

Održavanje po stanju kontrolom parametara

Brckan, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:133287>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Karlo Brckan

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Karlo Brckan

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Dragutinu Lisjaku na pomoći u vidu korisnih savjeta i uputa tijekom izrade rada.

Također, zahvaljujem se zaposlenicima u odjelu održavanja tvrtke Holcim Hrvatska d.o.o., a posebice voditelju održavanja Vedranu Mariću na ustupljenim informacijama te izdvojenom vremenu i pomoći pri pisanju ovog rada.

Konačno, zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori tijekom dosadašnjeg studija.

Karlo Brckan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Brckan**

JMBAG: **0035226596**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održavanje po stanju kontrolom parametara**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Condition base maintenance by parameter control**

Opis zadatka:

Održavanje po stanju spada u skupinu naprednijih strategija održavanja, a po definiciji je to proces kojim određujemo stanje (“zdravlje”) tehnološke opreme čije radne parametre kontinuirano pratimo tijekom eksploatacije. Cilj je otkriti degradaciju komponenti što je ranije moguće, kako bi se izbjegli neplanirani zastoji i troškovi.

U radu je sukladno navedenom potrebno:

1. Opisati strategiju održavanja po stanju,
2. Prikazati i objasniti faze uvođenja održavanja po stanju kontrolom parametara,
3. Predložiti i izraditi konkretan projekt implementacije.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Dragutin Lisjak

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Predsjednik-Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. OSNOVNA PODJELA I CILJEVI ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SUSTAVA	2
2.1. Ciljevi održavanja	2
2.2. Pregled strategija održavanja	3
2.2.1. Korektivno održavanje	4
2.2.2. Preventivno održavanje.....	4
3. ODRŽAVANJE PO STANJU	8
3.1. Ciljevi strategije održavanja po stanju	9
3.2. Tehnička dijagnostika	10
3.3. Metode praćenja stanja kontrolom parametara	10
3.3.1. Vibrodijagnostika.....	11
3.3.2. Termografija	14
3.3.3. Analiza ulja	18
3.3.4. Ultrazvučna dijagnostika	20
3.4. Implementacija održavanja po stanju kontrolom parametara	23
4. PRIMJER IMPLEMENTACIJE ODRŽAVANJA PO STANJU KONTROLOM PARAMETARA.....	26
4.1. Vibrodijagnostika.....	26
4.1.1. Odabir strojeva i učestalost mjerenja	27
4.1.2. Alarmne granice	28
4.1.3. Oprema za mjerenje	29
4.1.4. Postupak mjerenja vibracija.....	30
4.2. Termografija.....	37
4.2.1. Odabir strojeva i učestalost mjerenja	37
4.2.2. Alarmne granice	37
4.2.3. Oprema za mjerenje	38
4.2.4. Postupak termografskog mjerenja.....	39
4.3. Analiza ulja	45
4.3.1. Preporučeni testovi i učestalost analize ulja	45
4.3.2. Uzorkovanje ulja	46
4.3.3. Rezultati analize ulja.....	47
5. PRIJEDLOG UNAPRJEĐENJA PROCESA ODRŽAVANJA.....	49
6. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA.....	54

PRILOZI..... 56

POPIS SLIKA

Slika 1.	Strategije održavanja	4
Slika 2.	Podjela preventivnog održavanja [1].....	5
Slika 3.	Krivulje troškova strategija održavanja [14]	9
Slika 4.	Opći slučaj određivanja i značenja granica mjerenog parametra [1]	11
Slika 5.	Tipičan oblik akcelerometra za mjerenje vibracija [7].....	13
Slika 6.	Prikaz mjerenja vibracija [7]	14
Slika 7.	Elektromagnetski spektar [8].....	15
Slika 8..	Daljinski infracrveni termometar [8].....	16
Slika 9.	Infracrvena kamera proizvođača FLIR [9].....	16
Slika 10.	Prikaz termografskog mjerenja reduktora transportne trake [1]	17
Slika 11.	Potencijalni izvori kontaminacije ulja [10]	18
Slika 12.	Navojni kontaktni ultrazvučni senzor [13].....	21
Slika 13.	Beskontaktni ultrazvučni senzor [13].....	21
Slika 14.	Prikaz ispitivanja ventila ultrazvučnom dijagnostikom [13].....	22
Slika 15.	Metode praćenja stupnja degradacije opreme primjenom I-P-F krivulje [16]	23
Slika 16.	Prikaz faza uvođenja strategije održavanja po stanju [1]	25
Slika 17.	Dopuštene vrijednosti općih vibracija prema ISO 10816-1 1995 [11]	29
Slika 18.	391-K-SL QuickCollect prijenosni senzor proizvođača SKF [17]	30
Slika 19.	Skica ventilatora s lokacijama mjerenja vibracija [11]	31
Slika 20.	Mjerenje vibracija ležajeva ventilatora otprašivanja peći	32
Slika 21.	Skica kugličnog mlina s lokacijama mjerenja vibracija [11]	32
Slika 22.	Skica glavnog pogona rotirajuće peći s lokacijama mjerenja vibracija [11].....	33
Slika 23.	Mjerenje vibracija na reduktoru glavnog pogona peći.....	35
Slika 24.	Dijagram trenda mjerenih vibracija za ventilator otprašivanja peći [11].....	36
Slika 25.	Dijagram trenda mjerenih vibracija za reduktor glavnog pogona peći [11].....	36
Slika 26.	Infracrvena termalna kamera FLIR T560 [18]	38
Slika 27.	Infracrveni termometar TKTL 30 [19].....	39
Slika 28.	Postupak mjerenja temperature plašta rotirajuće peći	40
Slika 29.	Postupak mjerenja temperature zupčanika rotirajuće peći	41
Slika 30.	Izveštaj mjerenja temperature zupčanika rotirajuće peći	42
Slika 31.	Postupak mjerenja temperature vanjskog ležaja mlina ugljena.....	43
Slika 32.	Izveštaj mjerenja temperature vanjskog ležaja mlina ugljena.....	44
Slika 33.	Lokacije uzorkovanja ulja [11].....	46
Slika 34.	Uzorkovanje ulja s reduktora mlina cementa	47
Slika 35.	Primjer bežičnog kontaktnog senzora [19].....	49
Slika 36.	Montirani senzor na ležaju ventilatora [11]	50
Slika 37.	Montirani senzor na reduktoru glavnog pogona peći [11]	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iskustvene dopuštene vrijednosti vibracija za zubne vijence i pogonske zupčanike [11]	29
Tablica 2. Lokacije mjerenja vibracija ležajeva ventilatora [11]	31
Tablica 3. Lokacije mjerenja vibracija kugličnog mlina [11]	33
Tablica 4. Lokacije mjerenja vibracija glavnog pogona rotirajuće peći [11].....	34
Tablica 5. Vrste analize ulja ovisno o njihovoj primjeni [11].....	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
f	Hz	frekvencija
v	m/s	brzina
a	m/s ²	akceleracija
λ	m	valna duljina

SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje važnost i implementaciju održavanja po stanju kontrolom parametara u industriji, s posebnim naglaskom na cementnu industriju. Rad detaljno razmatra različite metode održavanja po stanju, uključujući analizu vibracija, termografiju i analizu ulja, koje omogućavaju rano otkrivanje i sprječavanje potencijalnih kvarova opreme. Kroz konkretan primjer implementacije u tvrtki Holcim Hrvatska, rad prikazuje kako napredne tehnologije senzora i analitički alati mogu unaprijediti proces održavanja, smanjiti operativne troškove i povećati sigurnost na radu. Osim toga, razmatra se i proces implementiranja bežičnog sustava za praćenje stanja opreme u svrhu unaprjeđenja trenutnih praksi održavanja po stanju kontrolom parametara.

Ključne riječi: održavanje po stanju, parametar, analiza vibracija, termografija, sensorika

SUMMARY

This thesis explores the importance and implementation of condition-based maintenance by monitoring parameters in the industry, with a special focus on the cement industry. It thoroughly examines various condition-based maintenance methods, including vibration analysis, thermography, and oil analysis, which enable early detection and prevention of potential equipment failures. Through a concrete example of implementation in Holcim Croatia, the thesis demonstrates how advanced sensor technologies and analytical tools can improve the maintenance process, reduce operational costs, and enhance workplace safety. Additionally, the process of implementing a wireless system for monitoring equipment condition with the aim of improving current practices of condition-based maintenance by parameter control is also considered.

Key words: condition-based maintenance, parameter, vibration analysis, thermography, sensor technology

1. UVOD

U današnjem industrijskom okruženju, dinamičnost i kompleksnost proizvodnih procesa postavljaju visoke zahtjeve pred sustave održavanja. Razvojem znanosti i tehnologije oprema i uređaji su sve sofisticiraniji, mogućnost kvarova i zastoja sve je veća, a cijena popravaka sve je viša, pa je u suvremenim tvrtkama unapređivanje procesa održavanja u direktnoj funkciji razvoja i povećanja profita. Efikasno upravljanje održavanjem stoga je, osim za osiguravanje pouzdanosti, dostupnosti i produženja životnog vijeka opreme, posljedično ključno i za konkurentnost i uspjeh na tržištu.

Održavanje po stanju kontrolom parametara, koje se temelji na kontinuiranom praćenju i analizi parametara rada opreme, predstavlja moderni pristup koji omogućava predviđanje potencijalnih kvarova i u skladu s njima, preventivno djelovanje. Implementacijom senzorskih tehnologija za praćenje ključnih parametara stanja u stvarnom vremenu, poput vibracija, temperature i drugih omogućava se brza reakcija na anomalije prije nego što one eskaliraju u ozbiljne probleme. Ovaj pristup ne samo da smanjuje potrebu za planiranim i neplaniranim zastojima, već i značajno doprinosi sigurnosti radnog okruženja, smanjenju operativnih troškova i optimizaciji procesa održavanja.

Cilj ovog rada je istražiti kako se kroz primjenu senzorskih tehnologija i analitičkih alata u cementnoj industriji može postići optimizacija procesa održavanja po stanju. Detaljno će se razraditi primjer održavanja po stanju kontrolom parametara u tvornici cementa tvrtke Holcim Hrvatska te će se analizirati potencijalna implementacija suvremenih tehnologija s ciljem postizanja maksimalne raspoloživosti opreme, odnosno sredstava za rad, uz optimalne troškove održavanja, a s fokusom na kontinuirano poboljšanje i prilagodbu specifičnim zahtjevima cementne industrije.

2. OSNOVNA PODJELA I CILJEVI ODRŽAVANJA TEHNIČKIH SUSTAVA

Održavanje je skup tehničkih i administrativnih aktivnosti i postupaka usmjerenih prema očuvanju projektirane i zadane funkcije, kao i tehničkih svojstava određenog sredstva rada, tehničkog sustava ili općenito objekta održavanja ili dovođenje istog u tehnički ispravno stanje u kojem može obavljati svoju funkciju [1].

Održavanje je ključna komponenta procesa gospodarenja tehničkim sustavima. Funkcija mu je osigurati maksimalnu raspoloživost tehničkog sustava čime će se pojave degradacije, zastoja ili kvarova koji nepovoljno utječu na sposobnost izvršenja njihove zahtijevane funkcije svesti na najmanju moguću mjeru. Održavanje treba promatrati i kao investiciju u budući profit koji će se ostvariti kroz osiguranje kapaciteta i smanjenje operativnih troškova poslovanja. Održavanjem se također dokazuje i briga te sprječava negativan utjecaj tehničkih sustava na imovinu, ljude i okoliš.

2.1. Ciljevi održavanja

Ciljevi održavanja su usmjereni na očuvanje funkcionalnosti tehničkih sustava, produženje njihova životnog vijeka, minimiziranje neraspoloživosti kroz pojave zastoja ili kvarova, zadržavanje i po mogućnosti poboljšanje performansi, uz istovremeno osiguranje sigurnosti i usklađenosti sa zakonodavnom regulativom i tehničkim standardima. Ciljevi održavanja tehničkih sustava obuhvaćaju :

- Osiguravanje optimalne raspoloživosti opreme uz minimalno moguće, odnosno objektivno realne troškove održavanja
- Praćenje rada tehničkih sustava uz konstantno razmatranja mogućnosti modifikacija u cilju produženja životnog vijeka i eventualno poboljšanje svojstava i tehničkih performansi
- Svođenje kvarova i zastoja na minimum primjenom strategija planiranog i preventivnog održavanja
- Praćenje i provedbe postupaka i mjera kojim će se eliminirati negativni utjecaj tehničkog sustava na imovinu, ljude i okoliš

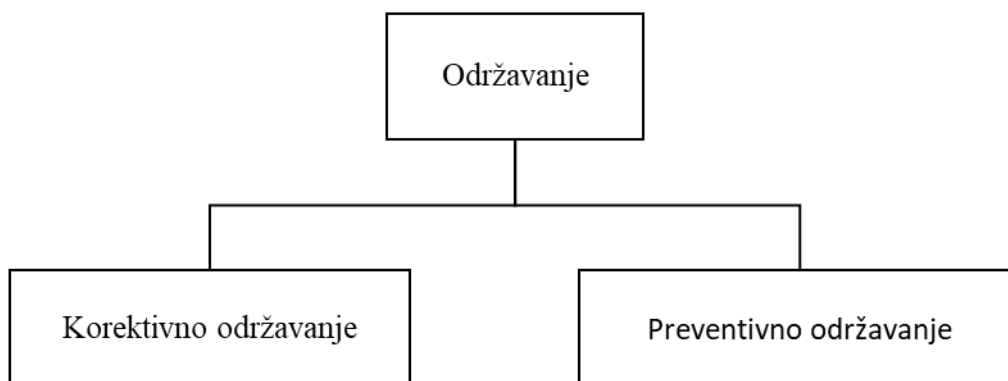
- Ispunjenje sigurnosnih propisa i zahtjeva provođenjem aktivnosti održavanja u skladu sa primjenjivom zakonskom regulativom i tehničkim standardima i normama

2.2. Pregled strategija održavanja

Strategija održavanja je metoda upravljanja čijom primjenom će se ostvariti ciljevi održavanja [2].

Ne postoji univerzalna strategija koja bi se mogla primijeniti na sve grane industrije, odnosno različite vrste objekata održavanja koji se mogu susresti u različitim tvrtkama ili organizacijama koje upravljaju tehničkim sustavima te kao takva odgovoriti na raznovrsne zahtjeve i izazove koji se susreću u poslovanju. Stoga svaki subjekt nužno mora oblikovati strategiju odgovarajuću vlastitim potrebama i ciljevima poslovanja. U praksi, oblikovanje strategije održavanja u industriji često uključuje prilagodbu standardnih pristupa specifičnim uvjetima i izazovima s kojima se tvrtka susreće. Primjerice, u energetske sektoru, gdje su sigurnost i pouzdanost ključni te je dužnost opskrbiti krajnje korisnike električnom energijom u bilo koje doba dana, strategija može biti usmjerena na rigorozne inspekcije i pojačano preventivno održavanje kritične opreme. U farmaceutskoj industriji, strategija održavanja mora naglasiti usklađenost s regulatornim zahtjevima i osiguravanje kvalitete krajnjeg proizvoda koji mora biti siguran za zdravlje. To često uključuje stroge protokole za čišćenje, sterilizaciju i validaciju opreme, uz kontinuirano praćenje kritičnih parametara procesa. U industriji cementa, na kojoj će kasnije biti obrađen i konkretan primjer implementacije održavanja po stanju, fokus strategije održavanja je, osim na smanjenju potrošnje energije i emisija ugljičnog dioksida, produženju životnog vijeka opreme poput rotirajućih peći i kugličnih mlinova te na optimizaciji procesa mljevenja i pečenja s obzirom na zahtjevne radne uvjete u kojima se navedeni procesi odvijaju. Generalno gledajući, trend je da suvremene tvrtke sve više teže inovativnim rješenjima uključujući senzoriku i analitiku podataka u svakodnevne aktivnosti održavanja u svrhu pravovremenog otkrivanja potencijalnih problema i optimizaciju istog.

