Dijagnostički uređaji u održavanju

Koren, Ivica

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:460575

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-08**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivica Koren

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Dragutin Lisjak Ivica Koren

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc Dragutinu Lisjaku na vremenu uloženom u mene. Zahvaljujem se i svim ostalim profesorima na mojoj edukaciji i pripremi za bolje sutra. Zahvaljujem se obitelji na razumijevanju i strpljenju.

Ivica Koren

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVICA KOREN** Mat. br.: 0035186229

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **DIJAGNOSTIČKI UREĐAJI U ODRŽAVANJU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DIAGNOSTIC DEVICES IN MAINTENANCE**

Opis zadatka:

Strategija održavanja po stanju zahtijeva primjenu različitih dijagnostičkih uređaja za utvrđivanje "zdrastvenog" stanja određenih objekata održavanja pa je u skladu s time u radu potrebno obraditi sljedeće:

1. Dati kratki prikaz strategije održavanja po stanju.
2. Definirati grupe dijagnostičkih uređaja s obzirom na primjenu.
3. Detaljno opisati tehničke značajke pojedinih dijagnostičkih uređaja te opisati načine mjerenja na konkretnim primjerima.
4. Zaključak.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv. prof.dr.sc. Dragutin Lisjak

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
1.1. Održavanje po stanju (CBM) 2
1.2. Kvar 3
1.3. Dijagnostički uređaji 3
2. METODE I TEHNIKE ZA KONTROLU STANJA TEHNIČKOG SUSTAVA 4
3. Vizualna kontrola 5
3.1. Endoskopija 5
3.2. Boroskopi 6
3.3. Fiberskop 7
3.4. Videoskop 8
3.5. Uređaj VideoControl-Flexi3DLaserliner 9
3.6. Primjer dijagnostike endoskopima 10
4. MJERENJE I KONTROLA TEMPERATURE 12
4.1. Beskontaktno mjerenje temperature - IC termografija 13
4.2. Termografski uređaji 15
4.2.1. Termografska kamera Flir T 425 15
4.2.2. Termografska kamera IC Flir SC660 17
4.3. Primjer upotrebe termografskih uređaja 18
5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE I KONTROLA 20
5.1. Metoda prozvučavanja 22
5.2. Puls-eho metoda odjeka 23
5.3. Metoda rezonancije 24
5.4. Ultrazvučni uređaj General Electric (GE) USM GO 25
5.5. Primjer upotrebe ultrazvučnog uređaja 29
6. VIBRACIJE I ISPITIVANJE VIBRACIJA 34
6.1. Vibracije 34
6.2. Parametri vremenskog signala 35
6.3. Opis amplitude signala 35
6.4. Sile i vibracije 36
6.5. Senzori za mjerenje vibracija 37
6.6. Analiza i obrada signala vibracija 40
6.7. Uređaj za mjerenje vibracija ADRE 408 SXP 40
6.8. Primjena upotrebe ADRE 408 SXP 45
6.8.1. Osnovni podaci o strojevima 45

6.8.2. Rezultati ispitivanja – analiza 47
7. ZAKLJUČAK 57
8. LITERATURA 58
9. PRILOG 59

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela preventivnog održavanja [2] 1
Slika 2. Borsoskop PCE-RS 40 7
Slika 3. iFlex Fiberscope [7] 8
Slika 4. Endoskop VideoControl-Flexi3D Laserliner [8] 9
Slika 5. Djelomični presjek turbo motora GTM ASTAZOU III B [9] 10
Slika 6. Kućište centrifugalnog kompresora [5] 11
Slika 7. Komora sagorijevanja [5] 11
Slika 8. Vijenac vodnog sučelja [5] 11
Slika 9. Ulaz zraka [5] 11
Slika 10. Difuzor [5] 11
Slika 11. Komora sagorijevanja [5] 11
Slika 12. Spektar elektromagnetskog zračenja [10] 13
Slika 13. Energija koja pada na osjetnik termografskog uređaja prilikom termografskog snimanja objekta [11] 14
Slika 14. Termografska kamera Flir T 425 [12] 15
Slika 15. Termovizijska kamera IC Flir SC660 [13] 17
Slika 16. Termografska i normalna fotografija kablovske glave trafostanice 35/10 kV [13] 19
Slika 17. Termografska i normalna fotografija izolatora trafostanice 35/10 kV [13] 19
Slika 18. Podjela zvučnih valova prema frekvencijama [14] 20
Slika 19. Longitudinalni val [16] 21
Slika 20. Transverzalni val [16] 21
Slika 21. Blok shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek [16] 22
Slika 22. Metoda prozvučavanja [16] 23
Slika 23. Plus-eho metoda [16] 24
Slika 24. Ultrazvučni uređaj General Electric (GE) USM GO [16] 25
Slika 25. Sonda MB 4S [16] 29
Slika 26. Etalon V2 [16] 30
Slika 27. Baždarenje sondom na BD=12.5 mm MP=50 mm [16] 31
Slika 28. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju [16] 31
Slika 29. Ispitivanje ležajnih rukavaca kod pogonskog zupčanika [16] 32
Slika 30. Prednji ležaj rukavca (MP=100 mm, RO=59 dB) [16] 33
Slika 31. Disk (MP= 50 mm, RO= 43 dB) [16] 33
Slika 32. Stražnji ležaj rukavca (MP=140 mm, RO = 58 dB) [16] 33
Slika 33. Najjednostavniji oblik oscilirajućeg sustava – model masa-opruga [17] 34
Slika 34. Prikaz parametra vremenskog signala [17] 35
Slika 35. Veza vibracija as pobudnom silom i karakteristikama sustava [17] 37
Slika 36. Beskontaktni senzor pomaka [18] 38
Slika 37. Kapacitivni senzor pomaka [16] 38
Slika 38. Kontaktni senzor brzine [18] 39
Slika 39. Kontaktni senzor ubrzanja [18] 39
Slika 40. ADRE 408 SXP [19] 40
Slika 41. ADRE 408 SXP (prednja i stražnja strana) [19] 41
Slika 42. Trend promjene amplitude ukupnih vibracija prilikom ustaljenog načina rada [19] 47
Slika 43. Spektar mjernog mjesta ventilatora zračnog hladnjaka [19] 48

Slika 44. Spektar mjernog mjesta elektromotora Booster pumpe 2501 [19]..... 49
Slika 45. Prikaz signala (timebase) Booster pumpe 2501 [19]..... 49
Slika 46. Raspored mjernih mjesta linije glavnog pumpnog agregata P-2603..... 50
Slika 47. Spektar mjernog mjesta L2V [19]..... 52
Slika 48. Spektar mjernog mjesta L5VR [19]..... 53
Slika 49. Spektar mjernog mjesta L6VR [19]..... 53
Slika 50. Promjena amplituda i faznih kuteva mjernog mjesta L5VR [19]..... 55
Slika 51. Promjena amplituda i faznih kuteva mjernog mjesta L6VR [19]..... 55
Slika 52. Prikaz orbita [19]..... 56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz metoda i tehnika za pojedinu opremu [3] 4
Tablica 2. Tehničke specifikacije Borsoskopa PCE-RS 40 [6] 7
Tablica 3. Tehničke specifikacije iFlex Fiberscope-a [7] 8
Tablica 4. Tehničke specifikacije Endoskopa VideoControl-Flexi3D Laserliner [8] 9
Tablica 5. Osnovne specifikacije turbo motora GTM ASTAZOU III B [9] 10
Tablica 6. Tehničke specifikacije termografske kamere Flir T 425 [12] 15
Tablica 7. Tehničke specifikacije termovizijske kamere IC Flir SC660 [13] 17
Tablica 8. Tehničke specifikacije ultrazvučnog uređaja General Electric (GE) USM GO [16] 25
Tablica 9. Tehničke specifikacije sonde MB 4S [16] 30
Tablica 10. Parametri ispitivanja pogonskog zupčanika [16] 32
Tablica 11. Parametri ispitivanja rotora turbine [16] 33
Tablica 12. Vrijednost maksimalne amplitude ukupnih vibracija [19] 47
Tablica 13. Vrijednosti maksimalne amplitude ukupnih vibracija svih mjernih mjesta Booster pumpe 2501 [19] 48
Tablica 14. Vrijednosti iznosa nepravilnosti mjernih staza relativnih osovinskih vibracija [19] 50
Tablica 15. Maksimalna ukupna amplituda vibracija prve faze [19] 51
Tablica 16. Maksimalna ukupna amplituda vibracija druge faze [19] 54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
λ	m	Valna duljina
f	Hz	Frekvencija
dB	bel	Jedinica razine neke veličine
MP	mm	Mjerno područje
RO	mm	Radna osjetljivost

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada su dijagnostički uređaji u održavanju. Rad se sastoji od teorijskog dijela i od onog u kojem je prikazana praktična primjena uređaja. U početku rada opisuje se razvoj održavanja, a u uvodu je opisano održavanje općenito, održavanje po stanju, kvarovi i dijagnostički uređaji. U radu su po poglavljima prikazane metode ispitivanja, a to su: vizualna metoda, termografija, metoda ultrazvuka te metoda mjerenja vibracija. Svaka od metoda teorijski je ukratko opisana, a shodno tome za svaku od metoda prikazan je jedan ili više primjera dijagnostičkih uređaja. U praktičnom dijelu prikazana je primjena pojedinog uređaja u svrhu dijagnostike s rezultatima ispitivanja.

Ključne riječi: održavanje po stanju, metode dijagnostike, vizualna kontrola, termografija, ultrazvuk, mjerenje vibracija, dijagnostički uređaji

SUMMARY

The subjects of this final thesis are diagnostic devices in maintenance. Thesis consists of a theoretical part and of a section showing the practical use of the device. At the beginning of the work, maintenance development is described. The introduction describes maintenance, condition based maintenance, breakdowns and diagnostic devices. The methods of examination are divided into following chapters: visual method, thermography, ultrasound method and lastly vibration measurement method. Each of those methods are briefly theoretically described and therefore one or more examples of diagnostic devices are displayed for each of the methods. In the practical part, the application of a single device is shown for diagnostic purposes with the results of the test.

Key words: maintenance by status, diagnostic methods, visual control, thermography, ultrasound, vibration measurement, diagnostic devices

1. UVOD

Održavanje je profesija posvećena održavanju sustava tako da sustav kontinuirano radi u najboljem mogućem stanju, pritom čineći opremu pouzdanom, produktivnom i sigurnom za korištenje.

Ljudi su se oduvijek brinuli za stanje svoje opreme, a to se odnosi čak i na najjednostavnije alate. Većina kvarova koja se događala bili su posljedica preopterećivanja opreme, što se i dan danas događa. Održavanje bi se primjenjivalo kada oprema više nije bila u mogućnosti obavljati svoju zadaću. Takva primjena održavanja naziva se „Korektivno održavanje".

Trend „Korektivnog održavanja" trajao je sve do 1950. godine, kada je grupa japanskih inženjera razvila novu ideju održavanja koja se sastoji od praćenja uputa proizvođača prema koji su odredili vremenske intervale prema kojima su se trebale provoditi operacije zamjene nekog dijela opreme. Novi trend nazvan je „Preventivno održavanje". Kao rezultat tog održavanja, voditelji postrojenja mogli su prepustiti nadglednicima, mehaničarima ili drugim specijalistima da razviju rasporede kada bi se trebalo pregledati opremu radi sprečavanja oštećenja opreme. Iako je takav pristup pomogao da se smanji vrijeme zastoja strojeva, u pitanju je ipak bila skuplja alternativna varijanta. Mnogi dijelovi su bili promjenjeni prema uputama proizvođača, a bili u mogućnosti da rade dulji vremenski period.

Preventivno održavanje dijeli se na: održavanje po konstantom ciklusu, održavanje po stanju, te na kontrolne preglede. (Slika **1**). **Error! Reference source not found.**

Slika 1. Podjela preventivnog održavanja [2]

1.1. Održavanje po stanju (CBM)

Održavanje po stanju (CBM) filozofija je upravljanja koja postavlja odluke popravljanja ili zamjene trenutnog ili budućeg otkaza rada opreme. Održavanje po stanju prepoznaje da je promjena stanja ili performansi rada opreme glavni razlog za vršenje održavanja. Optimalno vrijeme za održavanje treba biti određeno praćenjem stanja strojeva ili njihovih dijelova..

Glavni zadatak održavanja po stanju minimalizirati je sveukupni trošak inspekcija i popravaka tako da se prikupljaju i tumače podaci povezani s operativnim dijelovima opreme. Praćenje stanja, tamo gdje je isplativo, može dati odgovarajuću obavijest o kvaru koji bi se mogao dogoditi, što bi omogućilo planirane popravke na temelju degradacije strojeva. To je ipak drugačije od skupih popravaka temeljenim na vremenskim intervalima ili popravaka kada oprema stane s radom radi već pokvarenog dijela.

Održavanje po stanju (CBM) zahtijeva jaku analizu podataka o pouzdanosti i financijskom planu održavanja. Nadalje, ono zahtijeva nedvosmisleno razumijevanje načina i učestalosti kvara, kritičnosti opreme i isplativosti povezane s različitim strategijama održavanja.

Održavanje po konstantom ciklusu često ne pruža maksimalni životni vijek stroja. U mnogim slučajevima oprema je zamijenjena dok joj je ostalo još mnogo radnih sati koji su mogli biti iskorišteni.

Praksa je pokazala da neki signali, uvjeti ili indikatori predvide 99% otkaza strojeva. Promatrajući opremu, mogu se povući određeni potezi prije nego li se ozbiljne posljedice odnosno kvarovi dogode. S takvim postavom, voditelji se mogu usredotočiti na zamjenu dijelova opreme, točnije komponente. Preporučuje se metoda zamjena Just-In-Time (JIT), te tako se uz maksimalno iskorištenje komponente dobije i minimalizirano vrijeme zamjene komponenata, tj. stajanje stroja.

CBM je neinvazivna tehnika i stvarna preventivna akcija za otkrivanje početka i nastanka kvara. Ponekad se događaju i skriveni kvarovi koji su često prisutni u uređajima na čekanju, zaštitnim uređajima ili rijetko korištenim strojevima. Skriveni kvarovi nisu vidljivi do vremena kada je potreba za tim strojem, tj. do uključenja.

Ključni uvjet za uspješnu provedbu CBM-a niska je učestalost lažnih alarma te brz i pouzdan sustav otkrivanja grešaka. Projekt Međunarodne agencije za energetiku (IEA) ukazao je na to da se nagle greške mogu lako otkriti, dok s druge strane, degradativni kvarovi morali su biti prilično veliki prije nego što je detekcija bila nedvosmislena. Studija je također istaknula da je

moguće uravnotežiti snagu i osjetljivost. Povećanje osjetljivosti rezultira ranim upozoravanjem na pogreške, ali može povećati indiciranje lažnih alarma. Međutim, vodeći proizvođači praćenja uvjeta stanja primijenili su tehnike tipa kontrole kvalitete u otkrivanju kvarova stroja; čime se osigurava povećana zaštita od lažnih alarma. [1]

1.2. Kvar

Kvar/otkazivanje je kada oprema, komponenta ili neki element ne može obavljati svoj posao. Za mnogu opremu, međutim, često se javljaju određeni simptomi (male greške) prije potpunog zakazenja, kao što su prekomjerne vibracije, abnormalna toplina, kruti sadržaji u ulju i tako dalje. Senzori sposobni za otkrivanje signala kvara mogu dati upozorenje ili alarm koji obavještavju operatera o trenutnom stanju opreme i mogućem otkazivanju. [1]

1.3. Dijagnostički uređaji

Dijagnostičke uređaje koristimo za dobivanje upozorenja ili alarma. Dijagnostički uređaji mogu biti sustavno automatizirani u postrojenju ili se mogu ručno koristiti prilikom ispitivnja opreme.

Postoji više vrsta dijagnostičkih uređaja. Ovisno o opremi ili elementu koji se promatra, odabire se adekvatan uređaj koji će nam pomoći da dođemo do informacija o stanju opreme. Za odabir adekvatnog uređaja moramo znati kakvu kontrolu želimo provoditi, odnosno što želimo ispitati.

Postoji više vrsta metoda kontrole: Prva je vizualna kontrola kod koje se koriste endoskopski dijagnostički uređaji kao što su boroskop i fiberskop koji se zajedno nazivaju endoskopima. Zatim slijedi termografija koja koristi termografske dijagnostičke uređaje koji sadrže IC osjetnik – oni na temelju prikupljanja količine zračenja koje pada na osjetnik ukazuju na razliku temperature promatranog objekta. Treća po redu je ultrazvučna metodda kod koje koristimo ultrazvučne dijagnostičke uređaje koji pomoću sonda očitavaju udaljenosti odbijenih ultrazvučnih valova. Zadnja je analiza vibracija kojom se koriste dijagnostički uređaji za ispitivanje vibracija – uz njih pomoću sonda promatramo male pomake koje oprema radi tijekom rada. U sljedećim poglavljima bit će prikazano koje metode kontrole postoje te će biti ponuđen kratki osvrt na njih. Opisat će se i koja je adekvatna metoda kontrole za pojedinu opremu ili elemente.

2. METODE I TEHNIKE ZA KONTROLU STANJA TEHNIČKOG SUSTAVA

Kako postoje različiti sustavi koji imaju potrebu za održavanjem tako postoje i različite metode koje nam daju informacije o stanju sustava.

S obzirom na sustav koji promatramo trebamo koristiti kontrole i metode koje nam daju korisne podatke. Ti podaci nam trebaju govoriti o trenutnom stanju sustava prema kojima se zaključuje u kakvom je stanju promatrani sustav. Tablica 1 prikazuje metode i tehnike se primjenjuju prema opremi koja se ispituje.

