje su prisutne vibracije od 0,4 mm/s, okretaji od 1313 o/min, struja 180 A i snaga 70 kW. Kursorom B koji je prikazan plavom bojom, označeno je područje nakon nastanka havarije gdje se može uočiti konstantno povećanje vibracija. Podaci prikazani kursorom B na dan 19.2. prikazuju vibracije od 2,8 mm/s, brzina okretaja je 1270 o/min, struja 170 A i snaga 63 kW.

U nastavku će se provesti kontinuirano praćenje vibracija ovisno o ostalim parametrima iz razloga jer ventilator radi ovisno o potrebama proizvodnog pogona

odnosno proizvoda pa nije dovoljno pratiti samo vibracije, već i ostale parametre jer povišene vibracije ne znače nužno i određen postupak održavanja.

6.2. Karakteristike ventilatora

Kako bi se lakše shvatila pozicija i uloga ventilatora zone hlađenja u postrojenju, na sljedećoj je slici prikazana shema proizvodnog procesa.



Slika 6.2. Shema proizvodnog procesa [12]

Promatrani ventilator nalazi se u zoni hlađenja sa svrhom hlađenja vune koja izlazi iz peći za kaljenje. U zoni hlađenja nalazi se odsisna komora kao sastavni dio tog sustava na čijem se kraju nalazi upravo odsisni ventilator. Tijekom rada ventilatora, zrak prolazi kroz kamenu vunu čime se postiže njezino hlađenje koje je potrebno nakon procesa kaljenja, kako bi kamena vuna poprimila željena svojstva. Zrak koji se koristi za hlađenje vune, odvodi se u filter gdje se nakon pročišćavanja ispušta u atmosferu putem 30 metarskog dimnjaka.

Materijal kojim se postiže filtriranje zraka je upravo kamena vuna koja se nakon dostizanja točke zasićenja ponovno reciklira. Kako su debljina i gustoća vune varijabilne tijekom procesa proizvodnje, regulacija rada ventilatora postiže se mjerenjem tlaka zraka ispod vune, kako bi se u svakom trenutku kamena vuna dovoljno ohladila i dostigla najbolja moguća svojstva. To bi značilo da je u slučaju povećanja debljine i/ili gustoće vune potreban veći protok zraka pa se posljedično tome povećava broj okretaja ventilatora.

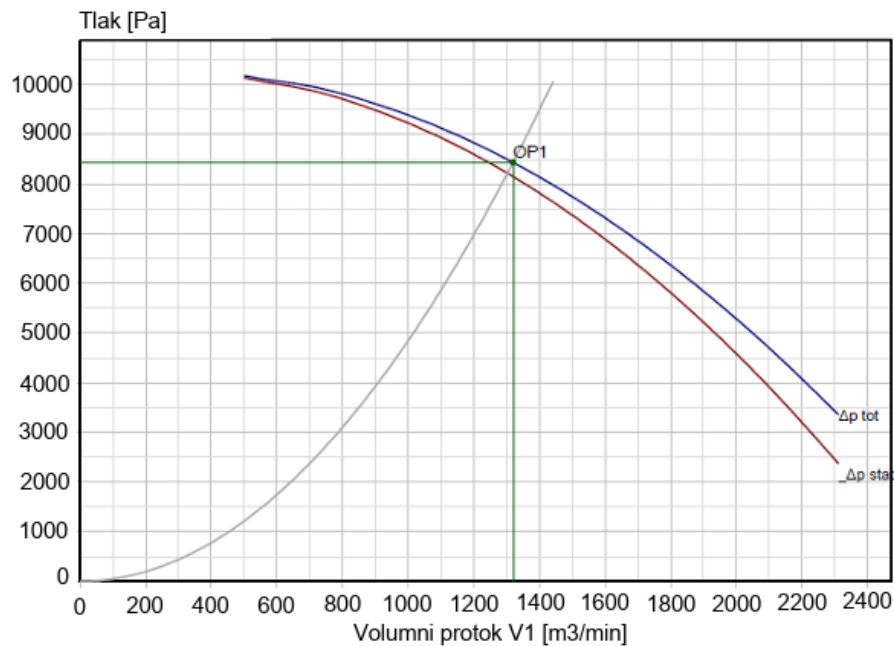
Karakteristike ventilatora prikazane su u dolje navedenoj tablici, a podijeljene su prema karakteristikama optimalnog rada ventilatora i karakteristikama željenih specifikacija prema potrebama kupca odnosno tvrtke Rockwool Adriatic d.o.o.

Tablica 6.1. Karakteristike ventilatora

Karakteristike ventilatora	Oznaka	Podaci za optimalan rad	Podaci prema specifikacijama kupca	Mjerna jedinica
Volumni protok	-	1320	1320	m ³ /min
Povećanje statičkog tlaka	-	8150	8150	Pa
Vlažnost		0	0	g/kg
Plinska konstanta	R	287	287	J/(kg K)
Koeficijent adijabatske kompresije	K	1,4	1,4	-

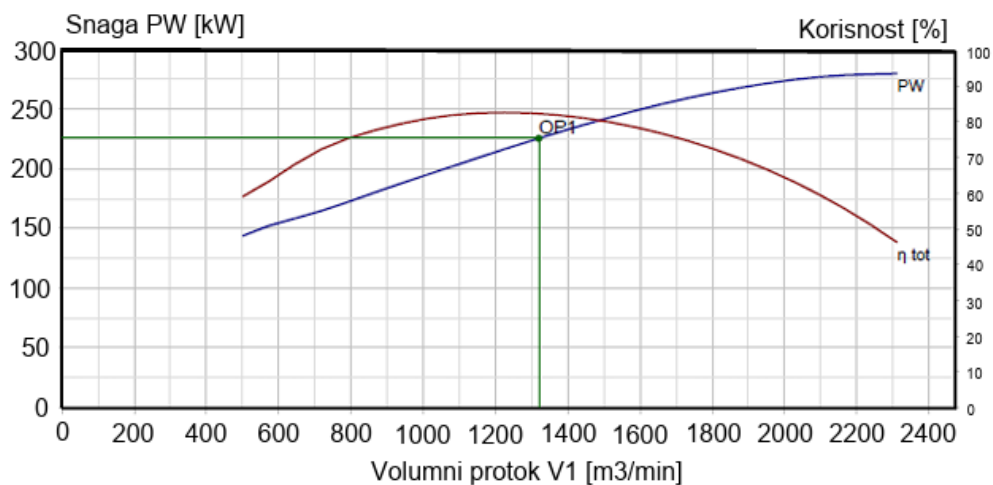
Temperatura na ulazu	$t1$	75	75	°C
Temperatura na izlazu	$t2$	86	86	°C
Atmosferski tlak	$P0$	1001,33	1001,33	Pa
Gustoća zraka	$\rho0$	1,015	1,015	kg/m ³
Gustoća zraka na ulazu	$\rho1$	0,939	0,939	kg/m ³
Povećanje ukupnog tlaka	Δp_t	8440	8437	Pa
Dinamički tlak	p_{d1}	560	561	Pa
Dinamički tlak	p_{d2}	850	845	Pa
Povećanje statičkog tlaka	Δp_{st}	8150	8152	Pa
Osovinska snaga	PW	225,6	225,6	kW
Brzina rotacije impelera	n_l	1480	1480	o/min
Snaga motora	PM	315	315	kW
Sinkronizirana brzina rada motora	n_M	1491	1491	o/min