Pojedini autori na različit način pristupaju u kategorizaciji i raščlambi strategija održavanja, ali je generalno prihvaćena podjela ona na planirano preventivno i neplanirano, odnosno korektivno. Navedena podjela prikazana je na slici 1.



Slika 1. Strategije održavanja

2.2.1. Korektivno održavanje

Korektivno održavanje (eng. *Corrective maintenance*) je metoda održavanja koja se temelji na otklanjanju kvarova ili zastoja tek nakon njihovog događaja, odnosno pojave. Primjena ove strategije trebala bi biti ograničena na tehničke sustave koji nisu kritični za raspoloživosti, kod kojih kvarovi ne izazivaju značajne posljedice, a vrijeme popravka je relativno kratko, a tehničke i ekonomske posljedice izazvane kvarom su minimalne [3].

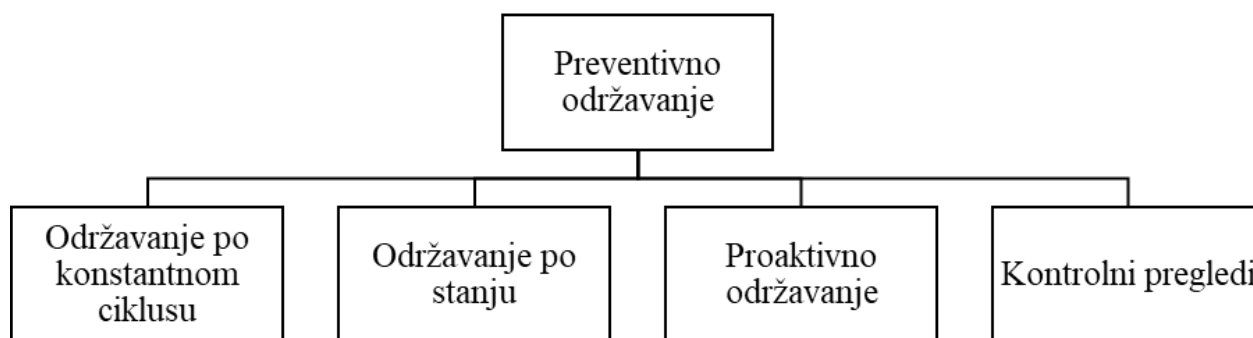
Strategija korektivnog održavanja je najneučinkovitija i po prirodi reaktivna strategija održavanja i općenito gospodarenja tehničkim sustavima. U složenim i vitalnim postrojenjima i kod ključne opreme se izbjegava radi velikih sigurnosnih rizika te neisplativosti zbog značajnih troškova popravaka te poslovnih gubitaka.

2.2.2. Preventivno održavanje

Preventivno održavanje je strategija održavanja koja se temelji na unaprijed planiranim aktivnostima koje se provode u određenim ciklusima ili intervalima, ili prema propisanim kriterijima i parametrima specifičnim za određeni tehnički sustav, a usmjerene su prema eliminaciji ili smanjenju vjerojatnosti pojave kvara ili zastoja. Razvijena je pametnim promišljanjem gospodarenja tehničkim sustavima kao odgovor na neefikasnu strategiju korektivnog održavanja koja je reaktivna i ne temelji se na planiranju, nego na otklanjanju

kvarova nakon što se već dogode. Na temeljima strategije planiranog održavanja razvijene su efikasnije i još naprednije metode održavanja potpomognute razvojem suvremenih tehnologija, a usmjerene su općenito na praćenju stanja i parametara rada tehničkih sustava u eksploataciji te pravovremenom preventivnom poduzimanju mjera i zahvata održavanja kojim će se prevenirati pojava kvarova i zastoja.

Strategija preventivnog održavanja može se podijeliti na: održavanje u konstantnim ciklusima (eng. *Fixed-time maintenance*), održavanje po stanju (eng. *Condition based maintenance - CBM*), proaktivno održavanje (eng. *Proactive maintenance*) te kontrolne preglede [1], kako je prikazano na slici 2.



Slika 2. Podjela preventivnog održavanja [1]

Dobro organiziran i sistematiziran plan preventivnog održavanja temelj je dobrog gospodarenja i upravljanja tehničkim sustavima. Rana detekcija potencijalnih problema primjenom strategija preventivnog održavanja prije nego što se pojave može značajno utjecati na:

- Povećanje raspoloživosti tehničkih sustava i smanjena vremena zastoja
- Smanjenje troškova održavanja, a time i općenito troškova poslovanja
- Smanjenje vjerojatnosti pojave oštećenja, kvarova i havarija koje mogu imati negativan utjecaj na imovinu, ljude i okoliš

- Produljenje životnog vijeka tehničkih sustava
- Povećanje pouzdanosti i produktivnosti poslovanja

Kontrolni pregledi služe za utvrđivanje funkcionalnosti i tehničke sigurnosti različitih sredstava rada, a provode ih inspektori unutar državnih agencija ili specijaliziranih poduzeća koji djeluju sukladno zakonima i regulativama. Takvi pregledi mogu obuhvatiti razne sustave i opremu, uključujući vozila, protupožarne uređaje, električne instalacije i slično, osiguravajući njihovu sigurnost i ispravnost za upotrebu [1].

Proaktivno održavanje fokusira se na identifikaciju i eliminaciju osnovnih uzroka kvarova. Koncentrirajući se na uzrok kvara umjesto na simptome, proaktivno održavanje prepoznato je kao važna strategija za postizanjem ušteda koje konvencionalne strategije održavanja ne mogu osigurati. Ovaj pristup uključuje tehniku RCFA za identifikaciju korijenskih uzroka kvarova koji se često ponavljaju u svrhu eliminacije istih, tehniku FMEA za analizu potencijalnih kvarova opreme i njihovih posljedica te tehniku RCM koja se fokusira na osiguravanju pouzdanosti i dostupnosti kritične opreme. Za očekivati je se da će u budućnosti doći do sve veće primjene ovog pristupa zahvaljujući ubrzanom napretku u razvoju senzora za detekciju uzroka kvarova, posebice u kontekstu kompleksnih tehničkih sustava [1].

Neki od nedostataka strategija preventivnog održavanja mogli bi se identificirati kod primjene strategije održavanja po konstantnom ciklusu. Kod iste se održavanje u primjeru postrojenja ili opreme planira u pravilu u određenim pravilnim vremenskim intervalima. Navedeno najčešće podrazumijeva zastoj proizvodnog ili drugog sličnog procesa te se zatim pristupa održavanju uslijed zahtjeva različitih normativa i/ili preporuka proizvođača opreme, bez prethodnog poznavanja realnog stanja objekta održavanja. Drugim riječima pristupa se u pravilu zahtjevnom i složenom skupu aktivnosti koje iziskuju značajan angažman svih vrsta resursa u planiranju i provedbi (npr. montaža, demontaža, ispitivanja, zamjene dijelova i komponenti), a održavanje možda nije objektivno niti bilo potrebno provesti.

U tom kontekstu se razvija i pristupa efikasnijim i učinkovitijim strategijama održavanja tehničkih sustava po stanju koje se temelje na povremenom ili kontinuiranom praćenju, kontroli i analizi relevantnih parametara stanja opreme u eksploataciji primjenom različitih tehnika i tehnologija te primjenom adekvatne specijalizirane dijagnostičke opreme. Takvim pristupom se mogu pravovremeno uočiti anomalije u stanju opreme i pravovremeno poduzimati potrebne aktivnosti, a ne čekati da nastupi propisani ciklus održavanja te tek tada poduzimaju odgovarajuće radnje.

Može se reći da se u praksi dobrog gospodarenja opremom kombinira preventivno održavanje u konstantnim ciklusima npr. planiranim zastojima radi obavljanja remonata ili servisa većeg obuhvata te provedbe zakonski propisanih ispitivanja ili pregleda, a ključna, vitalna i kritična oprema se pored toga prati po stanju. Navedeno može rezultirati da se ciklus planiranog održavanja tipa remont može produljiti što radi manje količine i vremena zastoja može imati značajan efekt na efikasnost i ekonomičnost cjelokupnog poslovanja. U nastavku će biti detaljnije obrađena strategija održavanja po stanju, što je i predmet ovog završnog rada.

3. ODRŽAVANJE PO STANJU

Održavanje po stanju (eng. *Condition based maintenance - CBM*) je strategija održavanja temeljena na poznavanju realnog stanja i uvjeta eksploatacije tehničkog sustava te temeljem toga planiranja aktivnosti održavanja u cilju osiguranja funkcionalnosti i kontinuiteta rada istog [2].

Praćenje stanja (eng. *Condition monitoring - CM*) u kontekstu održavanja, podrazumijeva primjenu prikladnih suvremenih tehnologija sa svrhom utvrđivanja stanja opreme i po mogućnosti, predviđanja i temeljem toga prevencije pojave kvara. Osim tehnologija koje počivaju na određenim fizikalnim načelima, odnosno pojava koje se mogu utvrditi uz pomoć odgovarajuće mjerne i ispitne opreme, te potom analizirati radi utvrđivanja stanja opreme, postoje i druge relativno jednostavne, ali u praksi provjerene, metode ocjene stanja opreme poput korištenja ljudskih osjetila (vid, sluh, osjet, njuh), praćenja pogonskih pokazatelja i parametara koji se zatim obrađuju primjenom statističkih i drugih metoda.

U ovom poglavlju biti će prikazane opisane neke tehnologije, odnosno metode praćenja i analize stanja opreme koje su potvrđene u praksi, a među kojima se mogu izdvojiti:

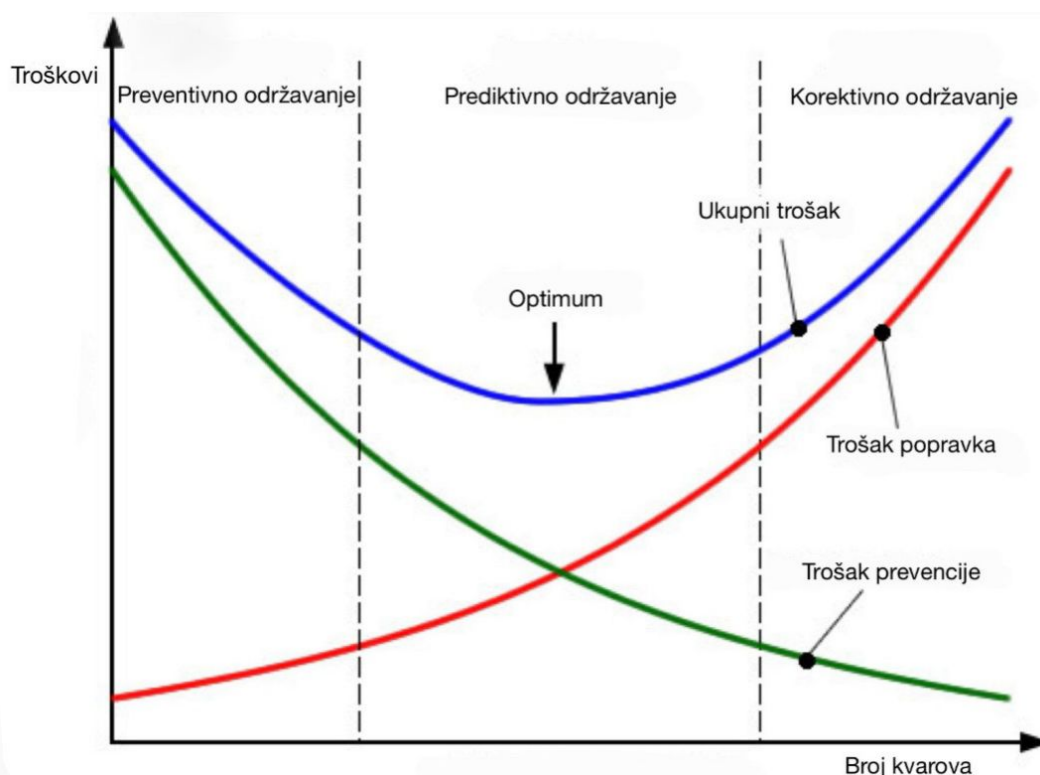
- vibrodijagnostika
- termografija
- analiza ulja
- ultrazvučna dijagnostika.

Kako je prethodno pojašnjeno, postoji mnogo načina na koje se može utvrditi stanje opreme ili općenito tehničkog sustava. Pri tome treba naglasiti važnost potrebe odabira odgovarajuće metode koja je prikladna za određeni tip, vrstu i namjenu opreme kako bi se što ranije mogle uočiti eventualne anomalije te slijedom toga imati dovoljno vremena i dugih resursa potrebnih za planiranje, pripremu i provedbu potrebnih aktivnosti za prevenciju i rješavanje potencijalnih problema.

3.1. Ciljevi strategije održavanja po stanju

Predviđanje događaja, odnosno donošenje zaključaka na temelju praćenja, odnosno utvrđivanja stanja pojedinog tehničkog sustava je vrlo zahtjevna zadaća koja iziskuje visoku razinu preciznosti i točnosti, detaljnu analizu podataka te kontinuirano praćenje promjena, kako bi se osigurala pouzdana i učinkovita operativnost istog u eksploataciji. Praćenje stanja tehničkog sustava, dugoročno gledano, bit će opravdano i isplativo ako ispunjava stvarni poslovni cilj, a to je ostvarenje maksimalne raspoloživosti uz realnu i troškovno optimalnu razinu ulaganja u tehnički sustav kroz cijeli životni vijek istog. U tom kontekstu mogu se izdvojiti sljedeći ciljevi:

- povećanje raspoloživosti i pouzdanosti opreme i općenito tehničkih sustava uspješnim predviđanjem, a zatim i prevencijom kvarova i otkaza opreme
- skraćivanje obustava i zastoja pogona planiranjem popravaka i drugih aktivnosti održavanja s naslova kontinuiranog praćenja stanja
- produženje životnog vijeka tehničkih sustava s naslova minimiziranja mogućnosti pojave događaja koja mogu negativno utjecati i time skratiti životni vijek
- reduciranje troškova održavanja koji su prikazani na slici 3., a time posredno i cjelokupnog poslovanja.



Slika 3. Krivulje troškova strategija održavanja [14]

3.2. Tehnička dijagnostika

Tehnička dijagnostika namijenjena je utvrđivanju stanja tehničkog sustava u realnom vremenu primjenom prikladnih metoda, postupaka i sredstava [1]. Navedeno se može postići praćenjem i mjerenjem različitih fizikalnih i drugih veličina relevantnih za eksploataciju pojedinog tehničkog sustava te usporedbom istih s prethodno definiranim graničnim i prihvatljivim vrijednostima za normalan i pouzdan rad u eksploataciji.