Tablica 1. Prikaz metoda i tehnika za pojedinu opremu [3]

	Akustika	Ultrazvuk	Analiza zvuka	Analiza električkih	Mjerenje protoka	IR snimanje	Toplomjeri	Analiza hidraulike	On-line debris LM	Off-line debris	Optičko praćenje	Alarmni sustavi	Mjerenje pomaka	Mjerenje pritiska	Mjerenje temperature	Voltaža/amperaža	Moment	Brzina	Efikasnost
Ležajevi	•		•			•	•				•	•			•	•			
Remeni						•	•				•							•	
Ventilatori	•	•	•	•	•	•	•				•		•	•	•	•		•	
Kotlovi	•				•	•	•								•				
Oprema za lemljenje/zavarivanje				•		•	•				•	•							
Kompresori/pneumatski strojevi	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•	•		•	•	•	•
Spojke	•		•			•	•						•			•			
Giljotine/strojevi za rezanje	•		•	•		•	•	•	•	•						•			•
Postrojenja za iskopavanje	•		•	•		•	•	•	•	•					•	•			•
Električni motri	•		•	•		•	•								•	•			•
Dizala/konvejeri	•		•	•		•	•	•							•	•			•
Pokretne stepenice	•			•		•	•									•			•
Filteri/ventili	•	•			•	•	•		•	•					•			•	•
Mjenjači	•		•			•	•		•	•	•	•	•	•	•	•			•
Vakuumska oprema	•	•	•		•	•	•	•	•	•					•	•			•
Spalionice/peći		•			•	•	•	•			•	•			•				•
Motori s unutarnjim izgaranjem	•				•	•	•	•	•	•	•	•			•	•			•
Utovarivači	•			•		•	•	•	•	•									
Mehanički strojni alati	•		•			•	•		•	•					•	•	•		
Hidraulički strojevi	•		•			•	•	•	•	•					•	•			
Posude pod tlakom/akumulatori	•					•	•								•				
Pumpa	•	•	•		•	•	•	•	•	•				•	•	•		•	•
Strukturna čvrstoća	•	•				•	•				•	•				•			
Transformatori				•		•	•								•				
Turbine	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
Cijevi	•	•	•		•	•	•		•	•	•	•				•			

3. Vizualna kontrola

Vizualna metoda je najosnovnija metoda održavanja po stanju. Predstavlja promatranje opreme s ciljem otkrivanja vidljivih nesavršenosti površine ili defekata te može biti obično promatranje pomoću oka, promatranje pomoću digitalnih kamera ili kao automatsko prepoznavanje. Može se vršiti na vanjskoj površini ili unutar stroja. Promatranje unutar stroja naziva se endoskopija.

Kvaliteta vizualnog ispitivanja je primarno određena:

- kvalitetom detektora,
- oka ili kamere,
- uvjetima osvjetljenja,
- sposobnošću obrade vizualnih podataka

Vizualna kontrola ili optičko ispitivanje koristi se za otkrivanje niza površinskih grešaka kao što su korozija, kontaminacija, završna obrada površine, te površinske greške spojeva (zavara, zaptivki, ljepljivih traka, i sl.).

Ova metoda ispitivanja primjenjiva je za širok spektar materijala, proizvoda, postrojenja i konstrukcija.

Prednosti upotrebe ove metode ispitivanja su:

- može dati vrlo korisne informacije o ispitivanom području,
- relativno je jeftina,
- ne oduzima puno vremena,
- rezultati se mogu trajno zabilježiti,
- može biti automatizirana...

Upotrebom optičkih instrumenata moguće je ispitati nepristupačna mjesta, preventivno djelovati i pravovremeno tretirati postojeće greške. [4]

3.1. Endoskopija

Cilj endoskopije je promatrati unutrašnjost određene opreme ili strojnog elementa bez rastavljanja istog tako da se koristi za ispitivanje (promatranje) nepristupačnih mjesta.

Endoskop omogućuje optički uvid u unutrašnjost strojeva i postrojenja. To je optički uređaj koji se sastoji od krute ili fleksibilne cijevi s lećom na jednom kraju i objektivom na drugom.

Upotrebom određenih endoskopskih instrumenata moguće je pravovremeno otkriti grešku, izmjeriti njenu veličinu te je locirati iako se nalazi na nepristupačnom mjestu. Endoskopija omogućava da se prošire granice kontrola koje su se do sada izvodile i doprinosi njihovom pojednostavljenju.

Endoskop je zajednički naziv za sve uređaje za promatranje sklopova i dijelova u zatvorenom prostoru. Endoskop može biti kruti i fleksibilni. Kruti endoskop se primjenjuje u slučajevima kada je olakšan pristup mjernom mjestu, dok se fleksibilni endoskop primjenjuje u slučaju kada je otežan pristup ispitivanom mjestu. Endoskopi se prema konstrukciji dijele na: boroskope, fiberskope i video endoskope. [5]

3.2. Boroskopi

Boroskopi predstavljaju klasičan sustav optičkih leća ugrađenih u krutu cijev kroz koju se istovremeno dovodi osvjetljenje i gleda u unutrašnjost. Kruta konstrukcija, mogućnost reguliranja dužine, promjera, ugla i polja vida, kao i jednostavnost upotrebe, čine boroskop rasprostranjenim priborom vizualne kontrole.

U leću boroskopa se mogu povezati digitalne mini kamere, a sve u sustav s video analizatorom, čime se povećavaju njegove operativne mogućnosti. Inače, uslijed svoje čvršće konstrukcije boroskopi se lako održavaju, nakon što su pri tehničkoj dijagnostici izloženi raznim nečistoćama. Na jednostavan način se poslije upotrebe detaljno obrišu. Boroskopi se mogu nesmetano koristiti do temperatura od 150° C. Kreću se od promjera 8 mm, 6 mm do onih čiji je promjer samo 1,7 mm. Intenzitet svjetla zavisi od promjera vlakna za osvjetljavanje, veći promjer znači bolju osvijetljenost.

Borsoskopi se široko primjenjuju za kontrolu cijevi oružja, parnih kotlova i hladnjaka, plinovoda, naftnih bušotina, plinskih boca, raznih cijevi i sl. [5]

Slika 2. Borsoskop PCE-RS 40

Tablica 2. Tehničke specifikacije Borsoskopa PCE-RS 40 [6]

	Duljina	Promjer	Vidno polje	Osvjetljenje	Baterija
PCE-RS 40	do 432 mm	4 mm	45°	LED	3.7 V Li-Ion

3.3. Fiberskop

Fiberskopi su moderniji predstavnici savitljivih endoskopa koji imaju mogućnost savijanja svjetlovoda bez posljedice po sliku koja se obrađuje, a sastoje se od snopa tankih staklenih vlakana ugrađenih u savitljivu cijev kroz koju se istovremeno dovodi osvjetljenje i gleda u unutrašnjost. Fiberskopi se mogu upotrebljavati do temperature od 80°C .

Za fokus fiberskopa pri različitim udaljenostima do objekta dijagnostike, leća objektiva se mora pomicati u pravcu osi. Obično se položaj fiberskopa regulira udaljeno od okularnog dijela fiberskopa. U okularu postoji specijalni dioptrijski regulator za prilagođavanje oštrine oku promatrača. Kvaliteta slike je u krajnjem slučaju određena rasporedu završetka vlakana na krajevima za prijenos slike.

Fiberskop ima mogućnost savijanja svojih krajeva, što omogućava ne samo direktan, nego i bočni pogled. Njegovi osnovni dijelovi su: koherentan snop vlakana za prijenos slike, koji se prostire od glave koja se uvodi u prostor ispitivanja do ručice za upravljanje i okulara; svjetlovod za osvjetljavanje koji polazi od glave i vodi do ručice za upravljanje i dalje kroz spojnicu do svjetlosnog izvora; tanke žice koje povezuju glavu s ručicom za upravljanje i pričvršćuju se za regulator pravca glave koji omogućava operatoru da namjesti glavu pod zadanim uglom i time osigura njen prolazak kroz složene kanale i pregled željenih zatvorenih

prostora; obloga koja obavija oba snopa optičkih vlakana i žičica; ručica za upravljanje koja osigurava fokus objektiva i okulara, željeno upravljanje krajevima fiberskopa i dobivanje željene slike.

Pomoćni pribor koji se koristi s fiberskopom varira od video kamere do različitih svjetlosnih izvora i kutnih adaptera za okular. Fiberskop je moguće spojiti s TV ekranom, odnosno računalom i monitorom, što specijalistima omogućava razne pogodnosti kao što je mogućnost dokumentiranja i memoriranja te kasniju analizu podataka. [5]

Slika 3. iFlex Fiberscope [7]

Tablica 3. Tehničke specifikacije iFlex Fiberscope-a [7]

	Promjer	Duljina	Vidno polje	Osvjetljenje
iFlex Fiberscope	2.4 mm do 6.0 mm	70 cm do 300 cm	70°	vanjsko

3.4. Videoskop

Videoskopi predstavljaju posljednji tehnički proizvod baziran a optičkoj digitalnoj tehnologiji, koji je danas postao standard u dijagnosticiranju. Kamera malog promjera od nekoliko milimetara i upotreba preciznog sustava leća, omogućava stvaranje maksimalne osvijetljenosti objekta i velike rezolucije snimaka može se dovesti na različite načine na mjesto ispitivanja.

Proces se odvija tako da kamera snima ispitno mjesto i istovremeno je povezana sa računalom tako da se na ekranu može pratiti snimanje i odabrati parametri snimanja te dobiti informaciju o postojanju greške, njenoj veličini, porijeklu i utjecaju na dalju eksploataciju.

Slika se može obrađivati na računalu, uvećati i dobiti velika preciznost u mjerenju.

Najčešće se upotrebljavaju savitljivi videoskopi promjera 6 mm. Videoskop se sastoji od:

- glave kamera,
- komandne jedinice,
- monitora.
- specijalna hvataljka (omogućava operatoru jednostavno uklanjanje stranih predmeta iz motora ili drugih objekata)

Mali TV sistemi endoskopa, ne samo da znatno proširuju dosadašnje mogućnosti primjene tehničkih endoskopa već mogu da zamjene krute i fleksibilne endoskope sa sondama promjera preko 12 mm. [5]

3.5. Uređaj VideoControl-Flexi3DLaserliner

Slika 4. Endoskop VideoControl-Flexi3D Laserliner [8]

Tablica 4. Tehničke specifikacije Endoskopa VideoControl-Flexi3D Laserliner [8]

Duljina sonde	2 m
Određene značajke endoskopa	Fokusiranje, TV izlaz, SD utor za karticu, LED rasvjeta, Automatsko isključivanje, Funkcija slike, Video funkcija, WiFi, Rotacija slike, Fokusiranje, Digitalni zoom, Visoka rezolucija
Promjer sonde	5.5 mm

Razlučivost kamere	640 x 480 pix
Rezolucija prikaza	640 x 480 pix
Tip endoskopa (kategorizacija)	Endoskop
Vrsta zaštite	IP67 (sonda), IP65 (osnovna jedinica)
Zoom (digitalni)	2 x

3.6. Primjer dijagnostike endoskopima

Za primjer dijagnostike endoskopima prikazat ćemo dijagnostiku GTM ASTAZOU III B(Slika **5.**), turbo motora koji se koristi za zračna vozila. Ispitivanje je provedeno na Vojnotehničkom institutu u Podgorici.

Slika 5. Djelomični presjek turbo motora GTM ASTAZOU III B [9]

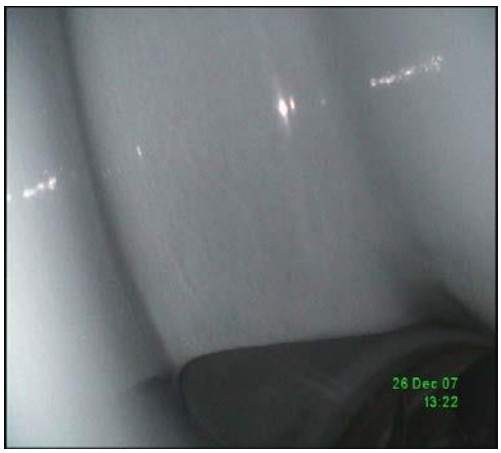
Tablica 5. Osnovne specifikacije turbo motora GTM ASTAZOU III B [9]

Parametri	Maksimalna izlazna snaga	Duljina	Promjer	Širina
GTM ASTAZOU III	480 kW	1,433.5 mm	460 mm	483 mm

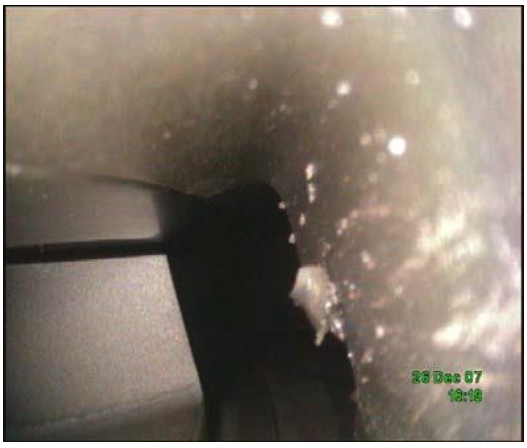
Slika 6. Kućište centrifugalnog kompresora [5]

Slika 7. Komora sagorijevanja [5]

Slika 8. Vijenac vodnog sučelja [5]



Slika 9. Ulaz zraka [5]



Slika 10. Difuzor [5]

Slika 11. Komora sagorijevanja [5]

Kod slike **6.** vidi se pojava korozije i nečistoće. Slika **7.** prikazuje pojavu oksidacije, kemijske korozije i djelomično pregorijevanje bez oštećenja. Slika **8.** prikazuje pojavu prljavštine i naslage ulja. Na slici **9.** kod ulaza zraka nema oštećenja. Slika **10.** prikazuje oštećenje izlaznog ruba difuzora. Slika **11.** pokazuje istu situaciju kao kod slike **7.** samo se još primjećuje i pojava koksa.

4. MJERENJE I KONTROLA TEMPERATURE

Temperatura je toplotno stanje neke stvari. Ona ovisi o tome koliko toplote sadrži neko tijelo određene mase i pritiska. Temperatura ne može prelaziti s tijela na tijelo, nego prelazi toplina a temperature se izjednačavaju, i kao takva se očitava na niz načina. Tako povišenje temperature uzrokuje promjenu mjera tijela. S porastom temperature produžuje se npr. metalni štap, smanjuje kaučukova nit, plinovi povećavaju svoju zapreminu itd. Promjena temperature uzrokuje promjenu električnog otpora vodiča (pri višim temperaturama otpor bakrene žice je veći, a ugljenog štapa manji). Jednako tako, promjena temperature uzrokuje promjenu agregatnog stanja tvari (pri niskim temperaturama voda se skrućuje, dok pri višim ona je u tekućem stanju, a pri još višim prelazi u paru).

Mjerenje temperature u današnjem industrijskom okolišu obuhvaća široku paletu upotreba i zahtjeva. Za ispunjavanje ove široke lepeze potreba razvio se veliki broj senzora i uređaja za obradu tih zahtjeva. Temperatura je vrlo kritična i široka mjerena varijabla za većinu inženjerskih strojarstva. Mnogi procesi moraju imati pratnju i kontrolu temperature. To može varirati od jednostavnog praćenja temperature vode motora ili opterećenje uređaja, ili kao kompleks mjerenje temperature kod zavara laserskog zavarivanja. Teža mjerenja su temperatura dima plina od pogonskih stanica ili visoke peći ili ispušnih plinova od raketa može biti teško za pratiti. Mnogo su češće temperature tekućine u procesima ili podrška za aplikacije, ili temperatura tvrdih predmeta kao što su metalne ploče, ležajevi i osovine u komadu strojeva. Što se tiče mjerenja, može se vršiti kontaktno mjerenje upotrebom termometra kao senzora, ili beskontaktno upotrebom kamera koje očitavaju infracrvene zrake.

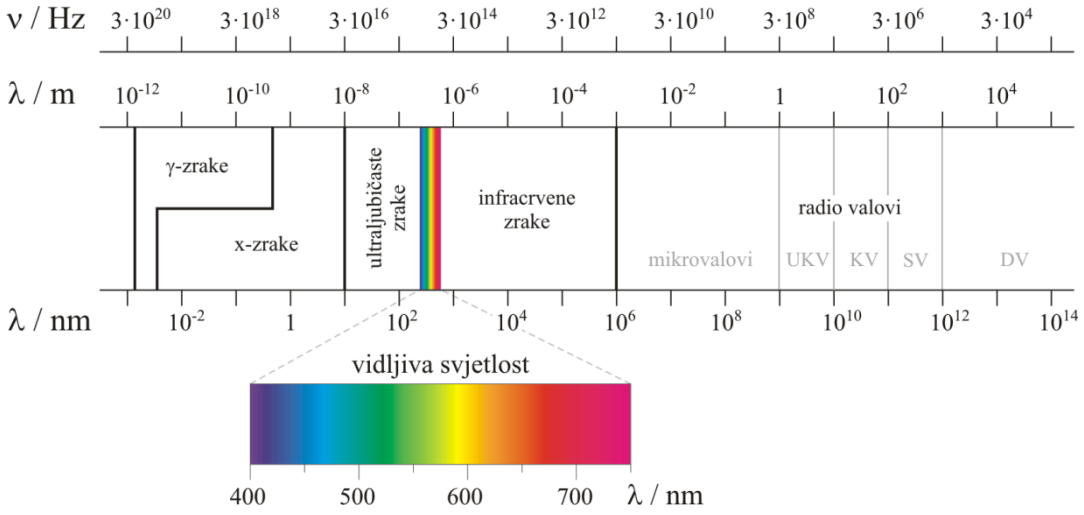
Kontaktno mjerenje zasniva se na svojstvima metala ili tekućina koji se šire i sužavaju promjenom temperature. Za tekućinu se najčešće koristi živa koja ima svojstvo da kada je temperatura veća, povećava joj se volumen, te se tako izradi skala koja je čitljiva. Za smanjenje temperature volumen se smanjuje. Ovdje će fokus biti na beskontaktno mjerenje tj termografiju.

4.1. Beskontaktno mjerenje temperature - IC termografija

IC termografija beskontaktna je metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini nekog tijela. Temelji se na mjerenju intenziteta infracrvenog zračenja s promatrane površine. Rezultat suvremenog termografskog mjerenja je termogram koji u sivim tonovima ili nekom kodu boja daje sliku temperaturne raspodjele na površini promatranog objekta. Upravo ova temperaturna raspodjela daje informaciju o različitim stanjima same površine ili je pak odraz strukture i unutrašnjeg stanja promatranog objekta.

Sva tijela kontinuirano emitiraju elektromagnetsko zračenje, koje kroz vakuum putuje brzinom svjetlosti. Zračenje se ponaša kao čestica u svojoj interakciji s tvar, a kao val kad se širi kroz prostor. Elektromagnetski valovi tako imaju dualnu prirodu: valnu i korpuskularnu. Valna je duljina zračenja λ vezana na frekvenciju vala.

$$c = \nu \cdot \lambda$$



Slika 12. Spektar elektromagnetskog zračenja [10]

Iako na visokim temperaturama užarena tijela svijetle, vidljiva svjetlost nije jedino zračenje koje ona emitiraju. Emisijski spektri (Slika **12.**) čvrstih tijela kontinuirani su i sastoje se od svih valnih duljina, od neke minimalne do maksimalne. Oblik spektra i raspored energije po pojedinim valnim duljinama ovisi o temperaturi i svojstvima površine koja zrači.