Osim navedenih karakteristika, proizvođač ventilatora je Reitz Group, a proizvođač elektromotora ABB kojemu je raspon radne temperature od -20°C do +80°C. Ventilator je dizajniran je sa 100 mm debljine izolacije, a radijus impelera iznosi 792 mm. Na sljedećoj je slici prikazana ovisnost volumnog protoka $V1$ u odnosu na tlak. Optimalna točka prikazana je kao OP1, dok je Δp_{tot} linija povećanja tlaka, a Δp_{stat} linija povećanja statičkog tlaka. Na grafu je prikazano kako je optimalna točka za rad ventilatora pri volumnom protoku od 1320 m³/min jednaka 8440 Pa za povećanje ukupnog tlaka, a 8150 Pa za povećanje statičkog tlaka.



Slika 6.3. Karakteristike ventilatora (volumni protok – tlak)

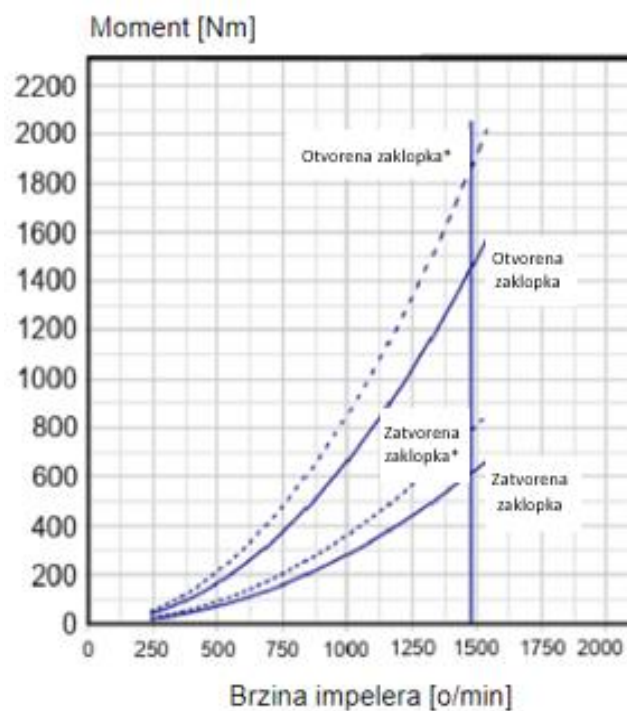
Osim volumnog protoka i ovisnosti povećanja tlaka, grafički se može prikazati i ovisnost volumnog protoka i snage za postizanje optimalne točke u radu ventilatora što je prikazano na sljedećoj slici. Također, s desne strane nalazi se korisnost za određene parametre. Optimalna točka za rad ventilatora nalazi se pri volumnom protoku od 1320 m³/min, potrebna snaga (PW) je 225,6 kW što dovodi do ukupne korisnosti od 82,3%.



Slika 6.4. Karakteristike ventilatora (volumni protok – snaga)

Radijani su ventilatori uređaji koji mogu imati poteškoće pri pokretanju. Naime, pogonski motor mora biti u mogućnosti prevladati moment inercije lopatica kao i moment opterećenja ventilatora pri pokretanju. Takva vrsta ventilatora može biti prikazana na dijagramu momenta opterećenja ovisno o brzini impelera tako da moment opterećenja raste kvadratom brzine. U slučaju kada je to moguće, takav je tip ventilatora potrebno pokretati sa prtvorenim zaklopkama kako bi se postigao zadovoljavajući moment opterećenja. U slučaju tvrtke Rockwool Adriatic d.o.o., prisutne su tri zaklopke koje se podešavaju ovisno o potrebnom protoku zraka odnosno vrsti proizvoda.

Na sljedećoj je slici prikazana ovisnost momenta opterećenja i brzine impelera s obzirom na to ako je zaklopka zatvorena ili otvorena.



Slika 6.5. Moment opterećenja i brzina okretaja impelera

Ovisno o otvaranju zaklopke, postiže se različiti moment opterećenja na koji je potrebno obratiti pozornost prilikom pokretanja ventilatora zbog što manjeg udarnog opterećenja, kao i izbjegavanja stvaranja rezonancije ventilatora prilikom pokretanja.