Nadzor stanja sustava, odnosno praćenje i mjerenje relevantnih veličina, može biti periodički ili kontinuirano. Periodički nadzor obično se izvodi u određenim, u pravilu vremenskim intervalima (npr. dnevno ili svakog sata) ili nakon što tehnički sustav odradi određeni broj operacija ovisno o njegovoj namjeni (npr. broj sati rada, broj operacija, broj uklopa/isklopa i sl.)

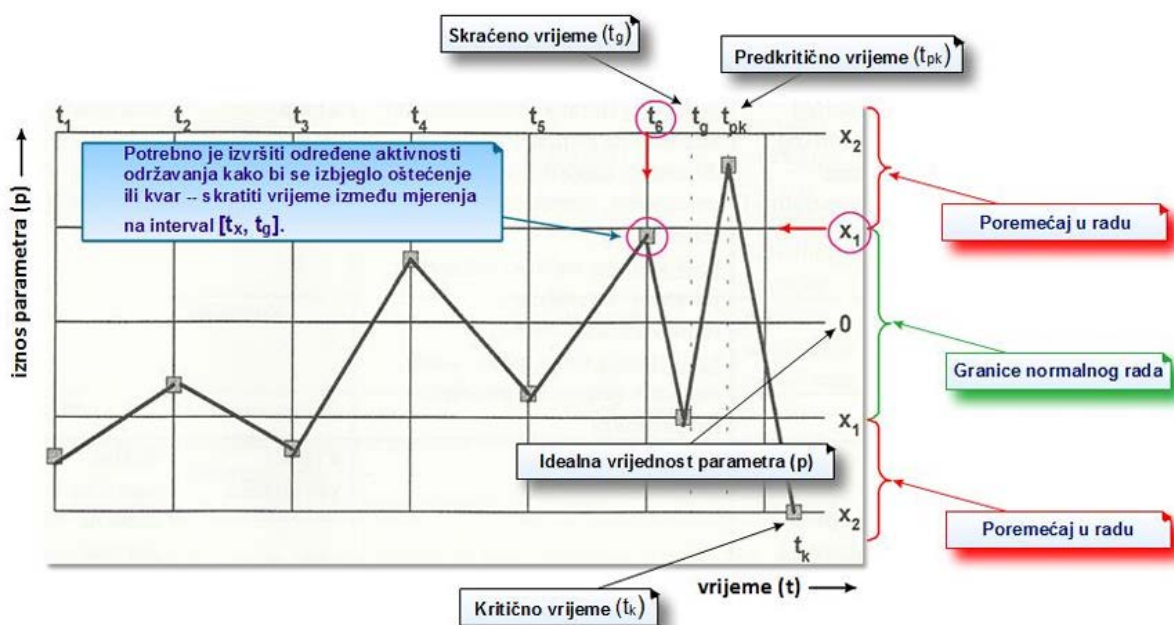
Nadzor se u pravilu provodi od strane operatera ili održavatelja korištenjem prijenosnih uređaja, kao što su termografske kamere, mjerači vibracija, analizatori buke, ultrazvučni detektori i sl. Ograničenje periodičkog nadzora stanja je u tome što zbog prirode periodičnosti i cikličnosti procesa može u među intervalima doći do propuštanja potencijalno važnih informacija i podataka o stanju opreme. Proces se kontinuiranog nadzora, s druge strane, obično izvodi pomoću instalirane opreme za mjerenje i akviziciju podataka te nadzor kojom se odabrane fizikalne veličine prikupljaju kontinuirano, bez prestanka. Time se prikuplja znatno veći broj podataka koji se potom direktno ili naknadno obrađuju [3].

Obrada podataka može se izvršavati za vrijeme prikupljanja podataka (eng. *on-line*) ili nakon što su podaci prikupljeni i spremljeni (eng. *off-line*) [15]. Podaci se, u kontekstu održavanja po stanju, obrađuju i uspoređuju s prethodno definiranim graničnim vrijednostima te se temeljem toga interpretiraju u svrhu procjene stvarnog stanja opreme te planiranja odgovarajućih aktivnosti održavanja.

3.3. Metode praćenja stanja kontrolom parametara

U nastavku će biti opisane tipične metode praćenja stanja kontrolom parametara koje su u praksi najviše zastupljene i dokazano efikasne. Od najveće je važnosti ponajprije identificirati metodu praćenja stanja koja će biti prikladna i optimalna, u tehničkom i ekonomskom pogledu za postizanje željenih i očekivanih rezultata. Svaka metoda ima svoja ograničenja, kako s obzirom na vrstu opreme na kojoj se može primijeniti tako i s obzirom na probleme i anomalije koje može detektirati.

Na slici 4. je prikazan dijagram koji ilustrira koncept održavanja po stanju kontrolom parametara. Os ordinate predstavlja iznos mjerenog parametra (p), što se može odnositi na izmjerene vrijednosti vibracija, temperature ili nekog drugog relevantnog pokazatelja stanja opreme, dok os apscise predstavlja vrijeme kroz koje se prati stanje opreme (t). Linije koje povezuju točke mjerenja pokazuju trendove u ponašanju mjernog parametra tijekom vremena tj. eksploatacije tehničkog sustava. Kako bi proces održavanja po stanju bio uspješan potrebno je definirati granice vrijednosti normalnog rada koja se temelji na idealnoj vrijednosti parametra. Važno je da se, ukoliko je mjerenjima utvrđeno da je vrijednost praćenog parametra prešla ove granice, pravovremeno provedu akcije održavanja u svrhu sprječavanja daljnje degradacije stanja opreme te potencijalnih većih oštećenja i kvarova.



Slika 4. Opći slučaj određivanja i značenja granica mjerenog parametra [1]

3.3.1. Vibrodijagnostika

Vibracija je cikličko gibanje čestice elastičnog tijela oko referentne točke koja primjerice kod rotirajućih strojeva može biti središte ležaja, kućište ležaja ili vratilo. Nastaje okretanjem rotirajućih komponenti strojeva, ali se prenosi se i na stacionarne dijelove strojeva pa i na dijelove na kojima su strojevi montirani.

Svaki rotirajući dio generira svoju jedinstvenu razinu vibracija koju je moguće detektirati odgovarajućim instrumentima. Veličina vibracija se kvantificira pomoću senzora i predstavlja osnovu za utvrđivanje mirnoće rada stroja odnosno dijagnostiku vibracijskog

stanja. Vibracije se mogu dijagnosticirati uz pomoć jedne ili više vrijednosti sljedećih parametara [4]:

- frekvencija vibracijskog gibanja - brzina ponavljanja periodičkog događaja, obično se izražava u ciklusima u minuti (min^{-1}), sekundi (s^{-1}) odnosno Hertzima (Hz)
- amplituda vibracije - maksimalna udaljenost koju čestica ili tijelo dostiže od svoje ravnotežne pozicije tijekom oscilacije ili vibracije
- pomak - ukupna udaljenost koji vibrirajući dio prevali od jedne krajnje granice pomaka do druge, također se naziva „pomak od vrha do vrha“ („peak to peak“)
- brzina vibracija - brzina kojom strojna komponenta oscilira, uobičajeno se izražava u milimetrima u sekundi (mms^{-1}) te se često bira kao jedinstveni parametar ocjene stanja.
- ubrzanje - predstavlja najveću brzinu kojom se brzina vibracija (brzina pomaka) povećava i daje nam naznaku pojave dinamičkih sila koje se generiraju vibracijama, a izražava se u milimetrima u sekundi na sekundu (mms^{-2})
- fazni kut - mjera vremenskog odnosa dvaju signala, korisna kod detektiranja neuravnoteženosti, necentriranosti, ekscentričnosti, labavosti, rezonancije i sl.

Praćenje vibracija može biti kontinuirano, uz pomoć trajno ugrađenih senzora, pri čemu poseban sustav prikuplja, obrađuje i pohranjuje podatke i omogućava kasniju ili trenutnu analizu te periodično, koje se obavlja prijenosnom opremom. Senzori mogu biti beskontaktni koji mjere vibracije direktno na rotirajućim dijelovima ili kontaktni koji mjere vibracije na stacionarnim dijelovima (npr. kućištima strojeva). Izbor senzora koji će najbolje prikazati stanje određenog rotirajućeg stroja ovisi o konstrukciji i broju okretaja stroja. Utvrđene su norme i strukovne smjernice koje pomažu kod utvrđivanja trenutnog stanja u odnosu na prihvatljive veličine vibracijskog stanja rotacionog stroja. Kod uspostave programa održavanja prema stanju utvrđuju se granice mirnoće rada stroja koje će ukazati na potrebu poduzimanja aktivnosti održavanja.

Za praćenje stanja opreme analizom vibracija, najčešće se primjenjuju kontaktni senzori – akcelerometri [Slika 5]. Mjerenje vibracija pomoću akcelerometra je vrlo jednostavno; senzor se prislanja na unaprijed definirani stacionarni dio stroja u radu te generira električni izlazni signal u korelaciji s vibracijama, odnosno mjerenom akceleracijom. Podaci prikupljeni akcelerometrom izravno se prenose u softver koji bilježi navedeni signal u obliku vremenskog vala, a na temelju kojeg se generira frekvencijski spektar vibracija koji je

ključan za utvrđivanje uzroka vibracija koje mogu rezultirati kvarovima. Ovi podaci se zatim analiziraju pomoću raznih računalnih sustava, a ukoliko dođe do odstupanja od prethodno utvrđenih granica normalnog rada stroja, održavatelji provode daljnju analizu s ciljem utvrđivanja uzroka povećanih vibracija te potencijalne potrebe za zamjenom ili popravkom [6]. Prikaz postupka mjerenja vibracija dan je na slici 6.



Slika 5. Tipičan oblik akcelerometra za mjerenje vibracija [7]

Razvoj suvremene tehnologije u području sensorike doveo je i do pojave bežičnih, visokobrzinskih laserskih senzora koji mogu detektirati vibracije koje akcelerometri ne mogu. Njihova uporaba omogućuje precizniju i lokaliziranu analizu vibracija, s obzirom da se senzori montiraju direktno na rotirajuću opremu umjesto na prethodno spomenute stacionarne dijelove. Vrlo je važno pritom odabrati smislene točke za postavljanje istih kako bi sami rezultati mjerenja bili što precizniji te kako ne bi došlo do oštećenja senzora ili rotora stroja u radu.

Praćenjem vibracija i njihovom analizom moguće je otkriti i dijagnosticirati velik broj problema vezanih uz rotacijske strojeve. Neki od općeprihvaćenih kvarova odnosno stanja koja dovode do povećanih vibracija i koja možemo njihovim praćenjem utvrditi su sljedeća [1]:

- neravnoteža sustava (statička, dinamička, konzolnog opterećenja)
- asimetričnost sustava (paralelna, kutna)
- problemi s valjnim ležajevima (greške vanjske i unutarnje staze kotrljanja, kuglica)
- ekscentričnost sustava
- deformiranost ili pukotine vratila
- labavost/slabost mehaničkih spojeva
- vibracije uslijed protoka medija

- rezonancija.

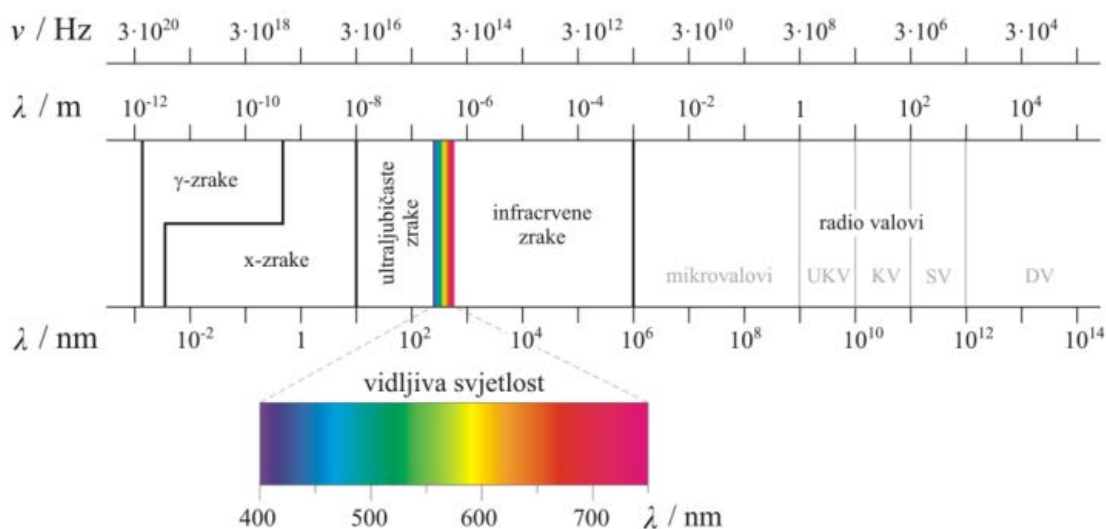


Slika 6. Prikaz mjerenja vibracija [7]

Analiza rezultata praćenja vibracijskog stanja sa svrhom utvrđivanja stanja odnosno detektiranja postojanja problema na promatranj komponenti nije jednostavan postupak. Ispravno tumačenje vibracijskog stanja traži izuzetno obučene i iskusne osobe koje poznaju kako tehnologiju tako i opremu koja se promatra. Neki od problema se brzo i lako detektiraju dok neki traže mnogo sati rada iskusnog specijaliste za postavljanje ispravne dijagnoze, ili pak primjenu većeg broja različitih dijagnostičkih metoda. Rana detekcija navedenih stanja koja dovode do povećanja vibracija ključna je za produljenje životnog vijeka opreme te, samim time, prevenciju potencijalnih kvarova i većih havarija koje mogu biti vrlo skupe i opasne.

3.3.2. Termografija

Toplinskim mjernim tehnologijama mogu se mjeriti apsolutne ili relativne temperature važnih dijelova opreme koja se prati. Svaka promjena temperature označava promjenu stanja tehničkog sustava te velika temperaturna odstupanja od uobičajenih vrijednosti mogu dati dobru indicaciju o eventualnoj prisutnosti nekog problema. Među najčešće korištenim metodama praćenja toplinskog stanja opreme je infracrvena termografija. Ova beskontaktna metoda omogućuje mjerenje intenziteta infracrvenog zračenja s površine promatranog objekta s ciljem određivanja temperature i njezine raspodjele po površini mjerenog objekta.