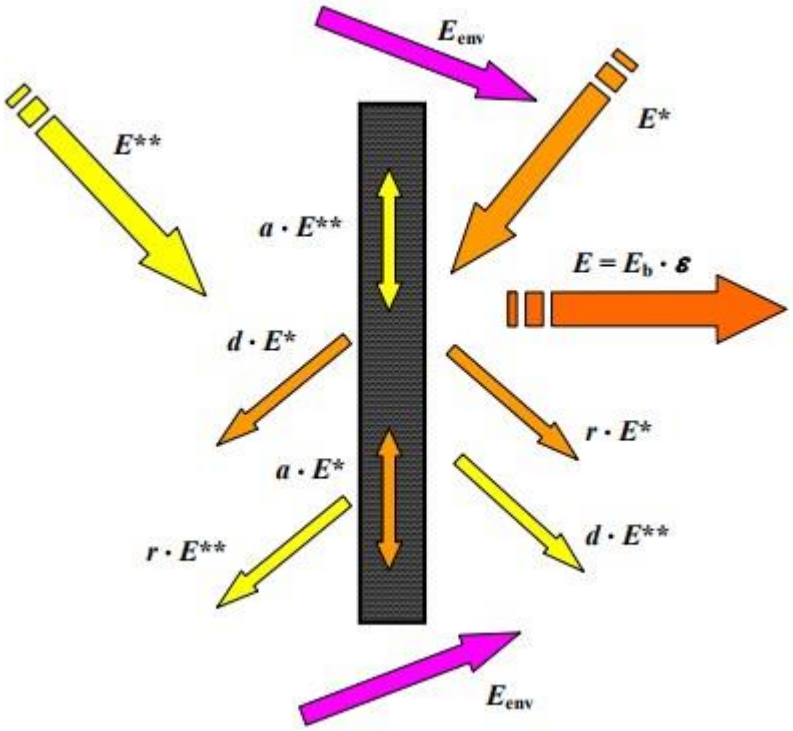
Crno tijelo je naziv za idealno tijelo koje apsorbira cjelokupno zračenje koje pada na njega i ništa ne reflektira. U stvarnosti imamo realna tijela i kod njega zračenje koje dolazi na površinu se djelomično apsorbira, djelomično reflektira, a djelomično i propusti.

Termografski se sustav sastoji od termografske kamere i jedinice za obradu termograma (osobno računalo). U samoj kameri integrirana je IC optika, osjetnik IC zračenja, jedinica za pretvorbu električnog u video signal, monitor i kartica za pohranu podataka. Računalo služi za obradu termograma prema određenom softveru i u njega se podaci učitavaju s kartice koja se nalazi u kameri.

Kako su karakteristike elektromagnetskog zračenja jednake za cijeli elektromagnetski spektar, to je optika koja se koristi u IC uređajima po obliku jednaka onoj kod fotografskih uređaja, no različita po materijalima iz kojih je napravljena. Materijali koji se koriste za izradu leća moraju biti propusni za IC zračenje, a to su; germanij, cink sulfid, cink selenid za dugovalna IC zračenja te silikon, safir, kvarc ili magnezij za srednjevalna IC zračenja.

Osjetnik u termografskoj kameri mjeri količinu energije koja pada na njegovu površinu i koja odgovara intenzitetu zračenja definiranog dijela IC spektra. Dozračena energija na osjetnik E_{os} jednaka je sumi energija koje dolaze od promatranog tijela - vlastita emisija i refleksija ($E+r\cdot E^{*}$) , energije koja prolazi kroz tijelo $d \cdot E^{*}$ i energije koja dolazi od okoline E_{env}(Slika **13.**).

$$E_{os} = (E + r \cdot E^{*}) + d \cdot E^{**} + E_{env}$$



Slika 13. Energija koja pada na osjetnik termografskog uređaja prilikom termografskog snimanja objekta [11]

Da bi se iz zračenja prispjelog na osjetnik kamere izračunala korektna vrijednost temperature promatranog objekta potrebno je poznavati svojstva površine objekta, temperaturu okolišnih objekata, udaljenost kamere od promatranog objekta, temperaturu i relativnu vlažnost zraka. Sve te podatke potrebno je prethodno podesiti kao ulazne parametre u softveru kamere. Utjecaj zračenja iz okoliša treba svesti na minimum, osobito ako se radi o objektu koji je na temperaturi bliskoj okolišnoj ili ima nisku vrijednost emisijskog faktora.

Prednosti IC termografije su beskontaktno mjerenje, mjerenje na daljinu, mjerenje u realnom vremenu, ne remećenjem toplinske ravnoteže. Dok su ograničenja ovisna o poziciji mjerenja i svojstvima kamere. [11]

4.2. Termografski uređaji

4.2.1. Termografska kamera Flir T 425

Slika 14. Termografska kamera Flir T 425 [12][12]

Tablica 6. Tehničke specifikacije termografske kamere Flir T 425 [12]

Model	Flir T425
Performanse slike	
Termalna osjetljivost	50 mK na 30°C
IR rezolucija	320 x 240 pixels
Uvećavanje	1-8x, digitalni
Prezentacija slike	

Mod slike	Generalna + Termalna fuzija
Termalna fuzija	IR slika prikazana ispod, iznad ili unutar temperaturnog područja vizualne slike
Slika u slici	Moguće
Mjerenje	
Temperaturni opseg	-20°C do +1200°C u tri opsega; -20°C do 120°C ili 0°C do +350°C ili +200°C do 1200°C
Analiza mjerenja	
Razlika temperature	Razlika temperature između mjerenih funkcija ili referentne temperature
Alarm mjerenja	Audio/znakovni alarm za temperature iznad ili ispod namještene č
Postavke	
Paleta boja	Opća + RainHC, Bluered
Spremanje slika	
Periodično spremanje slika	Svakih 10 sekundi sve do 24 sata
Digitalno kamera	
Digitalno video snimanje	Video klip na memorijsku karticu

4.2.2. Termografska kamera IC Flir SC660

Slika 15. Termovizijska kamera IC Flir SC660 [13]

Tablica 7. Tehničke specifikacije termovizijske kamere IC Flir SC660 [13]

Vidno polje	24° x 18° / 0.3 m 12° x 9° / 1.2 m 45° x 34° / 0.2 m Objektiv: Fibre optics Lens (FOL38)
Prostorna rezolucija	0.65 mrad za 24° leću 0.33 mrad za 12° leću 1.3 mrad za 45° leću
Temperaturna osjetljivost	0,03°C kod 30°C
Zoom	1-8x
Raspon po valnim duljinama	7.5 - 13 μm
Detektor	Focal Plane Array (FPA) nehlađeni mikrobolometar 640 x 480 piksela
Temperaturni raspon	-40°C do +1500°C
Točnost	+/- 2%
Display	5.6" color LCD, 1024 x 600 piksela
Pohrana slika	SD memorijska kartica; JPEG format, uključuje podatke mjerenja; Spremaju se simultano IC slika, automatski

	povezana s odgovarajućom digitalnom slikom
Video kamera	3.2 Mpiksela auto-fokus i bljeskalica
Laserska zraka	Semiconductor AlGalnP diode laser, Class 2
Baterija	Punjiva Lithium-ion;
Vrijeme rada s baterijom	3 sata pri 25 °C
Sustav punjenja	AC/DC pretvarač, 90–260 V AC, 50/60 Hz ; 12 V DC-izlaz
Granične radne temperature	-15 °C do +50 °C
Granične temperature za skladištenje opreme	-40 °C do +70 °C
Spremanje slike	u realnom vremenu, 14 bitni digitalni zapis
USB-A	Za vanjski stick
USB-Mini-B	Prijenos podataka s/na PC
Težina kamere s baterijom	1.8 kg
Dimenzije kamere	L x W x H: 299 x 144 x 147 mm

4.3. Primjer upotrebe termografskih uređaja

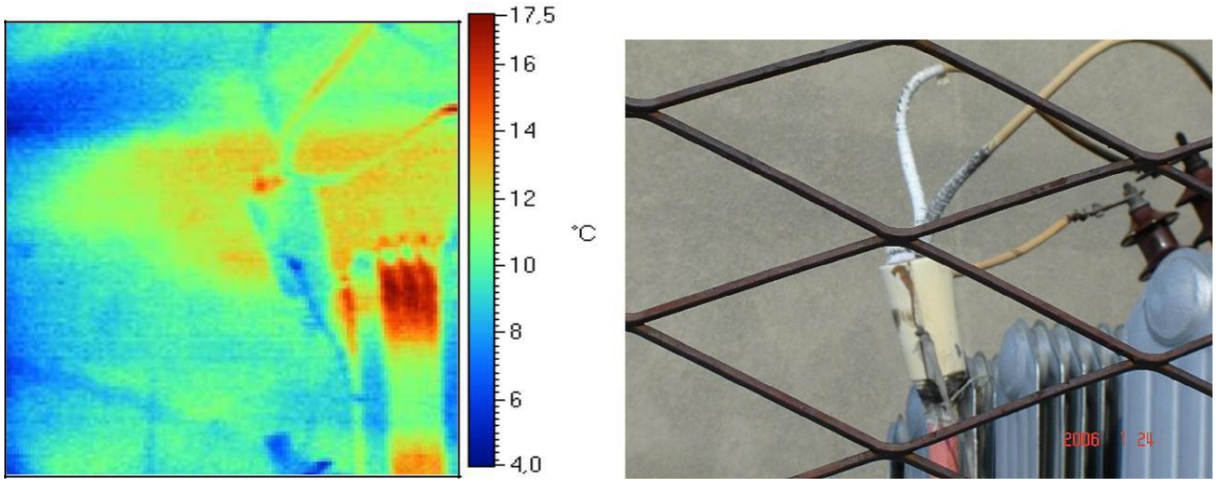
U praksi IC termografija ima jako široku primjenu, ponajviše zbog njenih prednosti.

Koristi se u zgradarstvu za očitavanje gubitaka topline, oštećenja na fasadi, otkrivanje vlage itd.

U strojarskim sustavima se koristi kod sustava grijanja, sustava za hlađenje motora i ulja, kod turbina radi kontrole visokih temperatura ulja i ležajeva, kod kompresora i pumpi, kod spremnika tekućina i plinova te kod pregleda elektromehaničkih mehanizama.

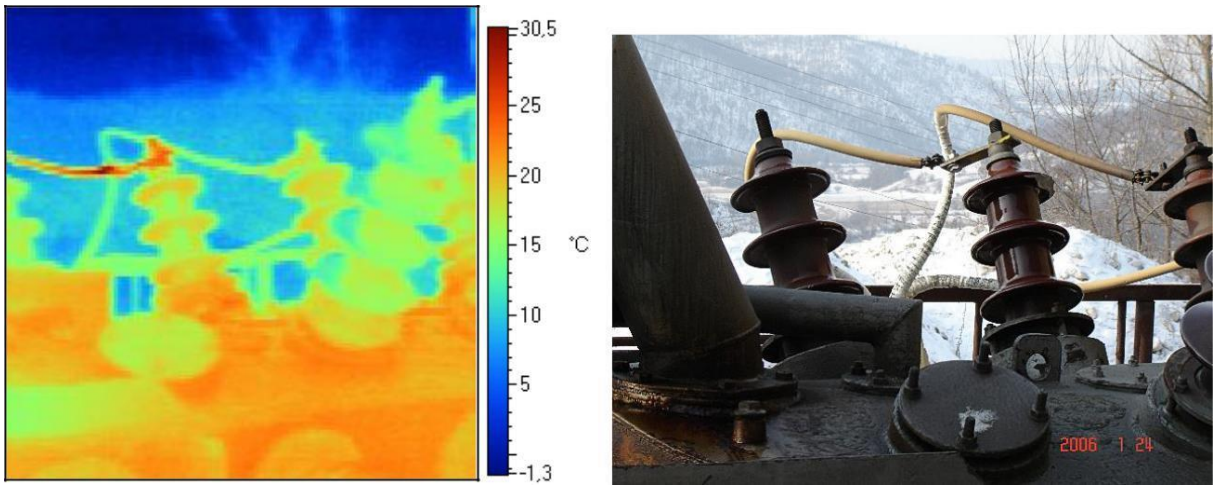
U elektroenergetskim sustavima se traži prekomjerno zagrijavanje pojedinih komponenti rasklopnog postrojenja i distribucijskog sustava, nejednolika opterećenja i velikih otpora, lošijih priključaka akumulatora, kratkih spojeva u ćelijama. IC termografija se koristi i u medicini i veterini,a ovdje su prikazani neki od primjera iz prakse.

Elektrodistribucija Bor opskrbljiva kupce električnom energijom preko devet trafostanica TS 35/10 kV na području Bor, Srbija. S ciljem utvrđivanja stanja opreme te njegovog analiziranja u cilju preventivnog održavanja izvršena su termografska ispitivanja energetskih objekata, tj posebno trafostanica 35/10 kV. [13]



Slika 16. Termografska i normalna fotografija kablovske glave trafostanice 35/10 kV [13]

Na slici **16.** je prikazana termografska i fotografska snimka kablovske glave 35 kV kod koje se uočava grijanje što označava curenje struje, te je neophodna njena zamjena.



Slika 17. Termografska i normalna fotografija izolatora trafostanice 35/10 kV [13]

Na slici **17.** je prikazana termografska i fotografska snimaka izolatora jedne faze transformatora 35/10 kV koji je oštećen zagrijavanjem zbog lošeg kontakta.

5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE I KONTROLA

Ultrazvučno ispitivanje nerazorna je metoda ispitivanja koja svoju primjenu ima u području strojarstva, elektrotehnike i graditeljstva. Ultrazvučna metoda ispitivanja temelji se na detekciji ultrazvučnih signala koji dolaze s predmeta ispitivanja i pretvaranju tih signala u zvukove iz frekvencijskog područja koje ljudi čuju.

Primjenom ultrazvučne kontrole u području održavanja moguće je otkriti mjesto kvara (primjerice propuštanje) i time bitno utjecati na smanjenje troškova uslijed gubitaka u eksploataciji.

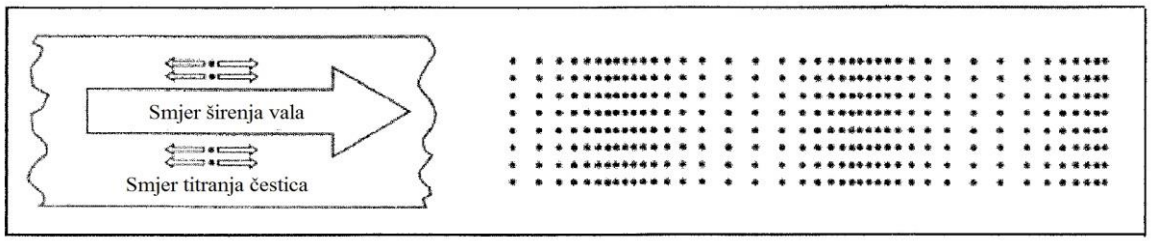
Ultrazvuk je zvuk čija je frekvencija iznad 20 kHz odnosno iznad gornje granice čujnosti ljudi (Slika **18.**).[14]

Slika 18. Podjela zvučnih valova prema frekvencijama [14]

Ultrazvučno ispitivanje zasniva se na svojstvu ultrazvuka da se širi kroz homogene materijale i da se odbija na granici materijala različitih akustičkih osobina (otpornosti), odnosno od nehomogenosti (grešaka) u materijalu. Od izvora ultrazvuka šire se ultrazvučni valovi kroz materijal koji se kontrolira. Ako u materijalu postoji greška, iza nje će, ovisno o vrsti greške, ultrazvučni valovi oslabiti ili se neće pojaviti (odbiju se od greške).

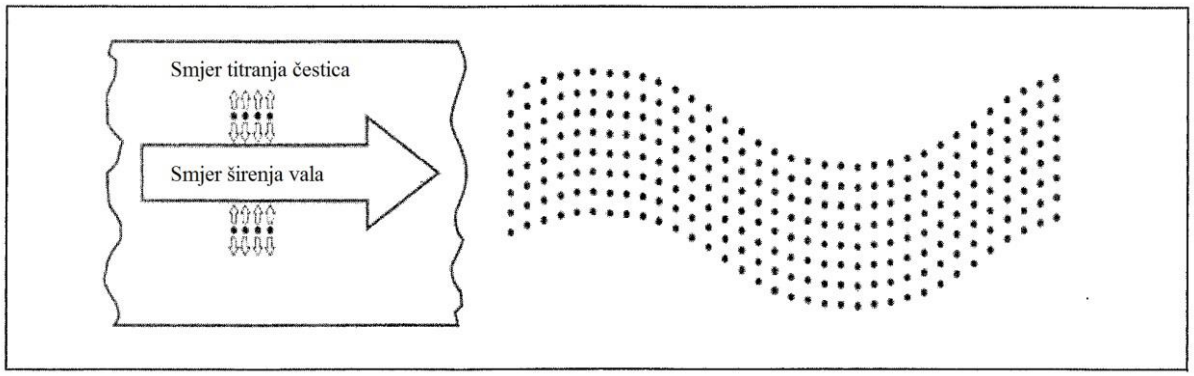
Dvije najčešće korištenih vrsta zvučnih valova u industrijskom ispitivanju su kompresijski (longitudinalni) val i transverzalni (poprečni) val. [15]

Longitudinalni valovi (Slika **19.**) nastaju ako se pokrenu čestice s površine a pravac kretanja čestica je okomit na površinu u smjeru širenja vala. Longitudinalni valovi se mogu prostirati kao kompresijski valovi u sva tri agregatna stanja.