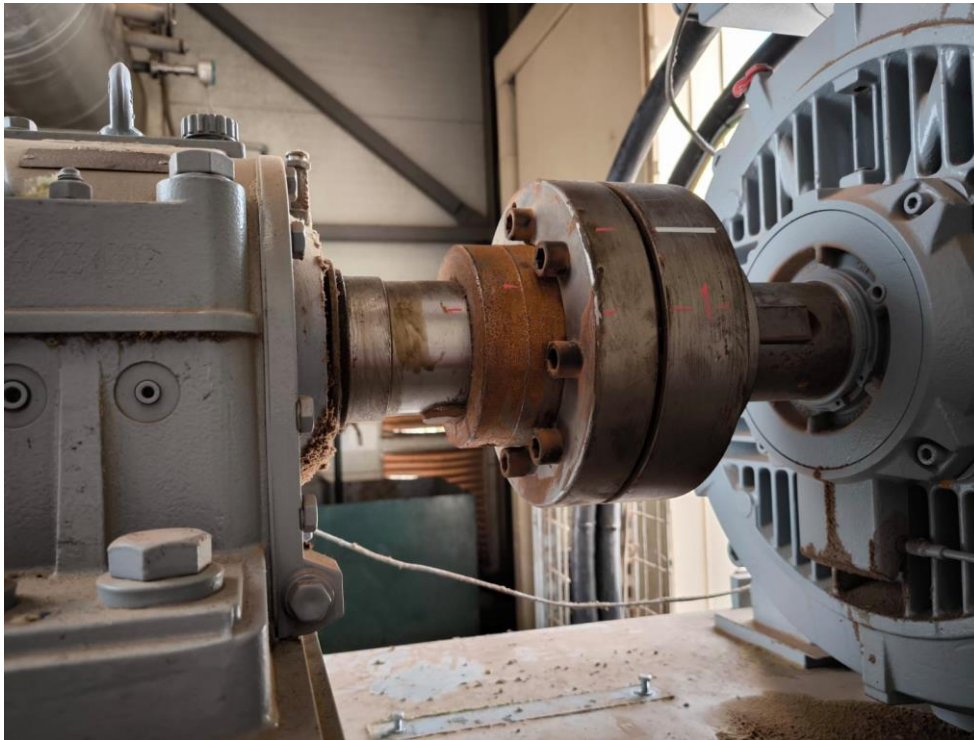
6.3. Balansiranje

Kako bi postupak balansiranja ventilatora zone hlađenja protekao besprijekorno, najprije je potrebno pripremiti mjerni uređaj kao i mjernu opremu te provjeriti njezinu ispravnost. Postupak započinje označavanjem početne točke mjerenja na lopatici impelera brojem 0. Lopatica se zatim postavlja vodoravno kako bi se na vanjskom dijelu rotora u istoj ravnini postavila traka pomoću koje mjerni senzor očitava broj okretaja rotora ventilatora. Lopatice impelera ventilatora označavaju se suprotno od smjera vrtnje, a kako se sastoji od trinaest lopatica to će biti označeno brojevima od 0 do 12 što je prikazano na sljedećoj slici.



Slika 6.6. Označavanje lopatica impelera

Osim samih lopatica, paralelno njima, upisuju se brojevi na vanjskom dijelu rotora gdje se može vidjeti postavljena traka koju očitava senzor radi mjerenja broja okretaja što je vidljivo na sljedećoj slici.



Slika 6.7. Upis brojeva na rotor ventilatora

Netom prije balansiranja, pristupa se postavljanju mjernog uređaja SKF Microlog MX za mjerenje vibracija u jednoj ravnini. U nastavku su navedeni podaci mjernog uređaja koji će se koristiti, a to su redom:

- no. of planes – za broj ravnina upisuje se broj 1 jer se balansiranje odvija u jednoj ravnini
- vib measm 't type – vrsta mjerenja vibracija ovisi o vrsti senzora koji se koristi (senzor brzine, senzor pomaka ili akcelerometar) i potrebno je za uspostavljanje integracijskih zahtjeva za FFT (Fast Fourier Transform) analizu; većinom se za mjerenje brzine kod balansiranja koriste akcelerometri pa se postavlja: a -> v (mm/s)
- weight units – u ovom polju postavlja se mjerna jedinica za težinu kao g, kg, oz ili lb dok se u ovom slučaju postavlja na g
- length units – odabire se mjerna jedinica za duljinu između mm, cm, inch ili feet, a u ovom slučaju to je mm

- movement – specificira smjer vrtnje rotora ventilatora odnosno odabire se „with rotation“ (u smjeru vrtnje) ili „against rotation“ (obrnuto smjera vrtnje) rotora ventilatora; smjer vrtnje odabire se obrnuto od smjera rotacije ventilatora kao što su se zapisivali brojevi kako bi u trenutku pokretanja rada ventilatora to započelo od broja 0 – 12
- trigger type – odabire se fazni referentni tip mjerača, vanjski analogni ili ttl (transistor – transistor logic) tip; tip mjerača postavljen je na ext ttl
- trigger slope – označava rastući (+ve) ili padajući signal (-ve); u ovom slučaju radi se o odabiru rastućeg signala mjerača
- trigger level – potrebno je unijeti broj volti kako bi se eliminirala ostala buka koja može negativno utjecati na mjerenje (u slučaju odabira vanjskog analognog tipa mjerača); u početnim postavkama to je 2 V.

Prethodno objašnjeni podaci mjernog uređaja prikazani su na sljedećoj slici.

Balance Setup	
No. of Planes:	1
Vib Measm 't Type:	A-> V (mm/s)
Weight Units:	g
Length Units:	mm
Movement:	Against Rotn
Trigger Type:	ext TTL
Ext trig slope:	+ve
Trigger Level:	2.00 V



Slika 6.8. Postavke mjernog uređaja

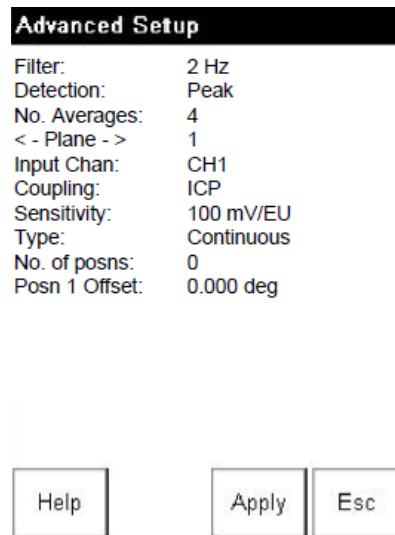
Osim osnovnih, tu su još i napredne postavke u kojima se nalaze sljedeće funkcije:

- filter – odabire se odgovarajuća frekvencija odnosno filter za filtriranje niskih frekvencija šumova; frekvenciju je moguće podesiti na 2 Hz, 10 Hz, 70 Hz,

upisati vrijednost željene frekvencije ili isključiti; osnovnim je postavkama definirano 2 Hz