Slika 7. Elektromagnetski spektar [8]

Infracrveni spektar dio je elektromagnetskog spektra, prikazanog na slici 7., koji se nalazi izvan vidljive svjetlosti, s valnim duljinama od 0,78 do 1000 μm . Primjenom infracrvene termografije se varijacije u infracrvenom zračenju (tj. razlike u temperaturi) površine objekta mogu vizualizirati u vidljivom dijelu spektra. Postoje uređaji koji pomoću osjetnika infracrvenog zračenja daljinski mjere temperaturu u nekoj točki objekta ili uređaji (infracrvene kamere) koji snimaju, poput TV kamera, površinu i proizvode sliku (tzv. termogram) temperaturnih varijacija prikazanu na njihovom ekranu. Infracrvene kamere uzimaju u obzir koeficijent emisije, udaljenost objekta, temperaturu okoline, te se obradom navedenih podataka u procesoru kamere golom oku nevidljiv spektar infracrvenog zračenja zračen s površine zamjenjuje vidljivim spektrom, odnosno bojama, pri čemu svaka boja predstavlja određen temperaturni raspon [9]. Ova metoda se još naziva i termovizijom i danas se, s obzirom na širu dostupnost opreme i njene sve veće mogućnosti, sve više koristi za snimanje toplinskog stanja dijelova postrojenja. Neke od prednosti provedbe termografskog pregleda su:

- provođenje pregleda pod normalnim radnim uvjetima
- dobivanje rezultata mjerenja u realnom vremenu bez prekidanja proizvodnog procesa i bez utjecaja na isti
- mogućnost praćenja temperature dijelova pod naponom i ostalih u pogonu nepristupačnih dijelova
- neispravna oprema otkriva se u ranom stadiju i stoga se kvarovi mogu sanirati prije ispada iz pogona

- rano otkrivanje kvarova omogućuje unapređivanje održavanja, raspored popravka i predviđanje potrebnih rezervnih dijelova
- moguće je obuhvatiti više mjernih točaka jednom kamerom i time smanjiti mogućnost pogreške
- smanjivanje troškova održavanja
- smanjivanje gubitka energije.



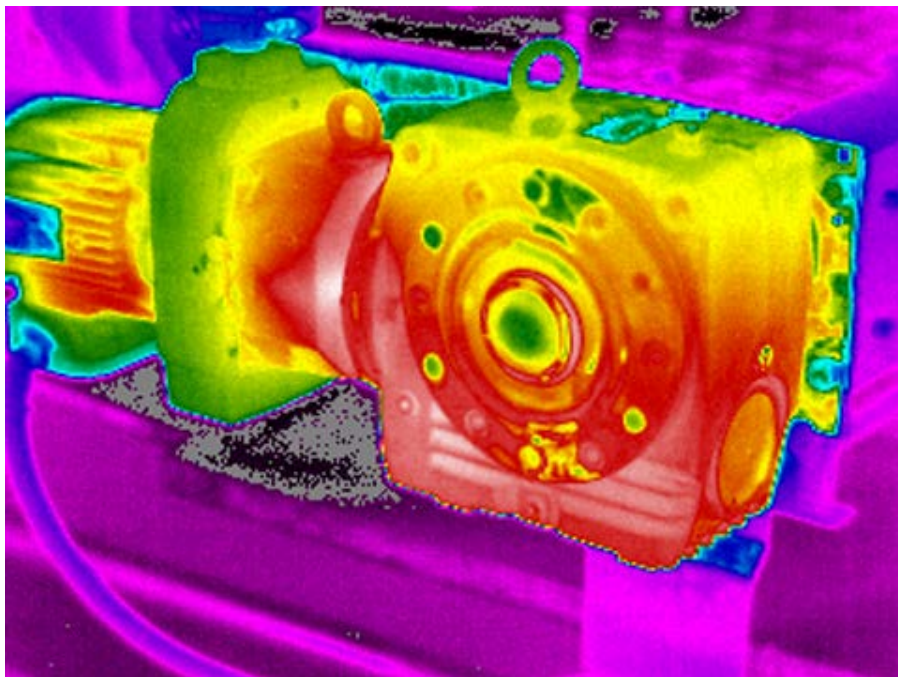
Slika 8.. Daljinski infracrveni termometar [8]



Slika 9. Infracrvena kamera proizvođača FLIR [9]

Mnoga stanja koja skraćuju životni vijek komponenata, odnosno ugrožavaju njenu funkcionalnost se iskazuju kroz promjene radne ili površinske temperature. Termografsko snimanje ili mjerenje temperature nam u takvim slučajevima pomaže kod ranog utvrđivanja problema. Primjerice, labavi ili korodirani električni spojevi dovesti će, zbog povećanog otpora, do povišenja temperature spoja što će se jasno vidjeti infracrvenom kamerom i omogućiti popravak prije otkaza komponente ili možda požara. Također, problemi kod rotirajućih strojeva obično će rezultirati povećanim trenjem koje se manifestira generiranjem toplinskog toka te posljedično povećanjem temperature komponenti u kontaktu [8]. Tipični problemi koji se mogu detektirati praćenjem temperaturnog stanja komponenata su:

- pregrijavanje ležajeva rotacijskih strojeva
- pregrijavanje mehaničkih prijenosnika
- problemi s toplinskom ili hidro izolacijom
- problemi s hlađenjem elektromotora
- problemi s ventilima
- prodor vlage
- pregrijavanje peći
- problemi s transformatorima (izolacija, priključci, razina ulja, hlađenje i sl.).

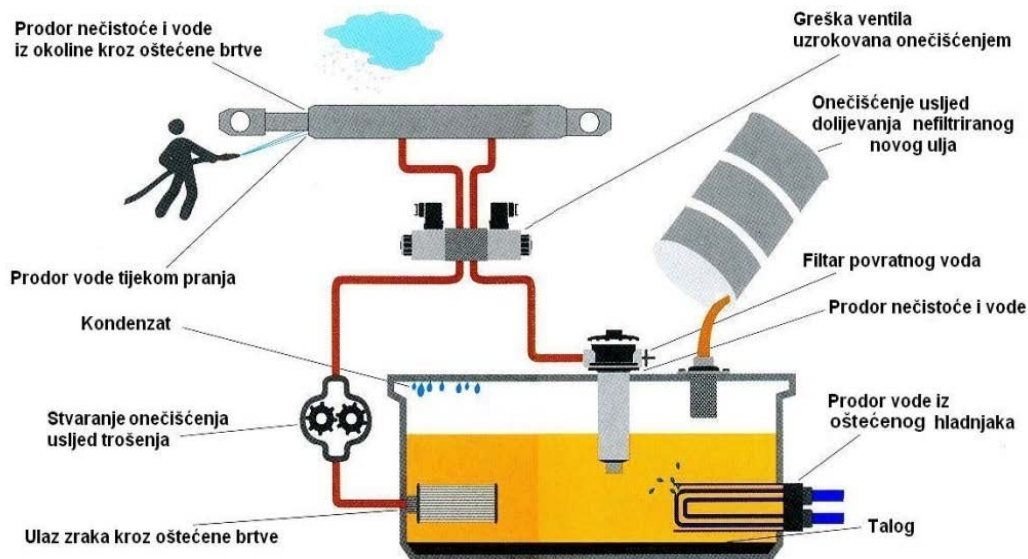


Slika 10. Prikaz termografskog mjerenja reductora transportne trake [1]

3.3.3. Analiza ulja

Jedna od osnovnih i najstarijih metoda održavanja prema stanju je analiza ulja za podmazivanje. Razlog tome je činjenica da je ta analiza vrlo uspješna u ranom otkrivanju potencijalnih problema u eksploataciji opreme.

Analizom ulja se utvrđuju mnoga stanja vezana uz podmazivanje strojeva. Utvrđuje se stanje ulja, odnosno ima li još uvijek ima maziva svojstva kakva su bila predviđena. Također, provjerava se i stanje sustava za podmazivanje koji uz svoju primarnu funkciju ima i bitnu ulogu u sprječavanju kontaminacije ulja koja bi dovela do slabljenja funkcije podmazivanja. Konačno, utvrđuje se stanje komponente koja se podmazuje analizom čestica metala koje su u ulje dospjele trošenjem podmazivanih površina stroja. Dodatno na utvrđivanje stanja odnosno stupnja degradacije sustava periodičkim analizama i praćenjem njihovih trendova može se zaključivati o kvaliteti izvedenih radova održavanja ili vođenja pogona kao što su: kontaminacija sustava za vrijeme promjene ulja, nepravilno čišćenje sustava nakon popravaka, dodavanje neodgovarajućeg ulja, neodgovarajući režim rada i sl. stanja koja skraćuju životni vijek komponenata odnosno ugrožavaju njenu funkcionalnost se iskazuju kroz promjene radne ili površinske temperature [8]. Na slici 11. prikazani su potencijalni izvori kontaminacije ulja.



Slika 11. Potencijalni izvori kontaminacije ulja [10]

Analiza ulja se može provoditi u vlastitom laboratoriju, a mogu se koristiti i usluge vanjskih specijaliziranih laboratorija. Intervali uzimanja uzoraka trebaju biti temeljeni na povijesti pogona, broju sati rada, stanju ulja i sl. Uzorci se uzimaju iz aktivnog dijela uljnog

cjevovoda uzvodno od bilo kakvih uređaja za filtriranje. Radi konzistentnosti rezultata najbolje je uzorke uzimati uvijek na istom mjestu za određeni stroj (koristeći trajno ugrađene ventile za uzorkovanje) [12].

Osim ulja za podmazivanje prate se, uz odgovarajuće prilagođene testove, i ulja koja se koriste i za druge namjene kao što su izolacijska ulja, ulja za hlađenje, ulja u transformatorima ili ulja u raznim hidrauličkim sustavima. Tipični testovi koji se provode na uzorcima ulja su [8]:

- test na prisutnost vode - testom se kvantificira količina vode u ulju. Voda znatno smanjuje maziva svojstva ulja, dielektrična svojstva ulja i pospješuje koroziju podmazivanih površina. Prisutnost vode ukazuje na moguću kondenzaciju, propuštanje iz rashladnog sustava ili iz procesa kroz brtve
- spektroskopija - mjeri se koncentracija metala u mazivu. Metali mogu biti: čestice od trošenja kliznih površina, vanjska kontaminacija ili aditivi dodani u mazivo ulje. Te informacije pomažu u utvrđivanju stanja komponente ili maziva
- krute čestice u ulju - mjeri se veličina i količina krutih čestica u ulju. Podatak govori o čistoći ulja i potrebi za njegovo filtriranje ili zamjenu
- mjerenje viskoziteta - viskozitet je najvažnija karakteristika ulja. Usporedba s zahtijevanom vrijednošću ukazuje na potrebu zamjene ulja
- kemijski sastav ulja - molekularna analiza ulja daje informaciju o sastavu ulja, aditivima, produktima razgradnje tekućine i vanjskoj kontaminaciji
- ferografija - daje podatak o relativnoj količini feritičnih produkata trošenja u mazivu. Ako se trendiranjem utvrde promjene potrebna je akcija održavanja
- analitička ferografija - uz pomoć jakog mikroskopa vizualno se ispituju čestice metala i utvrđuje se vrsta i intenzitet trošenja površina
- kiselinski broj - utvrđuje se kiselost maziva. Organske kiseline, kao posljedica oksidacije ulja, degradiraju njegova maziva svojstva i potiču koroziju podmazivanih dijelova.

Kod primjene metode analize ulja jedna od ključnih zadaća je utvrditi na kojoj opremi ju je opravdano primijeniti. Izbor opreme treba biti optimalan s obzirom na njenu važnost po raspoloživost postrojenja, njezinu cijenu i trošak zamjene ulja. Obično je, kod većih uljnih sustava jeftinije uspostaviti sustav zamjene ulja temeljen na njegovom stanju nego periodički mijenjati ulje. Kod manjih sustava možda neće biti isplativo kontrolirati ulje već ga periodički

mijenjati. U takvim slučajevima analiza kritičnosti opreme i posljedica njezinog otkaza mogu pomoći kod opredjeljenja za ili protiv praćenja ulja.

Općenito govoreći, svi hidraulički sustavi te svi rotacijski strojevi većih snaga sa sustavima ulja za podmazivanje su pogodni za analizu ulja, a učestalost analize je najčešće mjesečno do tromjesečno [11]. Tipična oprema kod koje se provodi analiza ulja uključuje:

- reduktore
- energetske i mjerne transformatore
- hidrauličke sustave
- dizel agregate
- velike pumpne agregate
- servo uređaje (prigoni, motori)
- ležajeve.

3.3.4. *Ultrazvučna dijagnostika*

Većina strojeva u svom radu, pod normalnim uvjetima, emitira zvuk koji se može prepoznati kao njihova zvučna slika. Svaka promjena zvučne slike je znak da je došlo do nekog pogoršanja stanja.

Praćenje stanja opreme ultrazvukom danas je vrlo popularna metoda u industriji radi svoje široke primjene te mogućnosti rane i precizne detekcije potencijalnih problema. Ultrazvukom se smatraju zvučni valovi frekvencije veće od 20 kHz, a ultrazvučni spektar je definiran u području 30 kHz do 2 MHz. To je zvuk kojeg ljudsko uho ne može čuti pa se stoga kod snimanja zvučne slike nekog uređaja koristi odgovarajući instrumentarij. Postoje dvije vrste senzora koje se koriste kod ultrazvučne dijagnostike – kontaktni i beskontaktni a, shodno tome, i dva načina mjerenja stanja opreme. Kod beskontaktnih senzora (eng. *airborne*) [Slika 13] senzor nije u fizičkom kontaktu s objektom mjerenja te detektira, obrađuje i memorizira signal koji se širi zrakom, dok se kontaktni senzori (eng. *structure borne*) [Slika 12] koriste na način da se senzor prislanja ili montira na objekt mjerenja i obrađuje signal koji se širi kroz kruti materijal [13].



Slika 12. Navojni kontakti ultrazvučni senzor [13]



Slika 13. Beskontaktni ultrazvučni senzor [13]

Tehnika se primjenjuje na sustave u kojima se generira mjerljiva razina ultrazvuka kao što su hidraulički sustavi, sustavi komprimiranog zraka i plinova, sustavi pare i sustavi u podtlaku, a najčešće u svrhu detekcije propuštanja navedenih medija. Zbog sigurnosnih razloga, točnije mogućnosti „closed door“ ispitivanja, ultrazvučna dijagnostika je također vrlo efikasna i u inspekciji visoko i niskonaponskih električnih instalacija. Tipični primjeri opreme na kojoj se može izvoditi su:

- sustavi pare
- hidraulički sustavi
- sustavi s komprimiranim zrakom

- sustavi s plinovima pod tlakom (vodik, kisik)
- izmjenjivači topline
- ventili [Slika 14]
- pumpe
- ležajevi
- električne instalacije.