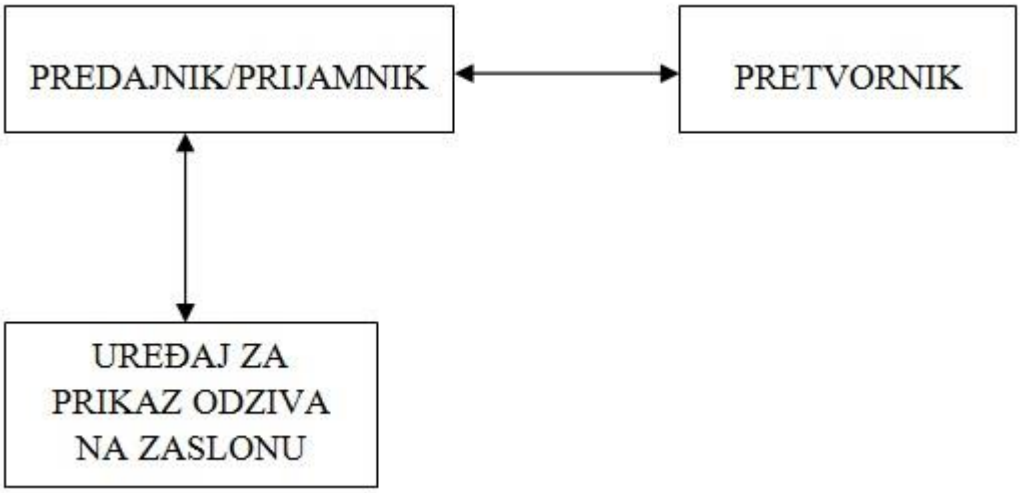
Slika 19. Longitudinalni val [16]

Transverzalni valovi (Slika **20.**) nastaju ako se pokrenu čestice s površine u smjeru površine. Plohe pokrenutih čestica ostaju uvijek u jednakim razmacima, a valovi se kroz materijal gibaju u konstantnim razmacima, odnosno konstantnom duljinom transverzalnog vala. Kod transverzalnih valova čestice titraju okomito na smjer širenja vala, oni mogu nastati samo tamo gdje su molekule vezane čvrsto jedna uz drugu, kao što su čvrsta tijela. Iz toga razloga u tekućinama i plinovima ne postoje transverzalni valovi.



Slika 20. Transverzalni val [16]

Zvuk se unosi u dio koji se ispituje korištenjem ultrazvučnog pretvornika koji pretvara električne impulse iz uređaja u zvučne valove, zatim pretvara vraćeni impuls natrag u električne impulse koji se mogu prikazati kao vizualni prikaz na digitalnom zaslonu (slika **21.**). Ako je stroj ispravno kalibriran, operater može odrediti udaljenost od sonde do refleksije, te u mnogim slučajevima, iskusan operater može odrediti vrstu greške (poput troske, poroznosti ili pukotina u zavaru) koju uzrokuje refleksija.



Slika 21. Blok shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek [16]

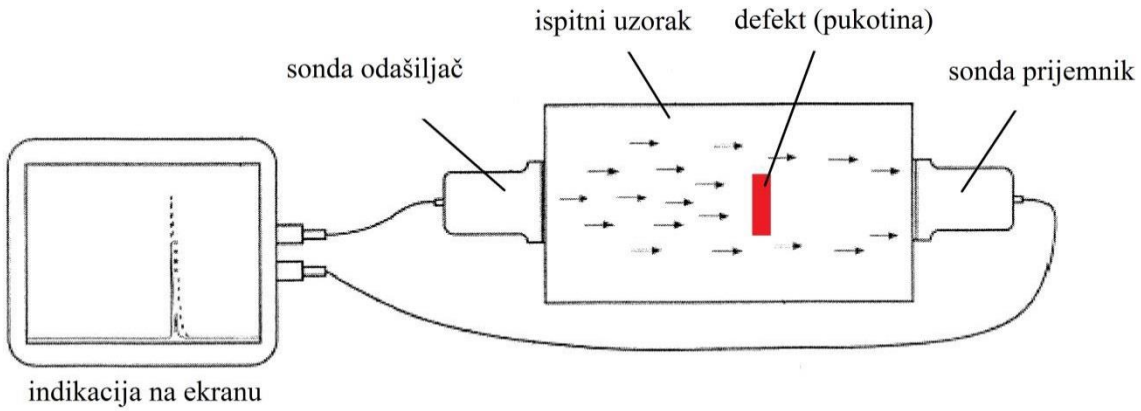
Postoje različite tehnike u ultrazvučnom ispitivanju, no najčešće se ispitivanje vrši na jedan od tri osnovna principa na kojima se bazira ispitivanje ultrazvučnom metodom:

- metoda prozvučavanja (transmisije),
- puls-eho metoda odjeka,
- metoda rezonancije. [16]

5.1. Metoda prozvučavanja

Metoda prozvučavanja zasnovana je na principu apsorpcije ultrazvuka u unutrašnjim nehomogenostima u materijalu. Mjeri se slabljenje ultrazvučnih valova pri prolasku istih kroz predmet koji se ispituje.

Pomoću jedne ultrazvučne glave (sonda odašiljač) ultrazvučni valovi se usmjeravaju u ispitni uzorak a na drugoj strani drugom ultrazvučnom glavom (sonda prijemnik) se mjeri energija valova kao što je prikazano na slici **22**.



Slika 22. Metoda prozvučavanja [16]

Kada je uzorak homogen, bez pukotina, signal na prijemniku bit će jednak ulaznom signalu.Kod uzoraka koji se sastoje od dva različita materijala dio ultrazvučne energije odbija se od granice materijala (refleksije) i prijemnik registrira signal manji od ulaznog.Koliko manji ovisi o vrsti materijala, odnosno njegovom zvučnom otporu.

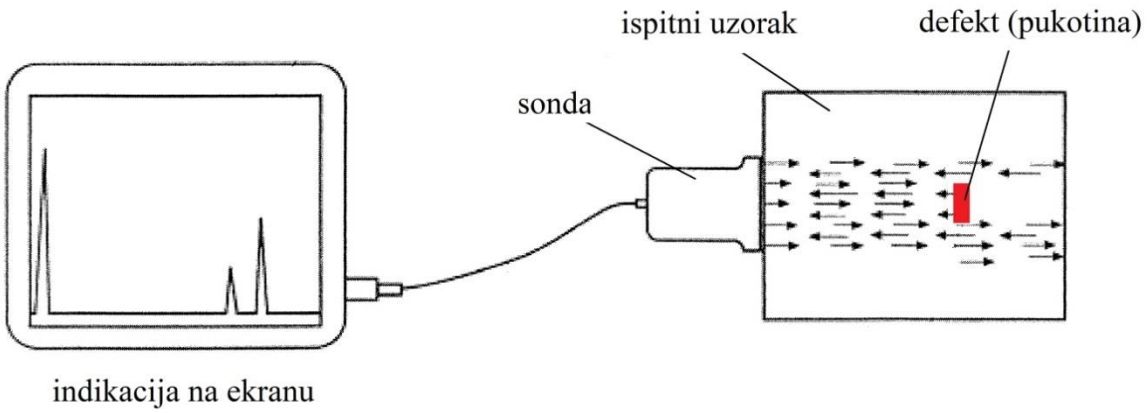
Ovom metodom možemo otkriti samo velike defekte. Naročito je pogodna za otkrivanje slojevitih grešaka u tankim uzorcima debljine do 50 mm. [16]

5.2. Puls-eho metoda odjeka

Temelji se na principu odbijanja ultrazvučnih valova od različitih nehomogenosti u materijalu. Jedna ultrazvučna sonda služi i kao generator i kao prijamnik ultrazvučnih valova. Umjesto propuštenog dijela ultrazvučnog vala, mjeri se reflektirani val (Slika **23.**).

Zvučna energija probija u materijal i širi se kroz njega u obliku valova. Ukoliko postoji diskontinuitet (kao što je pukotina) na valnom putu, dio energije će se odbiti od površine nepravilnosti. Tada se odbijeni valni signal pretvara u električni impuls kroz sondu i prikazuje na ekranu odgovarajućeg uređaja. Registrirani signal se prikazuje u odnosu na vrijeme od trenutka kad je signal uočen i registriran.

Vrijeme putovanja signala može se izravno prikazati u odnosu na udaljenost koju je signal prešao. Na ovaj način se preko signala, dobije informacija o mjestu na kojem se nalazi greška (pukotina). Osim lociranja grešaka ovom metodom mjerimo i debljinu uzoraka.



Slika 23. Plus-eho metoda [16]

Da bi se mogla koristiti ova metoda mora se posjedovati mjerni instrument koji istovremeno pokazuje napon i vrijeme. Kod metode transmisije mjeri se samo slabljenje signala, a kod puls-eho metode mjeri se i vrijeme prolaza i slabljenje signala.

Puls-eho metoda je osjetljivija od metode prozvučavanja, smatra se da se samo 5% energije odbije zbog nehomogenosti u materijalu.

Puls-eho metodom mogu se identificirati sljedeće greške:

- položaj i veličina raznih nehomogenosti u materijalu,
- područje materijala koje nije dobro toplinski obrađeno,
- kontrola zavarenih spojeva.

Nedostatak ove metode je mrtva zona. Na mjestu ulaska ultrazvuka u materijal emitirani impulsi ne mogu biti tako male dužine da odmah otkriju defekte u blizini ultrazvučnog vibratora. Korištenjem prigušivača ova zona se može znatno smanjiti i iznositi 5 mm. [16]

5.3. Metoda rezonancije

Temelji se na principu stojećih valova. Ultrazvučni valovi se odbijaju od zadnje stijenke i vraćaju u prijemnik pri čemu se ti valovi interferiraju s dolazećim. Ukoliko je debljina materijala jednaka zbroju polovina valne duljine, nastaje stojeći val, tj. postignuta je rezonancija.

Metoda rezonancije korištena je u starijim instrumentima za mjerenje debljine stijenke.[16]

5.4. Ultrazvučni uređaj General Electric (GE) USM GO

Slika 24. Ultrazvučni uređaj General Electric (GE) USM GO [16]

Tablica 8. Tehničke specifikacije ultrazvučnog uređaja General Electric (GE) USM GO [16]

LCD ekran	
Aktivno područje	Širina: 108 mm Visina: 64.8 mm
Dijagonala ekrana	5.0"
Rezolucija	800 x 400 piksela
Konektori	
Konektori za sonde	2 x LEMO-00
UT izlazni konektor	SAP izlaz, Alarm
USB sučelje	Micro USB konektor
SD-Card konektor	Utor za standardne memorijske kartice
Odašiljač (prema EN12668 specifikaciji)	
Način rada odašiljača	Simulirani pik standard, Jednopolni podesivi

	kvadratni val (opcija)
Napon odašiljača (SQ mode)	120 V do 300 V s korakom od 10 V uz toleranciju 10%
Raspon trajanja odašiljanja (SQ mode)	30 ns do 500 ns s korakom od 20 ns uz toleranciju 10%
Amplituda odašiljača (Spike mode)	Nisko: 12 v, Visoko: 300 V
Prigušenje	50 ili 1000 Ohm
PRF	Automatska optimizacija između 15 Hz i 2000 Hz, 3 automatski podešavajuća načina: AutoLow, AutoMed, AutoHigh – Opcija "phantom echo" za ručnu kontrolu PRF-a od 15 do 2000 Hz
Prijamnik	
Mjerno područje	14016 mm longitudinalnog vala u čeliku (557")
Digitalno pojačanje	Dinamički raspon od 110 dB, sa korakom od 0.2 Db
Analogna širina frekvencijskog područja	0.2 MHz – 20 MHz
Rektifikacija	Širokopojasno 1-5 MHz 2, 2.5 MHz 4,5 MHz 10 MHz
Monitor	
Neovisni monitori	2 monitora (A i B), za monitor B podržano okidanje monitorom A
Filteri	Pozitivan (POS) I Puni val (FW) Negativan (NEG) I RF
Mjerenja	Peak (vrh) Flank (strana) Jflank

Memorija	
Kapacitet	Do 16 GB SD memorijska kartica (isporuka sa 2 GB SD karticom)
Izvještaj	.JPG ili .BMP format. Formati kompatibilni sa snimačem podataka i softverom UltraMate (za DMS Go)
Utjecaj na okoliš	
Baterija	5.5 sati Punjenje baterije u samom uređaju Opcija – adapter za vanjsko punjenje baterije Indikator baterije koji pokazuje preostalo vrijeme upotrebe prije potrebe za punjenjem
Punjač	Univerzalni AC (100-240 V, 50-60 Hz) Udovoljava zahtjevima CCC, CE, UL, CSA i PSE
Veličina	175 mm x 111 mm x 50 mm
Težina	845 g (1.87 lb) sa baterijom
Zaštita kao po MIL-STD-810F	
Temperatura i vlažnost (skladištenje)	10 Ciklusa: 10 sati na 60˚C do 30˚C, 10 sati na 30˚C do 60˚C, tranzicija unutar 2 sata, 507.4
Temperaturni šok (skladištenje	3 Ciklusa: 4 sata na -20˚C do 60˚C, 4 sata na 60˚C, tranzicija unutar 5 minuta, 503.4 Procedure II
Vibracije	514.5-5 Procedure I, Annex C, Figure 6, Općenito izlaganje: 1 sat po svakoj osi
Udarci	6 ciklusa po svakoj osi, 15 g, 11 ms Half Sine, 516.5 Procedure I
Loose Cargo LCL	514.5 Procedure II
Transit Drop (pakiranje za isporuku)	516.5 Procedura IV, 26 drops
Raspon temperatura pri upotrebi	0˚C do 55˚C

Raspon temperatura za skladištenje	-20˚C do 60˚C	
Otpornost na prašinu/vodu	Kao prema IEC 529 specifikaciji za IP 67 klasifikaciju	
Suglasnosti s normama		
EMC/EMI	EN 55011 i EN 61000-6-2:2001	
Ultrazvuk	EN 12668, ASTM-E1324, E317, ANSI/NCSL Z 540-1-1994, MII STD 45662A MIL STD 2154	
Prijamnik		
USM Go AWS opcija	AWS alat za procjenu veličine prema prema AWS D1.1 strukturnom zavarivačkom kodu	
USM Go Dac opcija	DAC alat za procjenu veličine , 16 točaka Sukladno sa:	EN 1712- EN 1713 – EN 1714 ASME & ASME III JIS Z3060 compliant
	TCG: 120 dB dinamičko	
	TCG: 110 dB/µs nagib	
USM Go DGS opcija	DGS alat za procijenu veličine u suglasnosti sa EN 1712 Uključuje i novu trueDGS tehnologiju	
USM Go ugrađen datalogger - opcija	Podešavanje linearne ili tablične formacije podataka	
USM Go opcija odašiljanja kvadratnih valova	Omogućuje fino podešavanje odašiljačkih parametara Podesivost napona od 120V do 300V uz korak od 10V Podesivost odašiljača od 30ns do 500ns uz korak od 10ns	
USM Go ručno podešavanje PRF i Phantom opcije	Omogućuje ručno optimiziraje PRF-a između 15 Hz i 2000 Hz korakom od 5 Hz. Phantom PRF pomaže pri identifikaciji “fantomskih“ odjeka uslijed višestrukih odjeka u materijalu	

5.5. Primjer upotrebe ultrazvučnog uređaja

Provođenja ultrazvučne kontrole radi se na dijelovima pogonskog zupčanika i rotora turbine u tvornici TTK. Da bi se uspješno provelo ispitivanje potrebno je osigurati nužnu opremu uz sam ultrazvučni uređaj. Ovdje će se koristiti sonda MB 4S (Slika **25.**) i referentni etalon V2 (Slika **26.**).

Sonda nam služi za samo ispitivanje, tj preko nje se signali prenose u ultrazvučni uređaj. Oznake na sondi određuje proizvođač i daje nam osnovne informacije o vrsti sonde, frekvenciji i materijalu.

Slika 25. Sonda MB 4S [16]

Ispitivanje je vršeno pomoću ravne sonde MB 4S. Oznake na sondi određuje proizvođač i daje osnovne informacije o vrsti sonde, frekvenciji i materijalu:

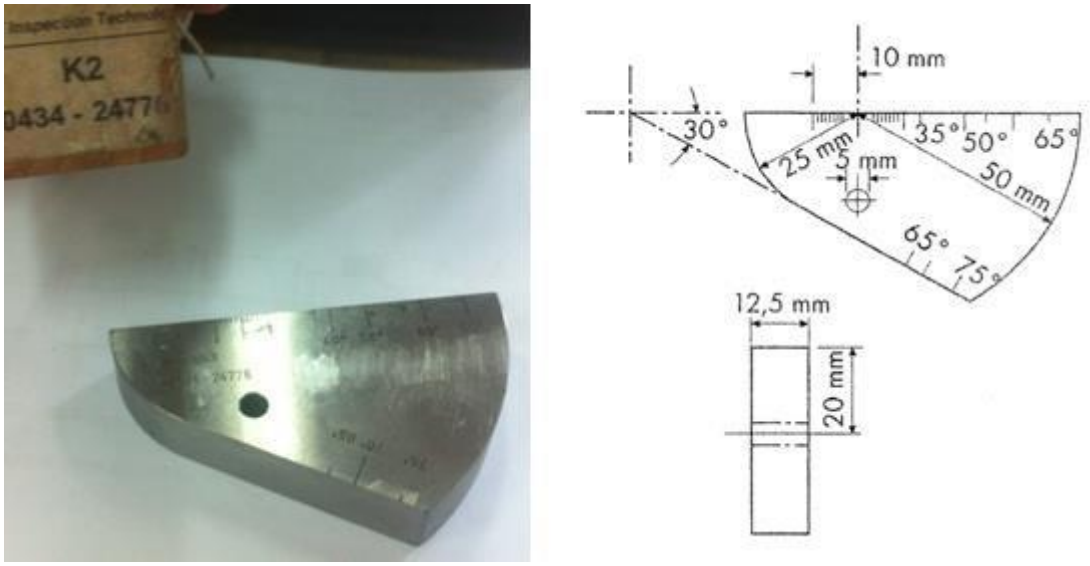
- M – Miniatur (minijaturna sonda ϕ10 mm),
- B – Bariumititanat (piezo materijal – barijev titanat),
- 4 – Frequenz (frekvencija – 4 MHz),
- S – Schutzschicht (meki zaštitni sloj).

Tablica 9. Tehničke specifikacije sonde MB 4S [16]

Vrsta	MB4S
Veličina kristala	10 mm Ø
Frekvencija	4 MHz
Propusnost	3,5 .. 4,5 MHz
Radno područje	15 .. 1500 mm
Dužina polja	16 mm
Rcho širina	3 mm
Kontakt područje	15 mm Ø

Da bi se moglo ispravno provesti ultrazvučno ispitivanje potrebno je baždariti ultrazvučni uređaj, tj podesiti mjerno područje kao preduvjet za određivanje položaja nepravilnosti u ispitnom objektu.