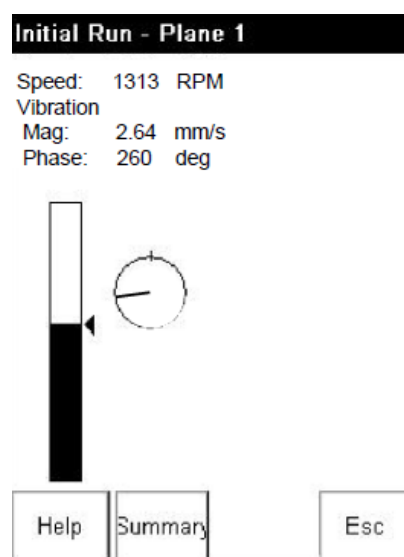
- detection – određuje otkrivanje odnosno detekciju i skaliranje signala; vrijednosti brzine, ubrzanja i pomaka dobivene od strane akcelerometra skaliraju se RMS detekcijom; time se ponavlja metoda korištenja na starijim instrumentima tako da nove vrijednosti mjerene SKF Microlog MX mjernim uređajem ostanu ekvivalentne; opcije detekcije uključuju Peak, Pk-Pk i RMS; Peak se odabire za brzinu i ubrzanje kao u ovom slučaju dok se Peak-to-Peak odabire za dislokaciju
- number of averages – potrebno je odrediti broj spektralnog prosjeka uključenog u mjerenje; postavlja se broj 4
- plane – za balansiranje u jednoj ravnini odabire se broj 1; time se definira kako se koristi jedan senzor za mjerenje prilikom balansiranja i kako se ostali podaci odnose na taj senzor dok je kod balansiranja u dvije ravnine moguće odabrati 1, 2 ili oboje ovisno o postavkama mjerne opreme
- input channel – u slučaju balansiranja u jednoj ravnini, kao ulazni kanal moguće je odabrati ch1 ili ch2 dok se u slučaju balansiranja u dvije ravnine sa dva senzora, odabire jedan senzor jedne ravnine kao ch1, a drugi senzor druge ravnine kao ch2
- coupling – određuje tip signala potrebnog za mjerenje; postoje dvije opcije: AC – koristi ulazni signal od strane vanjskog uređaja ili icp – koristi DC za signal senzora i povezuje dinamički signal sa ulaznim kanalom
- sensitivity – postavlja se osjetljivost pretvarača u mV; 100 mV koristi se za akcelerometar, 200 mV za većinu beskontaktnih senzora pomaka dok se 1000 mV koristi u slučaju izravnog očitavanja
- type – potrebno je odabrati odgovarajuću vrstu položaja težine; to može biti continuous – definira da položaj težine može biti smješten na bilo kojem dijelu ravnine balansiranja ili fixed – odabire se u slučaju postavljanja težine na prethodno definirano jedno mjesto
- number of positions – odnosi se samo u slučaju postavljanja težine na prethodno definirano mjesto što ovdje nije slučaj
- position 1 offset – isto kao i broj položaja, odnosi se kada se prilikom odabira položaja težine odabire „fixed“.

Prethodno opisane napredne funkcije koje je potrebno postaviti prilikom postupka balansiranja prikazane su na sljedećoj slici.



Slika 6.9. Napredne postavke mjernog uređaja

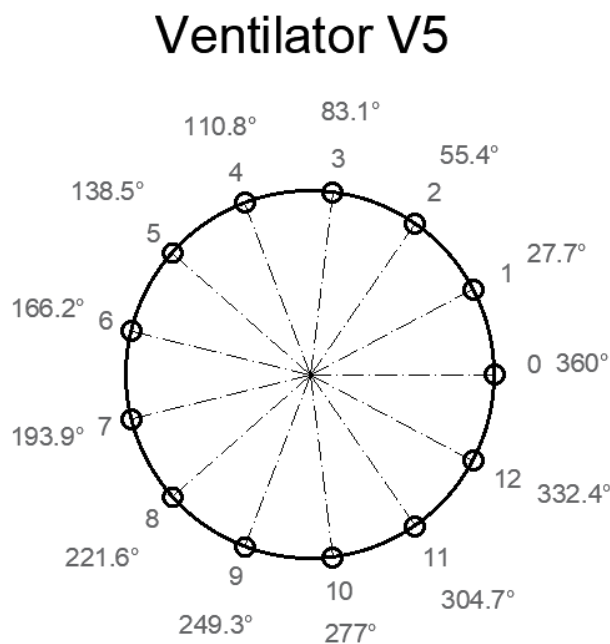
Po završetku pripreme opreme za balansiranje i definiranja parametara mjernog uređaja, započinje postupak balansiranja. Postupak započinje pokretanjem promatranog ventilatora zone hlađenja tako da se ventilator dovede do nominalne odnosno stalne brzine rada.



Slika 6.10. Početno pokretanje

Nakon pokretanja mjernog uređaja, počinju se prikupljati podaci što je vidljivo na prethodnoj slici. Mjerni uređaj pokreće referentno mjerenje kojim se očitava broj okretaja, magnituda i mjesto na kojem će se postaviti testni uteg. Zaslona koji je vidljiv na prethodnoj slici prikazuje navedene parametre.

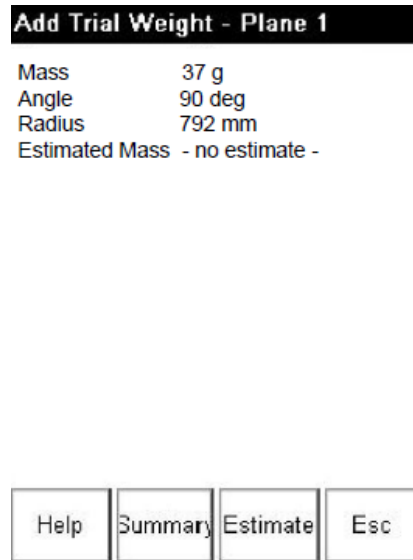
Kako bi postupak balansiranja bio točan, broj okretaja ventilatora postavljen prilikom početnog mjerenja potrebno je provoditi tijekom cijelog procesa balansiranja. Osim mjerne opreme, u postupku se koristi i obrazac s naznačenim brojem lopatica i pozicija lopatica, odnosno razmak između njih prikazan u stupnjevima kako bi se nakon prikazivanja parametara na uređaju, to isto moglo predočiti na obrazac, a zatim i na ventilator. Navedeni je obrazac prikazan na sljedećoj slici.



Slika 6.11. Obrazac ventilatora zone hlađenja

Nakon početnog mjerenja slijedi unos težine, kuta i radijusa gdje će se zavariti testni uteg nakon čega slijedi njegovo zavarivanje za impeler ventilatora. Postupak se provodi nakon osiguravanja stroja tako da odgovorna osoba točno definira mjesto zavarivanja utega, a zavarivač kreće sa zavarivanjem. Potrebno je kontrolirati kvalitetu zavara kako tijekom ponovnog pokretanja ne bi došlo do oštećenja impelera ventilatora.

Izgled ekrana sa navedenim podacima na uređaju SKF Microlog MX prikazan je na sljedećoj slici.



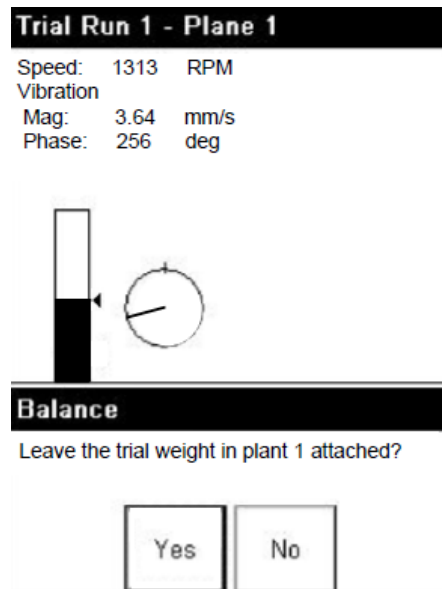
Slika 6.12. Unos podataka testnog utega

Nakon definiranih parametara, postupak se nastavlja zavarivanjem testnog utega na impeler ventilatora. Sljedeća slika prikazuje zavareni testni uteg prije ponovnog pokretanja ventilatora.