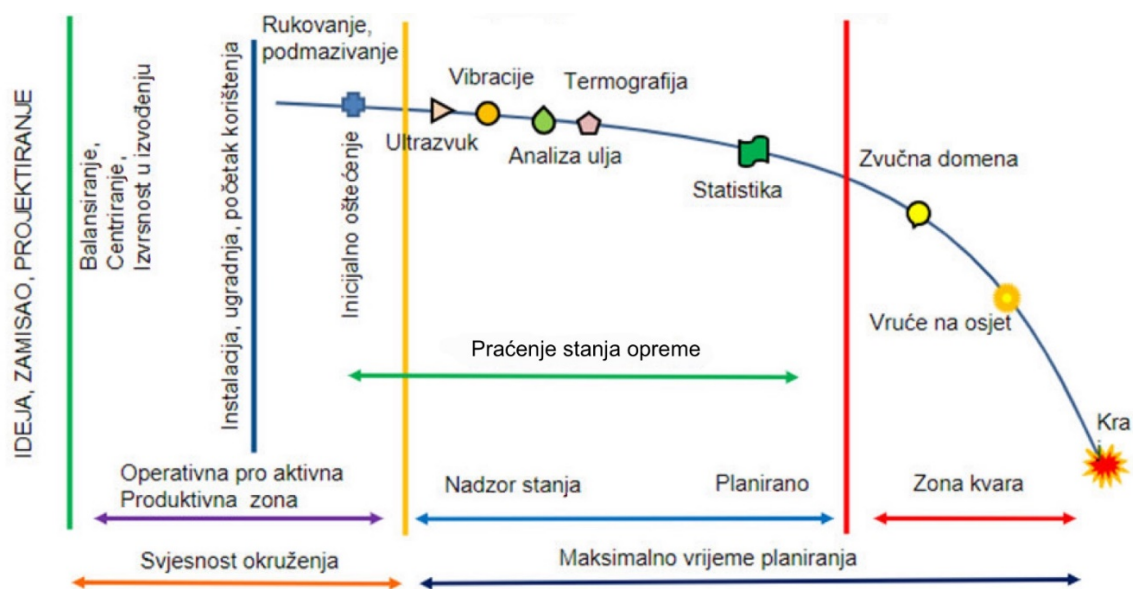


Slika 14. Prikaz ispitivanja ventila ultrazvučnom dijagnostikom [13]

Osim gore navedenog, analizom ultrazvučne slike i praćenjem njezinih trendova mogu se rano identificirati oštećenja ležajeva te se značajno može unaprijediti proces podmazivanja. Proces podmazivanja je vrlo izazovno područje u održavanju koje, s obzirom na svoju kritičnu važnost za pravilno funkcioniranje opreme, zahtjeva veliki fokus, resurse i dobro razrađenu strategiju. Danas se proces podmazivanja još uvijek često bazira na iskustvenoj procjeni izvršitelja što dugoročno nije najpouzdanija metoda. Samim time, postoji ogroman prostor za unaprjeđenje procesa podmazivanja, a jedan od načina je primjenom ultrazvučne dijagnostike. Efikasnost primjene ultrazvuka u ovom području leži u činjenici da ultrazvuk mjeri trenje, dok je primarna zadaća podmazivanja upravo smanjenje trenja. Ultrazvučna dijagnostika omogućuje podmazivanje po stanju gdje se „slušanjem“ ležajeva te uspoređivanjem dobivenih rezultata mjerenja s trendovima može vrlo precizno odrediti trenutak u kojem je potrebno podmazivanje ležajeva, kao i optimalna količina maziva

potrebna za njihov pravilan rad. Optimizacija količine maziva kombinirana s pravovremenim podmazivanjem igra veliku ulogu u smanjenju trošenja ležajeva trenjem, a posljedično i produljenju životnog vijeka istih [13].

Na slici 15. prikazane su metode praćenja stupnja degradacije opreme primjenom I-P-F krivulje.



Slika 15. Metode praćenja stupnja degradacije opreme primjenom I-P-F krivulje [16]

3.4. Implementacija održavanja po stanju kontrolom parametara

Postupak uvođenja održavanja po stanju složen je proces kojeg možemo podijeliti u 7 faza [Slika 16] [1]:

1. **Izbor metode mjerenja:** ova faza uključuje detaljnu analizu različitih metoda dostupnih za praćenje stanja opreme. Potrebno je razmotriti prednosti i nedostatke svake metode u kontekstu specifičnih zahtjeva postrojenja te pri odabiru metode uzeti u obzir faktore poput troškova, dostupnosti željene opreme, stručnosti osoblja i sl.
2. **Izbor lokacije mjerenja:** važno je identificirati kritične lokacije na opremi na kojima se, uslijed trošenja ili kvarova, među prvima očekuju promjene u parametrima koji se mjere, a koji su vitalni za performanse tehničkog sustava ili sigurnost.
3. **Izbor parametara:** biraju se pouzdani parametri koji će se pratiti na prethodno odabranim lokacijama mjerenja na temelju njihove značajnosti za rad tehničkog

sustava te sposobnosti pravovremenog prepoznavanja potencijalnih budućih problema na temelju istih.

4. **Izbor dopuštenih vrijednosti:** ova faza uključuje postavljanje granica normalnog rada, tj. dopuštenih vrijednosti mjerenih parametara. Mogu se temeljiti na specifikacijama proizvođača, industrijskim standardima, preporukama eksperta ili pak iskustvu rada s opremom slične ili iste vrste.
5. **Mjerenje:** podrazumijeva redovno i sustavno praćenje vrijednosti na definiranim lokacijama odabranom metodom mjerenja u svrhu kontinuiranog praćenja stanja tehničkog sustava.
6. **Dijagnoza:** mjerenjem prikupljeni podaci se obrađuju, analiziraju te potom interpretiraju. Uspoređuju se s dopuštenim vrijednostima kako bi se procijenilo stvarno stanje tehničkog sustava te identificirale abnormalnosti ili potencijalni problemi koji bi iziskivali daljnje akcije održavanja.
7. **Odluka o planu održavanja:** na temelju rezultata dijagnostičke analize, donosi se odluka o budućim aktivnostima koje treba poduzeti kako bi se održala operativna učinkovitost opreme te spriječili potencijalni kvarovi ili veće havarije.



Slika 16. Prikaz faza uvođenja strategije održavanja po stanju [1]

4. PRIMJER IMPLEMENTACIJE ODRŽAVANJA PO STANJU KONTROLOM PARAMETARA

Konkretan primjer implementacije održavanja po stanju kontrolom parametara prikazan je na primjeru tvrtke Holcim Hrvatska, točnije, njezine tvornice cementa na lokaciji Koromačno u Istarskoj županiji. Holcim Hrvatska je dio Holcim Grupe, jednog od vodećih svjetskih proizvođača i distributera cementa i agregata (drobljeni kamen, pijesak i šljunak), transportnog betona i asfalta. Holcim Grupa formirana je u srpnju 2015. godine spajanjem dvaju vodećih svjetskih poduzeća na području proizvodnje građevinskog materijala: Lafarge i Holcim, a zapošljava 70.000 radnika u više od 70 zemalja diljem svijeta.

Preventivno održavanje je ključni element strategije održavanja proizvodnih pogona Holcim Grupe. Jasno definirane uloge i odgovornosti te procedure temelj su organizacije održavanja Holcima. Preventivno održavanje temelji se na dobro planiranim i raspoređenim te pravovremeno provedenim tzv. preventivnim rutinama održavanja (engl. *Preventive Maintenance Routine* - PMR) i redovitim inspekcijama obilaskom pogona (engl., *walk-by*). od strane održavatelja koji koriste ljudska osjetila i jednostavnu opremu za kontrolu i prikupljanje podataka.

Uz sve navedeno ključna oprema u proizvodnom procesu opremljena je fiksno instaliranim senzorima koji funkcioniraju na principu alarmnih granica, a služe za kontinuirani monitoring, mjerenje i kontrolu vitalnih pogonskih parametara poput vibracija i temperature što čini osnovicu strategije održavanja po stanju. Podaci se evaluiraju interno unutar pojedine tvornice te uspoređuju i analiziraju s istovrsnom instaliranom opremom u drugim tvornicama u grupaciji Holcim, s obzirom da se manje-više radi o tipiziranim postrojenjima za proizvodnju cementa. Detalji primjene elaborirani su u nastavku.

4.1. Vibrodijagnostika

Vibrodijagnostika ima značajnu važnost u cementnoj industriji, gdje je održavanje opreme ključno za neprekidan rad i efikasnost postrojenja. U okruženju koje je po svojoj prirodi prašnjavo i prljavo, poput cementnih postrojenja, oprema je podložna specifičnim vrstama oštećenja i kvarova. Na primjer, stvaranje naljepa na rotirajućim dijelovima može uzrokovati neravnotežu i povećane vibracije, što vodi do prekomjernog trošenja ležajeva i

potencijalnih otkaza. Također, nakupljanje cementne prašine u kritičnim komponentama može dovesti do zaglavljivanja i smanjenja efikasnosti rada strojeva.

Primjenom vibrodijagnostike, moguće je rano otkriti takve anomalije u radu opreme, poput povećanih vibracija uzrokovanih neravnotežom ili habanjem ležajeva zbog prisutnosti abrazivnih čestica. Navedeno omogućava planiranje preventivnih mjera poput čišćenja naljepa i prašine, zamjene ležajeva ili rebalansiranja rotirajućih dijelova, prije nego što dođe do ozbiljnijih kvarova. Kroz ovakav pristup, vibrodijagnostika ne samo da smanjuje rizik od neplaniranih zastoja, već i produžava vijek trajanja opreme, čime se osigurava stabilnost proizvodnih procesa u cementnoj industriji.

4.1.1. Odabir strojeva i učestalost mjerenja

Ključni motiv implementacije vibrodijagnostike u cementnoj industriji, je praćenje parametara na strojevima koji su kritični za proizvodni proces. S obzirom da svi strojevi nisu od jednake važnosti, pri kreiranju plana održavanja treba se uzeti u obzir dugoročna isplativost zbog velikih resursa potrebnih za uspješnu implementaciju održavanja po stanju kontrolom parametara. Odabir rotacijskih strojeva za vibrodijagnostiku u Holcimu Hrvatska temelji se na sljedećim kriterijima [11]:

- **Kritičnost za proizvodni proces:** Prioritet imaju strojevi čiji bi kvar mogao uzrokovati zastoje u proizvodnji ili značajno smanjenje kapaciteta.
- **Utjecaj na kvalitetu proizvodnje:** Strojevi koji imaju izravan utjecaj na kvalitetu konačnog proizvoda smatraju se visoko prioritetnima.
- **Rizik od ozljeda i utjecaj na okoliš:** Strojevi koji pri kvaru mogu predstavljati rizik za sigurnost radnika ili imati negativan utjecaj na okoliš zahtijevaju posebnu pažnju.
- **Potencijal za smanjenje troškova održavanja:** Strojevi za koje se može očekivati smanjenje troškova održavanja s naslova manjeg broja intervencija također su kandidati za redovitu vibrodijagnostiku.

U kontekstu cementne industrije, gdje strojevi često rade u prašnjavim i abrazivnim uvjetima, važno je uzeti u obzir specifične izazove kao što su abrazija, korozija, i stvaranje naljepa. Ovi uvjeti mogu ubrzati trošenje i kvarove opreme, što zahtijeva pažljivu evaluaciju učestalosti mjerenja. Na primjer, strojevi izloženi visokim temperaturama ili agresivnim materijalima mogu zahtijevati češća mjerenja kako bi se pravovremeno identificirali i

spriječili kvarovi. Uz prethodno navedeno, učestalost mjerenja temeljena je i na sljedećim faktorima [11]:

- **Vjerojatnost kvara (P-F krivulja):** P-F krivulja (eng. *Probability-failure curve*) omogućava procjenu vremenskog perioda između trenutka kada se potencijalni kvar može prvi put detektirati do trenutka kada stroj otkazuje. Frekvencija mjerenja trebala bi biti dovoljno česta da se uoči početak kvara i omogući pravovremena intervencija prije nego što dođe do potpunog otkaza.
- **Čvrstoća konstrukcije:** Strojevi s većom čvrstoćom konstrukcije mogu imati manju potrebu za čestim mjerenjima, dok strojevi s manjom čvrstoćom konstrukcije mogu zahtijevati češća mjerenja kako bi se osiguralo da se ne razviju strukturni problemi koji bi mogli dovesti do kvara.
- **Kapacitet opterećenja u odnosu na radne uvjete:** Treba uzeti u obzir kapacitet stroja da podnese opterećenja u normalnim i ekstremnim radnim uvjetima. Strojevi koji se redovito koriste blizu svojih granica kapaciteta ili koji su izloženi teškim uvjetima rada mogu zahtijevati češća mjerenja kako bi se osiguralo da ne dođe do preopterećenja i kvara.

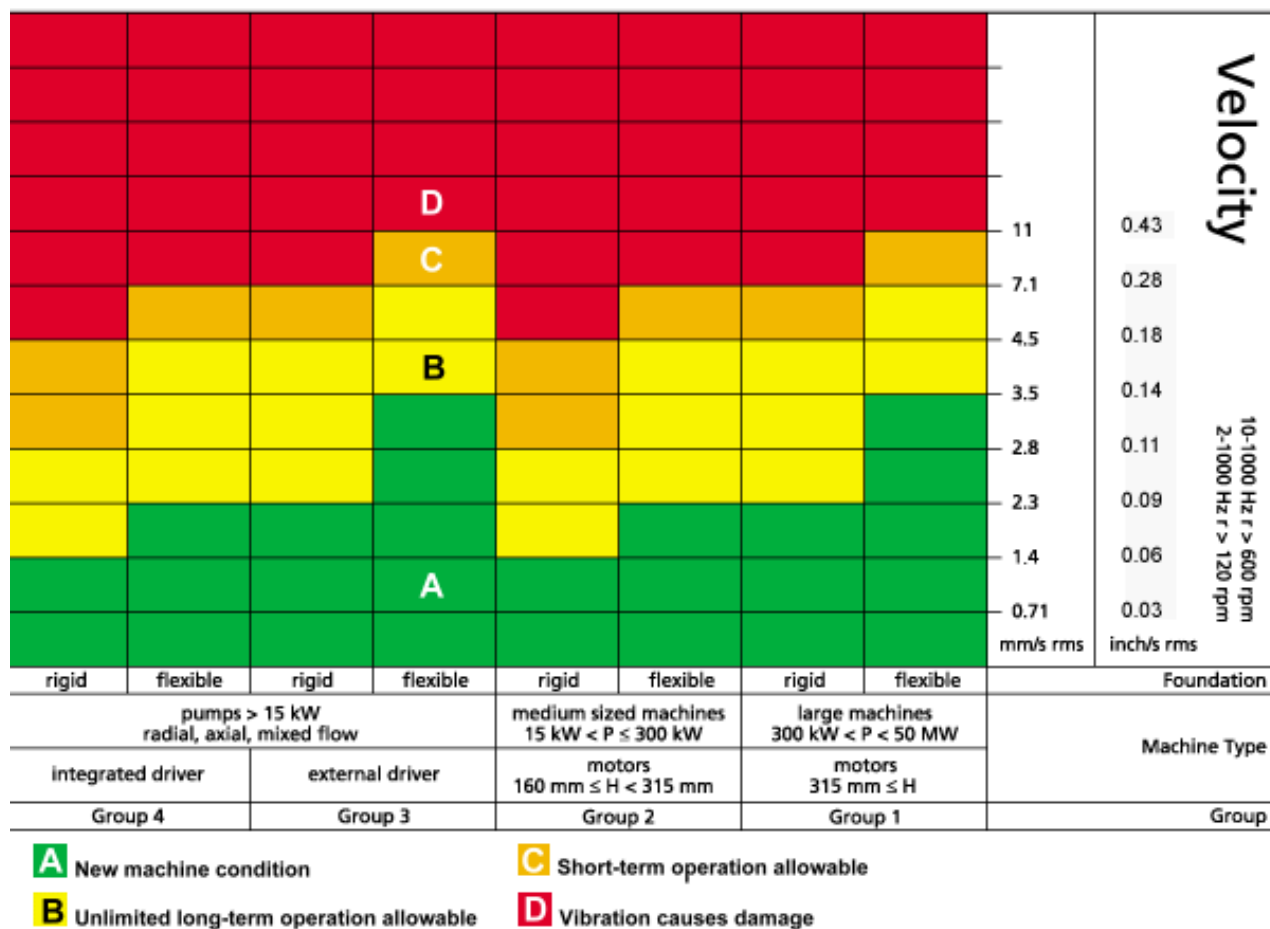
Uz redovite *walk-by* inspekcije, inspektori preventivnog održavanja jednom mjesečno sustavno mjere vibracije na svoj kritičnoj opremi te se dobivena mjerenja, uz internu analizu, šalju i na vanjsku analizu proizvođača SKF.