Za baždarenje je korišten etalon V2 izrađen prema normi HRN EN 27963.

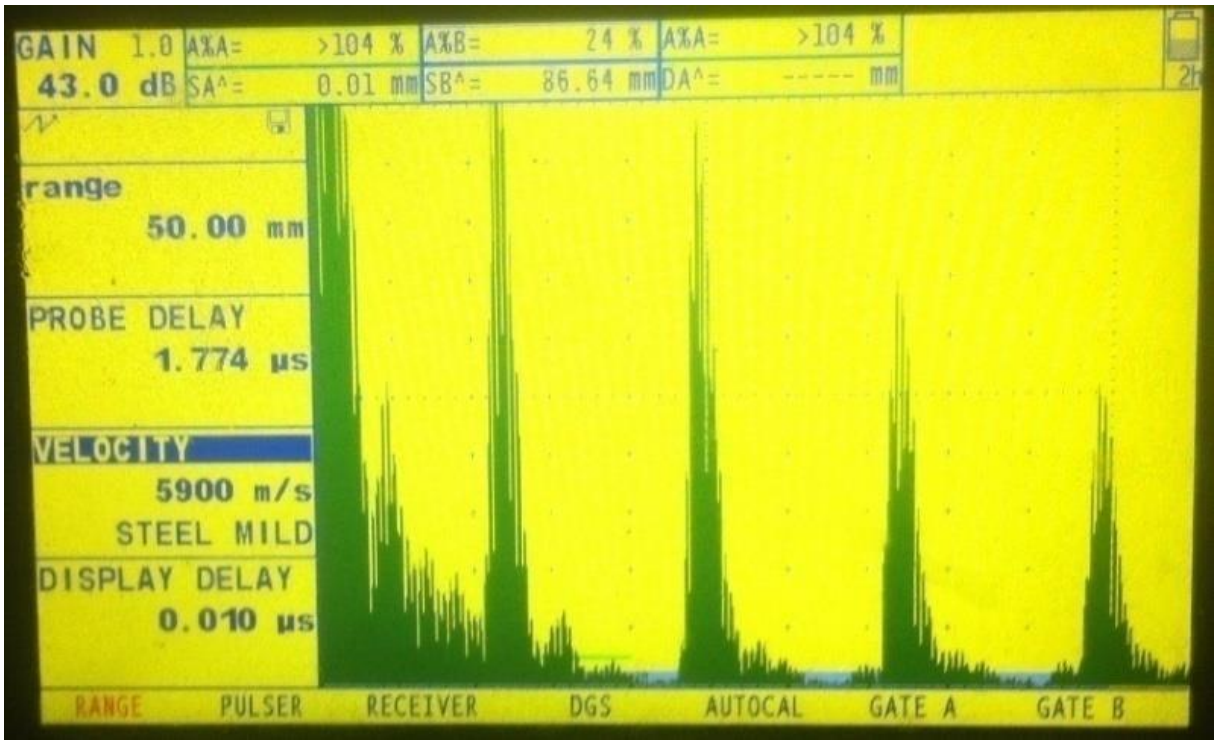


Slika 26. Etalon V2 [16]

Postupak baždarenja (Slika **27.**) sustava se provodi u cilju osiguranja točnosti ispitivanja zbog toga je potrebno kalibrirati mjerni uređaj prema referentom talonu. Na etalon se nanese kontaktno sredstvo i vrši se umjeravanje po poznatoj baždarenoj debljini etalona. Laganim pomicanjem ravne sonde po etalonu se promatra referenti signal koji ima višestruki odjek od

baždarene debljine. Na primjeru debljine od 12.5 mm u mjernom području od 50 mm se mora postići četiri signala (Slika **28.**). Na horizontalnoj skali pozicije signala nalaze se na 12.5 hds, 25 hds, 50 hds i time postupak baždarenja završava.

Slika 27. Baždarenje sondom na BD=12.5 mm MP=50 mm [16]



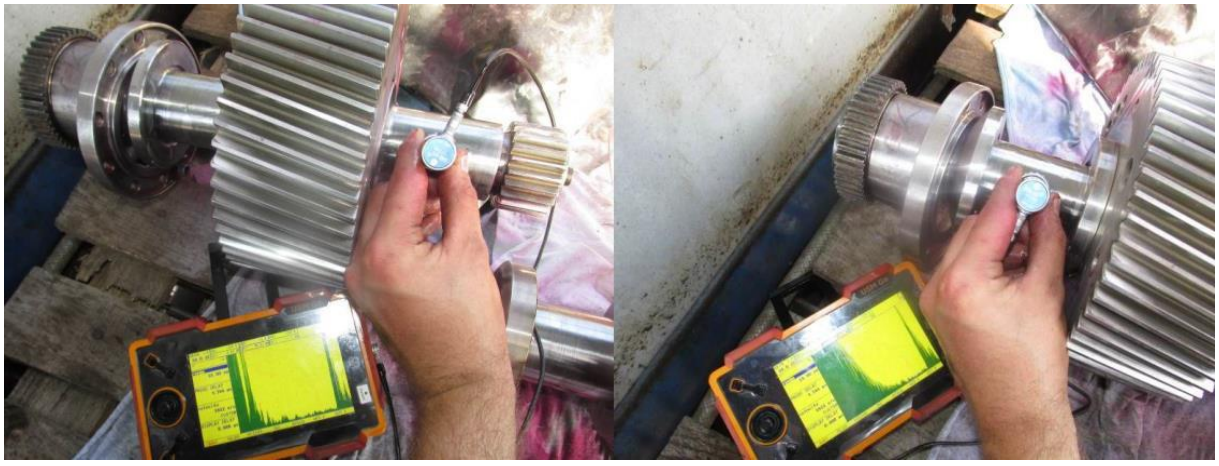
Slika 28. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju [16]

Prije provođenja ispitivanja ultrazvučnom metodom potrebno je obaviti vizualnu kontrolu, čišćenje površine i nanošenje kontaktnog sredstva na ispitni uzorak.

Nakon nanošenja kontaktnog sredstva sondom ispituje se uzorak po cijeloj dužini.

Tablica 10. Parametri ispitivanja pogonskog zupčanika [16]

<table>
<tr><td colspan="3">Naziv objekta: Pogonski zupčanik</td><td colspan="2">Materijal: Čelik</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Priprema površine:
Odmašćeno</td><td colspan="2">Oprema za kontrolu</td><td colspan="2">Parametri ispitivanja</td></tr>
<tr><td>Instrument:</td><td>USM GO</td><td>Mjerno područje</td><td>55 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Kontaktno sredstvo:
Ulje</td><td>Sonde:</td><td>MB4S</td><td>Baždarena osjetljivost:</td><td>42 dB</td></tr>
<tr><td>Kabeli:</td><td>MPKL – 2</td><td rowspan="2">Radna osjetljivost:</td><td rowspan="2">59 dB</td></tr>
<tr><td>Etalon:</td><td>V2</td></tr>
</table>



Slika 29. Ispitivanje ležajnih rukavaca kod pogonskog zupčanika [16]

Ispitivanjem (Slika **29.**) nisu pronađene indikacije oštećenja unutar osnovnog materijala ležajnih rukavaca.

Tablica 11. Parametri ispitivanja rotora turbine [16]

<table>
<tr><td colspan="2">Naziv objekta: Rotor turbine</td><td colspan="2">Materijal: Čelik</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Priprema površine:
Očišćeno</td><td colspan="2">Oprema za kontrolu:</td><td colspan="2">Parametri ispitivanja:</td></tr>
<tr><td>Instrument:</td><td>USM GO</td><td>Mjereno područje:</td><td>mm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Kontaktno sredstvo:
ulje</td><td>Sonde:</td><td>MB4S</td><td>Baždarena osjetljivost:</td><td>35 dB</td></tr>
<tr><td>Kabeli:</td><td>MPKL – 2</td><td rowspan="2">Radna osjetljivost:</td><td rowspan="2">dB</td></tr>
<tr><td>Etalon:</td><td>V2</td></tr>
</table>

Slika 30. Prednji ležaj rukavca (MP=100 mm, RO=59 dB) [16]

Slika 31. Disk (MP= 50 mm, RO= 43 dB) [16]

Slika 32. Stražnji ležaj rukavca (MP=140 mm, RO = 58 dB) [16]

Provedenim ispitivanjima (Slika **30.**) (Slika **31.**) (Slika **32.**) nisu pronađene indikacije oštećenja unutar osnovnog materijala što se može vidjeti iz dobivenog signala na slikama. [16]

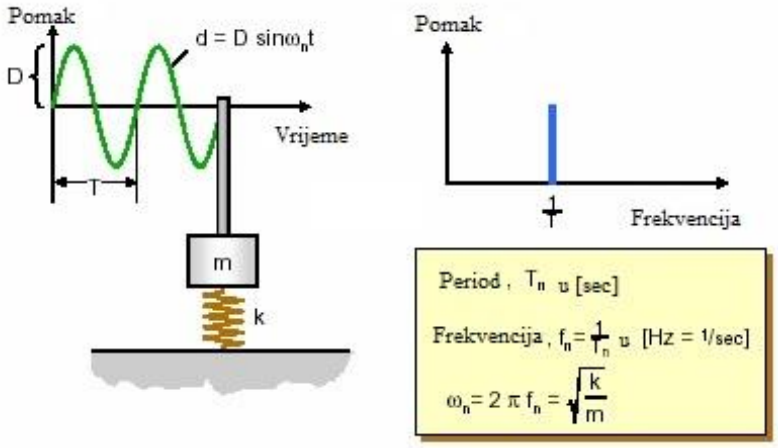
6. VIBRACIJE I ISPITIVANJE VIBRACIJA

6.1. Vibracije

Vibracija u generalnom smislu predstavlja oscilatorno kretanje mehaničkog sustava pri čemu su pomicanja točaka sustava mala u usporedbi sa dimenzijama samog sustava. Kaže se da tijelo vibrira kada izvodi oscilatorno kretanje oko svog ravnotežnog položaja. Oscilacija je periodično kretanje oko ravnotežnog položaja, tj. kretanje koje se ponavlja nakon nekog vremenskog intervala.

Najjednostavniji oblik vibracijskog kretanja (slika **33.**) jesu slobodne harmonijske oscilacije bez prigušenja, predstavljene modelom masa-opruga. Kada se sistem kojeg čine masa i opruga dovede u kretanje zadavanjem nekog početnog pomaka ili brzine oscilirajućoj masi, on će nastaviti kretanje konstantnom frekvencijom i amplitudom, teorijski, u beskonačnost.

Sustav je doveden u oscilirajuće stanje koje ima sinusnu formu vala.



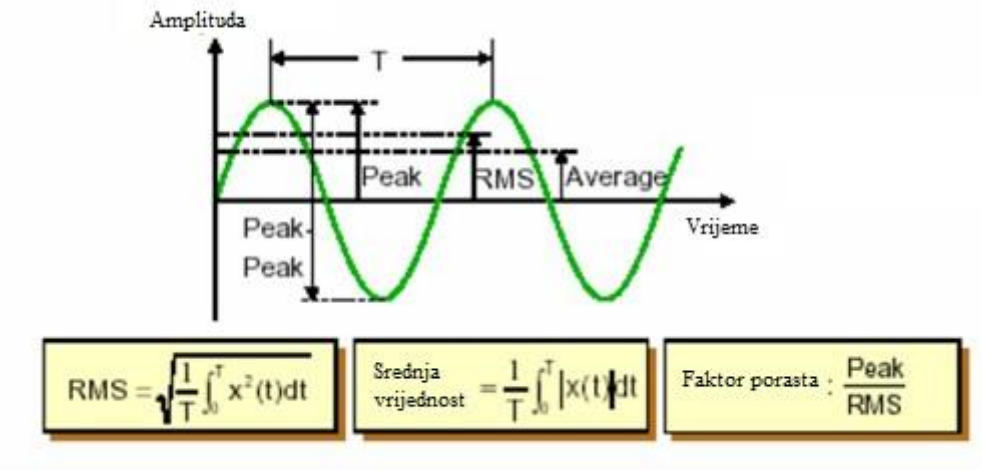
Slika 33. Najjednostavniji oblik oscilirajućeg sustava – model masa-opruga [17]

Ukoliko pratimo kretanje sustava masa-opruga tokom vremena, primijetiti ćemo da je to kretanje harmonijsko i opisano je sinusnom krivuljom d(t)=Dsin(ωn)t, definiranom amplitudom (D) i periodom (T). Frekvencija je broj punih ciklusa oscilacija u jedinici vremena (u jednoj sekundi), mjeri se u hercima [Hz] i jednaka je recipročnoj vrijednosti perioda. Množenjem frekvencije sa 2π dobiva se kružna frekvencija ωn, koja je proporcionala kvadratnom korijenu iz količnika krutosti opruge *k* i mase *m*. Frekvencija oscilacija naziva se prirodna frekvencija fn. Čitav sinusni val može se opisati formulom d(t)=Dsin(ωn)t, gdje je *d*- trenutni pomak a *D*- maksimalan pomak (amplituda). [17]

6.2. Parametri vremenskog signala

Mjerenje vremenskog signala je najjednostavnija forma vibracijske analize. Postoje brojne karakteristike za vrednovanje amplitude (nivoa) vibracijskog signala (Slika **34.**):

- Vršna vrijednost (peak)
- Vrijednost od vrha do vrha (peak-peak)
- Srednja vrijednost (average)
- Efektivna vrijednost (RMS - root mean square)
- Faktor porasta (Crest factor)
- Periodičnost/Ponavljanje (Periodicity/ Repetition Rate)
- Trajanje (Duration) [17]



Slika 34. Prikaz parametra vremenskog signala [17]

6.3. Opis amplitude signala

Amplituda vibracije je veličina koja ukazuje na ozbiljnost vibracije i može se prikazati različitim vrijednostima.

Vrijednost amplitude od vrha do vrha (*peak-to-peak*) prikazuje maksimalne amplitude signala koji opisuje vibraciju. Ovaj parameter je koristan u situacijama kada je vibracijsko pomicanje dijelova stroja značajno sa stajališta maksimalnih naprezanja ili zamora materijala u mehaničkom sustavu.

Vršna vrijednost amplitude (*peak*), *Az*, je parameter naročito koristan za izražavanje nivoa kratkotrajnih udarnih vibracija. Ovaj parameter iskazuje samo maksimalnu vrijednost amplitude, dok ne uzima u obzir vremensku povijest signala.

Srednja vrijednost, *Asr*, je parameter koji uzima u obzir vremensku povijest signala. Upotreba ovog parametra je ograničene praktične vrijednosti, jer nema direktne korelacije sa nekom fizičkom veličinom.

Efektivna vrijednost signala (RMS-root mean square), *Aef*, je najvažnija mjera amplitude vibracije zbog toga što uzima u obzir vremensku povijest signala. Na taj način ovaj parameter daje amplitudi signala vrijednost koja je direktno povezana sa energetskim sadržajem signala, tj. destruktivnom sposobnosti date vibracije. Za harmonijski periodični signal važe relacije:

$$A_{ef} = \frac{A_z}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{sr}$$

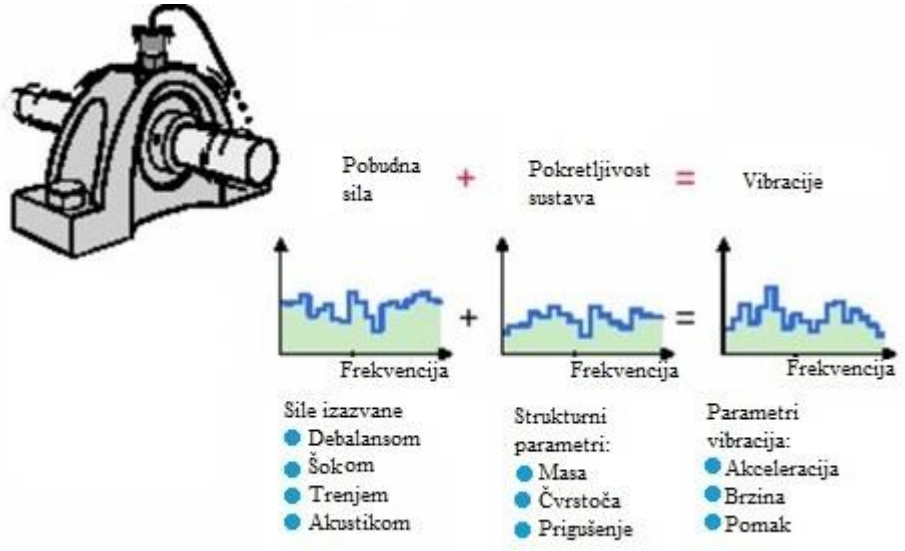
Prikazane veličine koje opisuju vremenski signal ne odnose se samo na jednostavan sinusoidni signal, nego na sve uobičajene vibracijske signale koji se mogu dobiti na strojevima, koji su sastavljeni od mnogo sinusoidnih komponenata.

Kretanje objekta duž prave linije može se opisati u formi trenutne pozicije objekta, njegove brzine u datom trenutku i njegovog ubrzanja u tom trenutku. [17]

6.4. Sile i vibracije

Ukoliko na mehanički sustav djeluje pobudna sila, sustav će proizvesti određeno kretanje (vibraciju) kao odgovor na zadatu pobudu. Odgovor sustava (vibracija) zavisi od karakteristike sustava, tzv. "pokretljivosti sustava" (slika **35.**). Ako je poznata pobudna sila i "pokretljivosti sustava" on da se može predvidjeti kakav će biti odgovor sustava (vibracija).

Modalna analiza ili druge metode vibracijskog ispitivanja koriste se za dinamičko modeliranje sustava. Nakon što je uspostavljen model sustava, možemo izračunati njegovu "pokretljivost" za silu danu u nekoj točki sustava, i tako predvidjeti vibraciju na različitim lokacijama sustava. Takav model može također biti iskorišten da bi se izračunalo opterećenje sustava koje može dovesti do loma.