Slika 6.13. Testni uteg

Nakon što je testni uteg sigurno postavljen, ventilator se ponovno pokreće na istu brzinu kao i prilikom početnog mjerenja. Zaslone uređaja prikazuje parametre mjerenja s testnim utegom.



Slika 6.14. Testno pokretanje

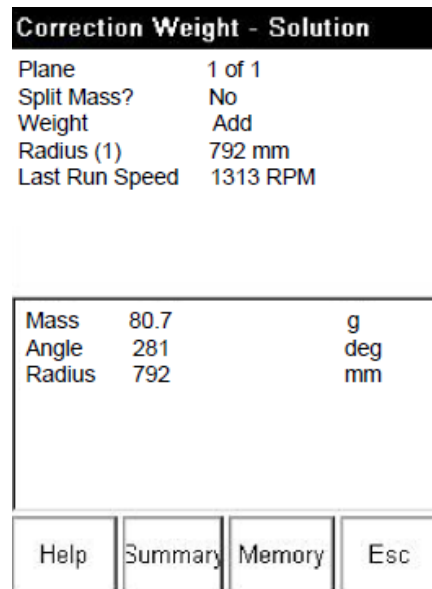
Nakon prikaza parametara, uređaj traži da se odabere hoće li testni uteg ostati pričvršćen ili će se ukloniti. Testni uteg je u pravilu privremen kao u ovom slučaju i obično se uklanja prije nego se pričvrsti konačni korekcijski uteg. Međutim, ponekad se testni uteg trajno pričvršćuje za impeler i trajno ostaje zbog sigurnosnih razloga.

Nakon odabira opcije testnog utega, potrebno je unijeti podatke za novi uteg koji će se trajno pričvrstiti za impeler. Potrebno je unijeti podatke za postavljanje utega odnosno „Split Mass“ – u ovom slučaju se odabire „No“ jer nije potrebno težinu utega postaviti na dva mjesta.

U slučaju kada se uteg ne može postaviti na mjesto koje je određeno proračunom, opcija „Split Mass“ automatski izračunava težinu utega u slučaju kada bi se umjesto jednog utega postavili dva i u tom slučaju se utezi postavljaju na dva mjesta jednako razmaknuta od početnog položaja utega.

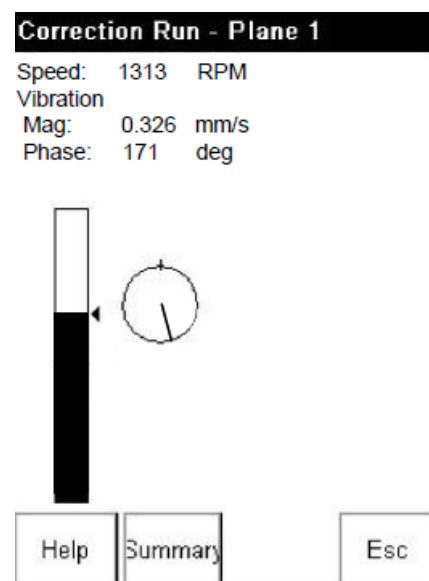
Opcijom „Weight“ određuje se dodaje li se ili oduzima težina utega. U ovom slučaju težina utega se dodaje i zatim se unosi radijus i otvara donji izbornik gdje je potrebno

unijeti podatke o težini utega i kutu kojim se određuje pozicija utega koji je potrebno postaviti što je moguće vidjeti na sljedećoj slici.



Slika 6.15. Parametri korekcijskog utega

Nakon unosa potrebnih parametara i zavarivanja utega kao i provjere zavara, ventilator se ponovno pokreće na prethodno definiran broj okretaja. Nakon pokretanja, na uređaju se prikazuju podaci odnosno broj okretaja i trenutne vibracije.

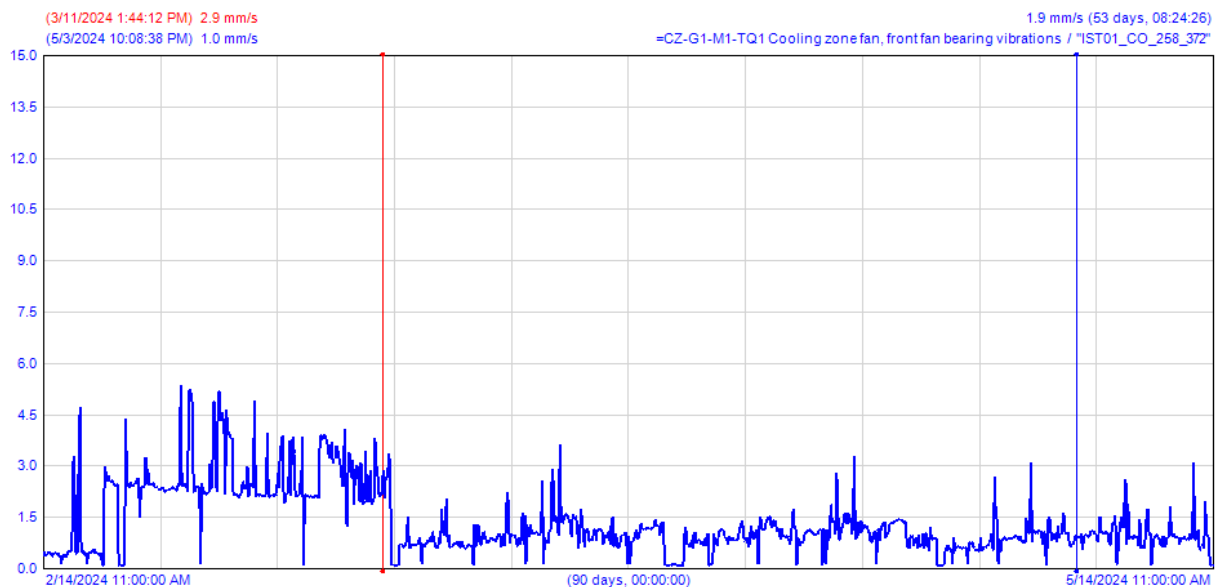


Slika 6.16. Pokretanje s korekcijskim utegom

Postupkom balansiranja, vibracije su s 2,64 mm/s, nakon postavljanja testnog utega blago porasle na 3,64 mm/s, a zatim su nakon uklanjanja testnog i postavljanja korekcijskog utega smanjene na 0,326 mm/s.