4.1.2. Alarmne granice

U procesu vibrodijagnostike, bitan korak je određivanje parametara koji trebaju biti mjereni te definicija kriterija prihvatljivosti, kako bi se utvrdilo je li izmjerena vrijednost vibracija prekomjerna, odnosno prihvatljiva. Fokus je primarno na amplitudi i frekvenciji vibracija; amplituda vibracija daje dobru indicaciju o ozbiljnosti problema, dok se analizom frekvencije može lako definirati uzrok povećanih vibracija.

Alarmne granice se utvrđuju pomoću raznih standarda koji predstavljaju dobar okvir za analizu izmjerenih vrijednosti te, posljedično, procjenu ozbiljnosti problema. Tijekom godina razvijeno je mnogo dijagrama i standarda koji se primjenjuju za određivanje alarmnih granica vibracija. U ovom konkretnom slučaju, vibracije se za ležajeve reduktora pogona mlinova cementa i sirovine, valjkaste preše te industrijske ventilatore ocjenjuju u skladu sa standardom ISO 10816-1 1995 [Slika 17]. Za zubne vijence i pogonske zupčanike navedenih mlinova te

rotirajuće peći ISO standardi se ne koriste, već se granice normalnog rada postavljaju iskustveno [Tablica 1].



Slika 17. Dopuštene vrijednosti općih vibracija prema ISO 10816-1 1995 [11]

Tablica 1. Iskustvene dopuštene vrijednosti vibracija za zubne vijence i pogonske zupčanike [11]

Opis stanja	Zupčanik s kliznim ležajevima	Zupčanik s valjnim ležajevima
Odlično	< 5 mm/s	< 2,5 mm/s
Dobro	5 – 10 mm/s	2,5 – 5 mm/s
Iskoristivo	10 – 15 mm/s	5 – 10 mm/s
Podnošljivo	15 – 20 mm/s	10 – 15 mm/s
Nedopustivo	> 20 mm/s	> 15 mm/s

4.1.3. Oprema za mjerenje

Osim trajno ugrađenih žičnih senzora koji služe za kontinuirano praćenje vibracija kritične opreme, a funkcioniraju na principu alarmnih granica, za mjerenje vibracija koristi se

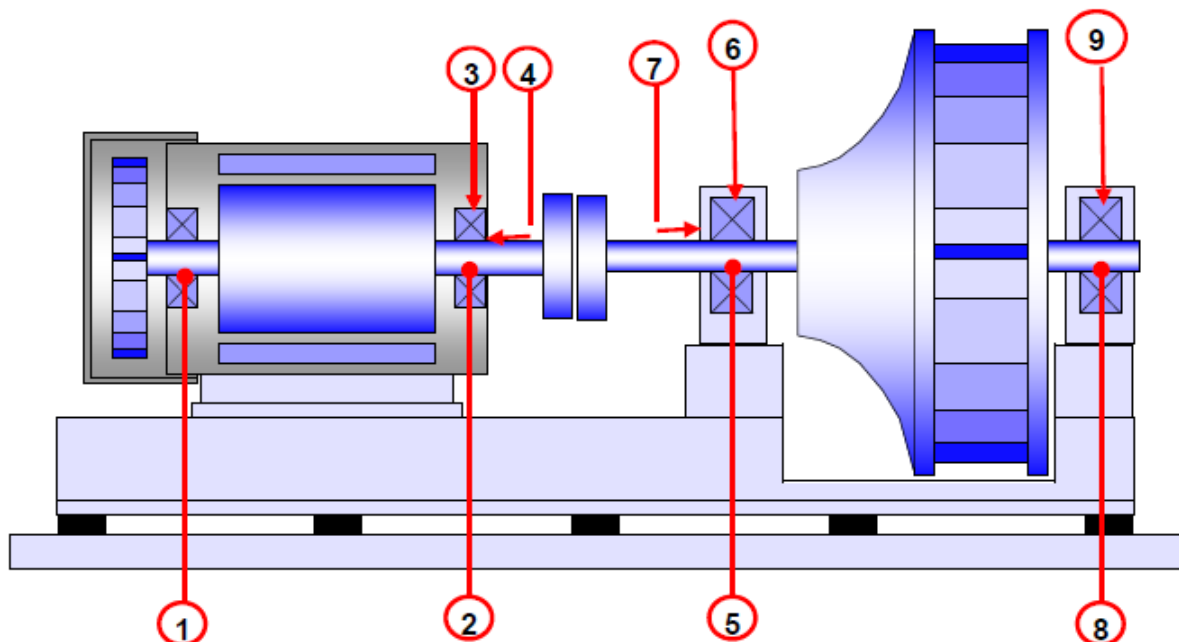
i uređaj 391-K-SL QuickCollect senzor proizvođača SKF [Slika 18]. Uređaj je spojen sa SKF mobilnom aplikacijom koja u svojoj bazi podataka ima navedenu svu kritičnu opremu te točke na istoj na kojima se mjere vibracije (u mm/s), temperatura, demodulirano ubrzanje i ubrzanje. Dobiveni rezultati mjerenja se potom u stvarnom vremenu uspoređuju s unaprijed postavljenim granicama normalnog rada te podliježu daljnjoj analizi, bilo unutarnjoj ili vanjskoj od strane proizvođača SKF.



Slika 18. 391-K-SL QuickCollect prijenosni senzor proizvođača SKF [17]

4.1.4. Postupak mjerenja vibracija

Za postupak mjerenja vibracija su zaduženi inspektori preventivnog održavanja. Vibracije se mjere prislanjanjem magneta spomenutog prijenosnog senzora na stacionarne dijelove opreme i to u tri smjera: horizontalnom, vertikalnom i aksijalnom. Lokacije mjerenja su standardizirane radi dosljednosti rezultata i lakše usporedbe unutar na istovrsnoj opremi unutar Holcim Grupe. Ove točke odnose se samo rutinska mjerenja, a slučaju otkrivenih problema/anomalija, ovisno o prirodi istih potrebno je identificirati dodatne potrebne lokacije mjerenja. U nastavku će biti prikazano nekoliko primjera ključnih strojeva s naznačenim lokacijama mjerenja vibracija, zajedno sa slikama samog postupka mjerenja.



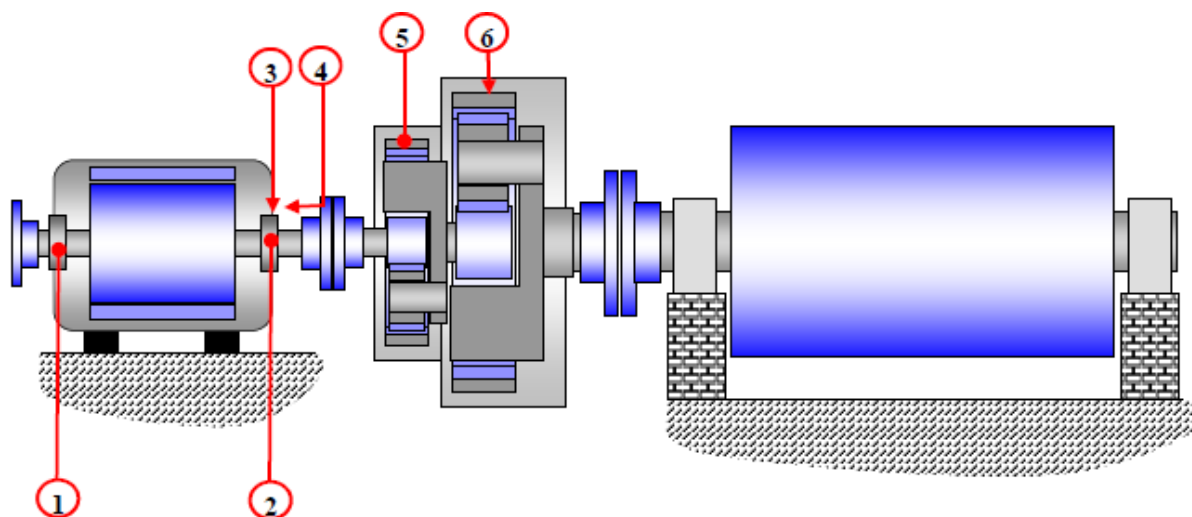
Slika 19. Skica ventilatora s lokacijama mjerenja vibracija [11]

Tablica 2. Lokacije mjerenja vibracija ležajeva ventilatora [11]

Broj	Lokacija	Smjer mjerenja na lokaciji		
		Horizontalni	Vertikalni	Aksijalni
1	Motor, gonjena strana	x		
2	Motor, pogonska strana	x		
3	Motor, pogonska strana		x	
4	Motor, pogonska strana			x
5	Ventilator, pogonska strana	x		
6	Ventilator, pogonska strana		x	
7	Ventilator, pogonska strana			x
8	Ventilator, pogonska strana	x		
9	Ventilator, pogonska strana		x	



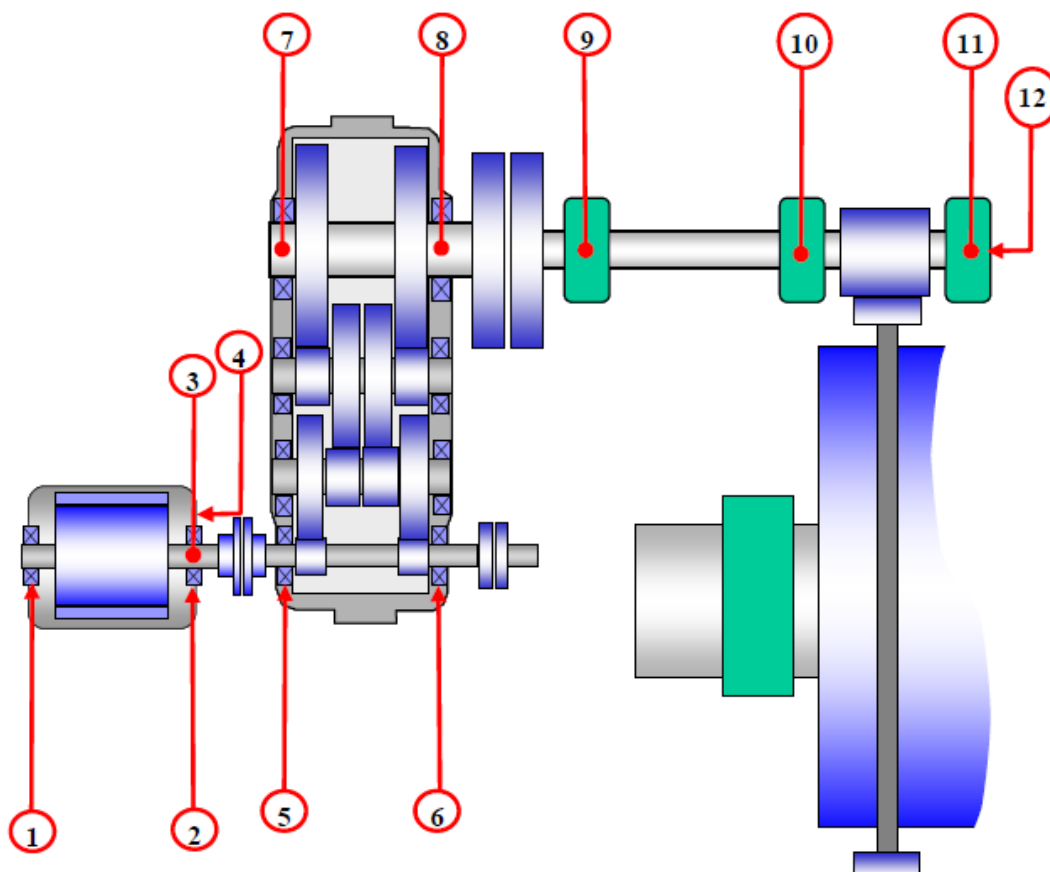
Slika 20. Mjerenje vibracija ležajeva ventilatora otprašivanja peći



Slika 21. Skica kugličnog mlina s lokacijama mjerenja vibracija [11]

Tablica 3. Lokacije mjerenja vibracija kugličnog mlina [11]

Broj	Lokacija	Smjer mjerenja na lokaciji		
		Horizontalni	Vertikalni	Aksijalni
1	Motor, gonjena strana	x		
2	Motor, pogonska strana	x		
3	Motor, pogonska strana		x	
4	Motor, pogonska strana			x
5	Planetarni reduktor, ulaz	Radijalni („na 3 sata“)		
6	Planetarni reduktor, izlaz	Radijalni („na 12 sati“)		



Slika 22. Skica glavnog pogona rotirajuće peći s lokacijama mjerenja vibracija [11]

Tablica 4. Lokacije mjerenja vibracija glavnog pogona rotirajuće peći [11]

Broj	Lokacija	Smjer mjerenja na lokaciji		
		Horizontalni	Vertikalni	Aksijalni
1	Motor, gonjena strana	x		
2	Motor, pogonska strana	x		
3	Motor, pogonska strana		x	
4	Motor, pogonska strana			x
5	Reduktor, ulaz pogonska strana	x		
5	Reduktor, ulaz pogonska strana		x	
5	Reduktor, ulaz pogonska strana			x
5	Reduktor, ulaz gonjena strana	x		
6	Prvo balansno vratilo, gonjena strana	x		
6	Prvo balansno vratilo, pogonska strana	x		
6	Prvo balansno vratilo, pogonska strana			x
7	Drugo balansno vratilo, gonjena strana	x		
7	Drugo balansno vratilo, pogonska strana	x		
7	Drugo balansno vratilo, pogonska strana			x
8	Reduktor, izlaz gonjena strana	x		
8	Reduktor, izlaz pogonska strana	x		
9	Pogonsko vratilo	x		
10	Zupčanik, pogonska strana	x		

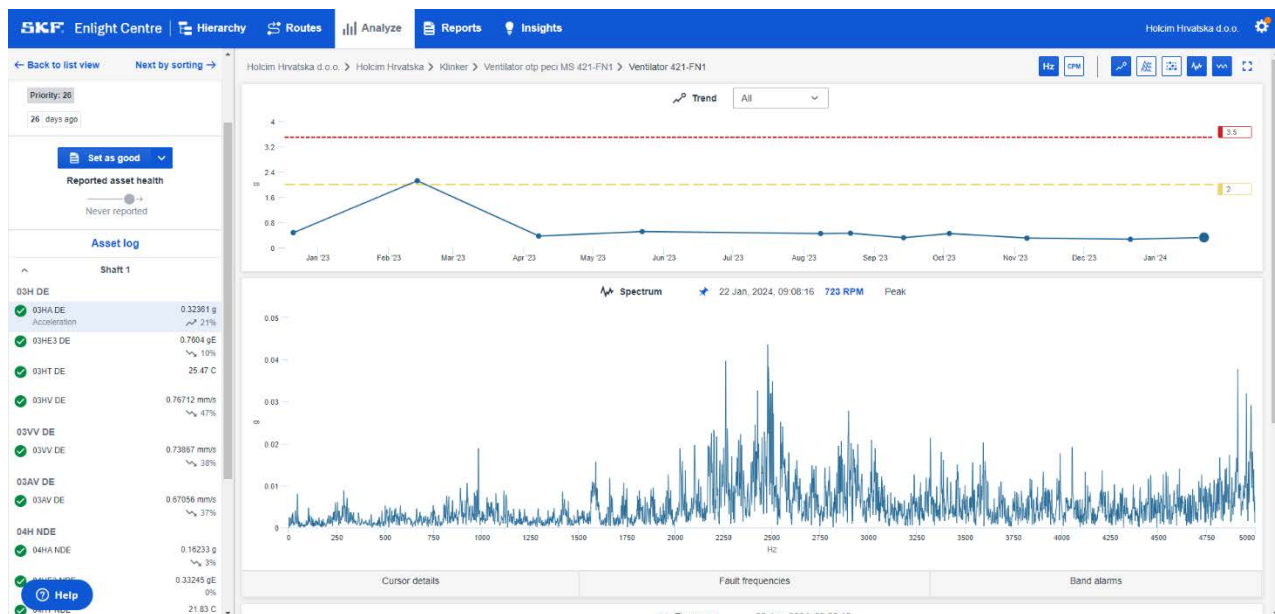
10	Zupčanik, pogonska strana		x	
11	Zupčanik, gonjena strana	x		
12	Zupčanik, gonjena strana		x	
12	Zupčanik, gonjena strana			x