Slika 35. Veza vibracija as pobudnom silom i karakteristikama sustava [17]

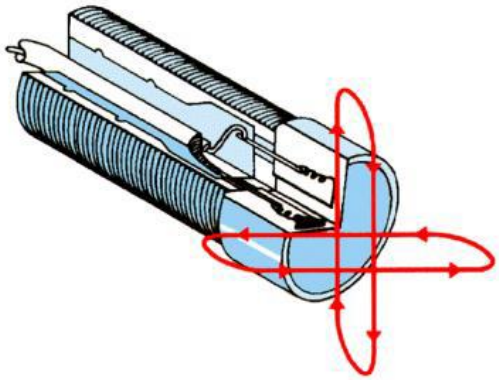
Za mjerenje vibracija se koriste vibracijska osjetila (probe, senzori) koja vibracije pretvaraju u električni signal.

Vrste osjetila mogu biti beskontaktna koja se koriste za mjerenja vibracijskih rotora (radijalnih i aksijalnih), pomaka (u radijalnom i aksijalnom pravcu), broja okretaja rotora.

Kontaktna se osjetila koriste za mjerenja vibracija kućišta strojeva i nosivih struktura. [17]

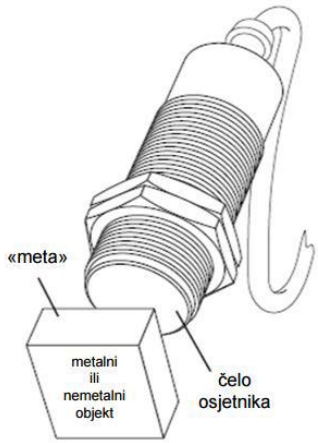
6.5. Senzori za mjerenje vibracija

Induktivni senzor pomaka (induktivni senzor) (slika **36.**) radi na principu vrtložnih struja . Magnetno polje proizvedeno prolaskom izmjenične struje kroz zavojnicu inducira vrtložne struje u bilo kojem električki vodljivom dijelu u blizini zavojnice. Takve senzore je potrebno prije upotrebe dobro kalibrirati, odnosno prednamjestiti na određeni napon, a pomak vodljivog materijala od osovine se manifestira u obliku rasta, odnosno pada napona.



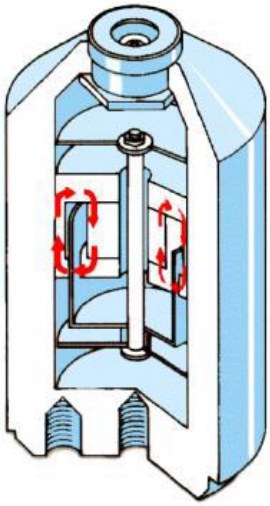
Slika 36. Beskontaktni senzor pomaka [18]

Kapacitivni senzor (slika **37.**) pomaka radi na principu električnog polja. Oscilator stvara električno polje usmjereno u smjeru „mete“ odnosno mjesta na kojem je potrebno mjeriti pomak, te se u ovisnosti o udaljenosti i površini objekta mijenja kapacitet osjetnika.



Slika 37. Kapacitivni senzor pomaka [16]

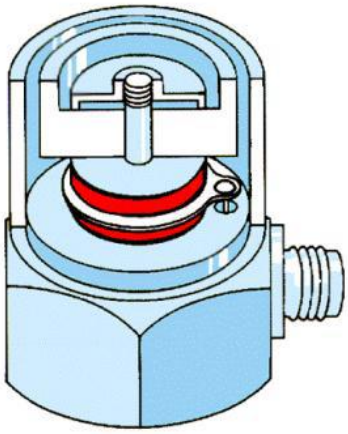
Kontaktni senzor (slika **38.**) vibracijske brzine radi na elektrodinamičkom principu. U svitku koji je zavješen u polju permanentnog magneta preko dviju helikoidalnih membranskih opruga s kojima tvori sustav masa-opruga se inducira napon proporcionalan vibracijskoj brzini.



Slika 38. Kontaktni senzor brzine [18]

Kontaktni senzor ubrzanja (piezoelektrični akcelerometar) (slika **39.**) radi na piezoelektričnom principu. Takvi senzori su najzastupljeniji u praksi.

Koristi se piezoelektrični efekt kvarca, odnosno mehaničko gibanje se pretvara u istezanje ili sabijanje kvarca u kojem dolazi do polarizacije molekula i nastaje električni naboj. Izmjereno vibracijsko ubrzanje se u mjernom instrumentu pomoću električkog integratora jednostavno pretvara u vibracijsku brzinu ili vibracijski pomak. [18]



Slika 39. Kontaktni senzor ubrzanja [18]

6.6. Analiza i obrada signala vibracija

Senzori prenose električne impulse koji su vremenski promjenjivi do uređaja za ispitivanje vibracija (vibrometra) koji ih zatim obrađuju. Obrada signala je glavni elemenat u praćenju vibracija, uz njihovo čitanje. Krajnji cilj praćenja stanja stroja je izvući detaljne informacije iz signala koju su obično bučni i kompleksni te predvidjeti preostali životni vijek stroja. Dakle, mogućnost prikladne i snažne metode za obradu signala je mjerodavna za učinkovito identificiranje i dijagnosticiranje grešaka koje upućuju na moguće kvarove.

Najstarija obrada signala je Fourierova transformacija jer može jednostavno provesti i analizirati stacionarne signale, ali ima ograničenja prilikom praćenja stvarnih struktura podložnim dinamički pobuđenjima.

U današnje vrijeme više je zastupljena frekventna analiza koja daje obrnuti spektar Fourierove transformacije. Pomoću računalne tehnike daju dijagram spektra koji se koristi za vizualni prikaz frekvencijske karakteristike i donošenja zaključaka.

6.7. Uređaj za mjerenje vibracija ADRE 408 SXP

Slika 40. ADRE 408 SXP [19]

Slika 41. ADRE 408 SXP (prednja i stražnja strana) [19]

ADRE 408 SXP (Slika **40.**) (Slika **41.**) je višekanalni, 24 bitni uređaj koji omogućuje istovremeno sakupljanje do 32 dinamička kanala i do 6 referentnih signala (tzv. Keyphasor signali – referentni signali za određivanje faznih kuteva i brzina vrtnje). Uređaj omogućuje neovisno sakupljanje svih podataka paralelno i praktički neograničeno dugo na ugrađeni čvrsti disk. Moguće je istovremeno uzorkovanje vibracijskih i drugih podataka sa četiri jedinice za akviziciju (ukupno do 128 kanala). Korištenjem software- a ADRE SXP omogućeno je obavljanje analize i za vrijeme rada strojeva.

ADRE 408 omogućuje sakupljanje sljedećih dinamičkih veličina:

- vibracijskog pomaka
- vibracijske brzine
- vibracijskog ubrzanja
- temperature
- frekvencije
- brzine vrtnje
- napona
- pritiska
- mase
- protoka (masenog i volumnog)
- snage (aktivne i reaktivne)
- momenta
- korisnički definirane (korisnik unosi vrstu mjerenja, mjerne jedinice i sl.)

Osjetilo (senzor) vibracijskog signala na uređaju može biti:

1. osjetilo vibracijskog pomaka (proximity proba)
2. osjetilo vibracijske brzine (velocity proba ili velomitor)
3. osjetilo vibracijskog ubrzanja (akcelerometar)

Mogu se sakupljati vibracijski signali uzorkovani s kućišta ležajeva ili osovinske vibracije i to i u radijalnom i u aksijalnom smjeru. Vibracijski se podaci mogu sakupljati i sa BNC konektora sistema za stalni nadzor i zaštitu rada turbolinije (npr. sustav Bently Nevada 3500).

Uzorkovanje vibracijskih signala se može vršiti:

1. za vrijeme starta i / ili obustave (tranzientnih načina rada strojeva)
2. za vrijeme ustaljenog načina rada stroja (kada nema promjene broja okretaja), ali može postojati (polagana) promjena opterećenja

Akviziciju (sakupljanje) podataka može inicirati:

1. promjena broja okretaja
2. promjena vremena (definira se vremenski razmak između dva uzorkovanja)
3. promjena amplitude ili faznog kuta
4. kontakt

Vibracijski signali se pomoću software- a ADRE SXP razlažu u odgovarajuće vibracijske formate pogodne za analizu.

Ti formati su:

- Trenutne vrijednosti; Prikaz trenutnih statičkih vrijednosti sa aktivnih mjerenja
- Tablični prikaz vrijednosti; Prikaz trenutnih i snimljenih podataka u tabličnoj formi;
- Prikaz orbite (sa superpozicijom signala za usporedbu); Prikaz orbite (putanje) rotora u ravni vibracijskih osjetila. Moguća je definicija referentnog izgleda orbite, kao i preklapanje analizirane orbite sa referentnom vrijednosti na istom prikazu. Moguće je prikazati orbite ukupnih signala,
- filtrirane 1X, 2X kao i nX orbite,
- nekompenzirane orbite i kompenzirane podacima sporog hoda, odnosno referentnim podacima navedenih vibracionih vektora;
- Izgled signala u vremenu (sa superpozicijom signala za usporedbu); Prikaz vremenskog signala sa svakog osjetila, sa mogućnošću preklapanja sa referentnim

izgledom na istom prikazu. Moguć je prikaz ukupnog (sirovog) signala, 1X, 2X, ... nX filtriranog signala;

- Prikaz kontinuiranog neobrađenog signala (s mogućnošću promjene frekvencije uzorkovanja)
- Bode prikaz; Prikaz promjene statičkih vrijednosti (amplitude ukupnog signala, kao i amplituda i faznih uglova svih nX vektora koji se sakupljaju) sa promjenom brzine vrtnje
- Polarni prikaz; Prikaz promjena izmjerenih nX vektora sa promjenom broja obrtaja ili sa protokom vremena u polarnim koordinatama. Softver omogućuje prikaz vrijednosti vektora u smjeru rotacije i smjeru suprotnom od smjera rotacije;
- Položaj ose rotora; Prikaz položaja ose rotora sa promjenom broja obrtaja ili protokom vremena sa mogućnošću prikaza orbite u svakoj od tačaka promjene;
- X – Y prikaz; Prikaz zavisnosti bilo koje mjerene statičke veličine od bilo koje druge;
- Prikaz trenda (arhivski prikaz) više promjenljivih na bazi izvršenih mjerenja;
- Prikaz promjene amplitude i faznog ugla 1X, 2X i nX vibracionih vektora u funkciji vremena
- Poluspektar / Potpuni spektar (spektar orbite – na bazi signala sa dva osjetila); Prikaz frekventnog spektra sa mogućnošću definiranja broja komponenti sa najvećim amplitudama, čije se vrijednosti amplitude i frekvencije prikazuju kao i mogućnost izbora FFT prozora. Softver omogućava prikaz potpunog spektra (spektra orbite) koji sadrži vibracione komponente u smjeru rotacije i suprotno od smjera rotacije;
- Vodopadni prikaz / Potpuni vodopadni prikaz (sa Campbell-ovim prikazom); Prikaz promjene poluspektra i potpunog spektra u vremenu sa mogućnošću prikaza u Campbell-ovom formatu;
- Kaskadni / Potpuni kaskadni prikaz (sa Campbell-ovim prikazom); Prikaz promjene poluspektra i potpunog spektra sa promjenom brzine vrtnje.
- Strukturna analiza (izgled signala u vremenu sa pravokutnim i eksponencijalnim prozorom); Prikaz za upotrebu kod modalne analize;
- Rezultati strukturne analize (sa prenosnim funkcijama, koherencijom, auto spektrom)

Vrsta formata koja se koristi u analizi ovisi o prirodi problema te vrsti signala.

Najkvalitetniji uvid u vibracijsko, a time i mehaničko stanje rotirajućeg stroja daju vibracijski signali uzorkovani direktno s osovine (vratila, rotora), jer, razumljivo, rotor je taj koji sudjeluje u dinamičkom kretanju i u oko 90% slučajeva je izvor (povećanih) vibracija.

Za kvalitetnu analizu potrebno je poznavati sljedećih pet parametara koji definiraju dinamičko stanje i ponašanje rotirajućeg stroja:

1. položaj osi rotora u ležaju (ležajevima)
2. vibracijska amplituda
3. frekvencija vibracije (vibracija)
4. oblik (forma) vibriranja - obično putanja osi rotora unutar ležaja te reflektirani izgled uzdužne osi rotora kod određenog moda
5. fazni kut vibracije

Posebna pažnja se posvećuje dijagnosticiranju eventualnog postojanja nekog od poremećaja koji mogu imati vrlo štetne posljedice za stanje strojeva, kao npr.:

- Neuravnoteženosti rotora
- Jednosmjerne sile uslijed necentričnosti spojki, necentričnosti osi ležaja i osi kućišta
- Pukotine rotora
- Fluidnim silama izazvane nestabilnosti (samouzbudne vibracije)
- Dodiri rotora sa statorom
- Labavosti u rotorskom sistemu
- Prevelike zračnosti (zazori) ležaja te labavosti u ležajima
- Nenormalne rezonancije
- Oštećenja kotrljajućih ležaja (kod strojeva koji ih imaju)
- Nepravilnosti zupčaničkih prijenosnika (kod strojeva koji ih imaju)
- Problemi elektromotora
- Problemi karakteristični za vijčane pumpe / kompresore
- Problemi temeljenja
- Hidrodinamički problemi strujanja fluida kroz pumpe/kompresore/ventilatore
- Problemi klipnih strojeva
- Problemi remenskih prijenosnika [19]

6.8. Primjena upotrebe ADRE 408 SXP

Na zahtjev naručitelja radova (Jadranski naftovod d.d.) izvršena je instalacija mjerne opreme na liniju glavne pumpe P-2603, hladnjaka ulja glavne pumpe P-2603 i Booster pumpe P-2501 na pumpnoj stanici Sisak za Jadranski naftovod d.d.

Ovaj izvještaj sadrži analizu vibracijskog stanja i ponašanja linije strojeva P-2603 za vrijeme ustaljenog načina rada i obustave.

6.8.1. Osnovni podaci o strojevima

Linija glavne pumpe P-2603 se sastoji od:

1. Elektromotor
2. VOITH spojka
3. Pumpa

Osnovni podaci linije P-2603 su sljedeći:

Elektromotor:

- Proizvođač: Končar
- Tip: 4 AZ Sh 1127-2
- Brzina vrtnje: 2980 min-1
- Snaga: 1900 kW

VOITH spojka:

- Proizvođač: Voith
- Tip: 562 SVNL III G
- Opis: hidrodinamička jednoosovinska (varijator) spojka
- Snaga: 2000 kW

Pumpa:

- Radni medij: sirova nafta
- Tip: centrifugalna pumpa ACEC 10x19 DVS HH
- Opis: jednostupna horizontalna s dvostrukim usisom i horizontalno podijeljenim kućištem
- Protok: 2090 m3/h
- Visina dobave: 300 m
- Brzina vrtnje: 2950 min-1

Linija zračnog hladnjaka ulja (ventilator) agregata P-2603 se sastoji od:

1. Elektromotor
2. Ventilator

Osnovni podaci linije zračnog hladnjaka ulja (ventilatora) glavnog agregata P-2603 su sljedeći:

- Proizvođač: HUPPMANN
- Tip: Na6 – Ø 1800
- Brzina vrtnje: 585 min-1
- Protok: 31,2 m3/s
- Snaga EM: 9,75 kW
- Serijski broj: 6451039/2

Linija Booster pumpe agregata P-2501 se sastoji od:

1. Elektromotor
2. Pumpa

Osnovni podaci linije Booster pumpe agregata P-2501 su sljedeći:

Elektromotor:

- Proizvođač: Končar
- Tip: 4 AZ Sh 905-4
- Brzina vrtnje: 1485 min-1
- Snaga EM: 500 kW

Pumpa:

- Radni medij: sirova nafta
- Opis: centrifugalna pumpa
- Tip: 1500 DKB 49 jednostupna vertikalna
- Protok: 2090 m3/h
- Visina dobave: 55 m
- Brzina vrtnje: 1485 min-1

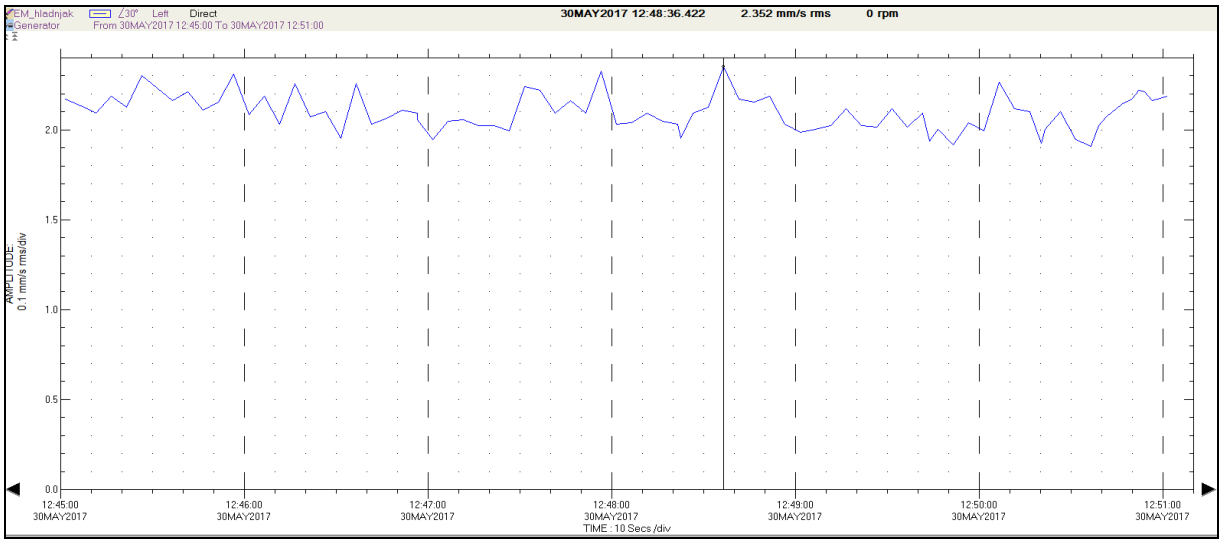
6.8.2. Rezultati ispitivanja – analiza

Za početak ispituje se ventilator zračnog hladnjaka ulja glavnog pumpnog agregata P-2603 u ustaljenom načinu rada.

Sakupljeni su vibracijski signali u radijalnom smjeru na elektromotoru. Vrijednost maksimalne amplitude ukupnih vibracija prikazuje Tablica **12**.