6.4. Mjerenje vibracija nakon balansiranja

Nakon postupka balansiranja, pristupilo se ponovnom mjerenju vibracija kroz vremenski razmak od tri mjeseca. U tom periodu, uočeno je kako su vibracije značajno smanjene na razinu dopuštenih vibracija.



Slika 6.17. Prikaz vibracija nakon balansiranja

Na prethodnoj su slici prikazane vrijednosti vibracija tijekom rada ventilatora u disbalansu i nakon njegovog balansiranja. Ukupan vremenski period na slici je tri mjeseca odnosno dva mjeseca od dana balansiranja. Vidljivo je kako su vibracije svedene na minimum čime se može zaključiti da je postupak balansiranja protekao profesionalno i uspješno.

6.5. Održavanje ventilatora

Ventilator zone hlađenja novi je ventilator u tvornici na kojem nema provedenih aktivnosti održavanja, ali u nastavku ovog poglavlja bit će navedeni podaci poput radnih sati između održavanja, broj uključenja/isključenja, učestalosti podmazivanja ležaja i ostalih operacija koje se moraju provesti kako bi sve dobro funkcioniralo. Održavanje ventilatora najčešće se provodi preventivno ili prediktivno, ali kako bi cjelokupni proces bio uspješno zaokružen, potrebno je primijeniti sve strategije održavanja kojima se zajedno postižu najbolji rezultati. Kako bi se kvalitetno pristupilo održavanju, potrebno je poznavati osnovne značajke ventilatora pomoću kojih se određuje način održavanja istog.

Tip ventilatora: KXE 112-125015-00

- KX = konstrukcijski dizajn sa spojkom
- E = jednostupanjski radijalni ventilator
- 112 = povećanje tlaka $\Delta p_t \times 10 - 1120$ daPa
- 1250 = volumni protok $V_1 - 1250$ m³/min
- 15 = brzina rotacije impelera $n_L \times 100 - 1500$ o/min
- 00 = interni kod

Dizajn KX tipa ventilatora realiziran je tako da se prijenos snage s osovine motora na osovinu ventilatora odvija pomoću fleksibilne spojke. Osovina ventilatora konstruirana je s dva ležaja protiv sile trenja.

Jednostupanjski radijalni ventilatori mogući su u dva načina izvedbe promatrajući ovisno o smjeru rotacije. To su načini rotacije u smjeru kazaljke na satu i obrnuto smjera kazaljke na satu. U slučaju promatranog ventilatora zone hlađenja, to je u smjeru kazaljke na satu.

Ležajevi ventilatora sa KX konstrukcijom podmazivani su uljem i dizajnirani za teoretsko vrijeme rada od 40,000 radnih sati. Glavne dijelove održavanja predstavljaju ležajevi, spojka, remeni, brtve vratila i ostali dijelovi podložni istrošenosti.

Tijekom održavanja potrebno je provjeriti stanje impelera na kojem postoji mogućnost taloženja prašine i u ovom slučaju sitnih čestica kamene vune, koje su vrlo abrazivne, pa je impeler podložan trošenju i nastanku disbalansa.

Kako tvornica radi 24 sata dnevno tako i ventilator mora konstantno raditi, tako da osim promjene proizvoda koja je varijabilna, ventilator se zaustavlja u prosjeku svaka dva dana radi promjene predilica na kratak period i u slučaju planiranog zastoja proizvodnje svakih 20 – ak dana po nekoliko sati ili u tehničkom stopu krajem godine u periodu od 10 – 15 dana.

Ležaji ventilatora smješteni su unutar kućišta ležaja gdje se nalazi ulje, a ovisno radi li se o pogonskoj ili pogonjenoj strani varira količina ulja. Na pogonjenoj strani je tip ležaja 22224 C3 koji se nalazi u kućištu sa količinom ulja od 2,1 litara dok je na pogonskoj strani ležaj 22222 C3 koji se također nalazi u svom kućištu sa količinom ulja od 1,9 litara.

Interval promjene MOBIL NUTO H68 ulja je svakih 5000 radnih sati stroja. Kako je 5000 radnih sati 208 dana, promjena ulja se provodi nešto češće odnosno dva puta godišnje kako bi se osigurao pouzdan rad stroja. Razinu ulja potrebno je provjeravati na mjesečnoj razini. Mazivo koje se koristi za brtve je CASTROL TRIBOL GR PD2, a tijekom procesa podmazivanja potrebno je nanositi mazivo do trenutka kada novo mazivo počne izlaziti izvan brtve.

Spomenuti ležajevi ventilatora imaju sljedeće karakteristike:

- SKF ležaj 22222 C3
 - Težina: 7 kg
 - Unutarnji promjer: 110 mm
 - Vanjski promjer: 200 mm
 - Materijal: čelik
- SKF ležaj 22224 C3
 - Težina: 8,5 kg
 - Unutarnji promjer: 120 mm
 - Vanjski promjer: 215 mm
 - Materijal: čelik

U nastavku je prikazan navedeni SKF ležaj 22224 C3 koji je prethodno opisan i nalazi se na pogonjenoj strani ventilatora.



Slika 6.18. SKF ležaj 22224 C3 [13]

Osim mjerenja vibracija, pristupilo se mjerenju temperature pomoću termografske kamere kojom je utvrđeno kako temperatura ležaja ne prelazi 75°C što znači da je zamjenu ulja moguće obavljati prema prethodno navedenim parametrima. Ukoliko je temperatura kućišta ležaja povišena, potrebno je korigirati vrijeme promjene ulja prema korekcijskom faktoru koji je prikazan u sljedećoj tablici u odnosu na temperaturu kućišta ležaja.

Tablica 6.2. Promjena intervala podmazivanja ležaja ovisno o temperaturi

Promjena intervala podmazivanja ovisno o temperaturi kućišta ležaja	
Temperatura kućišta ležaja	Korekcijski faktor
75°C	x 1,00
80°C	x 0,85
85°C	x 0,70
90°C	x 0,55
95°C	x 0,45
100°C	x 0,35

Elektromotor koji pokreće promatrani ventilator je trofazni motor proizvođača ABB, okvira veličine 355 i snage 315 kW koji radi pri maksimalnim okretajima od 1569 o/min. To su parametri kojima se vrši odabir sustava odnosno količine podmazivanja.

Na sljedećoj je slici prikazan navedeni elektromotor koji ima automatski sustav podmazivanja. Instalirana je automatska mazalica MEMOLUB HPS 240 cm³ kojom se podmazuju ležajevi elektromotora.



Slika 6.19. Elektromotor 315 kW i automatska mazalica

Automatska mazalica MEMOLUB HPS je elektromehanička naprava sa autonomnošću kojom se podmazuju ležajevi elektromotora s mogućnošću nadopunjavanja. Mazalica izbacuje odabranu mast kojom se podmazuju ležajevi pri tlaku od 25 bara. U ovom slučaju koristi se mazivo CASTROL OPTITEMP LG 2 te se podmazivanje primjenjuje na dvije točke udaljene jedan metar od mjesta postavljanja mazalice.

Navedena mazalica se sastoji od pločice za programiranje, kartuše s mazivom, baterija i uređaja za ugradnju kartuše i baterije. Mazalica se također sastoji od plastičnih prstenova kojima se podešava interval između izbačaja maziva. To su crveni, crni i bijeli prsten. Promjenom intervala postiže se promjena učestalosti podmazivanja dok

je količina maziva po izbačaju jednaka. Za promatrani ventilator zone hlađenja potrebno je učestalije podmazivanje pa se postavljaju crveni, crni i bijeli prsten koji definiraju interval između izbačaja maziva svakih sat vremena odnosno 24 puta na dan.

U nastavku će biti navedene specifikacije maziva CASTROL OPTITEMP LG 2 koje se koristi za podmazivanje ležajeva elektromotora i izveden proračun kako bi se definirala potrebna količina maziva i učestalost nadopunjavanja automatske mazalice.

CASTROL OPTITEMP LG 2 je sintetska litijeva mast na bazi polialfaolefina. Takva vrsta masti ima primjenu kod niskih temperatura i ležaja gdje su prisutne velike brzine u normalnom temperaturnom području. Također, mast je kompatibilna sa elastomerima i plastičnim materijalima poput poliamida. Mast ima široko temperaturno područje primjene od -50°C do $+120^{\circ}\text{C}$. Gustoća masti ne prelazi 1000 kg/m^3 odnosno 1 g/cm^3 .

Automatska mazalica ima zapremninu od 240 cm^3 i ukoliko se napuni s navedenom masti gustoće $<1\text{ g/cm}^3$ odnosno $0,99\text{ g/cm}^3$ pri 20°C , iz izraza proizlazi:

$$M_m = Z_k \times G_m = 240 \times 0,99 = 237,6\text{ g} \quad (6.1.)$$

gdje je:

- M_m – masa maziva [g]
- Z_k – zapremnina kartuše [cm^3]
- G_m – gustoća maziva [g/cm^3].

Unutar automatske mazalice nalazi se 237,6 grama masti kojom se podmazuju ležajevi. Poznato je kako se koriste crveni, crni i bijeli prsten i da se podmazivanje izvršava svakih sat vremena odnosno 24 puta na dan, a kartušu je potrebno nadopunjavati svakih petnaest dana.

Kako bi se izračunala količina masti utrošena po danu ili jednom intervalu podmazivanja, potrebno je podijeliti količinu, odnosno masu maziva sa intervalom nadopunjavanja kartuše.

$$M_d = M_m \div I_n = 237,6 \div 15 = 15,84 \text{ g/dan} \quad (6.2.)$$

gdje je:

- M_d – količina masti utrošena po danu [g/dan]
- M_m – masa maziva [g]
- I_n – interval nadopunjavanja kartuše [dan].

Nakon što je izračunata potrebna količina masti utrošena u danu, pomoću intervala podmazivanja tj. 24 puta na dan, dobiva se količina masti utrošena u jednom podmazivanju:

$$M_i = M_d \div I_{nd} = 15,84 \div 24 = 0,66 \text{ g/i} \quad (6.3.)$$

gdje je:

- M_i – masa maziva utrošena u jednom intervalu podmazivanja [g/i]
- M_d – količina masti utrošena po danu [g/dan]
- I_d – interval izbačaja maziva u jednom danu [i/dan].

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu potvrđuje se kako vibro dijagnostika ima značajan utjecaj tijekom inženjerskog pristupa balansiranja ventilatora unatoč pojedinim izazovima. Dokazano je kako su ti izazovi značajno manji u odnosu na prednosti vibro dijagnostike poput točnosti prilikom detekcije problema i efikasnosti u održavanju postrojenja. Također, ciljevi istraživanja koji se odnose na rješenje problema povišenih vibracija odnosno prikazivanje efikasnosti vibro dijagnostike, u potpunosti su ispunjeni.

Putem rezultata istraživanja temeljenih na raznim metodološkim pristupima, može se donijeti zaključak kako se pomoću RCM strategije i njezinih komponenata, ispunjavaju zahtjevi tržišta uz kontinuirano praćenje i prilagođavanje tehnološkim naprecima i alatima vibro dijagnostike radi postizanja maksimalne učinkovitosti.

Jedna od preporuka za buduća istraživanja je širenje upotrebe vibro dijagnostike na različite vrste industrijskih strojeva uz integraciju novih tehnologija poput umjetne inteligencije i strojnog učenja. Takvim se tehnologijama omogućava automatizacija vibro dijagnostike što bi osim povećanja preciznosti prilikom detekcije problema, pridonijelo povećanju sigurnosti i smanjenju ljudskih pogrešaka. Tim bi se istraživanjima uvelike rasteretilo inženjere koji bi mogli više vremena provoditi analizirajući takve podatke umjesto mjeriti, a samim time i postiglo provođenje više prediktivnih umjesto korektivnih mjera održavanja.

SAŽETAK

Ovaj rad istražuje primjenu vibro dijagnostike u održavanju industrijskih postrojenja, koristeći RCM (Reliability Centered Maintenance) strategiju kojom se postiže poboljšanje efikasnosti i povećanje pouzdanosti. Istraživanje se temelji na kontinuiranom online praćenju i analizi vibracija, a zatim rješavanju problema povišenih vibracija balansiranjem ventilatora čime se ostvaruje poboljšanje učinkovitosti i produljenje vijeka trajanja. Implementacija vibro dijagnostike donosi brojne prednosti, ali i izazove koji su lako rješivi stručnom edukacijom osoblja. Osim toga, u radu se korištenjem različitih znanstvenih metoda osigurava točnost i ponovljivost parametara. Na temelju dobivenih rezultata, radom se potvrđuju prednosti primjene vibro dijagnostike ukazujući njezin doprinos prilikom detekcije i rješavanja problema u suvremenom industrijskom postrojenju. U radu je donesena i preporuka za daljnja istraživanja koja uključuje širenje upotrebe vibro dijagnostike na različite vrste industrijskih strojeva uz integraciju novih tehnologija poput umjetne inteligencije i strojnog učenja.

Ključne riječi: vibro dijagnostika, RCM strategija, industrijsko postrojenje, održavanje, balansiranje

ABSTRACT

This paper investigates the application of vibration diagnostics in the maintenance of industrial facilities using an RCM (Reliability Centered Maintenance) strategy that increases efficiency and reliability. The research is based on continuous online monitoring and analysis of vibrations, followed by solving the issue of increased vibrations through the balancing fan, which result in improved efficiency and extended lifetime. The implementation of vibration diagnostics offers numerous benefits, but also challenges that are easily solved through the professional education. Additionally, this paper ensures the accuracy and repeatability of parameters using various scientific methods. Based on obtained results, the paper confirms the advantages of applying vibration diagnostics indicating its contribution in the detection and resolution of issues in modern industrial plant. The paper also makes a recommendation for further research, which includes expanding the use of vibration diagnostics to various types of industrial machines integrated with new technologies such as artificial intelligence and machine learning.

Key words: vibration diagnostics, RCM strategy, industrial facility, maintenance, balancing

LITERATURA

- [1] SKF Croatia d.o.o., *SKF Reliability Systems – Fundamentals of Machine Condition*, SKF Reliability Maintenance Institut, Zagreb, 2007.
- [2] NASA RCM Guide, *Reliability Centered Maintenance Guide, For Facilities and Collateral Equipment*, 2000.
- [3] NASA RCM Guide, *Reliability Centered Maintenance Guide, For Facilities and Collateral Equipment*, 2008.
- [4] Mobley, R. Keith, *Root Cause Failure Analysis*, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [5] Šestan, S., *Automatski sustav podmazivanja*, Tehnički fakultet u Rijeci, Rijeka, 2017.
- [6] SKF Reliability Systems, *Vibration Sensors*, 1999.
- [7] Wilcoxon Sensing Technologies, *Mounting Hardware and Accessories*, 2020.
- [8] Micro-Epsilon, *Distance Sensors*, Dostupno na: <https://www.micro-epsilon.de/dt3005-s2-m-c1-wirbelstrom-wegsensor/4314012/> (pristupljeno 29.3.2024.)
- [9] SKF Reliability Systems, *Vibration Sensors Catalog*, 2016.
- [10] SKF Reliability Systems, *Microlog Analyzer MX Series, CMXA 44, Portable Maintenance Instrument*, 2009.
- [11] Power-MI, *Vibration analysis*, Dostupno na: <https://power-mi.com/> (pristupljeno 14.5. 2024.)
- [12] DVOKUT-ECRO d.o.o., *Tehničko-tehnološko rješenje – Postojeće postrojenje u tvornici kamene vune Rockwool u Potpićnu*, Zagreb, 2012.
- [13] PKL, *SKF ležaj 22224 C3*, Dostupno na: <https://pkl.hr/proizvod/skf-lezaj-22224-ek-c3/> (pristupljeno 11.4.2024.)
- [14] Fatorić, O., *Mjerenje vibracija kao sastavni dio RCM strategije održavanja*, Visoka tehnička škola u Puli, Pula, 2008.
- [15] Šaravanja, D., Petković, D., *Vibracijska dijagnostika – teorija i praksa*, Mostar, 2010.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Komponente RCM strategije	4
Slika 3.1. Strojni dio - prikaz mase i opruge [5].....	14
Slika 3.2. Kombinacija izvora [1].....	17
Slika 3.3. Odnos amplitude vibracija [4].....	18
Slika 4.1. Odnos između pomaka, brzine i akceleracije [6].....	21
Slika 4.2. Načini montaže senzora [7].....	22
Slika 4.3. Odziv senzora ovisno o načinu montaže [7].....	23
Slika 4.4. Senzor brzine [6].....	25
Slika 4.5. Temperaturni odziv senzora brzine [6]	26
Slika 4.6. Senzor pomaka [8].....	27
Slika 4.7. Akcelerometar [9]	28
Slika 4.8. Uređaj Microlog MX [10]	30
Slika 5.1. Normalan spektar tijekom kontakta zupčanika i pinjona [11]	32
Slika 5.2. HTF spektar [11]	33
Slika 5.3. Ekscentričnost kod zupčastog prijenosa [11]	34
Slika 5.4. Spektralni prikaz napuknutog/slomljenog zuba [11].....	34
Slika 5.5. Uljni vrtlog [11]	35
Slika 5.6. Komponente valjnih ležajeva [11]	36
Slika 5.7. Dimenzije valjnog ležaja [11].....	36
Slika 5.8. Kutna ekscentričnost [11].....	40
Slika 5.9. Paralelna ekscentričnost [11].....	40
Slika 5.10. Ekscentričnost remenica [11].....	41
Slika 5.11. Ekscentričnost remena [11].....	42
Slika 5.12. Ekscentričnost ležaja [11]	42

Slika 5.13. Rezonancija [11]	43
Slika 5.14. Statički disbalans [11]	44
Slika 5.15. Spregnuti disbalans [11]	45
Slika 5.16. Disbalans ovješnog rotora [11].....	46
Slika 5.17. Oslonci motora.....	46
Slika 6.1. Vibracije prije i nakon nastanka havarije	48
Slika 6.2. Shema proizvodnog procesa [12]	49
Slika 6.3. Karakteristike ventilatora (volumni protok – tlak).....	52
Slika 6.4. Karakteristike ventilatora (volumni protok – snaga)	52
Slika 6.5. Moment opterećenja i brzina okretaja impelera	53
Slika 6.6. Označavanje lopatica impelera	54
Slika 6.7. Upis brojeva na rotor ventilatora	55
Slika 6.8. Postavke mjernog uređaja	56
Slika 6.9. Napredne postavke mjernog uređaja	58
Slika 6.10. Početno pokretanje	58
Slika 6.11. Obrazac ventilatora zone hlađenja.....	59
Slika 6.12. Unos podataka testnog utega	60
Slika 6.13. Testni uteg.....	60
Slika 6.14. Testno pokretanje.....	61
Slika 6.15. Parametri korekcijskog utega.....	62
Slika 6.16. Pokretanje s korekcijskim utegom.....	62
Slika 6.17. Prikaz vibracija nakon balansiranja.....	63
Slika 6.18. SKF ležaj 22224 C3 [13].....	66
Slika 6.19. Elektromotor 315 kW i automatska mazalica	67

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Primjena metode nadzora za pojedinu vrstu opreme [2]	8
Tablica 6.1. Karakteristike ventilatora	50
Tablica 6.2. Promjena intervala podmazivanja ležaja ovisno o temperaturi	66