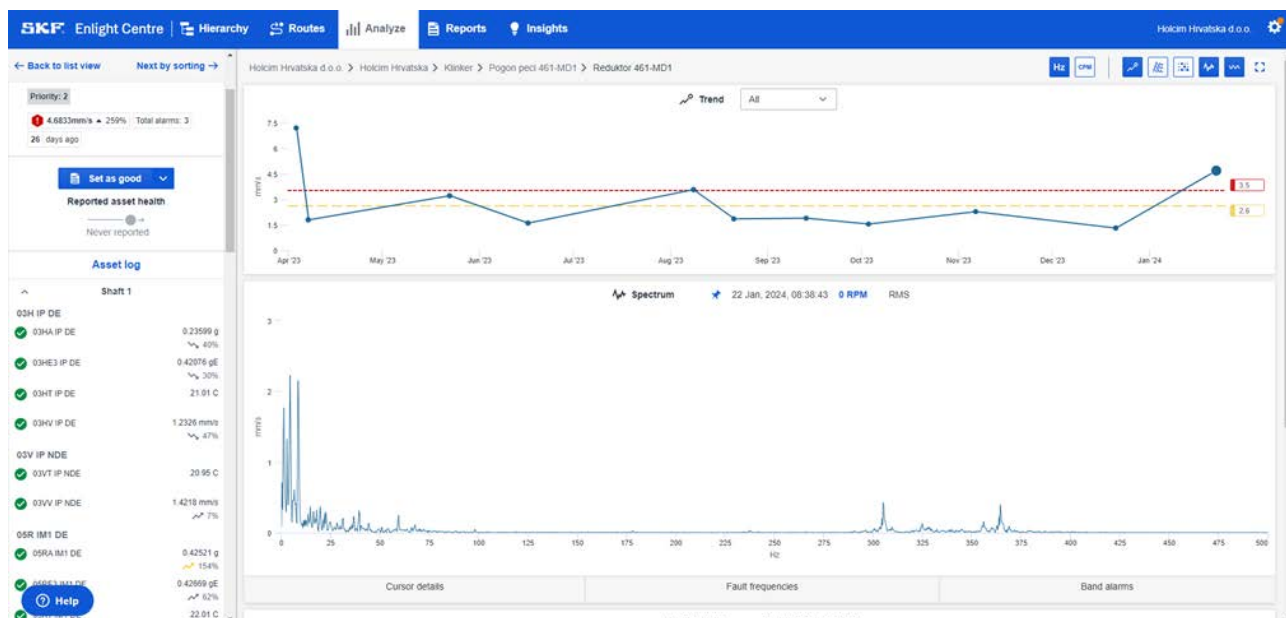
Slika 23. Mjerenje vibracija na reduktoru glavnog pogona peći

Sljedeće slike prikazuju dijagrame trendova mjerenih vibracija za prikazana mjerenja na ventilatoru otprašivanja i reduktoru glavnog pogona peći od travnja 2023. do siječnja 2024. godine. Na dijagramu su vidljive tri linije koje predstavljaju mjerenja vibracija u mm/s (milimetrima po sekundi); plava linija je stvarna izmjerena vrijednost vibracija, dok su žuta i crvena linija unaprijed definirane granice normalnog rada opreme.

Ispod dijagrama trendova nalazi se dijagram frekvencijskog spektra koji prikazuje mjerene vibracije po frekvencijama te daje dobru indicaciju o uzroku nepravilnosti u radu opreme. Na slici 25. vidljivo je da je zadnje mjerenje zabilježilo porast vibracija od 259% u odnosu na normalne uvjete, što ukazuje na potencijalni problem s opremom koja se nadgleda te u skladu s time zahtijeva planiranje prikladnih aktivnosti održavanja.



Slika 24. Dijagram trenda mjerenih vibracija za ventilator otprašivanja peći [11]



Slika 25. Dijagram trenda mjerenih vibracija za reduktor glavnog pogona peći [11]

4.2. Termografija

Termografsko ispitivanje je iznimno koristan alat za održavanje po stanju u cementnoj industriji jer su promjene u radnim temperaturama u eksploataciji često rani pokazatelji ili pratitelji mehaničkih ili električnih kvarova. Ovo je osobito važno kod električne opreme, gdje se kvarovi na strujnim krugovima i spojevima mogu ne primijetiti, sve do neposredno prije potpunog zastoja. Termografsko ispitivanje može otkriti pukotine ili degradaciju izolacije na krovovima ili zidovima, kao i u oblogama peći, što može dovesti do povećanog gubitka topline ili smanjenja efikasnosti proizvodnih postupaka. Pored toga, ova metoda također nalazi svoju uspješnu primjenu u kontroli izlaznih ležajeva većih strojeva (poput mlinova) te zupčanika i zubnih vijenaca koji su često pod velikim opterećenjem. Infracrveno skeniranje je neinvazivno i može se provoditi iz sigurne udaljenosti, što je idealno za opremu koja je pod visokim temperaturama ili teško dostupna. Također, s obzirom da se pregledi najčešće izvode dok je oprema u funkciji, eliminira se potreba za zaustavljanjem proizvodnog procesa u svrhu rutinskih pregleda.

Primjena termografskog ispitivanja omogućava detaljan pregled stanja opreme, identificirajući probleme koji nisu vidljivi bez specijalizirane opreme. Korištenjem termografskih kamera, stručnjaci mogu vizualno predstaviti temperaturne nepravilnosti na opremi, omogućavajući rano upozorenje na potencijalne kvarove. Ova tehnika je posebno dragocjena u industriji cementa, gdje su visoki termalni i mehanički zahtjevi uobičajeni, a redovito održavanje opreme je ključno za neprekidnost proizvodnje. Kroz termografsko ispitivanje, moguće je ne samo ranije otkriti potencijalne probleme, već i pružiti podršku u efikasnom upravljanju održavanjem, čime se smanjuju operativni troškovi i povećava sigurnost na radu.

4.2.1. Odabir strojeva i učestalost mjerenja

Prioritet za termografska mjerenja u cementnoj industriji imaju strojevi koji su ključni za proizvodni proces, kao što su rotirajuće peći, mlinovi za cement i ugljen te njihovi vitalni dijelovi poput zubnog vijenca i pogonskih zupčanika. Uz kontinuirano praćenje temperature pomoću žičnih senzora s alarmnim granicama, termografska mjerenja se provode u pravilu jednom mjesečno kako bi se osigurala kontinuirana detaljna procjena stanja opreme.

4.2.2. Alarmne granice

Alarmne granice kod strojeva postavljene su na temelju preporuka proizvođača ili iskustveno s obzirom na prirodu proizvodnog procesa koji se, u određenim fazama, odvija pod vrlo visokim temperaturama [11].

4.2.3. Oprema za mjerenje

Za termografska mjerenja koristi se infracrvena termalna kamera T560 proizvođača FLIR [Slika 24]. Nakon izvršenog mjerenja, dobivene termografske snimke se prenose u odgovarajući softver FLIR Thermal Studio Suite koji omogućuje naprednu analizu i izradu izvještaja termalnih slika. Kao pomoć termalnoj kameri, za određena mjerenja koristi se i infracrveni termometar SKF TKTL 30 koji predstavlja dobru alternativu za brze provjere temperatura na teško dostupnim pozicijama [Slika 25]. .



Slika 26. Infracrvena termalna kamera FLIR T560 [18]



Slika 27. Infracrveni termometar TKTL 30 [19]

4.2.4. Postupak termografskog mjerenja

Kao što je slučaj i kod mjerenja vibracija, termografska mjerenja izvode inspektori preventivnog održavanja infracrvenom termalnom kamerom koja mjeri temperaturu u više zadanih točaka raspodijeljenih duž opreme u radu. Mjerenja se provode na vanjskim i unutarnjim ležajevima rotirajuće peći, mlina ugljena i mlina cementa te zupčanicima i zubnim vijencima, a povremeno se analizira i raspodjela temperature po vanjskom plaštu rotirajuće peći. Također, mjere se temperature ležajeva i osovine potpornih valjaka po standardiziranom postupku koji se prakticira na korporativnoj razini. U nastavku će biti prikazano nekoliko primjera mjerenja na prethodno navedenim lokacijama, zajedno s odgovarajućim izvještajima formiranim na temelju dobivenih rezultata.



Slika 28. Postupak mjerenja temperature plašta rotirajuće peći



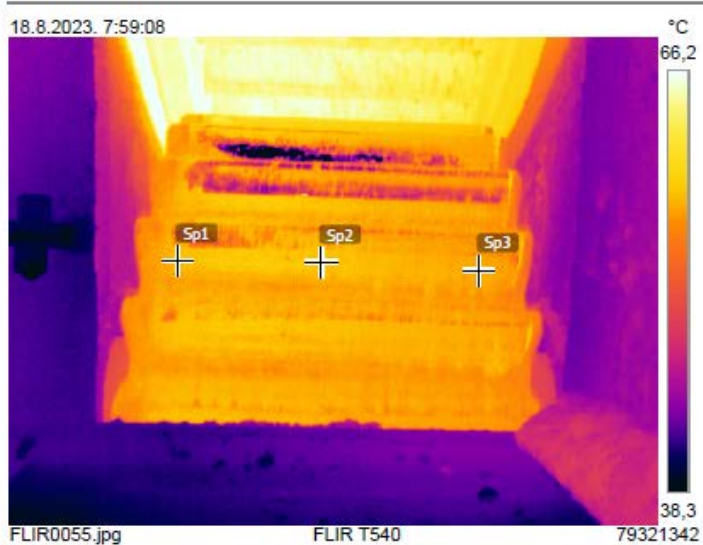
Slika 29. Postupak mjerenja temperature zupčanika rotirajuće peći



Measurements	
Sp1	58,2 °C
Sp2	58,9 °C
Sp3	57,6 °C

Parameters	
Emissivity	0.95
Ref. temp.	20 °C

Note	
PEĆ PINJON, TEMPERATURE SU U DOZVOLJENOM RASPONU	



Slika 30. Izvještaj mjerenja temperature zupčanika rotirajuće peći



Slika 31. Postupak mjerenja temperature vanjskog ležaja mlina ugljena



Measurements

Sp1	59,5 °C
Sp2	62,0 °C
Sp3	61,5 °C
Sp4	62,4 °C
Sp5	63,7 °C
Sp6	64,4 °C

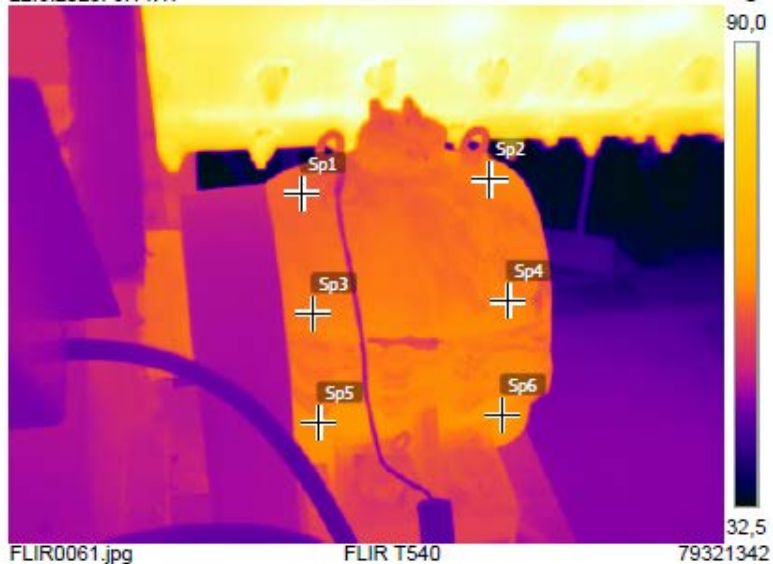
Parameters

Emissivity	0.95
Refl. temp.	20 °C

Note

Mlin ugljena vanjski ležaj. Temperature su u redu

22.8.2023. 8:14:17



22.8.2023. 8:14:17



Slika 32. Izvještaj mjerenja temperature vanjskog ležaja mlina ugljena

4.3. Analiza ulja

Jedan od najstarijih postupaka za održavanje opreme postrojenja i povećanje njezine pouzdanosti i korisnosti je analiza ulja. U cementnoj industriji, gdje su uvjeti rada često prašnjavi i zahtjevni, analiza ulja je od vitalne važnosti za očuvanje pouzdanosti i produženje vijeka trajanja opreme. Redovita analiza ulja omogućuje detekciju abraziva, oksidacije i propadanja maziva te ostalih ključnih indikatora koji utječu na planiranje zamjene ulja.

Dosljednost u uzorkovanju i testiranju ključna je za sprječavanje donošenja pogrešnih zaključaka koji uvelike mogu utjecati na raspoloživost čitavog tehničkog sustava. Rezultati nasumično uzorkovanog ulja mogu dati pogrešne rezultate, često ukazujući na radne uvjete koji zapravo ne postoje te je zbog toga velik naglasak stavljen na pravovremenom i sistematičnom uzorkovanju ulja. Osim što se redovitom analizom kvalitete maziva mogu izbjeći problemi s podmazivanjem, koncentracija i veličina čestica trošenja u uzorcima mogu otkriti značajne informacije o stanju podmazanih habajućih površina unutar stroja. Kako se koncentracija i veličina čestica povećavaju, proces trošenja napreduje od normalnog radnog stanja do početnog kvara i konačno do potencijalnog većeg kvara ili havarije.