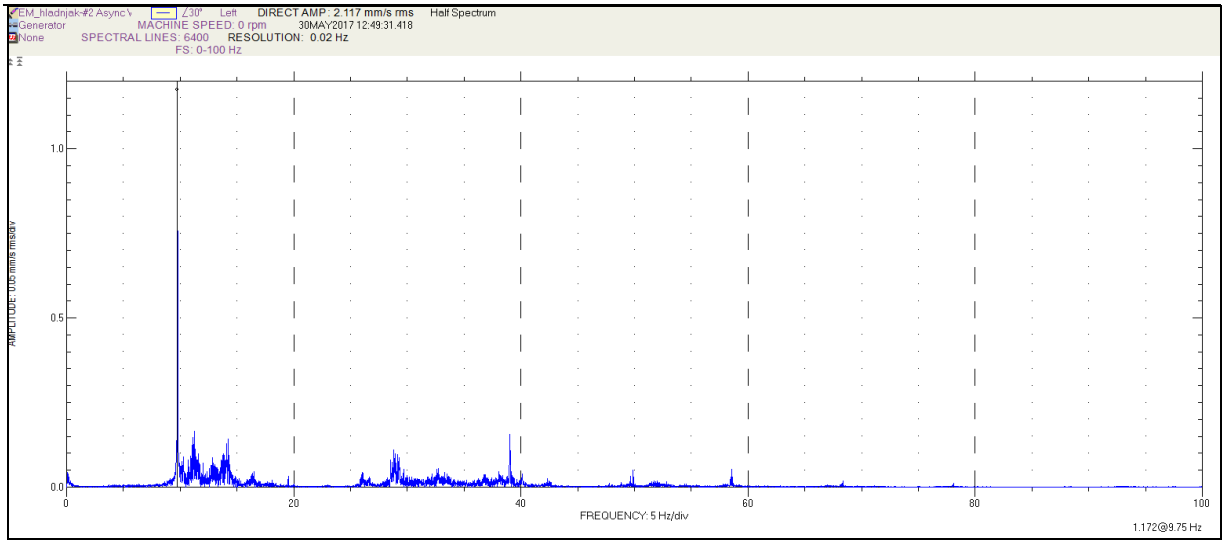
Tablica 12. Vrijednost maksimalne amplitude ukupnih vibracija [19]

Mjerno mjesto	**Maksimalna amplituda ukupnih vibracija u mm/s RMS**
EM_hladnjak	2,35



Slika 42. Trend promjene amplitude ukupnih vibracija prilikom ustaljenog načina rada [19]

Slika **42.** prikazuje trend promjene amplitude ukupnih vibracija prilikom ustaljenog načina rada. Amplituda ukupnih vibracija je bila niska u fazi ustaljenog načina rada.



Slika 43. Spektar mjernog mjesta ventilatora zračnog hladnjaka [19]

Slika **43.** prikazuje spektar mjernog mjesta ventilatora zračnog hladnjaka. U spektru vibracija, dominantna je amplituda komponente vlastite frekvencije vrtnje ventilatora (1X=9,75 Hz).

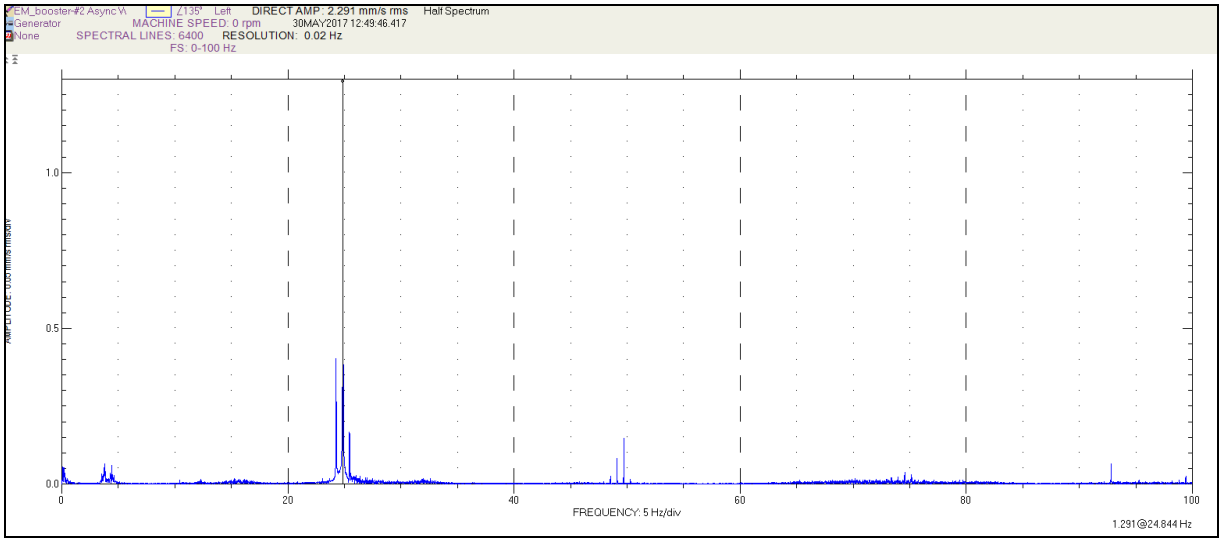
Kako je amplituda ukupnih vibracija bila niska u ustaljenom režimu rada, nema potrebe za detaljnijom analizom uzorkovanih vibracijskih signala.

Booster pumpa 2501

Sakupljeni su vibracijski signali u radijalnom smjeru na elektromotoru, u dva radijalna smjera (vertikalno i horizontalno) na pumpi i jedno aksijalno mjerenje na prvom ležaju pumpe. Vrijednost maksimalne amplitude ukupnih vibracija svih mjernih mjesta linije Booster pumpe 2501 prikazuje Tablica **13**.

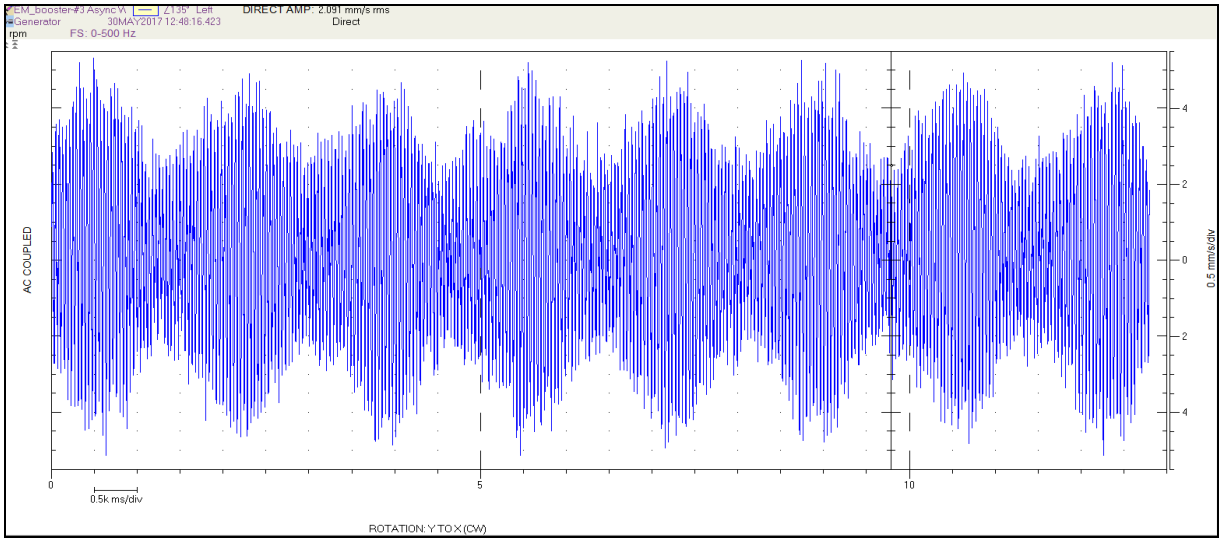
Tablica 13. Vrijednosti maksimalne amplitude ukupnih vibracija svih mjernih mjesta Booster pumpe 2501 [19]

Mjerno mjesto	Maksimalna amplituda ukupnih vibracija u mm/s RMS
EM_booster	2,38
Booster_P_Ver	1,20
Booster_P_Hor	1,42
Booster_P_Aks	1,40



Slika 44. Spektar mjernog mjesta elektromotora Booster pumpe 2501 [19]

Slika **44.** prikazuje spektar mjernog mjesta elektromotora Booster pumpe. Dominantna amplituda je komponenta vlastite frekvencije vrtnje elektromotora (1X = 24,85 Hz) sa tzv. „pole pass freq." sideband- ovima oko 1X komponente. Također je u spektru vidljivo postojanje 2X i 3X komponenti (dvostruka i trostruka frekvencija vrtnje elektromotora) sa „pole pass freq." sideband-ovima. Ovakav spektar upućuje na postojanje puknutih/napuknutih rotor štapova elektromotora.



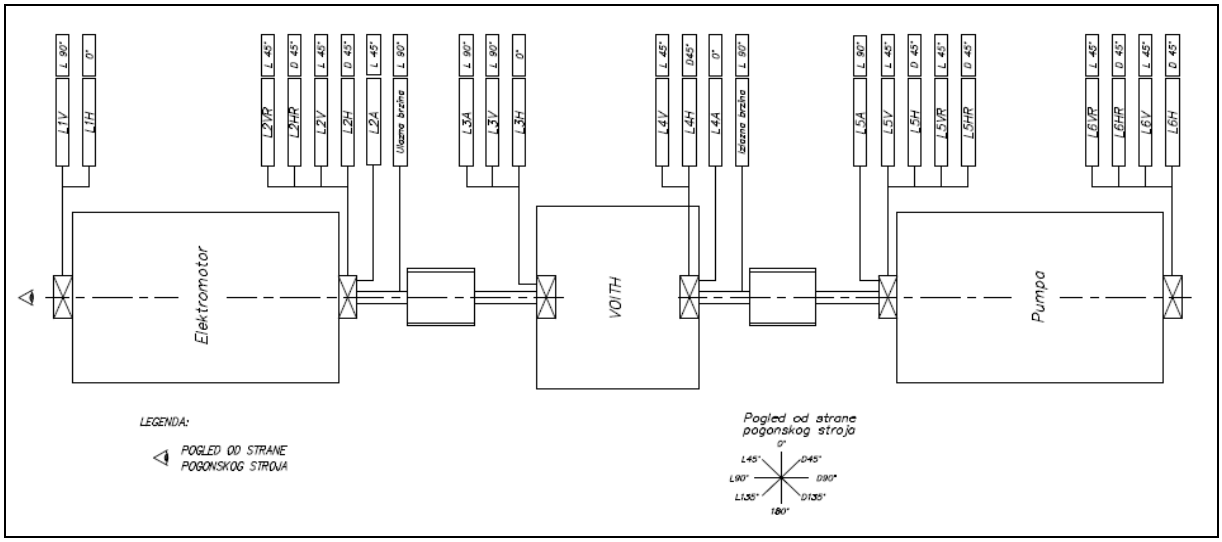
Slika 45. Prikaz signala (timebase) Booster pumpe 2501 [19]

Slika **45.** prikazuje prikaz signala (timebase) mjernog mjesta elektromotora Booster pumpe. Ovakav izgled prikaza signala (timebase) prikaza potvrđuje postojanje električkog problema unutar elektromotora.

Kako je amplituda ukupnih vibracija svih mjernih mjesta linije Booster pumpe 2501 bila niska u ustaljenom načinu rada, nema potrebe za detaljnijom analizom uzorkovanih vibracijskih signala.

Glavni pumpni agregat P-2603

Raspored mjernih mjesta linije glavnog pumpnog agregata P-2603 prikazuje Slika **46**.



Slika 46. Raspored mjernih mjesta linije glavnog pumpnog agregata P-2603

Tablica 14. Vrijednosti iznosa nepravilnosti mjernih staza relativnih osovinskih vibracija [19]

Mjerno mjesto	Ukupne vibracije	1X vibracije		2X vibracije	
	Amplituda (µmpp)	Amplituda (µmpp)	Fazni kut (°)	Amplituda (µmpp)	Fazni kut (°)
L2VR	44	-	-	-	-
L2HR	41	-	-	-	-
L5VR	20	9	158	9	52
L5HR	30	19	46	9	260
L6VR	28	5	101	10	83
L6HR	35	12	39	10	278

Tablica **14.** prikazuje vrijednosti iznosa nepravilnosti mjernih staza relativnih osovinskih vibracija. Nužno je provesti kompenzaciju, kako se ne bi stekla kriva slika o stanju strojeva.

Potrebno je napraviti analizu kvazistacionarnog režima rada (ustaljeni način rada) i obustave linije glavne pumpe P-2603 u dvije faze.

Prva faza – ustaljeni način rada

U ovoj fazi su brzine vrtnje elektromotora (2990 min-1) i pumpe konstantne (2530 min-1).

Tablica **15.** prikazuje maksimalne vrijednosti ukupne amplitude vibracija svih mjernih mjesta u ovoj fazi rada linije pumpnog agregata P-2603.

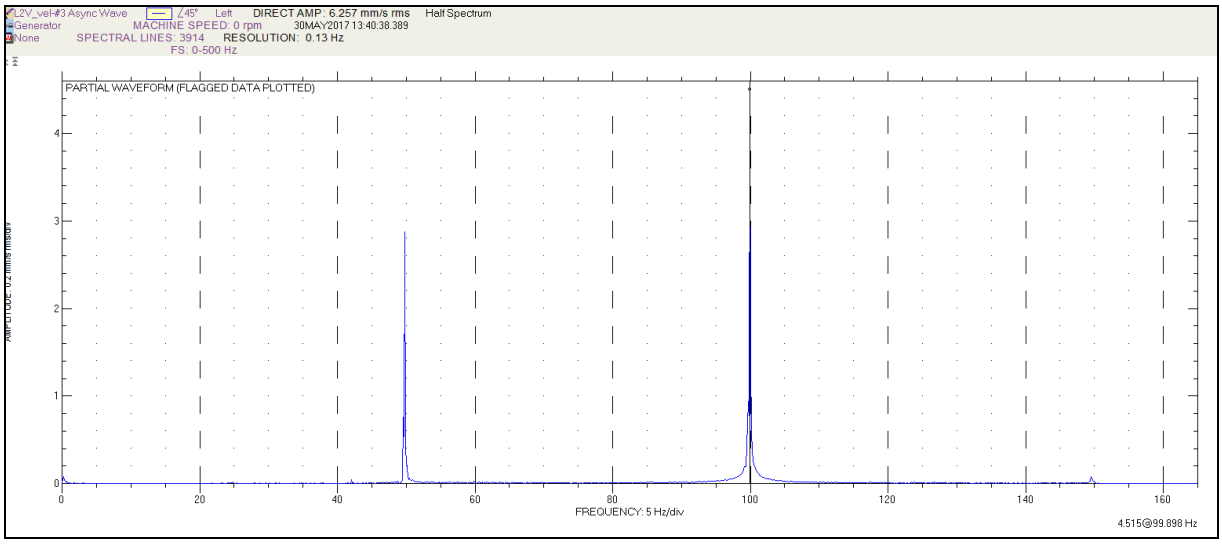
Tablica 15. Maksimalna ukupna amplituda vibracija prve faze [19]

Stroj	Mjerno mjesto	Ukupna amplituda	Mjerna jedinica
Elektromotor	L1V	3,4	mm/s RMS
	L1H	2,8	mm/s RMS
	L2V	6,3	mm/s RMS
	L2H	4,5	mm/s RMS
	L2A	3,3	mm/s RMS
	L2VR	45	µmpp
	L2HR	53	µmpp
VOITH	L3V	0,9	mm/s RMS
	L3H	0,8	mm/s RMS
	L3A	2,2	mm/s RMS
	L4V	1,3	mm/s RMS
	L4H	1,5	mm/s RMS
	L4A	3,1	mm/s RMS
Pumpa	L5V	1,9	mm/s RMS
	L5H	1,9	mm/s RMS
	L5A	1,3	mm/s RMS
	L5VR	109	µmpp
	L5HR	69	µmpp

	L6V	2,5	mm/s RMS
	L6H	2,5	mm/s RMS
	L6VR	144	µmpp
	L6HR	162	µmpp

Kompletna linija pumpnog agregata P-2603 je u ustaljenom načinu rada radila zadovoljavajuće.

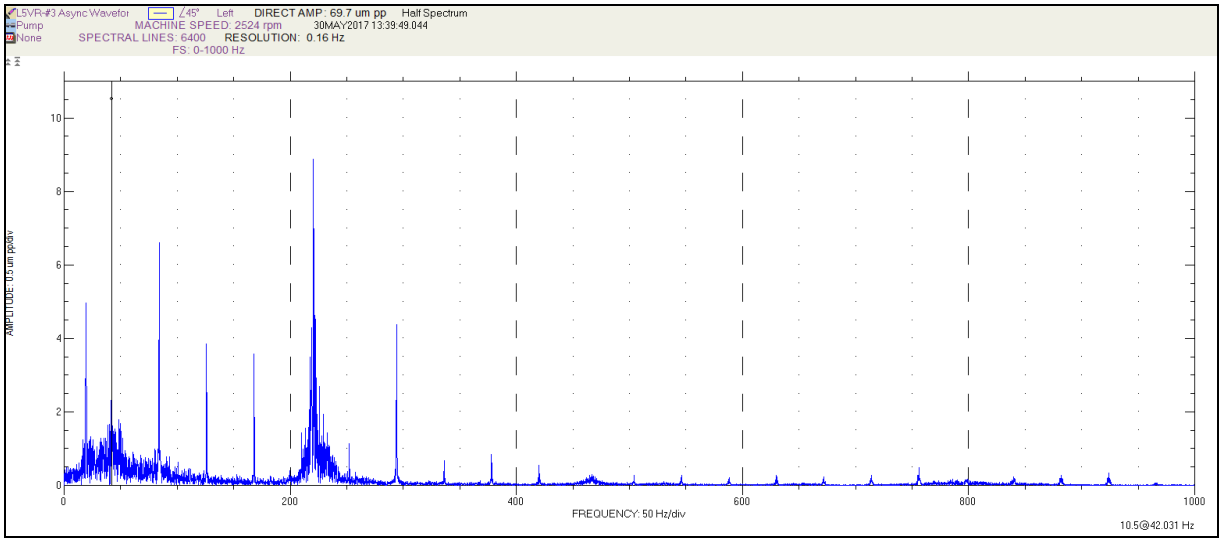
Elektromotor



Slika 47. Spektar mjernog mjesta L2V [19]

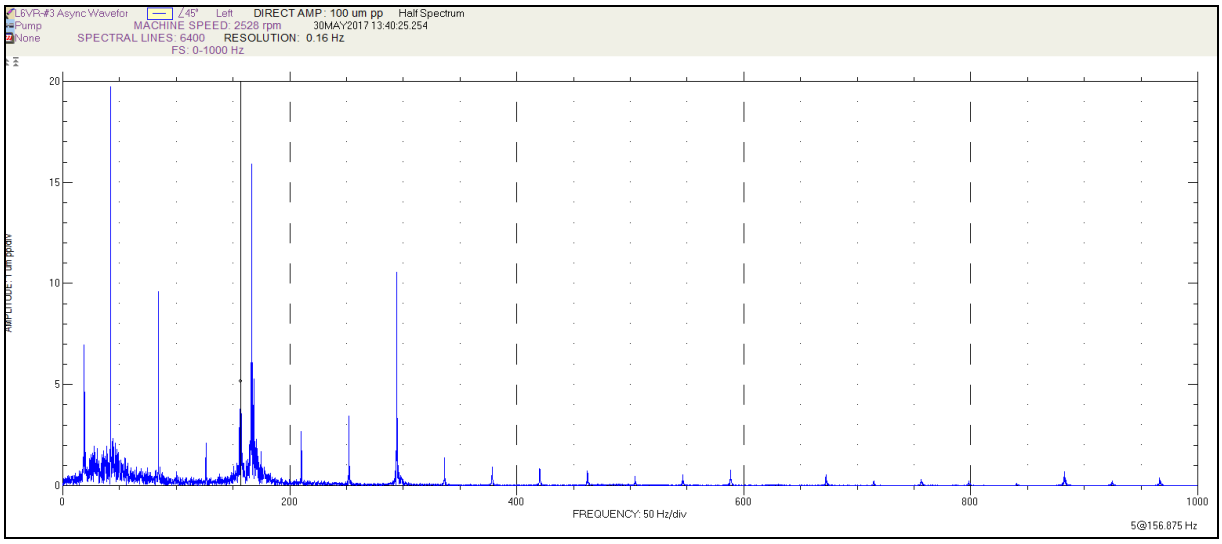
Slika **47.** prikazuje spektar mjernog mjesta L2V. Dominantna amplituda vibracije u cijelom režimu rada je komponenta frekvencije 100 Hz sa tzv. „pole pass freq.“ sideband- ovima. Značajnu vrijednost amplitude vibracija ima i komponenta vlastite frekvencije vrtnje elektromotora (1X). Također, pojavljuju se „pole pass freq.“ sideband- ovi oko komponente frekvencije 50 Hz. Ovakav spektar upućuje na postojanje ekscentričnosti rotora elektromotora.

Pumpa



Slika 48. Spektar mjernog mjesta L5VR [19]

Slika **48.** prikazuje spektar mjernog mjesta L5VR. Dominante frekvencijske komponente u ovome režimu rada su komponenta vlastite frekvencije vrtnje pumpe (1X), 0,46X, 2X, 3X, 4X, 220 Hz, i 7X sa pripadajućim 1X sideband- ovima.



Slika 49. Spektar mjernog mjesta L6VR [19]

Slika **49.** prikazuje spektar mjernog mjesta L6VR. Dominante frekvencijske komponente u ovome režimu rada su komponenta vlastite frekvencije vrtnje pumpe (1X), 0,45X, 2X, 3X, 4X (166 Hz), 157 Hz, i 7X sa pripadajućim 1X sideband- ovima.

Druga faza – obustava

Analizom podataka dobivenih iz prijelaznih načina rada (kao što su start i obustava) moguće je dobiti najviše podataka o strojevima.

U ovoj fazi se brzina vrtnje elektromotora mijenja od 2990 min^{-1} – 0 min^{-1} dok se brzina vrtnje pumpe mijenja od 2530 min^{-1} – 0 min^{-1}.

Tablica **16**. prikazuje maksimalne vrijednosti ukupne amplitude vibracija svih mjernih mjesta u ovoj fazi rada linije pumpnog agregata P-2603.

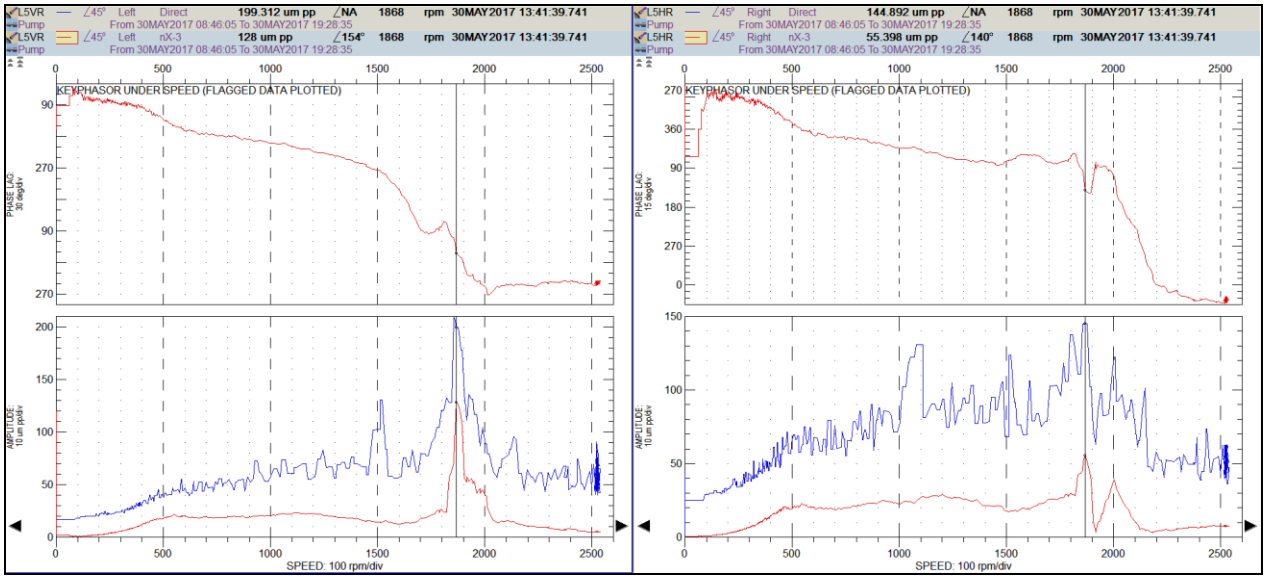
Tablica 16. Maksimalna ukupna amplituda vibracija druge faze [19]

Stroj	Mjerno mjesto	Ukupna amplituda	Mjerna jedinica
Elektromotor	L1V	3,4	mm/s RMS
	L1H	2,8	mm/s RMS
	L2V	6,3	mm/s RMS
	L2H	5,8	mm/s RMS
	L2A	4,8	mm/s RMS
	L2VR	81	µmpp
	L2HR	91	µmpp
VOITH	L3V	0,9	mm/s RMS
	L3H	1,5	mm/s RMS
	L3A	2,5	mm/s RMS
	L4V	1,3	mm/s RMS
	L4H	1,8	mm/s RMS
	L4A	3,4	mm/s RMS
Pumpa	L5V	3,0	mm/s RMS
	L5H	2,4	mm/s RMS
	L5A	1,25	mm/s RMS
	L5VR	209	µmpp
	L5HR	145	µmpp
	L6V	2,5	mm/s RMS
	L6H	3,2	mm/s RMS
	L6VR	225	µmpp
	L6HR	376	µmpp

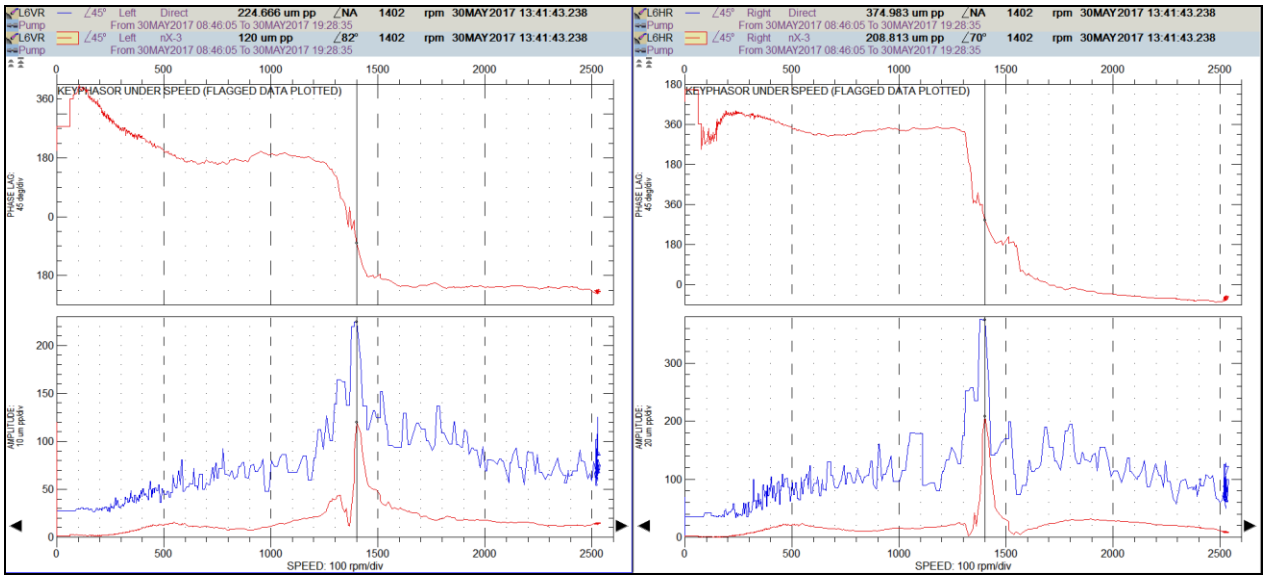
Elektromotor

Prilikom obustave elektromotora nije ustanovljen niti jedan značajan poremećaj.

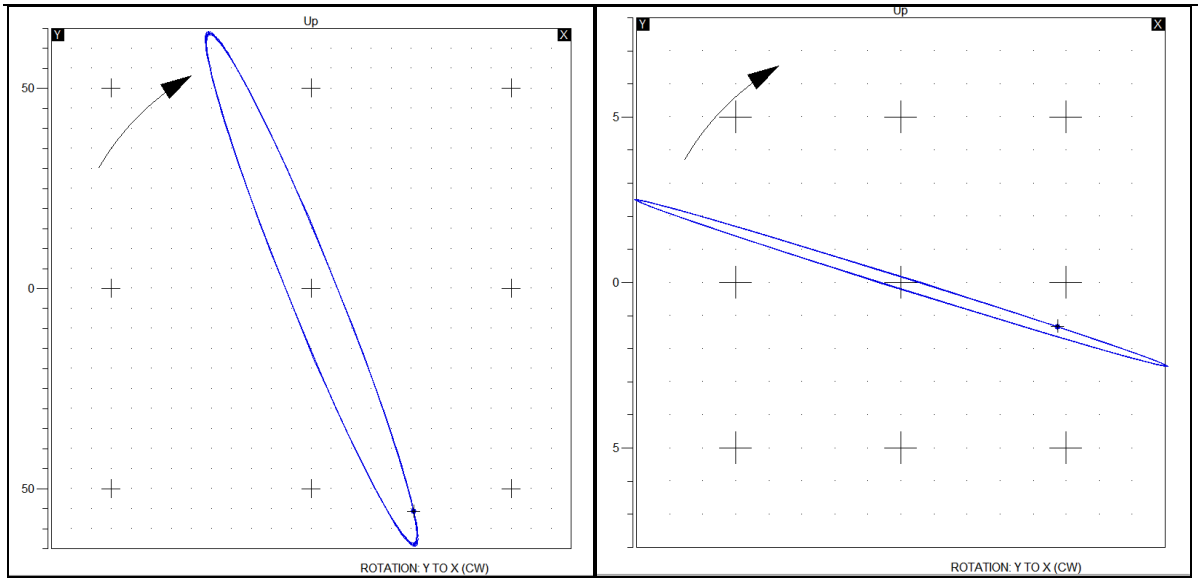
Pumpa



Slika 50. Promjena amplituda i faznih kuteva mjernog mjesta L5VR [19]



Slika 51. Promjena amplituda i faznih kuteva mjernog mjesta L6VR [19]



Slika 52. Prikaz orbita [19]

Slike **50.** i **51.** prikazuju promjenu amplituda ukupnih te amplituda i faznih kuteva 7X vibracija sa promjenom brzine vrtnje pumpe na mjernim mjestima relativnih vibracija na pumpi. U ravnini rukavca prednjeg ležaja, dolazi do pobuđivanja rezonancije pri brzini vrtnje od 1868 min-1. Rezonanciju pobuđuje komponenta 7X što znači da postoji vlastita frekvencija sistema rotor-ležaji pumpe pri 217,9 Hz. Rezonancija je izraženija u smjeru osjetila L5VR (točan smjer minimalne krutosti je jasno vidljiv na orbitnim prikazima na slici **52.**). Slično, u ravnini rukavca stražnjeg ležaja pumpe, rezonancija se pobuđuje pri 1.402 min-1, tj. postoji rezonancija sistema rotor-ležajevi pri 163,6 Hz. Dominantnija je u smjeru osjetila L6HR.

Postojanje 7X komponente jasno ukazuje na izražen problem strujanja medija u fazi starta.

Kako je obustava relativno brza, zadržavanje u području pobuđene rezonancije je bilo vrlo kratko (promjena brzine od 1.950 min-1 do 1.300 min-1 traje oko 5 sekundi). [19]

7. ZAKLJUČAK

Dijagnostički uređaji alat su svakog održavatelja. Dijagnostički uređaji omogućuju održavatelju da ispita stanje opreme i pomažu mu pretpostaviti što je pošlo po krivu ili što bi tek moglo poći po krivu. Ovisno o problemu koji traži, održavatelj koristi adekvatnu metodu ispitivanja/kontrole te traži kvar ili greške opreme. U ovom radu opisane su metode ispitivanja i dani primjeri dijagnostičkih uređaja za pojedine metode.

Kod vizualne kontrole koristimo endoskope. Važniji parametri za endoskope je debljina sonde kao bi se moglo ući u provrte i duljina kabla kako da ne bi bili zakinuti u pregledu cjelokupne opreme. U radu je dan primjer kontrole turbomotora vizualnom metodom i pronađena je pojava korozije, nečištoća i prljavštvina.

Kod termografije koristimo termografe, uređaje koji mjere intezitet infracrvenog zračenja. Najvažnija stavka termografa je toplinska osjetljivost. U radu je dan primjer kontrole trafostanice. Ispitivanje je pokazalo da dolazi do pregrijavanja kablovskih glava, što označava curenje struje.

Kod ultrazvučne kontrole koristimo ultrazvučne uređaje koji rade na principu odašiljanja ultrazvučnih valova i hvatanju jeke istih. Ako postoji nehomogenost u materijalu, uređaj će detektirati tu nehomogenost i prikazati je na zaslonu uređaja. Kod ove metode ispitivanja potrebno je imati sondu preko koje se signali prenose u uređaj. Potrebno je imati i etalon koji služi za baždarenje ultrazvučnog uređaja. U radu je dan primjer kontrole na pogonskom zupčaniku i rotoru turbine. Ispitivanje nije pokazalo indikacije o oštećenju unutar materijala.

Kod mjerenja vibracija koriste se uređaji za mjerenje vibracija. Isto kao kod ultrazvučnih uređaja, uređajima za mjerenje vibracija potrebne su sonde koje prenose signale od mjernog mjesta do uređaja. Sonde očitavaju male pomake koje stroj stvara prilikom rada te na temelju tih podataka mogu se donjeti zaključci o stanju stroja. U radu se nalazi i primjer kontrole elektromotora i pumpe na pumpnoj stanici. Ispitivanje je pokazalo da su napuknuti rotor štapovi elektromotora i da dolazi do pobuđivanja rezonancija kod dva ležaja, ali da je sve u granicama prihvatljivosti.

Bez dijagnostičkih uređaja, ispitivanja ne bi mogla biti provedena i zato je i njih potrebno držati u dobrom stanju jer bez održavanja sa pravilnim dijagnostičkim uređajima nema ni kvalitetnog održivog sustava.

8. LITERATURA

[1] Ellis B. A.: Condition based maintenance, TJP, 2008; pristupljeno 19.02.2018.

[2] Lisjak D.:Podloge za predavanje, predmet „Održavanje“, 2015, ver 7.0

[3] British Institute of Non-destructive testing, 2018.; pristupljeno 19.02.2018.

[4] Samardžić I.:Kontrola kvalitete nakon zavarivanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu; pristuljeno 19.02.2018

[5] Karadžić R.; Bulatović M.; Milaković J.: Mogućnosti primjene savremene endoskopske dijagnostike u održavanju prema stanju vazduhoplovnih sredstava; 1. Konferencija „Održavanje 2010“ Zenica, BiH, 2010; pristupljeno 19.02.2018.

[6] Borsoskop PCE-RS 40; pristupljeno 19.02.2018.

[7] Fiberskop iFlex Fiberscope; pristupljeno 19.02.2018.

[8] Videoskop VideoControl-Flexi3D Laserliner; pristupljeno 19.02.2018.

[9] Turbo motor GTM ASTAZOU III B; pristupljeno 19.02.2018.

[10] Spektar elektromagnetskog zračenja; pristupljeno 19.02.2018.

[11] Boras I.; Šavić S.:Laboratorijska vježba: Infracrvena termografija ,pristupljeno 19.02.2018.

[12] Termovizijska kamera Flir T 425; pristupljeno 19.02.2018.

[13] Tomas L.: Primjena termovizije u održavanju elektromotornih pogona, 2016.

[14] Energenova d.o.o, pristupljeno 19.02.2018.

[15] Koren I.: Primjena nerazornih ispitivanja u održavanju, 2017., pristupljeno 19.02.2018.

[16] Cejpek M.: Ultrazvučna kontrola, 2016. , pristupljeno 19.02.2018.

[17] Golubović-Bugarski V.: Buka i vibracije, Mašinski fakultet, Banja Luka,2010.

[18] Žigulić R.: Laboratorijska vježba:Mjerenje vibracija osovine rotora beskontaktnim senzorima, 2010., pristupljeno 19.02.2018.

[19] Turbomehanika d.o.o., Kutina, izvještaj vršenog ispitivanja na Terminalu Sisak, 06.06.2017.

9. PRILOG

[1] CD-R