4.3.1. Preporučeni testovi i učestalost analize ulja

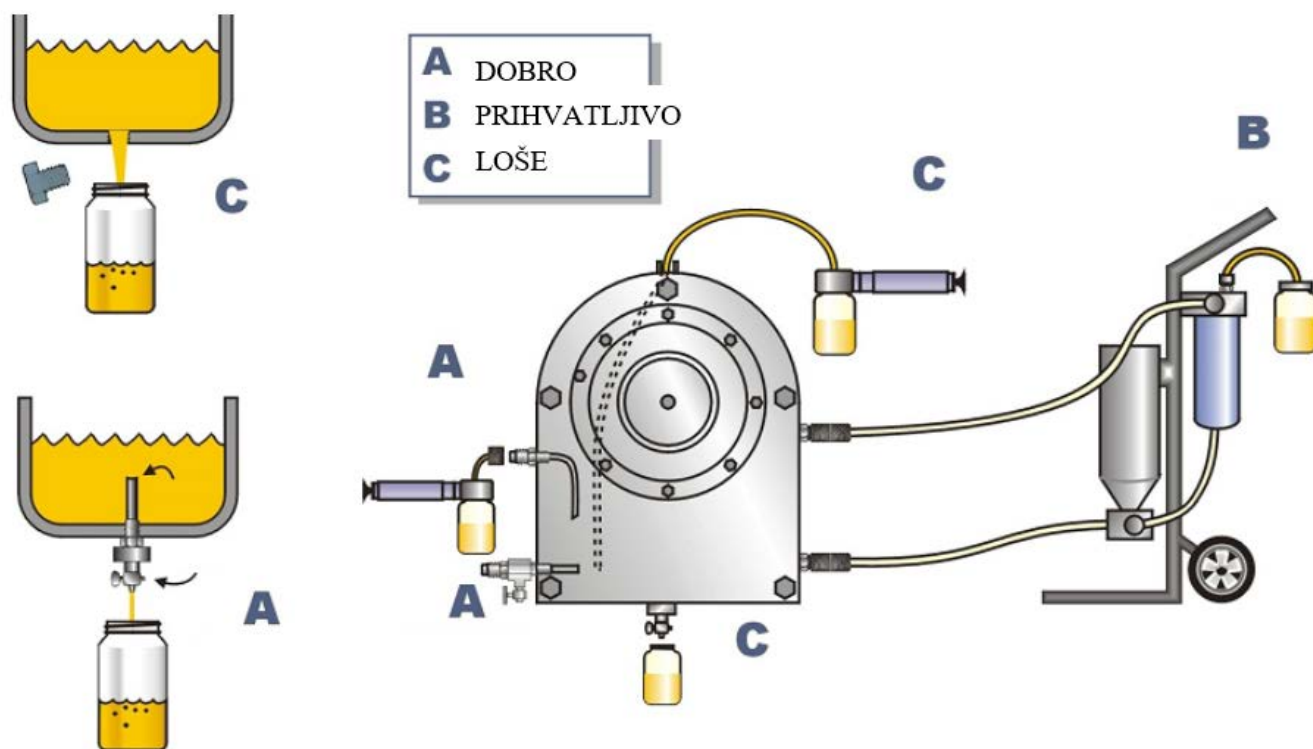
U sljedećoj tablici su navedene vrste analize ulja koje se provode na uljima za podmazivanje zupčanika i hidrauličkim ulja. Preporučena učestalost uzorkovanja i analize ulja za gotovo svu kritičnu opremu je jednom mjesečno [11].

Tablica 5. Vrste analize ulja ovisno o njihovoj primjeni [11]

Ulje za zupčanike	Hidrauličko ulje
Analiza u infracrvenom spektru	Analiza u infracrvenom spektru
Izgled/boja	Izgled/boja
Viskoznost	Viskoznost
Ukupni kiselinski broj	Ukupni kiselinski broj
Test na prisutnost vode	Test na prisutnost vode
Spektroskopija	Spektroskopija
Brojanje čestica ulja	Brojanje čestica ulja
Ferografija	Test pjenjenja hidrauličkog ulja

4.3.2. Uzorkovanje ulja

Uzorkovanje ulja najkritičniji je aspekt analize ulja, a za njega su odgovorni podmazivači iz odjela preventivnog održavanja [Slika 32]. Sve lokacije u stroju nisu jednako mjerodavne stoga je vrlo bitno odrediti precizne lokacije za uzorkovanje kako bi kasnija analiza bila što preciznija i odgovarala realnom stanju [Slika 31]. Uzorkovanja se u pravilu izvode u blizini turbulentnih zona (npr. koljena), uvijek tijekom rada opreme. Također, ukoliko se ne ispituje učinkovitost filtera, pravilo je da se uzorci za analizu ulja uzimaju iz povratnog voda prije filtracije. Pri uzorkovanju treba paziti na čistoću, s obzirom da čestice prašine i prljavštine mogu znatno utjecati na rezultate analize ulja. Potrebno je da su bočice za prikupljanje uzorka nove i čiste te da se nakon uzimanja uzorka, a prije nošenja na laboratorijsku analizu, obavezno stave u vrećicu sa zatvaračem i čvrsto zatvore [11].



Slika 33. Lokacije uzorkovanja ulja [11]



Slika 34. Uzorkovanje ulja s reduktora mlina cementa

4.3.3. Rezultati analize ulja

Kritičan faktor u analizi ulja je interpretacija rezultata analize ulja. Laboratorijski tehničar tumači rezultate testiranja ulja i na temelju istih formira izvješće o stanju opreme i ulja. Tehničari koriste različite izvore za valjanu interpretaciju rezultata analize ulja, uključujući granice trošenja proizvođača originalne opreme (eng. *Original equipment manufacturer* - OEM), osnovne vrijednosti i karakteristike ulja, industrijsku literaturu, ali se i oslanjaju na vlastito iskustvo kako bi se što preciznije procijenilo realno stanje opreme.

Uzroci kontaminacije ulja su brojni i mogu se klasificirati prema izvoru. Postoji kontaminacija koja dolazi izvana iz sustava - prašina (silicij), tekućine (mješavina s drugim uljima, voda, drugo kontaminirano ulje). Drugi izvor je u otvorenim sustavima - lanci,

kablovi, zupčanci u kontaktu s prašinom, vodom itd. Nečistoće mogu također dolaziti iz procesa u kojima se maziva koriste, npr. proizvodnja može proizvesti ostatke od zavarivanja, montaža uključuje prašinu, možda i silikone ili prašinu za poliranje, dok održavanje može uvesti nečistoće preko prljavih krpa i sl. [11]

Viskoznost je mjera sposobnosti ulja da podmazuje. Ako se viskoznost promijeni, ulje više ne podmazuje i nije u stanju učinkovito zaštititi površine. Ako je ulje prevruće ili ako je interval zamjene ulja predugačak, ulje može oksidirati. To posljedično uzrokuje zgušnjavanje ulja i povećanje viskoznosti. Ako gorivo ulazi u karter, ulje će se razrijediti što može dovesti do drastičnog smanjenja viskoznosti. Ulja generalno podliježu velikim promjenama svojstava kada su izložena kisiku, plinovima izgaranja i visokim temperaturama. Upravo promjena viskoznosti, kao i iscrpljenost aditiva i oksidacija uzrokuju degradaciju kvalitete ulja [11].

Nakon provedene analize ulja, inženjeri preventivnog održavanja postrojenja surađuju s analitičarima laboratorija prilikom definiranja potrebnih akcija održavanja na temelju izrađenih izvještaja.

5. PRIJEDLOG UNAPRJEĐENJA PROCESA ODRŽAVANJA

U današnje vrijeme, kada su proizvodni procesi sve složeniji i kada svaki neplanirani zastoj može imati značajne tehničko – tehnološke i financijske posljedice, važnost preciznog, pouzdanog i pravovremenog održavanja opreme nikada nije bila veća. Implementacija naprednih tehnologija, poput senzora za praćenje stanja, nije samo trend već nužnost koja omogućava poduzećima ostvarivanje konkurentske prednosti.

Implementacija modernih senzorskih tehnologija i analitičkih alata može unaprijediti održavanje po stanju u industriji. Nit vodilja su pri tom maksimalna raspoloživost opreme, minimiziranje troškova održavanja i produženje životnog vijeka opreme.

U nastavku će biti detaljnije elaboriran prijedlog implementacije nove tehnologije u postojeći sustav održavanja po stanju kontrolom parametara unutar tvrtke Holcim Hrvatska na lokaciji proizvodnog postrojenja u Koromačnom. Prijedlog unaprijeđenja se odnosi na implementaciju bežičnih senzora [Slika 33] i povezanog sustava za monitoring.



Slika 35. Primjer bežičnog kontaktnog senzora [19]

Navedeni senzori su specifični po tome što omogućavaju istovremeno praćenje čak četiri različita parametra u realnom vremenu: temperaturu i vibracije u tri osi (horizontalnoj, aksijalnoj i vertikalnoj). Uz vibracije i ubrzanje, mjere se RMS i „peak to peak“ vrijednosti, a sam signal se, osim u vremenskom spektru, može promatrati i u frekvencijskom što

omogućuje kvalitetnu i sveobuhvatnu analizu uzroka vibracija. Senzori su bežični, ali kontakti te se navojem pričvršćuju za stacionarne dijelove opreme što ih čini idealnima za korištenje na teško dostupnim lokacijama mjerenja koje bi inače zahtijevale žičnu konekciju. Ciljana oprema na kojoj se smatra da bi navedeni senzori značajno unaprijedili proces praćenja stanja su: ležajevi industrijskih ventilatora, raznih vrsta konvejera za transport materijala te pogonskih reduktora mlinova i peći. Potencijalne lokacije primjene istih prikazane su na sljedećim slikama.



Slika 36. Montirani senzor na ležaju ventilatora [11]



Slika 37. Montirani senzor na reduktoru glavnog pogona peći [11]

Proces mjerenja te analize dobivenih vrijednosti je vrlo jednostavan. Bežični senzor se montira na opremu te mjeri vibracije željene opreme. Mjerenja se potom obrađuju u procesoru te se bežičnim prijenosnikom koji je spojen na mobilnu internetsku mrežu prenose na oblak iz kojeg softver preuzima podatke. U softveru se vrši daljnja analiza mjerenja u svrhu detekcije problema ili anomalija, a na temelju koje se predlažu buduće akcije održavanja. Rezultati mjerenja se također na mjesečnoj bazi šalju vanjskom timu stručnjaka koji temeljem dublje analize istih rade mjesečna izvješća o stanju mjerene opreme.

Uvođenje navedenog sustava za bežično praćenje stanja opreme nudi brojne prednosti. Povećana sposobnost rane detekcije problema s opremom može pomoći u izbjegavanju skupih popravaka i zastoja, dok kontinuirano praćenje stanja opreme doprinosi produženju njezinog vijeka trajanja. Osim toga, optimizacija procesa održavanja kroz bolje planiranje i raspoređivanje radova može dovesti do značajnih ušteda.

Prijedlog je da se, u dogovoru s proizvođačem, za testni period navedeni senzori implementiraju na jednom dijelu postrojenja te da se kroz određeno vrijeme prati njihov rad. Ukoliko se nakon isteka probnog perioda utvrdi da su uvelike poboljšali proces održavanja po

stanju te, posljedično, smanjili operativne troškove prijedlog je implementacija istih na razini cijele tvornice.

6. ZAKLJUČAK

U radu su analizirane su suvremene strategije održavanja s posebnim naglaskom na održavanje po stanju kontrolom parametara. Prikazane su napredne metode održavanja po stanju kontrolom parametara koje uključuju razne primjene naprednih senzorskih tehnologija i analitičkih alata, a koje omogućavaju precizno praćenje stanja opreme s ciljem ranog otkrivanja potencijalnih problema u radu opreme.

Na konkretnom primjeru industrije cementa, pokazano je da analizirani pristup može donijeti značajne koristi, uključujući smanjenje troškova održavanja i povećanje operativne efikasnosti. U radu je detaljno opisan prijedlog implementacije nove tehnologije bežičnih senzora i sustava za monitoring kritične opreme u tvornici cementa. Navedeni senzori, omogućavajući istovremeno praćenje više različitih parametara u realnom vremenu, predstavljaju značajan korak naprijed u procesu praćenja stanja opreme. S obzirom da se montiraju se direktno na opremu, omogućuju jednostavan proces mjerenja i analize dobivenih podataka, što rezultira u pravovremenoj detekciji anomalija te posljedično efikasnijem procesu održavanja.

S obzirom na složenost i dinamiku današnjih proizvodnih procesa, značaj pouzdane, precizne i pravovremene reakcije na indikatore negativne promjene stanja opreme ne može se dovoljno naglasiti. Uvođenje naprednih tehnologija, poput navedenih senzora, prestaje biti samo trend i postaje nužnost za održavanje konkurentske prednosti. Moderna senzorska tehnologija i analitički alati pružaju mogućnost značajnog unaprjeđenja održavanja po stanju u industriji, usmjeravajući se na maksimalnu raspoloživost opreme, minimizaciju troškova održavanja i produženje životnog vijeka opreme što omogućuje tvrtki ne samo da ostane konkurentna, već i da postavlja nove standarde u industrijskom održavanju.

LITERATURA

- [1] Lisjak D.: Održavanje, nastavni materijal, FSB; 2020.
- [2] Održavanje i gospodarenje imovinom, Hrvatsko društvo održavatelja; 2016.
- [3] Kolar D.: Model rane procjene kvarova rotacijske opreme primjenom dubokog strojnog učenja [Disertacija]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2019 [pristupljeno 23.01.2024.] Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:773286>
- [4] Majdandžić N.: Strategije održavanja i informacijski sustavi održavanja, Sveučilište u Osijeku, Slavonski Brod; 1999.
- [5] Sharma J., Lal Mittal M., Soni G.: Condition based maintenance: a review; 2022. learning and role of interpretability: a review; 2022.
- [6] <https://www.reliableplant.com/vibration-analysis-31569> (datum pristupa: 18.1.2024.)
- [7] Bolf N, Bolf (ur.) N.: Mjerna i regulacijska tehnika: Mjerenje i analiza vibracija. Kemija u industriji [Internet]. 2021 [pristupljeno 06.02.2024.];70(1-2):111-114. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/252396>
- [8] Sullivan G.P., Melendez A.P., Pugh R., Hunt W.D.: O&M Best Practices Guide Version 2.0., U.S. Department of Energy; 2004.
- [9] Petrović K, Bolf (ur.) N. Mjerna i regulacijska tehnika: Infracrvena (IC) termografija – pravi izbor za redovito održavanje (I. dio). Kemija u industriji [Internet]. 2016 [pristupljeno 06.02.2024.];65(3-4):228-231. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/154293>
- [10] <https://www.domes.hr/proizvodi/filtriranje-ulja-i-hfc-medija/> (datum pristupa: 8.2.2024.)
- [11] Holcim Hrvatska d.o.o. interni dokumenti
- [12] <https://upkeep.com/learning/oil-analysis/> (datum pristupa: 8.2.2024.)
- [13] SDT Ultrasound Solutions; Level 1 Ultrasound inspector training, 2022.
- [14] Plaščak I, Jurić T, Emert R.: Application of Ferrography in Condition Based Maintenance. Strojstvo [Internet]. 2010 [pristupljeno 08.02.2024.];52(2):233-240. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/56751>
- [15] Miletić A.: Dijagnostičke metode i kriterij za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja. Sveučilište u Zagrebu – Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb; 2002.

-
- [16] <https://www.assemblymag.com/articles/96960-identify-failures-before-they-happen-the-pf-curve> (datum pristupa: 12.2.2024.)
- [17] <https://strojopromet-webshop.com/proizvod/cmdt-391-k-sl> (datum pristupa: 12.2.2024.)
- [18] https://www.flir.com/products/t560_science/?vertical=rd+science&segment=solutions (datum pristupa: 13.2.2024.)
- [19] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja> (datum pristupa: 14.2.2024.)
- [20] <https://info.dalog.net/wireless-vibration-sensors> (datum pristupa: 14.2.2024.)

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija