



**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNIČKI FAKULTET "MIHAJLO PUPIN"  
ZRENJANIN**



**MODELI RIZIKA ZA PROCENU NIVOVA  
VIBRACIJA TEHNIČKIH SISTEMA**

**MODELS OF RISK FOR ASSESSMENT  
OF VIBRATION LEVELS OF TECHNICAL  
SYSTEMS**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

Kandidat:  
Mr Slobodan Jurić

**ZRENJANIN 2018. godine**



**Univerzitet u Novom Sadu  
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin" Zrenjanin**



**MODELI RIZIKA ZA PROCENU NIVOVA  
VIBRACIJA TEHNIČKIH SISTEMA**

**MODELS OF RISK FOR ASSESSMENT  
OF VIBRATION LEVELS OF TECHNICAL  
SYSTEMS**

**-DOKTORSKA DISERTACIJA-**

Mentor  
Profesor dr Slavica Prvulović

Kandidat  
Mr Slobodan Jurić

**Zrenjanin 2018. godine**

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
TEHNIČKI FAKULTET „MIHAJLO PUPIN“ ZRENJANIN**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska publikacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani zapis
Vrsta rada: VR	Doktorska disertacija
Autor: AU	Mr Jurić Slobodan
Mentor: MN	Prof. dr Slavica Prvulović
Naslov rada: NR	Modeli rizika za procenu nivoa vibracija tehničkih sistema
Jezik publikacije: JP	Srpski (latinica)
Jezik izvoda: JI	Srpski/engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2018.
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	TF „Mihajlo Pupin“, Đure Đakovića b.b., Zrenjanin, Srbija
Fizički opis rada: FO	(8/211/146/73)
Naučna oblast: NO	Industrijsko inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Tehnologija održavanja
Predmetna odrednica/ključne reči: PO	Rizik, vibracije, pouzdanost i hidroelektrane
UDK:	
Čuva se: ČU	U biblioteci TF „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

Izvod: IZ	Istraživanje modela rizika predstavlja stalnu proveru parametara vibracija sistema, na osnovu kojih se može prognozirati vreme zamene komponenata pre nego što dođe do njihovih otkaza. Model se zasniva na stalnom praćenju parametara stanja u cilju eliminacije slabih mesta na tehničkom sistemu. Na taj način će biti ustanovljeni modeli za predviđanje i sprečavanje otkaza u radu tehničkog sistema. Karakteristika ovog modela je u neprekidnom praćenju stanja tehničkog sistema u procesu eksploatacije i iznalaženje uporednog modela za procenu rizika, prema ISO standardima. Istraživanje je imalo za cilj da se izvrši: procena dinamičkog stanja, osetljivosti i sklonosti rotirajućih elemenata hidro-elektre (HE) ka debalansu, kao i procenu sigurnosti funkcionisanja vratila i rotora turbinskog dela uređaja HE sa aspekta minimalnog rizika od pojave zastoja.
Datum prihvatanja teme od NN veća: DP	30. 04. 2014. godine
Datum odbrane: DO	
Članovi komisije: (Naučni stepen / ime i prezime / zvanje / fakultet) KO	
<b>Predsednik:</b>	Prof. dr Ljiljana Radovanović, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, vanredni profesor
<b>Član:</b>	Prof. dr Branko Škorić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, redovni profesor
<b>Član:</b>	Prof. dr Dragan D. Milanović, Mašinski fakultet Beograd, redovni profesor
<b>Član:</b>	Prof. dr Eleonora Desnica, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, vanredni profesor
<b>Mentor:</b>	Prof. dr Slavica Prvulović, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, redovni profesor

**UNIVERZITY OF NOVI SAD  
TECHNICAL FAKULTY „MIHAJLO PUPIN“ ZRENJANIN**

**KEY INFORMACION AND DOKUMENTATION**

Acdecession number: ANO	
Identifikacion number: INO	
Document type: DT	Monograph publication
Type of record: TR	Textual printed material
Contens code: CC	Ph. D. Thesis
Author: AU	Mr Jurić Slobodan
Mentor: MN	Slavica Prvulović, Ph.D., full professor
Title of work: TI	Models of risk for assessment of vibration levels of technical systems
Language of text: LT	Serbian (Latin letters)
Language of abstract: LA	Serbian and English
Country of publication: CP	Serbia
Locality of publication: UGP	Vojvodina
Publication Year: PY	2018.
Publisher: PU	Author reprint
Place and address: MA	Zrenjanin, 23 000 Djure Djakovica bb
Physical Description of work: PD	(8/211/146/73)
Scientific field Engineering: SF	Industrial engineering
Scientific discipline: SD	Maintenance technology
Subject/Keywords: SKW	Risk, vibrations, reliability and hydroelectric power plants
PO/ NUMBER:	
Holding data: HD	Library of Technical faculty „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin
Note: N	

Abstract: AB	Research into risk models is a constant check of the system's vibration parameters, based on which the time of replacing components can be predicted before their failure occurs. The model is based on continuous monitoring of state parameters in order to eliminate weak spots in the technical system. In this way, models will be established for predicting and preventing failure in the work, technical system. The characteristic of this model is the continuous monitoring of the state of the technical system in the exploitation process and the finding of a comparative risk assessment model, according to ISO standards. The aim of the research was to evaluate the dynamic state, sensitivity and tendency of the rotating elements of the hydroelectric power plant (HE), to the imbalance, as well as to assess the safety of the functioning of the shaft and rotor turbine part of the HE unit from the aspect of minimal risk of occurrence of delays.
Accepted on Senate on: AS	30. 04. 2014.
Defended: DE	
Thesis Defend Board: (name/degree/title/ faculty) DB	
Member, President:	Prof. dr Ljiljana Radovanovic, Technical faculty „Mihajlo Pupin“, associate professor
Member:	Prof. dr Branko Skoric, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, full professor
Member:	Prof. dr Dragan D. Milanovic, Faculty of mechanical engineering Belgrade, full professor
Member:	Prof. dr Eleonora Desnica, Technical faculty „Mihajlo Pupin“, associate professor
Member - mentor:	Prof. dr Slavica Prvulovic, Technical faculty „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, full professor

## PREDGOVOR

Disertacija predstavlja rezultat istraživanja o razvoju i primeni postupaka dijagnostike stanja tehničkih sistema. Model dijagnostike stanja tehničkih sistema je nastao kao rezultat istraživanja i specifičnih metoda za proučavanje rizika i vibracija zabeleženih otkaza komponenti.

Istraživanja su vršena na objektima hidroelektrana „Bočac“, „Jajce I“ i objektu tekstilne industrije „Svila“ Čelinac rotaciona predilica. Dobijeni podaci su upoređivani sa objektima iste vrste na području BiH. Za određivanje metode postupka dijagnostike stanja tehničkih sistema predviđene su osnovne faze i to: evidentiranje broja otkaza sastavnih komponenti i analize eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti tehničkog sistema.

Izbor najznačajnijih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti tehničkog sistema imao je glavnu ulogu u definisanju procesa postupka dijagnostike stanja. Za određivanje potrebne sigurnosti uzet je rizik na osnovu zabeleženih vibracija komponenta hidroelektrana i rotacione predilice.

Složeni tehnički sistemi koji se razmatraju u okviru ove disertacije su veoma skupi, i njihovo vreme zastoja povlači za sobom brojne konsekvence u celom sistemu. Takvi zastoji iziskuju potrebu za velikim brojem akcija održavanja. Oni oduzimaju mnogo vremena i njihova cena je veoma visoka, te kao takvi enormno utiču na cenu krajnjeg proizvoda, u ovom slučaju energije.

Kao jedan od bitnih faktora smanjenja gore pomenutih izdataka je pojava uzastopnih preventivnih akcija održavanja. Posebna pažnja je posvećena periodičnim opravkama. Snimanjem parametara vibracije na hidroelektranama i rotacionim predilicama mogu se definisati optimalni vremenski periodi opravke/zamene delova pre nego što dođe do njihovog otkaza ili potreba da se deluje korektivno.

Disertacija je urađena pod mentorstvom Prof. dr Slavice Prvulović.

Ovom prilikom najsrdačnije se zahvaljujem na podršci, razumevanju i svim korisnim savetima koje mi je uputila pri izradi ove disertacije.

Takođe se zahvaljujem direktorima Hidroelektrane „Bočac“, „Jajce I“ i „Svila“ Čelinac kao i Livnici čelika - Banja Luka, koji su mi omogućili pristup svim relevantnim podacima za izradu ove disertacije.

Mr Slobodan Jurić

## SADRŽAJ

1.0. UVOD.....	13
1.1. OSNOVNA PROBLEMATIKA.....	15
1.2. PREGLED SAZNANJA IZ RASPOLOŽIVE LITERATURE .....	16
2.0. METODOLOŠKI KONCEPT .....	19
2.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA .....	19
2.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA .....	21
2.3. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	22
2.4. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA .....	23
2.5. METODE ISTRAŽIVANJA .....	24
2.6. ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA.....	25
2.7. NAUČNA I DRUŠTVENA OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA.....	26
2.8. OČEKIVANI REZULTATI .....	26
3.0. PROIZVODNI SISTEMI, RIZIK, HAVARIJE USLED POVIŠENOG NIVOA VIBRACIJA .....	28
3.1. TEHNIČKI SISTEMI U KOJIMA SU VRŠENA ISPITIVANJA .....	28
3.2. UZROCI KOJI DOVODE DO NEISPRAVNOSTI ELEKTRANA.....	30
4.0. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA.....	32
4.1. MODELI RIZIKA .....	32
4.2. ODRŽAVANJE SISTEMA I UPRAVLJANJE RIZICIMA.....	36
4.2.1. ANALIZA RIZIKA U OBLASTI TEHNIČKIH SISTEMA .....	37
4.2.2. PROCENA, PROCESI I ELEMENTI UPRAVLJANJA RIZIKOM U OBLASTI TEHNIČKIH SISTEMA.....	40
4.3. MODELI ZA ANALIZU RIZIKA .....	41
4.4. UPRAVLJANJE RIZIKOM U ELEKTRANAMA.....	46
4.5. PRIMER UPRAVLJANJA RIZIKOM U ELEKTRANAMA .....	50
4.6. METODOLOGIJA OTKRIVANJA SLABIH MESTA .....	56
4.6.1. ANEO POSTUPAK.....	57
4.6.2. SPROVOĐENJE ANALIZE KRITIČNOSTI.....	59
5.0. RAZVOJ MODELA RIZIKA ZA PROCENU NIVOA VIBRACIJA TEHNIČKIH SISTEMA .....	61
5.1. PROCENA RIZIKA .....	61
5.2. PROCENA RIZIKA PRIMENOM KINNEY METODE.....	62
5.3. PROCENA RIZIKA PRIMENOM “SINGAPURSKOG” (3x3).....	64
5.4. PROCENA RIZIKA PRIMENOM METODE GUARDMASTER.....	66
5.5. PROCENA RIZIKA PRIMENOM METODE PILZ.....	68



5.6. MATRICA (XI) (Standard of Safety Instrumental System – SIL, Bently, Nevada, USA) .....	70
6.0. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....	74
6.1. UVOD .....	74
6.2. METODOLOGIJA I OBIM ISPITIVANJA .....	75
6.2.1. OBIM ISPITIVANJA .....	75
6.2.2. METODOLOGIJA ISPITIVANJA .....	78
6.3.1. ANALIZA APSOLUTNIH VIBRACIJA HE BOČAC .....	81
6.3.2. ANALIZA ROTORNIH VIBRACIJA .....	84
6.3.3. RAZVOJ DIJAGNOSTIČKIH BAZA HIDROAGREGATA .....	86
6.3.4. KORIŠTENA MERNA OPREMA .....	89
6.3.5. VALIDACIJA MERENJA I PODEŠAVANJE U COMPASS SISTEMU .....	90
6.3.5.1. STRUKTURA MERNE „COMPASS-OVE“ BAZE I NOTACIJA MERENJA .....	91
6.4. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA .....	95
6.4.1. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA MERENJA .....	102
6.5. MODELI RIZIKA, IZBOR OPTIMALNE STRATEGIJE ODRŽAVANJA MAŠINSKIH SISTEMA NA OSNOVU BRZINE VIBRACIJA .....	170
6.5.1. DIJAGNOSTIKA I IZBOR OPTIMALNE STRATEGIJE .....	170
6.5.2. PREDVIĐANJE POUZDANOSTI LEŽAJA NA MAŠINSKIM SISTEMIMA .....	179
6.5.3. ODRŽAVANJE MAŠINSKIH TEHNIČKIH SISTEMA .....	185
7.0. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA .....	189
7.1. PRIKAZ NORMATIVA ZA REZULTATE ISTRAŽIVANJA .....	189
7.2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA .....	191
7.3. DISKUSIJA O REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA .....	194
7.4. VREDNOVANJE REZULTATA ZA NAUKU I TEHNOLOŠKU PRIMENU .....	199
8.0. ZAKLJUČAK .....	203
LITERATURA .....	205

## REZIME DISERTACIJE

Disertacija se bavi problematikom formiranja modela rizika na osnovu analize vibracija tehničkih sistema. Istraživanje je vršeno na dve hidrocentrale i jednoj rotacionoj predilici. S obzirom na broj komponenti, kao i na složenost samih komponenti sistema radi se o složenim tehničkim sistemima.

Tehnički sistemi koji se razmatraju u ovoj disertaciji su veoma skupi i njihov zastoj nanosi velike gubitke, a time i obavezu za adekvatno održavanje. Kod održavanje složenih sistema svaki od delova sistema koji je druge vrste zahteva drugačije parametre raspodele verovatnoće pojave otkaza i zahteva drugačiju teorijsku raspodelu otkaza.

Osnova teorijskog dela istraživanja su pojmovi rizika vezani za vibracije.

U ovom delu teorijski je objašnjen:

- pojam vibracija u poželjnom i nepoželjnom obliku, kao i načini njihovog merenja
- postojanje rizika u svim procesima kao naučni kriterijmi za procenu rizika
- pojam i verovatnoću nepoželjnih zastoja naročito vezanih za složene tehničke sisteme

Osnova eksperimentalnog dela rada je uspostavljanje najoptimalnijih mesta za merenje vibracija, kao i izbor adekvatne opreme koja će dati najkvalitetnije rezultate. U ovom istraživanju koriste se automatizovani dijagnostički modeli bazirani na primeni računara i drugih savremenih informaciono - komunikacionih tehnologija. Vršiti se analiza apsolutnih vibracija u svim režimima rada (ustaljni način rada, malo opterećenje, nominalno opterećenje), u skladu sa međunarodnim standardima i standardima proizvođača opreme.

Merenje dinamičkih karakteristika agregata podrazumevaju merenja različitih veličina kao što su: vibracije generatorskog nosećeg ležaja u X, Y i Z smeru, vibracije turbinskog vodećeg ležaja u X i Y smeru, vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja (samo na agregatu 1) u X smeru, odstupanje ose turbinskog vratila u dva smera  $S_x$  i  $S_y$ .

Kod rotacione predilice se prati nivo vibracija na šest mesta i to: 1-4 na sklopu boks pređenje, 5-6 na sklopu za namotavanje kalemova gotovom pređom. Ovi sklopovi su izabrani jer su opterećeni u svome radu i izloženi su habanju, a predstavljaju najvažnije sklopove ovog tehničkog sistema.

Istraživanje pouzdanosti komponenata sistema na osnovu merenja vibracija u stalnom procesu navodi na zaključak o korelacionoj povezanosti vibracija i pouzdanosti. Određivanjem pouzdanosti komponenti sistema određuje se pouzdanost sklopa, a zatim i čitavog sistema.

Svi rezultati dobijeni na taj način vode do modela rizika, kao puteva za rešavanje datih problema. Celokupno istraživanje je procena sigurnosti tehničkih sklopova sa aspekta minimalnog rizika od pojave zastoja u radu.

## ABSTRACT OF DISSERTATION

The dissertation deals with the problems of risk modeling on basis of vibration of technical systems. The research was carried out on two hydroelectric power plants and one rotary spinning machine. Considering the number of components, as well as the complexity of the components of the system we are dealing with complex technical systems.

Technical system discussed in this dissertation are very expensive and their downtime causes great losses, and with it a commitment for adequate maintenance. While maintaining complex systems every part of a system which is of a different type requires different parameters of distribution of probability of failure occurrence and requires different theoretical allocation of failures.

The basis of theoretical part of the research are concepts of risks associated with vibration.

In this part there are theoretical explanations for:

- concept of vibrations in their desirable and undesirable forms, as well as methods of measuring them
- the existence of risk in all processes as scientific criteria for risk assessment
- concept and probability of undesirable delays especially related to complex technical systems

Basis of experimental part of the work is establishing of the most optimal places for measuring vibrations, as well as the selection of adequate equipment which will provide the highest quality results. Automated diagnostic models based on the application of computers and other modern information-communication technologies are used in this research. Absolute vibration analysis is conducted in all modes of operation (transient mode, low load, nominal load), in accordance with the international standards and standards of equipment manufacturers.

Measuring of dynamic characteristics of generators include measurements of different sizes such as: vibrations of generator carrier bearing in X, Y and Z directions, vibrations of turbine guide bearing in the X and Y directions, vibrations of generator lower guide bearing (only on the generator 1) in X direction, deviation of the axis of turbine shaft in two directions  $S_x$  and  $S_y$ .

The level of vibrations of rotary spinning machine is monitored at six places as follows: 1-4 at the joint of spinning machine box, 5-6 at the joint for winding of spools with ready-made yarn. These joints are selected because they are burdened in their work and exposed to wear, and they represent the most important joints of this technical system.

The research of reliability of components of a system on basis of measuring of vibrations in the constant process leads to conclusion on correlation of vibrations and reliability. Determining of reliability of components of a system determines the reliability of the joint, and then the entire system.

All results obtained in this manner lead to a model of a risk, as a way to solve the problems. The complete research is the assessment of the safety of technical joints from the aspect of a minimal risk from the appearance of delays in work.

## 1.0. UVOD

Danas je energija jedan od najuticajnijih parametara na poslovanje i konkurentnost. Ona predstavlja nezaobilazan segment poslovanja, svakog proizvoda i usluge. Sa prihvatljivom cenom energije i cena konačnog proizvoda postaje prihvatljiva.

S tim u vezi je i istraživanje ove disertacije. Naime, hidroelektrane učestvuju sa velikim udelom u svetskoj proizvodnji električne energije. Složenost njihove strukture zahteva potrebu za održavanjem kao sve važnijim elementom njihovog ukupnog životnog ciklusa sa posebnim osvrtnom na upotrebnost kvalitet hidroelektrana. Tokom perioda korišćenja ovi pogoni za proizvodnju energije su izloženi uticaju širokog spektra spoljnih i unutrašnjih faktora koji dovode do poremećaja u njihovom radu, odnosno do odstupanja od njihovih osnovnih karakteristika i parametara stanja. Funkcionisanje hidroelektrane bez otkaza, a sa predviđenim performansama, glavni je cilj strategije održavanja i prilagođavanja određenom privrednom sistemu. Osnovna uloga održavanja jeste da obezbedi visok nivo pouzdanosti i raspoloživosti (sigurnosti funkcionisanja) tehničkih sistema u toku njihovog životnog ciklusa. Pri tome je neophodno izvesti niz metoda i postupaka korektivnog i preventivnog održavanja (tehnologija održavanja) na sastavnim delovima tehničkog sistema, uz optimalne troškove održavanja (direktne i indirektne troškove).

Preventivno održavanje, neprekidno stanje sistema u „radu“ za osnovu uzima rizik. Rizik predstavlja potencijalnu mogućnost nastanka otkaza na mašinskom sklopu. Zarad profitabilnog poslovanja i smanjenja troškova održavanja, javila se potreba za izučavanjem oblasti delovanja na minimiziranje rizika. Postoje brojni različiti koncepti analize rizika, u zavisnosti od toga za koju se profesionalnu oblast vrši analiza rizika. Na području osiguranja rizik ukazuje na nastanak nepovoljnog ishoda, na području finansija rizik ukazuje na opasnost od novčanog gubitka, dok u mašinskim i elektro postrojenjima rizik predstavlja opasnost od ispada sistema.

IEC (International Electrotechnical Commission) standard za izvođenje analize rizika (IEC60300.3.9:1995) rizik definiše kao „kombinaciju frekvencije ili verovatnoće pojave i posledice specifičnog slučajnog događaja“.

Pitanjem „koliki je rizik“, realno su postavljena tri pitanja:

1. Šta se može dogoditi?
2. Koliko se to često dešava?
3. Kakve su posledice ukoliko se to dogodi?

Prvo pitanje upućuje na mogući neželjeni scenario, drugo na verovatnoću da se taj scenario dogodi, a treće na veličinu posledica nastalih pomenutim događajem. Termin rizika se ne može definisati na osnovu nastale štete usled ispada određene komponente u procesu rada, već od verovatnoće pojave neželjenog događaja. Iz tog razloga, definicija rizika obuhvata ove dve veličine: verovatnoću ispada sistema i posledicu njegove pojave. Redovnim praćenjem stanja datog sklopa u toku njegove eksploatacije moguće je na osnovu prekomernih vibracija pravovremeno detektovati oštećenje, odnosno otkaz na pojedinim strukturnim elementima. Vibracijama uopšte podrazumevamo oscilatorna kretanja krutog tela u odnosu na svoj ravnotežni položaj. Uročnik tog kretanja je poremećajna prinudna sila (prinudne vibracije). Slobodne vibracije predstavljaju periodično kretanje koje telo izvodi po prestanku delovanja poremećajne sile.

Proučavanjem vibracija smanjuje se vreme potrebno za održavanje, kao i rizik od iznenadnog zastoja mašine.

Vibracije tehničkih sistema su rezultat međusobne interakcije pobude i osetljivosti sistema na ovu pobudu. Radom tehničkih sistema stvaraju se poremećajni procesi čija su posledica složene vremenske funkcije poremećajnih sila. Tehnički sistem može biti osetljiv na određenu vrstu pobude ili ne, tj. pobuda može i ne mora da dovede do nastanka vibracija.

Pošto su vibracije nepoželjna pojava, pri konstruisanju je potrebno odnos pobude i osetljivosti sistema na pobudu podesiti tako da nivo vibracija bude što niži. Jedan od važnijih pokazatelja kvaliteta tehničkog sistema (mašine i postrojenja) je nivo energije koju vibracija prenosi na okolinu. Osim toga vibracije dovode do dodatnih dinamičkih opterećenja koja doprinose smanjenju nosivosti i radnih svojstava, ubrzanom zamoru i dr.

Vibracije su poželjne samo u izuzetnim slučajevima kada se radni proces zasniva na korištenju vibracija. U svim drugim okolnostima konstrukcijska rešenja treba da su izvedena tako što će sprečiti nastanak ili širenje energije vibracija. U ovom smislu na raspolaganju je širok spektar mera i rešenja za razvoj odnosno konstruisanje mirnih i tihih mašina. One se zasnivaju na izučavanju mehanizma nastajanja vibracija i na otklanjanju svih uslova koji dovode do ove pojave.

Danas u industriji su tehnički sistemi sve kompleksniji, produktivniji i skuplji, i od njih se zahteva visoka pouzdanost odnosno minimiziranje stanja u otkazu, do gotovo potpunog eliminisanja otkaza. Zbog otkaza samo jednog dela tehničkog sistema, npr. kritične mašine, visoko produktivne mašine može doći do zastoja cele proizvodne linije, a time i velikih troškova, ekoloških šteta i ugrožavanja sigurnosti radnika. Zbog toga je potrebno istovremeno i često ili neprekidno pratiti više dijagnostičkih parametara takvih tehničkih sistema kako bi se njihove eventualne neispravnosti otkrile u početnoj fazi i tako stvorili uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreče otkazi i havarije. Ako bi se u takvim situacijama obrada i analiza rezultata merenja, kao i procena tehničkog stanja sistema i donošenje dijagnostičkih odluka o daljim aktivnostima održavanja, vršili klasičnim (neautomatizovanim) postupcima, dijagnostička ispitivanja bi mogla postati vrlo složena i vremenski dugo trajati. Čovek u takvim situacijama najčešće ne bi bio u stanju da sve te poslove obavi zadovoljavajućom brzinom i tačnošću. Da bi se to izbeglo, vrši se automatizacija dijagnostičkog procesa, odnosno umesto klasičnih postupaka koriste se automatizovani dijagnostički sistemi zasnovani na primeni računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Sve navedene poslove umesto čoveka obavlja računar, odnosno računar upravlja celokupnim dijagnostičkim procesom, čime se taj proces znatno pojednostavljuje i ubrza. Izveštaje o obavljenim dijagnostičkim ispitivanjima moguće je dobiti odmah nakon ispitivanja.

Rizik je oduvek privlačio pažnju velikog broja istraživača i naučnika, ali uglavnom sa različitih aspekata, tako da ni do danas nemamo jedinstvenu definiciju rizika. Nije problem samo u razlikama pristupa već i u pojavnosti prirodi rizika, što je postalo fenomenom, pa rizik nije ni moguće jednoznačno pojasniti. Pojam rizika je vrlo relativizovan, ali svim rizicima je zajedničko to da moraju biti budući i nezavisni događaji.

Prisustvo rizika ne može se neutralisati pa pojedinci i poslovni sistemi traže puteve njegovog rešavanja. Rizici fundamentalne prirode rešavaju se putem kolektivnih napora

društva. Iako društvo može pomoći da se olakša teret rizika u mnogim oblastima, postoje neki rizici za koje su odgovorni pojedinci.

Postojanje rizika je izvor osećanja nelagodnosti kod najvećeg broja ljudi, a prateća neizvesnost stvara strah i zabrinutost. Pošto je rizik nepoželjan i neprijatan, racionalna priroda čoveka navodi da se nešto učini o tom pitanju. Posledice ostvarenja rizika mogu se rešiti pomoću nekoliko metoda upravljanja rizikom, a mi ćemo sada navesti neke od njih:

- izbegavanje (izbegavanje rizika je nezadovoljavajući metod rešavanja i upravljanja rizikom, tj. rizik se izbegava kada pojedinac ne želi da prihvati rizik)
- zadržavanje (zadržavanje rizika kao metod rešavanja rizika u mnogim slučajevima je najbolji način, odnosno, po pravilu rizici koji se zadržavaju su oni koji rezultiraju relativno malim gubicima, tj. kada pojedinac ne preduzima ništa da izbegne, umanj, ili prenese rizik, mogućnost gubitaka u takvim situacijama je zadržavanje rizika)
- prenos (rizik se može preneti sa pojedinca ili poslovnog sistema na drugi koji je više spreman da snosi rizik, tj. prenos rizika je proces osiguranja od gubitaka, gde se pojedinac ili poslovni sistem zasićuje od rizika gubitaka kupovinom ili prodajom nekog dobra za koji se procenjuje da neće imati gubitaka)
- podela (rizik se može podeliti kada postoji aranžman podele gubitaka, a isti se mogu podeliti u velikom broju slučajeva, npr. Organizacija akcionarskog društva, mehanizam osiguranja, itd.)
- umanjjenje (rizik se može umanjiti sprečavanjem i kontrolom, tj. sprečavanjem nastanka gubitka je najpoželjnije sredstvo za upravljanje rizikom jer ako se mogućnost gubitka potpuno eliminiše, eliminisao bi se i rizik, dok se umanjjenje rizika kontrolom može realizovati primenom zakona velikih brojeva).

## 1.1. OSNOVNA PROBLEMATIKA

Dijagnostika tehničkih sistema sa pratećom opremom predstavlja sve aktivnosti koje se vrše radi ocene trenutnog stanja ili davanja prognoze ponašanja sistema u određenom vremenskom periodu. Pri tome koristi sve raspoložive algoritme, pravila i modele koji su neophodni za određivanje stanja sistema, a sa ciljem pravovremenog predviđanja pojave neispravnosti.

Razvoj tehničke dijagnostike na sistemima išao je u pravcu ostvarivanja funkcije koju ona treba da obezbedi. Elementi na bazi kojih se vrši procena veka korišćenja ili pojave neispravnosti su lociranje mesta otkaza na najnižem hijerarhijskom nivou. Prognoza i definisanje uzroka otkaza mogu se ostvariti u toku same eksploatacije hidro postrojenja ili u okviru zastoja i vremena za remont postrojenja i opreme. Razlikuju se eksploataciona (radni režim) i remontna (stacionarni režim) tehnička dijagnostika, kao sastavni elementi održavanja prema stanju postrojenja u okviru elektrane, kao višeg hijerarhijskog sistema. Značajno mesto u održavanju tehničkih sistema ima razvijanje modela rizika na osnovu vibracione dijagnostike. Najzastupljenija dijagnostička metoda, koja se može koristiti kako na elektro tako i na mašinskoj opremi, je vibraciona dijagnostika.

Vibraciona dijagnostika na bazi rizika ima za cilj sprečavanje otkaza. Da bi se ovaj cilj ostvario, moraju se identifikovati sastavni delovi jednog postrojenja čiji otkaz može dovesti do velikih finansijskih gubitaka pa i povrede radnika. Rizik je kvantitativni i kvalitativni opis opasnosti, tj. mera opasnosti ili nivoa opasnosti.

Pošto je otkaz neke komponente tehničkog sistema u suštini statistički proces (verovatnoća pojave), rizik je adekvatna veličina koja može da posluži kao orijentir za odlučivanje o aktivnostima održavanja. Pri analizi je posebno voditi računa da jedan određen deo može da otkáže na različite načine, tj. troškovi održavanja, koji su povezani sa njihovim otkazom, moraju biti ocenjeni sa uslovnom verovatnoćom određene vrste otkaza, odnosno treba da se uzme u obzir prilikom određivanja rizika.

Metode održavanja na bazi rizika ne predstavljaju zamene za postojeće metode, već suštinski njegovu važnu i korisnu dopunu. Naime, upravljanje održavanja na bazi rizika usmereno je prvenstveno na preventivno održavanje i to na preventivno održavanje prema stanju koje se zasniva na osmišljenim tehničkim pregledima posmatranog dela tehničkog sistema.

## 1.2. PREGLED SAZNAJIA IZ RASPOLOŽIVE LITERATURE

Vibracije i njihova jačina u hidro i termo postrojenjima su usko povezane sa održavanjem postrojenja, mogućih otkaza i eventualnih havarija i procenom rizika. U tehnološkom procesu, može se reći što je veći rizik to je veća potreba za intenzivnijim održavanjem. U narednom izlaganju dat je pregled literature:

1. Gertsbakh, I. B., *Models of preventive maintenance*, North – HolLand publishing company, Amsterdam-New York-Oxford, 1997. U knjizi je dat prikaz velikog broja modela održavanja tehničkih sistema. Takođe, prikazan je model za određivanja optimalne periodičnosti dijagnostičkih stanja tehničkih sistema pri minimalnim troškovima održavanja. Za primenu ovog modela neophodno je poznavati: zakonitosti procene stanja i troškove dijagnostike i preventivno i korektivno održavanje tehničkih sistema.

2. Hill, C., *Anintroduction to chemical engineering kinteciccs and hidroelektric diesign*, Free University, Amsterdam, 1989. Ova knjiga predstavlja osnovnu analizu mehaničkih oscilacija, koje nastaju pri radu osnovnih sastavnih komponenti hidroelektrane. Ovde su prikazani svi uzroci nastajanja mehaničkih oscilacija pri radu sistema i za različite slučajeve je data matematička forma analize osnovnih njihovih veličina, kao i uticaj promene parametara temperature ležajeva.

3. Baldin, A., Furlanetto, L., *Održavanje po stanju*, OMO, Beograd, 1999. Ovde je prikazan model dijagnostičke kontrole stanja na osnovu minimalnih troškova. Suština primene ovih modela sastoji se u određivanju verovatnoće, pojave otkaza u intervalu između uzastopne dijagnostike stanja uz minimiziranje ukupnih troškova održavanja tehničkih sistema.

4. Barlow, R., Proschan, F., *Mathematical theory of reliability*, New York, 1996. U ovoj knjizi dat je model za slučajne otkaze. Ovaj model se zasniva na pretpostavci da je dužina eksploatacije tehničkog sistema između dva uzastupna dijagnosticiranja nepromenljiva.



Primenom ovog modela vrši se minimiziranje funkcije troškova (traženje njene minimalne ekstremne vrednosti). Takođe dat je i model Baldina za poznate otkaze koji potiču od strukturnih preopterećenja (zamora, habanja, starenja, korozije i drugih oblika slabljenja osnovne strukture)

**5.** Barzilovič, E. J., *Modeli tehničkog osluživanja složnih sistem*, „Visšaja škola“, Moskva, 1998. U ovoj knjizi dat je prikaz dijagnostičkih modela za određivanje trenutaka sprovođenja dijagnosticiranja tehničkih sistema. Ovaj model se zasniva na uvođenju sledećih pretpostavki: otkaza sastavnih delova tehničkog sistema koje je moguće ustanoviti pomoću dijagnostičkog stanja.

**6.** Brankovski, M., *Issledovanii i ustranii vibracii turbogeneratorov*, Energija, Mašinostoenie, Moskva, 1997. U ovoj knjizi izvršen je prikaz analize mašinskih sistema sa aspekta konstruktivnih rešenja, pouzdanosti i pogodnosti rada. U njoj su jasno definisana stanja rada hidroenergetskog sistema koja omogućuju formiranje analize stabla otkaza sastavnih komponenti sistema. Ovakav prilaz omogućuje formiranje univerzalnog stabla otkaza bilo kog mašinskog sistema.

**7.** Korogodskij V. M., *Matodologieeskie osnovi optimizaci i nadežnosti automobiei*, Kievski gosudarstveni universitete, Kiev, 1998. Tehnički model grupisanja periodičnosti dijagnostičkih stanja sistema koji se zasniva na optimizaciji takozvanog grupisanja koji se može izvršiti prema sledećim modelima: tehnički, grupisanje prema glavnoj operaciji ili grupi operacija i prirodno grupisanje. Primenom ovog modela koristi se osnovna pretpostavka da su ukupni troškovi održavanja manji od ukupnih troškova održavanja pojedinih delova. Takođe, za optimalno grupisanje sastavnih delova prema njegovoj periodičnosti dijagnostičke kontrole stanja sistema zasniva se na određivanju vrednosti za „grupnu“ periodičnost kontrolu stanja delova koja odgovara minimalnim troškovima održavanja.

**8.** Govoruščenko, N. J., *Tehničeskaja ekspluatacija automobilej*, „Visšaja škola“, Harkov, 1994. U ovoj knjizi prikazan je razvijeni algoritam za kontrolu nivoa pouzdanosti sastavnih delova tehničkog sistema. Korišćenje održavanja prema stanju s kontrolom nivoa pouzdanosti, koje se bazira na obradi statističkih podataka u toku celog perioda eksploatacije. Zadatak ovog održavanja jeste operativna ocena pouzdanosti sastavnih delova sistema u eksploataciji. Potreba za rešenjem tog zadatka proističe iz neophodnosti upravljanja kvalitetom proizvodnje i opravke delova sistema uz određivanje efikasnosti obavljenih aktivnosti u eksploataciji. Primena ovog modela zahteva poznavanje karakteristika pouzdanosti sistema, troškove dijagnosticiranja i troškove sprovođenja održavanja.

**9.** Bednjak, M. N., *Modelirovanie procesov tehničkog osluživanja*, „Visšaja škola“ Kiev, 1999. U ovoj knjizi su obrađene metode, analiza tehničkog stanja sistema kao i modela dijagnostičkog održavanja sa kontrolom nivoa pouzdanosti. Takođe, predstavljeni su modeli preventivnog održavanja, oni su dali doprinos u oblasti modeliranja dijagnostike stanja i njihov uticaj na pouzdanost sistema.

**10.** Gill, E., *Practical optimization*, London, Academic Press, 1989. Koristi se princip diskretnog maksimuma za rešavanje problema optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrana, dokazujući pritom sposobnosti ovog algoritma da uzme u obzir vreme

rada hidroelektrana sa definisanim parametrima stanja, mogućnost tretiranja nelinearnih funkcija cilja i nelinearnih jednačina stanja.

**11.** „*Prediktivno održavanje rotirajuće opreme na bazi mjerenja i analize mehaničkih vibracija*“ (Ličen, H., Zuber. N., Tehnička dijagnostika, 2007, Vol.6, No1., str. 13-20) prikazan je pregled različitih tehnika održavanja mašina baziranih na tehnikama merenja i analize mehaničkih vibracija kao i srodnih komplementarnih tehnika kao što su termovizija, analiza ulja kao i praćenje procesnih parametara. Predstavljene su zatim strategije njihovog izbora i primene na različite tipove mašina. Dat je prikaz za periodično i kontinualno praćenje stanja mašina i dijagnostiku. Prikazan je OneproD MVX-16 online sistem za strategijsko online praćenje i zaštitu od vibracija proizvođača 01dB-Metravib kao i njegova instalacija na turbini od 20 MW u Termoelektrani-Toplani TETO, Novi Sad (rekonstrukcija mernog sistema i instalacija MVX sistema izvršena od strane Tehničko Razvojnog Centra TRCpro). Cilj rekonstrukcije mernog sistema u TETO Novi Sad je bila zamena zastarelih elektrodinamičkih senzora brzine vibracije i namenski razvijenog akvizicionog sistema (proizvođač: TRCpro). Sam motiv za rekonstrukciju je bila činjenica da je cena zamene starih senzora novijim, ali isto elektrodinamičkim sensorima brzine vibracija, bila manja nego cena zamene kompletnog mernog lanca, primenom standardnih ICP akcelerometara.

**12.** „*Proaktivno održavanje hidroturbinske opreme primjenom 01db-Metravib OneproD koncepta*“ (Hotimir Ličen, Ninoslav Zuber, Tehnička dijagnostika, No1, 2008) je prikazana konfiguracija OneproD-MVX sistema primenom uključenog softvera OneproD CSM. Za realtime prikaz svih aktivnih kanala i svih definisanih parametara na kanalima OneproD-MVX sistem koristi OneproDXPR (naprednu vibrodijagnostiku) ili OneproD-VIO (Viewer) softver. Komunikacija OneproD-MVX sistema sa kontrolnim PC-om se ostvaruje preko RS485 ili Ethernet-a. Zahvaljujući, pre svega, postojanju mogućnosti uslovne akvizicije i komunikacije preko Ethernet-a, MVX sistem se može primeniti kao: merni sistem za uslovnu akviziciju i monitoring vibracija, merni sistem za samostalni monitoring, merni sistem za monitoring udaljenih (remonte) mašina i merni sistem za superviziju vibracija i procesnih parametara na mašinama.

**13.** „*Rano otkrivanje oštećenja pomoću analize vibracija*“ (Knuth, T., „OMO“, XVII, 4, Beograd, 1988). U ovom radu prikazane su procedure i preporuke kojima se smanjuje negativan uticaj mehaničkih oscilacija-vibracija, a odnosi se kako na sistem u uhadavanju tako i na rad sistema posle izvršenih remonta. Ovo je iskorišteno u analizi prikupljanja podataka o otkazima koji su nastali povećanjem nivoa mehaničkih oscilacija.

## 2.0. METODOLOŠKI KONCEPT

### 2.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA

Razvoj tehnologije vodi ka sve većoj složenosti tehničkih sistema, a samim tim i njihovo održavanje je sve složenije i zahteva viši nivo poznavanja tehničkog sistema. Sigurnost funkcionisanja tehničkih sistema predstavlja bitnu osnovu za planiranje i praktičnu primenu kvalitetnih postupaka održavanja. Tehnologija održavanja počiva na poznavanju karakteristika pouzdanosti, na osnovu kojih se stalno, tokom rada tehničkog sistema vrše prognoze budućeg stanja, odnosno predviđanje pojave otkaza. Na bazi tih saznanja se donose odluke o postupcima preventivnog korektivnog ili kombinovnog održavanja koje treba sprovesti u određenom trenutku vremena, kako bi se sprečila iznenadna pojava otkaza, a time i odgovarajući dodatni troškovi i zastoji.

Neplanirani otkaz tehničkog sistema imaju za posledice:

- gubitak u procesu proizvodnje
- havarije koje ugrožavaju zaposlene
- prouzrokovanje materijalne štete i povećanje troškova oporavka

Dosadašnja iskustva su pokazivala da najveći deo radnih sredstava ne gubi svoju funkcionalnu karakteristiku odjednom, već je to kontinualan proces. Privredni rizici su prisutni u svakom preduzeću, pa samim tim i u svakom proizvodnom procesu. Njihovo ocenjivanje i uzimanje u obzir je neophodno u održavanju tehničkih sistema. Imajući u vidu značaj tehničkih sistema, kao što su hidroeletarne, rotacione predilice u tekstilnoj industriji te livnice čelika potreban je visok nivo poznavanja tehničkog sistema. Ako bismo standardno definisali šta je to održavanje, onda bismo rekli da je to aktivnost da se održi postojeće stanje mašina i da se one zaštite od otuđenja. Međutim, činjenica je da se danas održavanje definiše kao proizvodna funkcija, pri čemu je ključna pretpostavka da je proizvod održavanja radna sposobnost jer održavanje ne proizvodi uslugu. Pri tome, kvar predstavlja prestanak sposobnosti sistema da izvodi zahtevanu funkciju.

Takođe održavanje možemo definisati i kao kombinaciju svih tehničkih, administrativnih i menadžerskih postupaka tokom veka trajanja nekog elementa, sa ciljem zadržavanja ili vraćanja elementa u stanje u kojem može izvoditi zahtevanu funkciju. Pri tome elementat je deo, komponenta, uređaj, podsistem, funkcijska jedinica, oprema ili sistem koji se može razmatrati pojedinačno. Održavanje se može definisati i kao identifikovanje i ublažavanje degradacije funkcionisanja tehničkog sistema, ali i kao vraćanje projektovanih funkcija sistema, njegovih komponenata i struktura u otkazu, u prvobitno stanje.

Ključno je pitanje, zapravo, šta dobijamo održavanjem fizičke imovine sa istom brigom i pažnjom kako održavamo ljudske i finansijske potencijale? Dobija se, odnosno povećava prvenstveno vreme raspoloživosti tehničkih sistema da obavlja funkciju za koju je namenjen. Osim toga, povećava se i sposobnost procesa da proizvodi proizvode i usluge, sa ciljem zadovoljavanja potreba kupaca<sup>1</sup>. I, na kraju, možemo pružiti sigurno i kontrolisano radno (proizvodno) i uslužno okruženje sa minimumom rizika za one koji učestvuju u njemu. Održavanje je delatnost kojom treba da se sačuvaju sve bitne

---

<sup>1</sup>Adamović Ž., Jurić S. *Poslovna inteligencija u kompanijama* „Društvo za energetska efikasnost BiH“, Banja Luka, 2012.

karakteristike opreme i postrojenja za siguran rad i pouzdano funkcionisanje tokom predviđenog vremena eksploatacije.

Pritisci kojima je izložena proizvodnja radi poštovanja rokova isporuke često uzrokuju odgađanje neophodnog zahvata održavanja na proizvodnoj opremi. To za posledicu ima ubrzano trošenje opreme i gubitak traženih tolerancija, a to može imati dugoročno negativan uticaj na kvalitet finalnog proizvoda, troškove i efikasnost. Logično je da proizvodna funkcija ima prioritet nad ostalim područjima pa tako i nad održavanjem. Međutim, troškovi proizvodnje nastali zanemarivanjem lošeg stanja proizvodne opreme neizostavno vode do povećanog vremena koje će oprema provesti u otkazu, s obzirom na povećan obim korektivnih aktivnosti i hitnih zahvata. Krajnji je rezultat takvog zanemarivanja i loše održavana oprema te pad pouzdanosti opreme u radu. S obzirom na eventualno duži period kada je oprema u otkazu proizvodnja nužno stagnira, čime je doveden u pitanje i profit preduzeća.

U disertaciji, tema je vezana za nivo vibracija tehničkih sistema, modele rizika i smanjenje kako vibracija tako i samog rizika. Predmet istraživanja su postrojenja hidroelektrana te postrojenja u tekstilnoj industriji i u livnici čelika. Ova prva postrojenja imaju strateški značaj za elektroprivredu, te veliku investicionu vrednost, a time i značaj za državu. Metode vibrodijagnostike će nam pomoći da predvidimo moguće probleme, a samim tim ćemo smanjiti nivo opasnosti (rizik), a time i troškove održavanja što je veoma važno i povećati efikasnost tehničkog sistema. Problematika vibracija se rešava merenjem, proračunom i frekvencijskom analizom vremenskih funkcija. Merenje omogućuje da se eksperimentalnim putem odrede sve one veličine koje je potrebno uporediti sa rezultatima proračuna. Najčešće je jednostavnije izmeriti vibracije nego parametre na osnovu kojih treba realizovati određeni proračun. Iz ovih razloga, a i zbog drugih prednosti merenja (jednostavnosti, praćenja i analize stanja sistema i dr.) merenje vibracija je čest eksperimentalni zadatak.

Na ovako složenim tehničkim sistemima, izvršeno je ispitivanje mehaničkih oscilacija (vibracija) na izabranim kontrolnim mestima i na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja određena je pouzdanost sastavnih delova sklopova. Dat je i njihov uticaj na pravilno preventivno održavanje sastavnih konstruktivnih elemenata i komponenata analiziranih sklopova.

U skladu sa prethodnim konstatacijama jasno je da postoji potreba za istraživanjem obima i inteziteta analize indikatora performansi održavanja tehničkih sistema kao ključnog elementa proizvodnog procesa u ukupnim organizacijskim performansama. I kako one imaju značaj za kvalitetnu primenu reinženjeringa održavanja mašina.

Identifikacija tj. praćenje i snimanje bitnih tehničkih parametara u procesu eksploatacije u tehničkim sistemima će se vršiti uz nadzor ekspertskeg tima sastavljenog od stručnih lica iz dotičnih preduzeća. Obrada podataka će se vršiti grupisanjem, tabeliranjem i grafičkim prikazivanjem. Osnovne metode obrade podataka obuhvatiće vrednost dijagnostičkih parametara stanja kroz matematički aparat čiji su elementi: statističke metode, metričke metode i dijagnostičke krive.

Analizom pouzdanosti formiraju se parametri modela rizika kao predlog za donošenje potrebnih odluka za pouzdanost komponenata sklopova. Proces istraživanja univerzalnog modela predstavlja vezu između periodičnosti provera parametara stanja u radu i otkaza

sastavnih komponenti sklopova. Simulacijom se može prognozirati vremenski trenutak zamene komponenti sklopova pre nego što dođe do otkaza.

Kod sastavnih komponenta sklopova rešavanje problema dijagnostike i rizika ima veliki značaj iz razloga što je svaki složen sklop podložan otkazima, a dijagnostika će omogućiti i ustanoviti prirodu i mesto otkaza. Analizom parametara moguće je razviti model rizika i dijagnostike stanja za period rada komponenti. Njihov zadatak je provera stanja komponenti i postupaka preventivnog održavanja, kako ne bi došlo do pojave otkaza. Na osnovu ispravne dijagnostike stanja i merenja vibracija može se korigovati funkcionisanje, odnosno može se zameniti neispravna komponenta prilikom održavanja mašina.

Pri usvajanju kriterijuma i analiza koje se koriste kod formiranja modela rizika i dijagnostike vrši se izbor najznačajnijih parametara iz niza istih. Optimalno rešenje predstavlja kompromis između korekcija i mogućnosti definisanja algoritma. Vrednosti se izražavaju kriterijumskom funkcijom pouzdanosti koja bi za najbolje rešenje dostigla globalni ekstremum, uzimajući u obzir ograničenja koja uslovljavaju mogućnost postizanja optimalnog cilja.

Na osnovu praćenja datog stanja radne sposobnosti komponenta tehničkog sistema i njihovog međusobnog funkcionisanja (uz uključivanje statističkih metoda i parametara) formira se model njihove zavisnosti. Korekcija parametara rizika i dijagnostike stanja mašina je neophodna za matematički program koji će analizirane komponente predstaviti kao dinamički sistem.

## 2.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

S obzirom na smisao, svrhu i potrebu održavanja neophodno je delatnost održavanja prepoznati i prihvatiti kao jedan od ključnih startegijskih segmenata svake organizacije. Kako bi delatnost održavanja mogla u punoj meri doprineti povećanju profita preduzeća, produktivnosti, nesmetanom toku proizvodnje, pouzdanosti, raspoloživosti, te sveukupnom kvalitetu, a ona mora biti prepoznata i prihvaćena kao integralna komponenta proizvodne strategije, kao neizostavan i bitan deo sveukupnog plana stvaranja vrednosti putem izrade proizvoda za krajnjeg korisnika, zahtevanog kvaliteta, u dogovorenom roku i po prihvatljivoj ceni.

Predmet ovog istraživanja je snimanje vibracija na unapred određenim kontrolnim mestima, te njihov uticaj na pouzdanost tehničkog sistema.

Praćenje i snimanje bitnih tehničkih parametara u procesu eksploatacije u tehničkim sistemima će se vršiti uz nadzor stručnih lica iz dotičnih preduzeća. Sva istraživanja u napred navedenim mestima obavice se u različitim dobima, za vreme rada sistema i vreme redovnog remonta radi dobijanja relevantnih podataka o dijagnostičkim parametrima stanja elemenata i sklopova ovih tehničkih sistema. Rezultati istraživanja su provedeni u Hidroelektrani „Bočac“, Hidroelektrani „Jajce I“, Fabrici tekstila „Svila“ Čelinac. Analiziraće se rad hidrocentrale „Bočac“ i „Jajce I“ od 2014. do 2016. godine, kao i paralelna snimanja od 25.08. do 31.10.2015. godine.

Analizom tokom ovog perioda obuhvatiće se:

- Vrednost vibracija između redovnih remonta
- Vrednost vibracija za vreme remonta
- Dužina redovnog remonta

Istraživanja su rađena u više faza sa sledećim aktivnostima:

- Izrada metodologije merenja i razvoj novih elektronskih dijagnostički baza
- Validacija merenja i podešavanje COMPASS sistema
- Analiza apsolutnih vibracija u svim režimima rada
- Analiza rotornih vibracija u svim režimima rada
- Odstupanje ose vratila

Analizirajući rad rotacione predilice, mere se vibracije na sastavnim delovima na sklopu boks prednje i sklopu za namotavanje kalemova gotovom predom. Kod praćenja nivoa vibracija neophodno je odrediti merna mesta koja daju najverodostojnije rezultate.

### 2.3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istrživanja je iznalaženje modela rizika u održavanju tehničkih sistema, te na taj način smanje pojave havarija i zastoja. Cilj je da se postigne maksimalna pouzdanost uz minimalni rizik. Očekivani rezultati ovog istraživanja su da se pomoću modela dođe do saznanja o mogućim uzrocima vibracija, definišu smernice i preporuke za najpovoljnije vibracione karakteristike u eksploataciji tehničkog sistema, a sve sa ciljem smanjenja rizika od pojave nedozvoljenih vibracija. Veliki broj autora u zemlji i svetu razvija posebne modele istraživanja, prilagođene posebnim oblastima u obrazovanju, privredi, poljoprivredi, zdravstvu, avioindustriji itd.

Na bazi detaljnih analiza vrše se:

- provera kvaliteta parametara modela koji će definisati granice sigurnog i ispravnog rada do granice pojave rizika
- analiza pouzdanosti pri formiranju korelacije parametara postupaka rizika i dijagnostike
- analiza evidentiranih otkaza i provera stanja rada koponenti sklopova
- identifikacija svih rizika sa stanovišta prekida radnih procesa, bezbednosti i sigurnosti radnih sklopova sistema
- sprovođenje mera koje treba preduzeti da bi se svi značajni rizici smanjili, odnosno da bi se smanjila verovatnoća nastanka otkaza, kako bi posledice tih događaja sa aspekta smanjenja troškova bile prihvatljive

Analizom cilja obuhvatiće se:

- izrada modela rizika i dijagnostike stanja koji će sa izborom odgovarajućih parametara omogućiti rešenja kako bi se kvalitativno mogli analizirati uticaji i pojave pouzdanosti komponenata sistema
- primena odgovarajućeg statističkog metoda u praksi, tj. povećanje vrednosti sa primenom parametara rizika i dijagnostike stanja na sastavne komponente u cilju postizanja maksimalne pouzdanosti

- rizik koji se smanjuje u zavisnosti od zabeleženih ukupnih otkaza, a samim tim i povećava njegovu vrednost
- analiza modela za uvođenje korekcionih zavisnosti bez primene i sa primenom parametara dijagnostike stanja sistema

## 2.4. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

Potrebu za iznalaženjem odgovarajućeg modela rizika i dijagnostike stanja iziskuje sadašnje stanje, godine starosti opreme i prevaziđenost tehnologije, a kako bi se sistem održao u funkciji sa potrebnim nivoom pouzdanosti.

Očekuje se da će predmetna istraživanja dati doprinos produženju životnog veka, povećanju pouzdanosti i funkcionisanju tehničkih sistema. U postupku analize i modeliranja očekuje se da se pouzdanost sistema poveća, a da se rizik smanji tj. da se gotovo potpuno eliminiše otkaz. Zbog toga je potrebno neprekidno pratiti više parametara kako bi se njihove eventualne nepravilnosti otkrile u početnoj fazi i tako stvorili uslovi da se pravovremeno poduzmu odgovarajuće aktivnosti. Koristi se automatizovani dijagnostički sistem zasnovan na primeni računara i drugih savremeno-komunikacionih tehnologija. Navedene poslove umesto čoveka obavlja računar, odnosno računar upravlja celokupnim procesom tako da izveštaje možemo dobiti odmah nakon ispitivanja. Korišćenjem rezultata merenja, moguće je oceniti stanje tehničkog sistema, odnosno prognozirati njegov preostali rad do otkaza.

Pretpostavka je da se dobrom primenom inženjerskih i naučnih metoda rizika i tehničke dijagnostike može uticati na procese održavanja tehničkih sistema u pogledu minimalnog rizika pojave zastoja. U proizvodnom procesu oni moraju biti usmeravani na stalno povećanje organizacionih performansi, kako bi se reinženjering procesa adekvatno i kvalitetno implementirao. To je u direktnoj uzajamnoj vezi sa povećanjem obima i kvaliteta proizvodnje u tehničkim sistemima.

Pretpostavka je da će se modeli moći primenjivati kako na jednostavne, tako i na složene sisteme. Uspešno izvršena analiza parametara stanja komponenti koje utiču na model za utvrđivanje optimalne vrednosti izvođenja rizika i dijagnostike, je u funkciji postizanja maksimalne pouzdanosti i raspoloživosti komponentenata tehničkog sistema.

Zadatak istraživanja rizika i dijagnostike vibracija je da se izvrši izbor najboljih parametara pri određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponentenata. Stvaranje mogućnosti za automatizovanu optimizaciju preventivnog postupka održavanja, njegovog trajanja i periodičnosti, kako po nivou održavanja tako i vrsti jeste, takođe, istraživanje. Očekuje se da će rezultati istraživanja imati upotrebnu vrednost u pogledu postizanja višeg nivoa pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova tehničkih sistema.

Pretpostavka je da će definisani model rizika i dijagnostike stanja tehničkog sistema stvoriti potencijalne mogućnosti povećanja pouzdanosti sistema i raspoloživosti u radu.

Glavna hipoteza istraživanja u ovoj disertaciji glasi:

Formirani model rizika i dijagnostike stanja tehničkog sistema stvorioće potencijalne mogućnosti povećanja pouzdanosti sistema i raspoloživosti u radu.

U cilju postizanja gore navedenog, formiran je model rizika i dijagnostike stanja rada komponenti sklopova prema izabranim parametrima, i mernim mestima na osnovu izmerenih vrednosti komponenata sklopova. Pretpostavka je da će model biti primenljiv u planiranju otkaza koji definiše strategiju i promenu stanja rada komponenti sklopova.

## 2.5. METODE ISTRAŽIVANJA

S obzirom na složenost i kompleksnost tehničkih sistema u disertaciji će se koristiti sistematske naučno istraživačke metode: eksperimentalne metode, metoda modelovanja i metode analize i sinteze. Tehnike i postupci u izradi doktorske disertacije su naučno posmatranje koje će prethoditi eksperimentalnoj metodi.

Način istraživanja se sastoji od više operacija:

- priprema merne tehnike (izbor merne opreme, podešavanje opreme)
- odabir uzorka ispitivanja (noseći ležaj, ležaj hidrogenatora, ležaj hidroturbina i odstupanje ose vratila)
- etnologija ispitivanja (organizovanje ispitivanja po svim pitanjima - odabir uzorka i merne tehnike, mesta istraživanja itd.), u skladu sa ISO 10816-5, ISO 7919 - (1,2) standardima
- obrada rezultata ispitivanja (obrađuju se rezultati - izračunavaju, upoređuju, analiziraju...)
- priprema za dalje plasiranje
- prikazivanje rezultata

Koristiće se postupci komparativne i statističke metode (opšte naučne metode), analiza i sinteza. Kod posmatranja ukupnog rizika tehničkog sistema, moraju se sabrati svi rizici pojedinačnih delova pa onda donositi zaključak.

Provera istraživanja (teorijskih i eksperimentalno-eksplatacionih) izvršiće se na tri konkretna industrijska postrojenja: u hidroelektranama „Bočac“, „Jajce I“ i fabrika tekstila „Svila“ Čelinac te upoređivati rezultate ovog modela sa drugim tehničkim sistemima.

Za eksperimentalno ispitivanje koristiće se savremeni senzori (receptori, detektori) koji svaku mehaničku veličinu pretvaraju u električni signal i šalju centralnoj memoriji. Program sve analogno/digitalne pretvarače prihvata, upoređuje i šalje izvršnim organima (servomotorima i reaktorima) koji prihvataju signal iz memorijske jedinice i zauzimaju položaj regulišući zahtevani parametar. Sistem automatski vrši upravljanje procesom koji predviđa čak i havarijske situacije, zatvara i otvara rezervne sisteme, a službi održavanja šalje informacije, kotu, postupak otklanjanja zastoja kao i potreban alat. Kad služba završi posao daje šifru centralnom računaru koji ponovo uključuje automatski glavni sistem, a rezervni isključuje. Čovek na monitoru može samo pratiti dešavanja i reakcije mehanizama (izvršnih organa) u vođenju ovako složenih tehničkih sistema koji besprekorno funkcionišu i u dozvoljenim granicama drže parametre u procesu<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Adamović Ž., Ašonja A., Milošević D., *Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.



Pri ispitivanju se vrši:

- merenje korisnosti turbine pri konstantno bruto padu za svaki agregat
- merenje hidrauličkih gubitaka na svakom cevovodu
- merenje vibracija ležajeva na hidrocentrali i na drugim tehničkim sistemima tj. na rotacionoj predilici i na terbodyuvaljci u livnici

## 2.6. ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA

U elektroprivredi Republike Srpske pa i tekstilnoj industriji BiH bilo je dosta otkaza sistema koji su evidentirani ali nisu dovoljno dobro obrađeni i klasifikovani po grupama.

Radi uspešnog ostvarenja postavljenog cilja doktorske disertacije istraživanja su organizovana u okviru sledećih faza:

1. U prvoj fazi istraživanja je analizirana literaturna građa iz predmetne oblasti radi sagledavanja domaće nauke i prakse i njegovog poređenja sa iskustvima razvijenih zemalja u svetu
2. U drugoj fazi istraživanja, na osnovu prikupljenih podataka, postavljen je model rizika za dijagnostiku stanja
3. U trećoj fazi analiziranje već postojećih načina merenja vibracija kao i odabir mesta i instrumenata kojima će se vršiti merenje a koje će se upoređivati sa predhodnim
4. U četvrtoj fazi njihov uticaj na pouzdanost tehničkog sistema, kao i njegova primena i raspoloživost u praksi, (upravo njegovom primenom, izvršena je provera i vrednovanje metoda rizika i dijagnostike stanja hidroelektrana)
5. U petoj fazi istraživanja izvršena je analiza dobijenih rezultata i potvrđena je hipoteza

Mesto eksperimentalnog istraživanja su hidroelektrane „Bočac“ u Republici Srpskoj, „Jajce I“ u Federaciji BiH i fabrici tekstila „Svila“ Čelinac. Kod eksperimentalnog istraživanja pored odabira mesta i instrumenata za merenje vibracija bitno je iskustvo osobe koja rukovodi merenjem vibracija.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja su u ovoj disertaciji obavljena prvenstveno sa ciljem unapređenja modela rizika i dijagnostike stanja sistema, a kroz davanje matematičkog modela, kojim su obuhvaćeni svi relevantni uticajni faktori koji utiču na njihovo tehničko stanje. U okviru doktorske disertacije analizirani su rezultati istraživanja, prevashodno sa ciljem dobijanja optimalnog rešenja sistema održavanja tehničkog sistema i to posmatranih sa aspekta rizika i vibracija. Nakon niza dobijenih rezultata, rezultate je potrebno sistematizovati i predstaviti u grafičkom i tabelarnom najpodesnijem obliku. Veliku pomoć u ovim postupcima pružaju softveri koju omogućuju sistematičan rad. Nakon dobijenih rezultata potrebno je komentarisati rezultate i izvesti zaključke.

## 2.7. NAUČNA I DRUŠTVENA OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA

Naučna i društvena opravdanost istraživanja zasniva se prvenstveno na potrebi za iznalaženje rešenja modela rizika i dijagnostike tehničkih sistema, koji bi bio osnov za formiranje tzv. baze znanja u okviru postrojenja.

Ispravnost korištenja i održavanja savremenih sistema zavisi od postavljenog i korištenog modela rizika i dijagnostike stanja, koji predstavlja bazu primene fleksibilnih sistema. Podaci dobijeni od odgovarajućih senzora i davača potiču iz baze podataka. Ukoliko se koriste na pravi način u okviru baze znanja, uz poštovanje odgovarajućih kriterijuma i ograničenja omogućuje dobijanje korisnih informacija za rad. Osnovu automatizovanih dijagnostičkih sistema čini baza znanja podržana odgovarajućim softverom, koji zahvaljujući dostignućima u oblasti tehnike obezbeđuje produženje veka trajanja tehničkih sistema i povećanja njihove efikasnosti. Optimizacija modela rizika i dijagnostike stanja, izborom najboljih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenata sklopova, čini naučnu opravdanost ovih istraživanja.

Modeli rizika i dijagnostike stanja analiziranih sklopova praćeni su primenom modela i algoritama koji daju potpunu metodologiju u određivanju sigurnosti funkcionisanja komponenti sistema. Kod predilice se može doprineti pravovremenom zamenom i remontom istrošenih komponenti sklopova u periodima kada OE - predilicu treba očistiti, čime se postiže ušteda u njenom proizvodnom vremenu rada. Na ovaj način povećana je produktivnost rada i opravdanost uvođenja optimizacije modela pri radu komponenata<sup>3</sup>. Nakon što se preispitaju mogućnosti već postojećih modela rizika tehničkih sistema u poglavlju teorijskih istraživanja će se razvijati novi model koji će se u eksperimentalnom delu implementirati na zadate složene tehničke sisteme.

Ovo istraživanje pokušava da približi realnom stanju sigurnost komponenata sistema, a time i čitavog tehničkog sistema. Znajući značaj za državu ovih tehničkih sistema na kojima su vršena istraživanja, a to su hidrocentrale i fabrika tekstila daje društvenu opravdanost ovog istraživanja. Ovako stečena pozitivna znanja se mogu prenositi i na druge hidrocentrale pa i druge tehničke sisteme.

## 2.8. OČEKIVANI REZULTATI

Polazeći od samog naziva doktorske disertacije, jasno je da se radi o izuzetno složenom i ozbiljnom zadatku. Ono što se može uraditi je utvrditi osnovna opredeljenja i ukazati na neophodne i neposredne korake na racionalizaciji održavanja tehničkih sistema u Republici Srpskoj. Godine starosti tehničkih sistema, primena klasičnih i krutih koncepata održavanja jasno odražavaju stanje naših tehničkih sistema. U poređenju sa održavanjem tehničkih sistema u zemljama Evropske unije, SAD i Rusije razlika je enormna. Njihov sistem održavanja je centralizovan, vrše ga samo specijalizovana preduzeća, remontu traju kraće, manji je broj zaposlenih na održavanju, manji je broj zaposlenih na elektranama i dr.

---

<sup>3</sup>Jurić S., Radić R., Adamović Ž., Kenjić Z., *Troškovi održavanja postrojenja u elektroprivredi*, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 3-4 od 2014.

Primenom modela rizika i stalnog praćenja vibracija, dolazi se do savremenog koncepta održavanja čime se može unaprediti stanje naših tehničkih sistema i izjednačiti sa stanjem tehničkih sistema u savremenim zemljama.

Primenom savremenog koncepta održavanja i upravljanja održavanjem, mogu se postići sledeća unapređenja:

- povećanje raspoloživosti
- povećanje pouzdanosti
- povećanje međuremontnog perioda
- smanjenje vremena trajanja remonta
- povećanje kvaliteta opreme
- produženje veka trajanja tehničkih sistema
- smanjenje troškova održavanja
- smanjenje troškova eksploatacije
- smanjenje broja zaposlenih

Mogućnost primene očekivanih rezultata ogleda se u tome da se mogu primeniti na sva slična postrojenja u zemlji pa i šire. Podaci koji ponuđeni model obezbeđuje pruža mogućnost najboljeg održavanja u tehničkim sistemima. S obzirom da su ovi tehnički sistemi od nacionalnog značaja potreba za primenom rezultata jednog ovakvog istraživanja je veoma velika.

Praćenjem razvoja predioničkih mašina, može se slobodno reći da su OE - predilice mašine koji spadaju u najsavršenije tehničke sisteme predioničke tehnologije danas. Obzirom da je tendencija domaće tekstilne industrije da se priključi proizvodnji najfinijih prediva nameće se potreba za uspešnom eksploatacijom savremenih predioničkih mašina. Kako su ovo tehnički sistemi moderne generacije kod nas, težnja je da se isti analiziraju u eksploataciji i da se postupcima planskog održavanja obezbedi veća sigurnost njihovog funkcionisanja, a time i veća produktivnost.

### 3.0. PROIZVODNI SISTEMI, RIZIK, HAVARIJE USLED POVIŠENOG NIVOVA VIBRACIJA

#### 3.1. TEHNIČKI SISTEMI U KOJIMA SU VRŠENA ISPITIVANJA

Glavna ispitivanja su vršena u HE „Bočac“ kod Banja Luke čije su osnovne karakteristike:

- Tip turbine „Fransis“ vertikalna
- Nominalna snaga turbine 2 x 57.6 MW
- Nominalni stepen korisnosti  $\eta = 94,5\%$
- Prečnik radnog kola 4050 mm
- Masa radnog kola 23,58 t
- Masa vratila 37,4 t
- Nominalni broj obrtaja 150 o/min
- Broj obrtaja pri pobegu 322 o/min

Vratilo turbine direktno je spojeno sa sinhronim generatorom.

Tehnički podaci generatora:

- Snaga generatora: 2 x 65 MVA
- Napon generatora: 10,5kV 50Hz
- Nominalna struja: 3574 A
- Nominalni stepen korisnosti:  $\eta = 98\%$
- Masa: stator 200 t, rotor 150 t
- Tip pobude: statička; tiristorska
- Nominalni parametri pobude: 206V, 1225 A
- Faktor snage:  $\cos\phi = 0,85$

Hidroelektrana „Bočac“ je puštena u rad 1981. godine, tokom rata (1992 –1995) je bila znatno oštećena.



Slika 3.1. Poprečni presek elektrane „Bočac“

Druga hidroelektrana na kome su vršena ispitivanja je "Jajce I".

Ona se nalazi na levoj strani Vrbasa, 7 km udaljena od grada Jajca. Hidroelektrana je derivacijskog tipa i koristi vodu prirodne akumulacije Velikog plivskog jezera. Tunelom dužine 5700 m i promera 5,40 m voda se dovodi na turbine u HE „Jajce I“. Mašinska zgrada i razvodno postrojenje su podzemnog tipa. Elektrana je puštena u pogon 1957. godine. U mašinskoj zgradi su ugrađene dve Francis turbine čiji je instalirani protok 35 m<sup>3</sup>/s idva sinhrona generatora snage 2 x 36 MVA. Srednja godišnja proizvodnja je 233 GWh, aukupna snaga elektrane je 60 MW. Elektrana je pripremljena za daljinsko vođenje iz DC-a Mostar. Tokom poslednjeg rata elektrana je bila oštećena, poplavljeni su turbinski prostori, tako da su postrojenja i oprema zatečeni u vrlo lošem stanju. Već 1996. godine započeta je sanacija štete i pripreme za obnovu elektrane. Do 2000. godine obnovljena su uglavnom sva vitalna postrojenja kao što su kranovi, sistemi drenaže, sistem upravljanja agregatima i pomoćnim pogonima, te rasklopna postrojenja 110 kV i 35 kV u elektrani, čime je sigurnost i pouzdanost dovedena na zadovoljavajući nivo.

Treće istraživanje je obuhvatilo rotorsku predilicu u tekstilnoj fabrici "Svila" Čelinac u RS. Princip rada rotorskog - bezvretenskog postupka pređenja je u formiranju pređe od pojedinačnih vlakana koja su prethodno izdvojena iz izlazne trake<sup>4</sup>.

Kada pogledamo razvoj predioničkih mašina, slobodno se može reći za rotacione predilice da spadaju u savršene tehničke sisteme predioničke tehnologije.

„Svila” Čelinac poseduje 4 savremene predilice švajcarskog proizvođača Rieter. Tehnički sistem OE – predilica se sastoji od pet osnovnih sklopova:

1. Pogonske grupe
2. Prenosa sistema snage od pogonske grupe do boksa pređenja
3. Sklop boks pređenja (srce OE - predelice)
4. Sklop za namotavanje kalemova gotovom pređom i
5. Automat za navezivanje prekinute pređe

Sekcija (blok) ima po 20 rotorskih mesta pređenja (boksa pređenja) i isto toliko i sklopova za namotavanja kalemova gotovom pređom. U svom radu sastavne komponente ovih sklopova su izložene habanju usled velikih ugaonih brzina i vibracija.

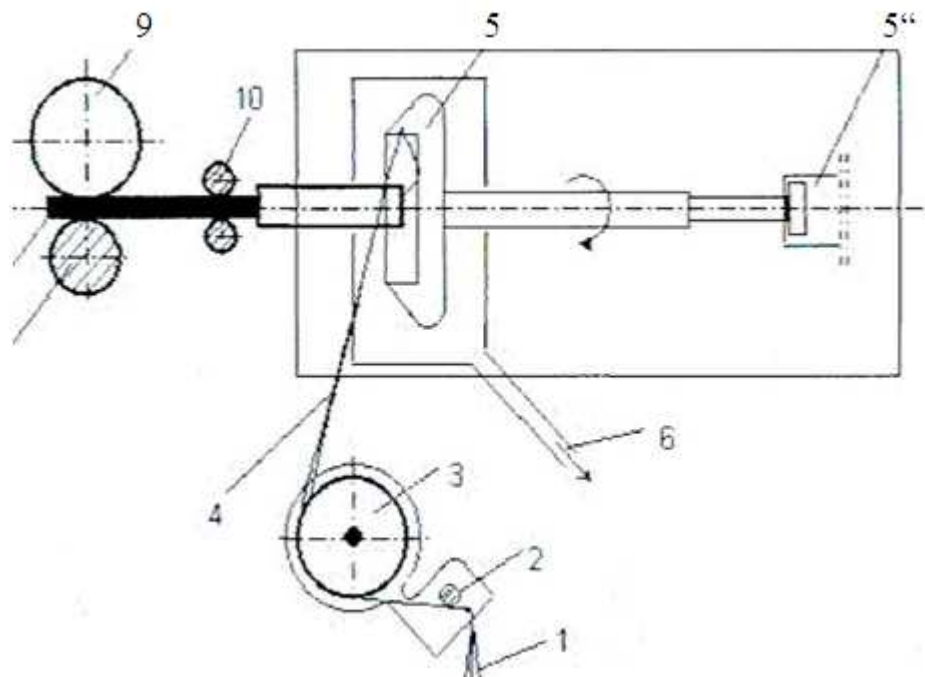
Materijal se prema bezvretenskom postupku pređenja u vidu trake (1) preko uvodnog valjka (2) uvodi u zonu dejstva uređaja za razvlakivanje (3). Valjak za razvlakivanje čija je brzina obrtaja od 7000-8000 (o/min) obložen je specijalnom testerastom garniturom tako da se iz trake izvlače pojedinačna vlakna (4), koja se zatim uz pomoć struje vazduha transportuju u rotor za pređenje (5). Pojedinačna izdvojena vlakna uz pomoć vazdušne struje ulaze tangentno na zid rotora. Usled velike brzine rotora (sa prečnikom rotora Ø32 i brzine rotora 115 000 (o/min)) vlakna se pakuju u žleb rotora u vidu klinastog paralelizovanog snopa. Obrtanjem rotora usled dejstva centrifugalne sile i dejstva Koriolisovog ubrzanja tj. sile, formira se izvestan oblik balona pređe. Ispredena pređa iz rotora se preko odvodnih valjaka (10) namotava na kalem (9).

Odvođenje pređe se kreće brzinom od 25-220 (m/min), kapacitet kalema je do 5 (kg) sa namotanom pređom na njemu (obično je kapacitet kalema do 2 (kg) sa namotanom pređom). Šema bezvretenskog načina pređenja kod OE predilice tipa R1, proizvođača

---

<sup>4</sup>Jurić S., Radić R., Blaženović R., Value analysis of workereliability of integral parts of a circuit forcoil winding with finished yarn of oe –spinning machine from the aspect of technology of maintenance, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA), Vol. 22, (2016)(ISSN 1310-4772) (M23)

švajcarske firme Rieterr je prikazana na slici 3.2.



Slika 3.2. Šematski prikaz bezvretenskog načina predenja

### 3.2. UZROCI KOJI DOVODE DO NEISPRAVNOSTI ELEKTRANA

Hidroelektrane u BiH rađene su od 1955. pa do 1980. što pokazuje da su na kraju životnog veka. Glavni uzroci koji dovode do neispravnosti elektrana su: neravnoteža, nesaosnost, noseći ležaji, mehanička labavost, termalno povijanje rotora, labavost rotora, labavost namotaja, turbine, pumpe i dr.

Sledeći problemi koji stvaraju neravnotežu su: neujednačena akumulacija prljavštine na lopaticama rotora, nepostojanje homogenosti u livenim delovima (kao što su mehurići, otvori za vazduh), ekscentričnost rotora, defleksija rolni, greške mašina u dizajnu, neravnomerna raspodela mase na električnom motoru rotora ili krila, neravnomerna erozija i korozija impelera pumpe, nedostatak težine ravnoteže, savijena osovina i dr.

Nesaosnost se dešava kad centralna linija uparenih osovina ne može da se poklopi. Ukoliko je nesaosnost centralne linije takva da je podudarna to je paralelna nesaosnost. Ukoliko je nesaosnost osovine takva da se sreću u tački ali da nisu paralelne, onda je ta nesaosnost nazvana uglastom. Gotovo svi uslovi za nesaosnost mašina viđeni u praksi su kombinacija ove dve osnovne vrste. Nesaosnost se tipično dešava pod sledećim uslovima: netačno postavljene komponente (kao što su pumpe i slično), relativna pozicija komponenti koje se premeštaju posle postavljanja, iskrivljenja usled sila koje se javljaju u cevovodima, temperatura indukuje rast strukture mašine, spojnica nije normalna na osu osovine.

Rotaciona labavost; Ne-rotaciona labavost: Labavost između mašine i njene osnove raste na komponenti vibracije od 1X u pravcu gde je najmanja krutost. Fleksibilnost osnove ili labavost može biti izazvana zavrtnjima, korozijom ili prskanjem postavljenog dela.

Termalno povijanje rotora; Neujednačeno zagrevanje rotora usled neizbalansiranog rotora izaziva iskrivljenost, ili povijanje rotora rezultira uslovima neravnoteže sa svim uobičajenim simptomima.

Labavost rotora; Ponekad rotor klizi po osovini, uvek naizmenično u zavisnosti od temperature i izazivajući ozbiljne vibracije na 1X i harmonike. Iznenaadne promene opterećenja ili napona mogu podstaći iste.

Ekscentricitet rotora; Ako rotor nije okrugao, izaziva ekscitaciju na 1X i neuravnotežene magnetne sile koje dovode do vibracija na frekvenciji klizanja puta broj polova. Ova komponenta nestaje momentalno kada se snaga prekine i ovo je test potvrđivanja.

Turbina; Turbine često pokazuju snažnu komponentu takozvani iznos lopatica, što je u stvari broj lopatica turbine pomnožen sa RPM rotora. Veličina ove komponente zavisi od unutrašnje geometrije jedinice. Ukoliko se menja, kao što je, na primer, usled prskanja, savijanja ili stvaranja rupica na lopaticama, komponenta prolaza lopatica na spektru se menja, obično na gore. Ukoliko se lopatice turbine habaju jednako, frekvencija prolaza lopatica je jednako uniformna, ali ukoliko je deo rotora oštećen, kao što je slomljena lopatica, komponenta prolaza će biti modulirana RPM rotora ili broj prskalica turbine puta RPM i izazivati bočne opsege na spektru.

Pumpe; Postoji mnogo vrsta pumpi koje se koriste i njihove vibracije variraju u širokom opsegu. Kada se posmatraju vibracije pumpi, važno je da operativni uslovi budu uniformni od jednog merenja do drugog da bi se obezbedila konzistentnost. Pritisak usisavanja, pritisak pražnjenja i naročito indukcija vazduha i kavitacija utiču na izgled vibracija. Nastanak vibracija usled delovanja aerodinamičkih i hidrauličnih sila. Vibracije ovog tipa se javlju na ventilatorima, pumpama i dr. Mogu se odmah identifikovati jer će frekvencija biti jednaka: broj lopatica ili krilca na radnom kolu hidraulične pumpe puta broj obrtaja mašine u minuti.

Tamo gde se javljaju prekomerne vibracije ovog tipa, mogu se izvesti ispitivanja rezonancije radi utvrđivanja koji deo mašine izaziva problem. Ukoliko su aerodinamičke i hidrauličke vibracije nedozvoljene i ako nema rezonantnog stanja, problem može poticati od nepropisnog projektovanja mašine ili susednog cevovoda.

Dodatni problemi vibracija i buke koji se javljaju pri kretanju tečnosti ili gasova obuhvataju kavitaciju, turbulenciju proticanja i sl. Njihove karakteristike vibracija su slične vibracijama koje nastaju usled aerodinamičkih i hidrauličnih sila<sup>5</sup>.

Frekvencija prolaska lopatice (*Blade Pass Frequency*), kako smo rekli, izražava se kao broj lopatica rotora pomnožen s brzinom obrtanja (RPM). Ova frekvencija je svojstvena pumpama, ventilatorima i kompresorima, ali obično ne uzrokuje problem. Međutim velike amplitude BPF (i harmonici) mogu biti generisane u pumpi ako razmak između rotirajućih lopatica i statičnih krilaca nije jednak. Visoki BPF može se pojaviti iako prsten za trošenje impelera "zapeče" na osovini ili ako popuste varovi koji drže krilca difuzera. Takođe, visoki BPF može nastati zbog naglih promena pravaca cevovoda, prepreka koje ometaju slobodan protok, postavki prigušnika ili zbog ekscentričnog rotora unutar kućišta.

---

<sup>5</sup>International Standard of Organisation ISO 7919-2, Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shaft – Part 2

## 4.0. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

### 4.1. MODELI RIZIKA

Procena - sagledavanje rizika je postupak kojem je cilj ustanoviti „ranjivosti“ sistema, uočiti potencijalne opasnosti (rizike), te na odgovarajući način kvantifikovati moguće posledice. Na osnovu ovoga odabrati najdelotvorniji način zaštite, odnosno proceniti opravdanost uvođenja dodatnih "protivmera". Analizom rizika moraju se utvrditi sledeće činjenice:

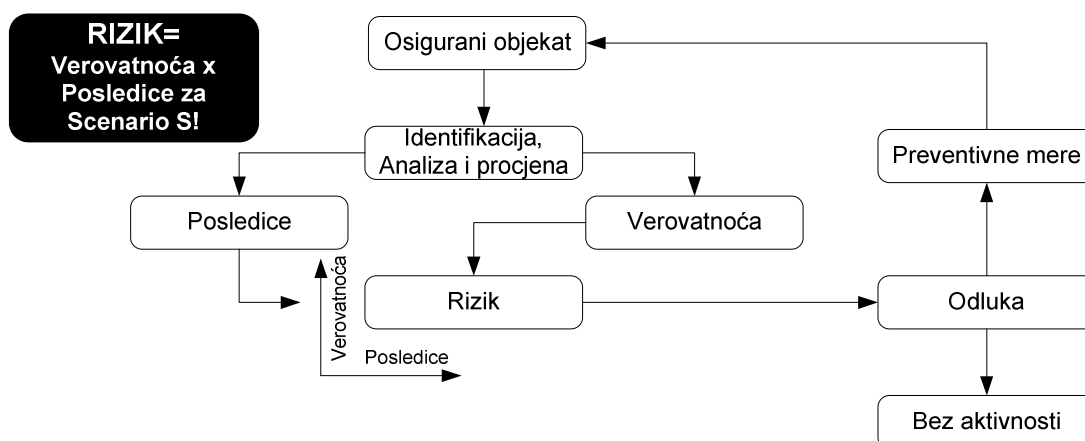
- kritični resursi i njihova vrednost (relativna ili novčana)
- potencijalni gubici koje prouzrokuje ostvarenje opasnosti
- pregled mogućih opasnosti i verovatnoće njihove pojave
- preporučene protivmere (nadzor) i zaštita

Na temelju dobijenih rezultata potrebno je odlučiti kakve protivmere treba preduzeti<sup>6</sup>. Postoje tri mogućnosti delovanja koje nisu međusobno isključive:

- da se smanji rizik
- da se prenose rizik
- da se prihvati rizik

Na osnovu isplativosti preduzeća odabira načina delovanja ovih predhodno nabrojani kriterija. Smanjenje rizika predstavlja proces u kojem se na temelju provedene analize rizika nastoje provesti odgovarajuće protivmere i uvesti sigurnosni nadzor da bi se zaštitili resursi organizacije. U tom postupku nastoji se smanjiti verovatnoća opasnosti i njen uticaj na proces.

U koliko se pokaže isplativijim rizik je moguće preneti na treću stranu (npr. Osiguravajuće društvo). Isto tako, moguće je da implementacija protivmera ili prenos rizika nisu isplativi. U tom slučaju preduzeće može odlučiti da prihvati rizik, odnosno troškove koji iz toga proizilaze. Jedini pristup koji u upravljanju rizikom nije prihvatljiv je ignorisanje ili zanemarivanje rizika. Treba znati da je upravljanje rizikom neprekidan proces, te da se odnos vrednosti resursa, ranjivosti i opasnosti s vremenom menja<sup>7</sup>.



Slika 4.1. Evolucija rizika

<sup>6</sup>Dorfman, M S., *Risk Management and Insurance*, 6th edition, 1998.

<sup>7</sup>Adamović, Ž., i dr., *Upravljanje rizikom*, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, 2008.

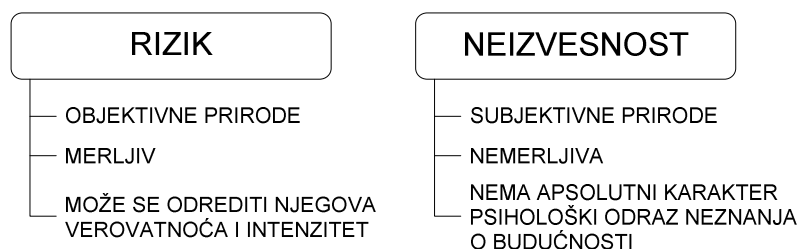


Sa fenomenom rizika postoje neki osnovni pojmovi koji su tesno povezani, pa se može reći i da su to elementi rizika. Elementi rizika su: neizvesnost, opasnost, hazard, šteta, neposredan uzrok, šansa ili mogućnost da se šteta dogodi (subjektivna i objektivna verovatnoća) i štetni događaj.

#### - Neizvesnost

Izraz neizvesnost često koristi u vezi sa rizikom, pa čak i dolazi do mešanja ovih pojmova potrebno je objasniti vezu između ova dva pojma. Naime, neizvesnost i rizik se međusobno odnose proporcionalno, a izvesnost i rizik obrnuto proporcionalno. Što je stepen neizvesnosti manji i rizik će biti manji i obrnuto. Kad se misli na neizvesnost obično se pod time smatra neka sumnja koja se zasniva na nedostatku znanja o tome šta će se dogoditi, ili šta se neće dogoditi u budućnosti. Odnosno to je sumnja u našu mogućnost da predvidimo budući ishod sadašnje akcije. Ovaj pojam je suprotan pojmu izvesnost koji označava sigurnost u pogledu ishoda određene situacije, odnosno da ne postoji nikakva sumnja. Neizvesnost je jednostavno psihološki odraz nedostatka saznanja o budućnosti, odnosno ovaj termin opisuje stanje uma. Neizvesnost nastaje kada neka osoba oseti da njegovo znanje o ishodu date situacije nije sigurno. Ponekad se pojam neizvesnost izjednačava sa pojmom rizika, iako je neizvesnost samo jedan od činilaca rizika. Neizvestan je događaj za koji se ne zna da li će uopšte nastati. Prema pravnom tumačenju ono što je moguće nije samim tim i sigurno da će se dogoditi. Stoga je i neizvesnost elemenat osiguranog rizika različit od mogućnosti (iako se nužno nadovezuje na njega). Ako se pod rizikom podrazumeva splet okolnosti pod kojim se može dogoditi neka šteta, onda je neizvesnost psihološki odraz neznanja o budućnosti koji se stvara kod pojedinca koji prepoznaje rizik<sup>8</sup>.

Kada postoji rizik ishodi se ne mogu predvideti sa sigurnošću. Stoga rizik izaziva neizvesnost. Međutim, za razliku od neizvesnosti koja je subjektivni koncept i koja se ne može direktno meriti rizik je objektivni koncept, što znači da se on može meriti (slika 4.2.).



Slika 4.2. Razlika između rizika i neizvesnosti

Kod kompleksnih aktivnosti, kao što je to recimo neki poslovni poduhvat neke osobe su veoma obazrive, dok su druge mnogo agresivnije u zavisnosti od toga kako koji pojedinac sagledava rizik u datom poduhvatu. Ovo sagledavanje rizika zavisi od informacija koje jedna osoba može da koristi da bi procenila mogućnost ishoda kao i od sposobnosti pojedinca da proceni date informacije. Samo jezičko tumačenje reči neizvesnost ne pravi ove razlike, što u ovom slučaju može da bude od velike važnosti. Drugim rečima, postoje različiti nivoi neizvesnosti, kako je to prikazano u tabeli 4.1.

<sup>8</sup>Jurić S., Radić R., *Osiguranje kao pristup upravljanja rizikom*, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije

Tabela 4.1. Nivoa neizvesnosti

NIVO NEIZVESNOSTI	KARAKTERISTIKE	PRIMERI
Nema neizvesnosti	Ishod može da se predvidi veoma precizno	Fizički zakoni, prirodne nauke
Nivo 1 (objektivna neizvesnost)	Ishodi se identifikuju a verovatnoće su poznate	Igre na sreću, karte, bacanje kockica
Nivo 2 (subjektivna neizvesnost)	Ishodi se identifikovani, ali su verovatnoće nepoznate	Požar, automobilska nesreća
Nivo 3	Ishodi nisu sasvim identifikovani, ali su verovatnoće nepoznate	Svemirska istraživanja, genetska istraživanja

Na organizacionom nivou troškovi neizvesnosti se najbolje mogu sagledati u domenu pogrešnog lociranja resursa. To znači da neka organizacija ne razmešta svoje resurse na optimalni način jer neizvesnost zamagljuje njene procene ili da zbog straha od gubitaka da ta kompanija ne investira u određene aktivnosti.

Nivo 1 predstavlja najniži nivo neizvesnosti, identifikovani su svi mogući ishodi i poznata nam je verovatnoća događanja. Ovaj nivo se može opisati i kao objektivna neizvesnost. Kod nivoa 2 nismo sigurni u pogledu verovatnoća, iako su identifikovani mogući ishodi. Kod nivoa 3 nismo sigurni u pogledu prirode samog ishoda, jer on nije u potpunosti identifikovan. Primeri neizvesnosti koji spadaju u ovaj nivo su prvi pokušaji svemirskih istraživanja i razvoj mirnodopske upotrebe atomske energije.

Najvažniji rizici sa kojima se susreću organizacije pripadaju nivoima neizvesnosti 2 i 3. Organizacija mora da se pouzda u metode koje nisu naučne da bi procenila i kontrolisala rizike koji se nalaze na ovim nivoima neizvesnosti. Nivo neizvesnosti određenog tipa rizika može da zavisi i od entiteta koji se suočava sa rizikom<sup>9</sup>. Mnogi oblici osiguranja od odgovornosti pripadaju nivou 3 neizvesnosti. Ishod izloženosti riziku od odgovornosti zavisi od budućeg razvoja zakonskog okruženja, što obuhvata propise i zakonske akte za odedivanje da li je neki pojedinac ili entitet odgovoran. I ako je to tako, koliki iznos pokriva tu odgovornost. Međutim, osiguravači limitiraju iznos koji uplaćuju u tim slučajevima, što im omogućava da identifikuju bar dva ishoda (najmanji i najveći iznos), čim postižu da neizvesnost pomere sa nivoa 3 na nivo 2.

#### - Opasnost

Opasnost se razlikuje od pojma rizika i definiše se kao uzrok štete. Opasnost je nešto što može da izazove gubitak neke vrednosti, kada je ta vrednost izložena uticaju date opasnosti. Opasnosti mogu da deluju samostalno ili kumulativno sa drugom opasnosti. Neke uobičajene opasnosti koje izazivaju oštećenje imovine ili njen gubitak obuhvataju požar, munje, oluje, grad, tornada, zemljotrese, krađe i provale. Osiguravajuće polise obezbeđuju finansijsku zaštitu od šteta koje su izazvane raznim opasnostima. Opasnosti mogu biti: prirodne (ekstremni događaji kao zemljotres, poplava i sl), biološke (zarazna bolest, genetska modifikacija) i industrijske prirode (štetni materijali iz proizvodnog procesa).

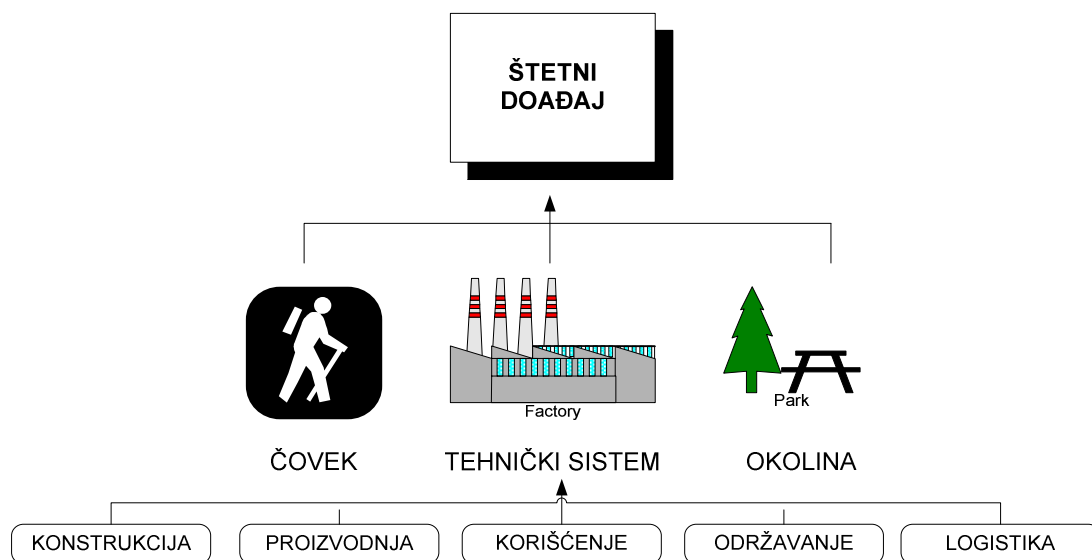
<sup>9</sup>Jurić S., Radić R., *Osiguranje kao pristup upravljanja rizikom*, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije,

## - Hazard

Hazard je okolnost koja stvara ili povećava verovatnoću da dođe do štete, odnosno to je okolnost koja povećava učestalost ili ozbiljnost štete. Rizici se mogu kontrolisati, umanjiti ili minimizirati. Hazard, odnosno indirektna opasnost ili postoji ili ne postoji. Ona se nemože ni kontrolisati ni minimizirati. Recimo, jedan od veoma važnih zadataka svakog osiguravača je da pokuša da spreči štetnu selekciju analizom hazarda koji okružuju neki rizik. Postoje četiri glavna tipa hazarda: fizički, moralni, psihološki i hazard zakonske odgovornosti.

## - Osnovni uticaji na pojavu štetnog događaja

Slučajni činioci koji utiču na pojavu štetnih događaja mogu da se analiziraju i svrstavaju na različite načine, zavisno od prilaza ili bližeg cilja posmatranja. Za plodotvorno preventivno delovanje, odnosno sa stanovišta metoda preventivnog inženjerstva dva nivoa analize imaju poseban značaj. Prvi se odnosi na širi okvir posmatranja koji obuhvata sve uticajne činioce, a drugi na analizu uticaja koji su pretežno vezani za sam tehnički sistem<sup>10</sup>. Razumljivo je da između ova dva moguća prilaza klasifikaciji uticajnih činilaca postoje mnoge veze i interakcije, što se može videti i iz šematskog prikaza datog na slici 4.3.



Slika 4.3. Veze između uticaja na pojavu štetnog događaja

Sa ove šeme se vidi da se u prvom opštem slučaju svi činioci koji utiču na pojavu štetnog događaja mogu podeliti na tri grupe:

- čovek (svi ljudi koji na bilo koji način, direktno ili indirektno utiču na rad sistema, odnosno na pojavu štetnog događaja),

<sup>10</sup> Fusek G., *Upravljanje rizikom u osiguranju*, Svijet osiguranja,

- tehnički sistem (mašine, objekat i svi drugi elementi) tehničke infrastrukture i podrške, kao što su sistemi snabdevanja električnom energijom, vodom, pogonskim i drugim potrošnim materijalima, putevi, komunikacije itd.) i
- okolina (klimatsko-meteorološki činioci i svi elementi koji je stvaraju)

## 4.2. ODRŽAVANJE SISTEMA I UPRAVLJANJE RIZICIMA

Za održavaoce tehničkih sistema energetske sistemi predstavljaju pravi izazov jer su svojim brzim razvojem, u tehničkom smislu probudili stagnaciju tehničkih sistema za održavanje, metode i tehnike održavanja i razvili tehničku, pogotovu preventivnu dijagnostiku sistema. Naučnici, stručnjaci, inženjeri i tehničko osoblje koje se bavi tehničkom dijagnostikom i preventivnim održavanjem u industriji i van nje, skoro da istim elanom i motivacijom otkriva-inovira (nove-stare) postupke ne bi li predupredio svaki otkaz ili moguću havariju na energetskom sistemu. Pri tom se svakako oseća potreba smanjenja rizika od otkaza sistema, ali i osiguranja imovine, energetskog tehničkog sistema, resursa, radne i životne sredine<sup>11</sup>.

Održavanja tehničkih sistema najbolje se prate preko logističkih parametara: pouzdanosti, raspoloživosti i gotovosti, funkcionalne podobnosti, pogodnosti održavanja i troškova (ekonomske efikasnosti). Svaki logistički parametar je međusobno povezan sa drugim i ima svoju ekonomsku cenu. Upravljanje sistemom održavanja tehnoloških sistema obuhvata: planiranje i sprovođenje postupaka aktivnosti održavanja koji su identifikovani, predviđeni projektom tehnološkog sistema ili su posledica otkaza tehničkog sistema. U proceduri upravljanja održavanja tehnoloških sistema je i segment sigurnosti rada sistema i zaštita radne i životne sredine, ambijent u kome radi posmatrani tehnički sistem; a u drugom slučaju kada se posmatra sam tehnički sistem, na pet grupa:

- konstrukcija/projekat (konstrukcijska, projektantska, radionička i prateća dokumentacija)
- proizvodnja (svi tehnološki elementi proizvodnog procesa, uključujući sistem upravljanja kvalitetom)
- održavanje (svi elementi sistema održavanja sa stanovišta koncepcije, tehnologije i organizacije i svi elementi koji su direktno ili indirektno vezani za proces održavanja i elemente logističke podrške održavanja)
- korištenje (način rada, odnosno disciplina u sprovođenju zahtevanih odnosno preporučenih postupaka za korištenje tehničkog sistema)
- logistička podrška (svi elementi integralnog tehničkog obezbeđenja koji su nužni za rad i održavanje posmatranog sistema)

Upravljanje rizikom se razvija naročito poslednjih deset godina. U njoj se javlja niz praktičnih i naučnih problema sa kojim se suočavaju pojedinci, nosioci poslovnih poduhvata, menadžeri osiguravajućih društava i teoretičari osiguranja. Upravljanje rizikom je funkcija rukovođenja isto kao što je to upravljanje marketingom ili finansijama. Pod upravljanjem rizikom ne podrazumeva se samo upravljanje onim rizicima koji su u domenu osiguravajućih društava. Ovo treba napomenuti jer su pojedinci i poslovni subjekti izloženi velikom rasponu rizika koji nisu osigurani. Osiguranje je samo deo procesa upravljanja rizicima. Menadžment osiguravajućih društava ima najvišu odgovornost za upravljanje svim vrstama rizika, uključujući čiste i špekulativne rizike.

<sup>11</sup>Kuburović, M., Petrov, A., *Zaštita životne sredine*, SMET i Mašinski fakultet, Beograd, 1994.

Dobro organizovana osiguravajuća društva imaju visoko obučene službenike koji su specijalizovani za proučavanje rizika. Upravljanje rizikom je profesionalni posao koji je star koliko i moderno osiguranje. Većina tehnika u upravljanju rizikom se koristi dosta dugo. U novije vreme samo im se daju savremena i popularna imena. Treba imati u vidu činjenicu da upravljanje rizikom nije isto što i rukovođenje osiguravajućim društvom. Upravljanje rizikom znači imati u vidu rizike koji se mogu osigurati i one koji se ne mogu osigurati ali se izborom odgovarajućih tehnika odnosno valjanim odlukama mogu sprečiti. Tradicionalno posmatrano kupac premije osiguranja nastoji da za utrošeni dinar dobije osiguranje. Upravljanje rizikom znači optimizaciju troškova rukovođenja rizikom na način da niko ne bude oštećen. Upravljanje rizikom je više od rukovođenja osiguravajućim društvom<sup>12</sup>. U tom slučaju radi pojašnjenja menadžment je upravljanje rizikom, a obuhvata poslovnu filozofiju, kulturu i klimu organizacije kao i neke poslovne funkcije. Proces upravljanja rizikom teži ka ostvarenju cilja tog upravljanja. Upravljanje rizikom izvodi se u šest koraka:

- 1) utvrđivanje ciljeva
- 2) identifikacija rizika
- 3) procena rizika
- 4) ocena alternativa i izbor sredstava za regulisanje rizika
- 5) primena odluke i
- 6) ocena i korekcije

Oduvek je rizik privlačio pažnju velikog broja istraživača i naučnika, ali uglavnom sa različitih aspekata, tako da ni do danas nemamo jedinstvenu definiciju rizika. Nije problem samo u razlici pristupa već i u pojavnosti prirodni rizika, što je postalo fenomen, pa rizik nije ni moguće jednoznačno pojasniti. Pojam rizika je vrlo relativiziran, ali svim rizicima je zajedničko to da moraju biti budući i neizvesni događaji. U najopštijem slučaju pod rizikom se smatra nastupanje jednog ekonomski štetnog događaja. Rizik je zbog svojih osobina misaoni pojam čije intuitivno značenje može da se poveže sa nedostatkom znanja o budućnosti i mogućnostima nepovoljnih ishoda<sup>13</sup>. Sve definicije upućuju na to da je pojam rizika svojevrsan fenomen pa čak i važno filozofsko pitanje. Zbog svega toga, može se reći da je rizik imaginacija sve do momenta njegovog nestanka. Stoga je najbolje da se rizik, kao kompleksna veličina koja obuhvata verovatnoću nastanka štetnog događaja i očekivanu posledicu tog događaja i objasni preko ove dve veličine: preko verovatnoće (mogućnost da se šteta dogodi) i preko intenziteta (obima ili veličine štete, što se obično izražava preko novčanog iznosa). Pri tome, dati sistem događanja štete mora da bude zaokružen (da mu se odrede granice) i da se nalazi u okviru nekog određenog vremenskog intervala. Da bi se u potpunosti sagledao neki rizik, odnosno njegova verovatnoća i intenzitet, potrebno je poznavati i takozvane elemente rizika, odnosno neizvesnost, opasnost, hazard, neposredan uzrok, štetni događaj i mogućnost da se šteta dogodi.

#### **4.2.1. ANALIZA RIZIKA U OBLASTI TEHNIČKIH SISTEMA**

Kod analize pouzdanosti ili bezbednosti je primarni cilj da se identifikuju opasnosti, kako bi bili u mogućnosti da redukujemo ili eliminišemo verovatnoću pojave neželjenog događaja i njegove konsekvence po čoveka, njegovu okolinu ili ekonomiju. Do ovoga

---

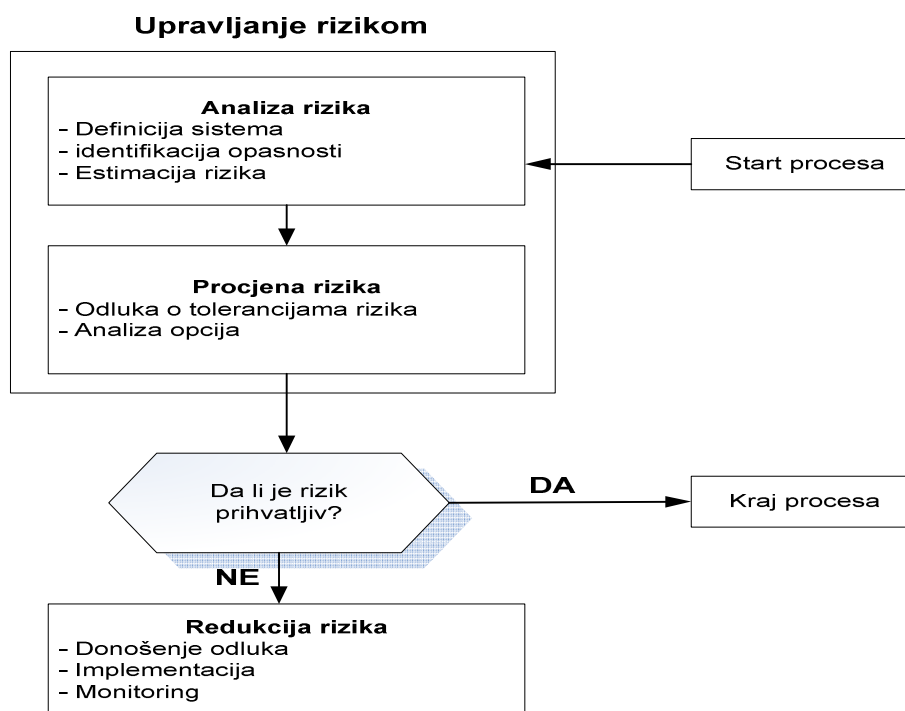
<sup>12</sup>Haimes, Y., *Risk modeling, assessment and management*, John Wiley and Sons, New York, 1998.

<sup>13</sup> Stamenović D., Vasić L., Grbović M., *Risk menadžment i osiguranje*, Preventivno Inženjersvo, broj 2/2001, Beograd

dolazi kada je inicijalni događaj praćen greškom sistema. Kumamoto i Henley su naveli događaje koji su uzročnici osnovnih tipova otkaza:<sup>14</sup>

- događaji koji su posledica ljudskog faktora, tj.greške u dizajnu i održavanju
- događaji koji su posledica hazarda (npr. curenje ventila)
- događaji koji su posledice uticaja okoline (zemljotresi, poplave)

Upravljanje rizikom pronalazi svoje mesto u ubrzanom razvoju tehnologija i porastu opšte brige o bezbednosti i zagađenju, i obezbeđuje procedure za procenjivanje i upravljanje rizikom. Termin „upravljanje rizikom“ se generalno koristi kako bi se obuhvatio celokupan proces uključujući kvalitativne i kvantitativne metode. On identifikuje opasnosti i procenjuje rizik, redukuje troškove ukupne očekivane štete i smanjuje verovatnoću, posledicu pojave događaja ili oboje zajedno sa implementacijom i monitoringom. Svrha upravljanja rizikom je ista za različite oblasti i discipline, naime da zaštititi društvo od uticaja opasnih sredstava i događaja. Ne postoji eksplicitna definicija procesa upravljanja rizikom. U svakom slučaju on u sebi inkorporira aktivnosti: identifikacije opasnosti, određivanja rizika, procenjivanja rizika i analize rizika. Na polju inženjeringa, gde se razmatra rizik tehničkih sistema (mašina i postrojenja), upravljanje rizikom ima korene u industriji sa kompleksnom, visoko razvijenom tehnologijom i zahtevima u smislu bezbednosti, kao što su elektrocentrale, hemijska industrija, aeronautika i elektronska industrija<sup>15</sup>.



Slika 4.4. Interaktivni proces upravljanja rizikom

Na slici 4.4. prikazana je najčešće korištena definicija procesa upravljanja rizikom koja je sadržana u standardu SS-EN 1050:1996 vezanom za bezbednost tehničkih sistema. Takođe, već pomenuti standard IEC 60300-3-9:1995 u analizi rizika sadrži iste odnose

<sup>14</sup>Haimes, Y., *Risk modeling, assessment and management*, John Wiley and Sons, New York, 1998.

<sup>15</sup> Vujović R., Jovanović, S., Todorović J., *Unapređenje metoda upravljanja rizikom u industrijskim postrojenjima*

između aktivnosti, kao proces upravljanja rizikom. Prvi korak analize rizika daje definicije vezane za sistem i identifikaciju opasnosti, što upućuje na kvalitativnu analizu rizika. Kvantitativna analiza rizika se vrši radi estimacije rizika, pri čemu se posledice, verovatnoće i rizik kvantifikuju.

Određivanje rizika jeste da obezbedi potrebne informacije kao podršku upravljanju rizikom u donošenju odluka. Ukoliko je rizik neprihvatljiv, redukcija rizika će biti razmatrana dalje sa analiziranjem novog mogućeg neželjenog događaja. Kompletan opis rizika obično počinje sa primenom kvalitativnih metoda koje ako je potrebno prelaze u kvantitativne. Ukoliko se sprovede kvantitativna analiza rizika, mora biti ustanovljen model sistema. Kada se odredi model i podaci, može se započeti sa proračunom kako bi se procenio rizik, identifikovale kritične komponente i događaji. Prikazana definicija procesa upravljanja rizikom se koristi u oblasti bezbednosti tehničkih sistema, ali u ovom obliku uz manje adaptacije primenjiva je i u hemijskoj, nuklearnoj, kao i u građevinskoj industriji. Analiza uzročnog lanca rizičnih događaja ukazuje na to da stanju otkaza prethodi stanje rizika sistema. Zbog toga je proučavanje stanja rizika od izuzetnog značaja za održavanje tehničkih sistema. S jedne strane, ono poboljšava kvalitet održavanja prema stanju, a sa druge pruža neophodne informacije za planiranje preventivnog održavanja. Korektivno održavanje posmatrano na nivou sistema smanjuje gubitke zbog materijalizacije rizičnog događaja u vidu otkaza sistema. Internacionalni standard IEC 60300-3-9:1995 definiše analizu rizika kao "Sistemska korišćenje raspoloživih informacija radi identifikacije opasnosti i procenjivanje rizika pojedinca, populacije, imovine ili okoline".<sup>16</sup>

Analiza rizika može biti izvedena kvantitativno pri čemu epizodni događaji sa potencijalno vezanim posledicama su identifikovani i rangirani shodno šemi vrednovanja u zavisnosti od kriterijuma. Rangiranje rizika omogućava menadžerima da odrede prioritete preventivnih aktivnosti i resurse za rizični scenario. Analiza rizika može biti podeljena u različite nivoe detalja<sup>17</sup>:

- Nivo 1 - analiza sistema, analiza verovatnoće pojave kritičnih stanja;
- Nivo 2 - analiza sistema i analiza posledica pojave različitih kritičnih stanja sa odgovarajućim verovatnoćama; ili
- Nivo 3 - dalja analiza za moguće (negativne) efekte na ljude, uključujući procenu opasnosti za ljudski život, i slučajevi u kojima može do toga da dođe.

Krajnji proizvod analize rizika tada zavisi od nivoa detalja koji se koriste, i treba da bude određen već pri definisanju predmeta analize, odnosno pre izvođenja analize.

Bitan deo analize rizika predstavlja formulacija cilja analize koji se analizira, a tu spadaju: definisanje sistema, definisanje interesa analize, definisanje okruženja, pretpostavka stanja i identifikacija odluka analize.

Definisanje interesa analize rizika treba da sadrži opis razloga zbog kojih se analiza izvodi sa jasno formulisanim problemom. Opis, takođe, treba da uključi ciljeve bazirane na glavnim interesima i definiciju kriterijuma za rad/ispad sistema. Prema TEC standardu, definicija sistema treba da sadrži generalni opis sistema, odnosno okruženje, materijale,

<sup>16</sup>George, E.rejda., *Principles of Risk Management and Insurance*, Ninth Edition, Addisom Wesley, Boston,

<sup>17</sup>Žarković, N., *Reosiguranje sa osiguranjem*, Univerzitet Singidunim, Beograd, 2006.

operacione uslove itd. koji moraju biti sistematično opisani. Sistem mora da ispunjava zadate zahteve zbog kojih je kreiran, mora da bude ekonomičan i da izvršava svoje funkcije na prihvatljivom nivou bezbednosti.

#### **4.2.2. PROCENA, PROCESI I ELEMENTI UPRAVLJANJA RIZIKOM U OBLASTI TEHNIČKIH SISTEMA**

Procena rizika se izvodi za svaku incidentnu situaciju, determinisanjem odgovarajućeg rizika za dati scenario ili tehnički proces, kao funkciju težine moguće štete i verovatnoće njene pojave<sup>18</sup>. Procena rizika je poslednji deo analize rizika i definiše se po TEC standardu kao " proces koji se koristi za kvantifikovanja nivoa rizika koji se analizira". Standardna postavka je da su svi elementi procesa procene rizika zajednički za sve incidente:

- Mogući uzroci neželjenog događaja se analiziraju radi determinisanja frekventnosti pojavljivanja, njegove dužine trajanja i prirode (količina, karakteristike distribucije itd.)
- Posledice realizacije neželjenog događaja se analiziraju radi kvantifikovanja težine posledica tog događaja

Metode koje se koriste u proceni rizika su često kvantitativne, mada stepen zahtevanog ulaska u detalje za pripremu procene zavisi od specifične aplikacije. Analiza frekventnosti se koristi za procenu verovatnoće svakog identifikovanog neželjenog događaja. Postoje tri opšta pristupa koja se upotrebljavaju za određivanje frekventnosti događaja:

- korišćenje relevantnih istorijskih podataka
- izvođenje pomoću analitičkih ili simulacionih tehnika
- korišćenje ekspertne procene

Sve ove tehnike mogu se koristiti individualno ili zajednički. Kada se koriste istorijski podaci, tada podaci moraju biti relevantni, odnosno moraju odgovarati tipu sistema ili aktivnostima koje se razmatraju. Frekventnost događaja može se prognozirati i korišćenjem tehnika kao što su ETA i FTA. Korišćenje ekspertskog znanja se obično vrši uz pomoć raspoloživih metoda kao što su npr. Brainstorming i Delphi tehnika.

Potpuna kvantitativna procena nije uvek moguća u slučaju nedostatka informacija o sistemu ili aktivnostima koje analiziraju, nepotpunim podacima o otkazima, uticaju ljudskog faktora itd. Neki elementi rizika ne mogu da se kvantifikuju verovatnoćom distribucije. Njihov značaj se onda procenjuje kvantitativno razmatranjem prirode onoga što se štiti (ljudstvo, okolina), ozbiljnošću povreda ili oštećenja (nezatno, ozbiljno, katastrofalno) ili stepenom štete (jedna ili više osoba). Takođe treba napomenuti da se veličina nastale štete može definisati različito u zavisnosti od situacije. Analiza posledica procenjuje verovatnoće uticaja ukoliko se neželjeni događaj desi tj. procenjuje uticaj na ljude, okolinu ili imovinu. Posledice različitog tipa rizika se generalno izražavaju siguronosnim (npr. fatalno, štetno), zdravstvenim, finansijskim, ekološkim terminima.

---

<sup>18</sup>Risk in an Industrial Society – Theory and Practice, October 2002. www.bbc.co.uk



Predviđanje posledica obično je posao za eksperte iz oblasti u kojoj je identifikovana moguća opasnost. Konačno, rizik se mora izraziti u odgovarajućoj formi. Neki od najčešće korištenih izlaznih formi u proračunu rizika su: frekvencija nasuprot posledica, statističko očekivanje gubitaka u funkciji ekonomskih troškova itd.

### 4.3. MODELI ZA ANALIZU RIZIKA

Cilj analize i broj raspoloživih informacija o sistemu treba da upućuju na izbor adekvatne metode. Kada je izabrana metoda analize, cilj je da se identifikuju opasnosti i opišu moguće sekvence neželjenih događaja i faktori koji mogu dovesti do toga. Metoda determiniše proces identifikacije opasnosti. Neke od metoda su kvalitativne, dok druge mogu da pruže i kvantitativnu estimaciju. Postoje dva različita pristupa sistemske analize i identifikacije opasnosti: indukcioni i dedukcioni. Indukcioni zasniva razmatranje od pojedinačnog slučaja do generalnog zaključivanja, dok dedukcioni ide u suprotnom smeru od generalnog do specifičnog. U globalu, induktivne metode se primenjuju da determinišu koja su stanja sistema (uobičajeno stanja otkaza) moguća. Počev od inicijalnog događaja definišu se posledice. Deduktivne metode se koriste da determinišu kako posmatrano stanje (uobičajeno stanja otkaza) može da se realizuje, tj. počev od neželjenog događaja, definišu se uzroci<sup>19</sup>.

PHA (Preliminary Hazard Analysis) je gruba induktivna i kvalitativna metoda za identifikaciju potencijalne opasnosti. Liste praćenja potencijalnih opasnih elemenata i situacija pružaju pomoć pri sprovođenju PHA. Za uspešno izvođenje analize neophodno je formiranje tima sastavljenog od eksperata koji su "familijarni" sa datim sistemom. Svaki identifikovani neželjeni događaj se posebno analizira kako bi se opisali mogući uzroci, posledice i verovatnoće. Posledice mogu takođe biti izdvojene npr. u one koje imaju uticaja na okolinu, zdravlje ljudi i ekonomiju i shodno tome se različito ocenjuju. Nakon toga posledice i verovatnoće se rangiraju prema svojoj težini. Analiza proizvodi preliminarni kvalitativni dokument o mogućim neželjenim događajima s obzirom na identifikovane izvore rizika.

HAZOP (Hazard and Operability Analysis) je kvalitativna i induktivna metoda za sistematičnu analizu načina na koji mogu da nastanu devijacije u sistemu, odnosno za analizu potencijala rizika te devijacije. Metoda je razvijena u hemijskoj industriji u Engleskoj 1960. godine i uveliko se primenjuje u procesnoj industriji. Bazirana na dijagramu toka sistema i skupu vodećih reči ili scenarija analiza rezultuje u identifikaciji opasnosti ili operacionalnih problema. Osnovni koncept HAZOP studije je da preuzme potpuni opis sistema i ispita svaki njegov deo kako bi otkrio do kakvih devijacija može doći u postojećem dizajnu i koji su uzroci i posledice te devijacije. Vodeće reči : NO/NOT, AS WELL AS, PART OF, MORE, REVERSE itd. služe za opis uslova procesa, aktivnosti, materijala, vremena i mesta. Analiza daje kvalitativnu dokumentaciju o sistemskim devijacijama sa predlogom bezbedonosnih mera za njihovo praćenje.

FMEA (Failure Modes and Effect Analysis) je jedna od najstarijih i najčešće korištenih metoda razvijena 50-ih godina prošlog veka; inicijalno je implementirana u aeroindustriji. Predstavlja induktivnu, uglavnom kvalitativnu metodu analize s ciljem da otkrije moguće otkaze i predvidi njihove efekte na sistem (o ovome je već bilo reči). Metoda reprezentuje analizu sistema i međusobnih odnosa njegovih delova, pod različitim uslovima rada (normalnim i abnormalnim), radi utvrđivanja verovatne lokacije otkaza, vidova i

---

<sup>19</sup> Vujović R., *Rizik i pojmovi povezani sa rizikom*, časopis „DDOR Novi Sad“, Novi Sad, 2007.

mehanizama otkaza. Važan element analize je istraživanje verovatnog efekta svakog otkaza na sve druge komponente, druge delove sistema i performanse sistema. Metodologija FMEA se može opisati sledećim koracima:

- definisanje sistema i njegovih funkcionalnih zahteva
- generisanje liste svih subsistema i komponenti
- generisanje liste svih modele otkaza, opisa otkaza i identifikacije
- dodeljivanje verovatnoća otkaza za bilo koji vid otkaza komponenti
- generisanje liste svih efekata otkaza na podsisteme, sistem, okruženje
- unošenje zapažanja za identifikovane modele otkaza
- pregled kritičnih modela otkaza i preduzimanje odgovarajućih korektivnih mera

FMEA pruža sistematičan pregled značajnih sekvenci otkaza sistema i predstavlja dobru osnovu za sveobuhvatnije kvantitativne analize, kao što je FTA (Fault Tree Analysis).

FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) je proširena FMEA, pošto se izvodi i analiza kritičnosti. Kritičnost je funkcija veličine efekta neželjenog događaja i frekvencije njegovog pojavljivanja. Analiza kritičnosti otkaza podrazumeva istraživanje mogućih otkaza u bilokojem delu sistema u odnosu na ostale delove sistema. Ona utvrđuje "težinu" efekta svakog otkaza u vezi sa verovatnim rizikom po pitanju bezbednosti, neprihvatljive degradacije performansi, prestanka rada ili raspoloživosti sistema.

ETA (Event tree analysis) je induktivna i kvalitativna metoda sa mogućnošću da se koristi kvantitativno. Polazi se od realnog ili hipotetičkog inicijalnog događaja, identifikuju se sve moguće posledice i estimira verovatnoća njegove pojave. Pitanje na koje se odgovora prilikom konstituisanja stabla događaja je: šta se dešava ako...? Prednost ove metode je u tome što je moguće uključiti i ljudski faktor pri vođenju analize. Metoda je primenljiva za analizu sigurnosnih sistema i bezbedonosnih rutina radi prevencije pojave incidentnih događaja, npr. pojave požara.

FTA (Fault Tree Analysis) je deduktivna metoda. Osnovni koncept je zasnovan na prevođenju fizičkih sistema na strukturne logičke dijagrame (stabla otkaza) koji prikazuju relacije između sistemskih otkaza tj. neželjenih događaja u sistemu. FTA je metoda u kojoj se prvo definiše neželjeni događaj tzv. vršni događaj (Top event), a zatim se analizira uticaj ponašanja pojedinih komponenti sistema na njegovo pojavljivanje. Analiza se oslanja na dijagram, stablo grešaka (Fault tree), koji simbolički opisuje logičke relacije između događaja. Važno je shvatiti da FTA nije model koji uključuje u sebe sve moguće uzroke otkaza sistema, već samo one neispravnosti koje doprinose vršnom događaju. Osnovni pojmovi i simboli u FTA su:

- Primarni događaji (Primary event), koji se iz različitih razloga dalje ne razlažu,
- Posredni događaj (Intermediate event)
- Vršni događaj (neželjeni događaj za koji se pravi analiza mogućnosti pojavljivanja)

Polazeći od realnog ili hipotetičkog događaja identifikuju se svi mogući uzroci i verovatnoće pojave i prikazuju u strukturi stabla. Ovi dijagrami se formiraju na osnovu simbola za događaje, logičke kapije i prenos. Pitanje na koje se odgovora prilikom konstituisanja stabla događaja je: šta prouzrokuje neželjeni događaj...?

Osnovne logičke kapije za konstruisanje stabla otkaza su „I“ i „ILI“ kapije. Kapija „I“ opisuje logičku operaciju pri kojoj se za pojavljivanje događaja na izlazu zahteva prisustvo svih događaja na ulazu, dok je kod kapije „ILI“ dovoljno prisustvo bar jednog događaja na ulazu.

Formula za izračunavanje verovatnoće pojave izlaza I (a) i ILI (b) logičke kapije događaja:

$$P_1(E) = \prod_{i=1}^k P(E_i) \quad (4.1.)$$

$$P_0(E) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P(E_i)) \quad (4.2.)$$

gde je:

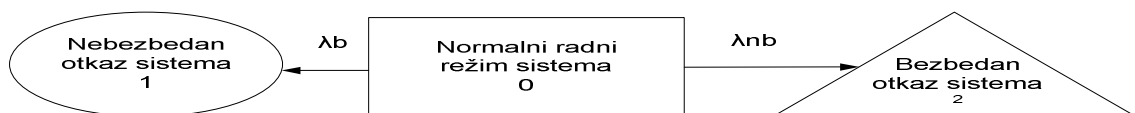
- k - ukupan broj ulaza u logičko kolo
- $P_1(E)$  - verovatnoća pojave izlaza "I" logičkog kola
- $P_0(E)$  - verovatnoća pojave izlaza "ILI" logičkog kola
- $P(E_i)$  - verovatnoća pojave i-tog događaja, za  $i = 1 \dots k$

Metod Markova se koristi u izvođenju analize raspoloživosti inženjerskih sistema. Osnovne postavke ove metode su:

- verovatnoća prelaza sistema iz jednog stanja u drugo u konačnom vremenskom intervalu  $\Delta t$ , data je sa  $\alpha \Delta t$ , pri čemu je  $\alpha$  koeficijent prelaza iz jednog stanja sistema u drugo
- svi događaji su nezavisni jedan od drugog
- verovatnoća pojave više od jednog prelaza iz jednog stanja sistema u drugo u konačnom vremenskom intervalu  $\Delta t$  je neznatna, tj.  $(\alpha \Delta t)(\alpha \Delta t) \rightarrow 0$

U određenom trenutku vremena, sistem se nalazi u jednom od konačnog broja stanja. Primer: pretpostavimo da sistem može da iz normalnog radnog stanja pređe u stanje otkaza na bezbedan i nebezbedan način. Koeficijenti prelaska su  $\lambda_b$  i  $\lambda_{nb}$  respektivno. Na dijagramu su predstavljena stanja sistema na slici 4.5.

Uz pomoć modela Markova mogu se napisati jednačine stanja prikazanog sistema:



Slika 4.5. Prostorni dijagram stanja [I]

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda_{nb} \Delta t)(1 - \lambda_b \Delta t) \quad (4.3.)$$

$$P_1(t + \Delta t) = P_0(t) \lambda_{nb} \Delta t + P_1(t) \quad (4.4.)$$

$$P_2(t + \Delta t) = P_0(t)\lambda_b\Delta t + P_2(t) \quad (4.5.)$$

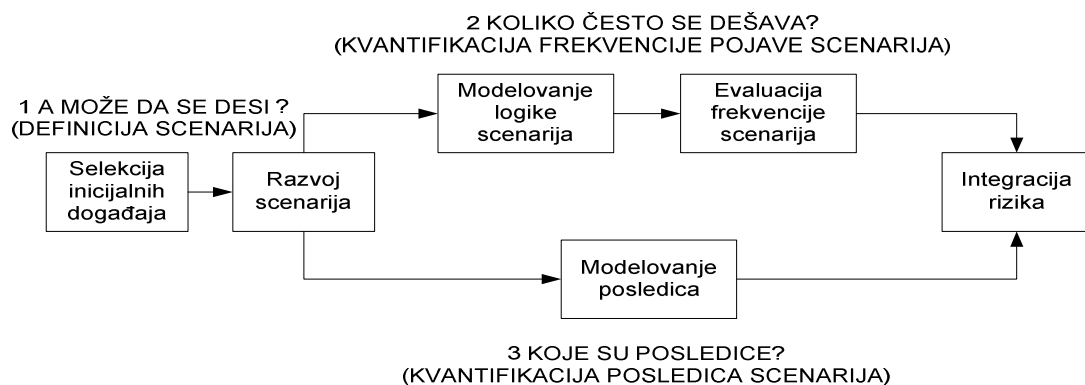
gde su:

- $P_i(t + \Delta t)$ ,  $i = 0,1,2$  verovatnoće  $i$  - tog stanja sistema u trenutku  $(t + \Delta t)$ ,
- $P_i(t)$ ,  $i = 0,1,2$  - verovatnoće  $i$  - tog stanja sistema u trenutku  $t$ ,
- $\lambda_{nb}\Delta t$  - verovatnoća bezbednog otkaza sistema u konačnom vremenskom intervalu  $t$
- $\lambda_b\Delta t$  - verovatnoća nebezbednog otkaza sistema u konačnom vremenskom intervalu  $t$

PRA (Probabilistic risk assessment) - je u poslednje tri decenije jedna od najznačajnijih analitičkih metoda za identifikaciju i analizu rizika projekata i kompleksnih sistema.

PRA (procena verovatnoće rizika) se razlikuje od analize pouzdanosti u dva bitna aspekta:

- PRA daje precizniju kvantifikaciju nepouzdanosti individualnih događaja i celokupnog sistema
- PRA pruža daleko informativniju evaluaciju koja kvantifikuje metriku vezanu za pojavu neželjenih posledica, za razliku od usko definisane metrike performansi sistema kao što je MTTF.



Slika 4.6. Implementacija koncepta rizika PRA

Proces PRA započinje identifikacijom seta inicijalnih događaja koji "pokreću" sistem. Za svaki takav događaj analiza determiniše sledeći događaj koji vodi ka realizaciji neželjenog (vršnog) događaja. Tada se određuju magnitude posledica za scenarije, kao i njihove verovatnoće pojavljivanja. Konačno, one se integrišu i reprezentuju profil rizika za dati sistem. Na slici 4.6. prikazana je pomenuta metodologija. Određivanje ukupnog rizika na osnovu skupa scenarija omogućava polaznu osnovu za identifikaciju i rangiranje udela rizika.

Estimacija (procenjivanje) verovatnoća događaja se uobičajeno bazira na različitim izvorima podataka. Tipični izvori podataka uključuju: prethodno iskustvo sa određenim sistemom (mereni ili direktno procenjeni podaci na osnovu relevantnih testova ili iskustva), podatke od drugih sistema ili projekata (npr. ekstrapolacija generičkih podataka, podaci istovetnih fizičkih modela), i ekspertne podatke (direktna estimacija verovatnoća specijalista za dati sistem). Sumirajući različite sisteme analize i identifikacije opasnosti izbor tehnike zavisi od aktuelnog sistema i predmeta analize. Za detaljne analize na raspolaganju su FTA i ETA simulacije. Ukoliko se želi uraditi kvantitativna analiza rizika, moraju se ustanoviti modeli verovatnoće sistema.

Postavljanjem modela i podataka može se krenuti u estimaciju rizika sistema i identifikaciju kritičnih komponenti i događaja.

Postoje dva osnovna pristupa analizi rizika, tabela 4.2.:

1. Kvalitativna analiza
2. Kvantitativna analiza

#### *Kvalitativna analiza rizika*

Kvalitativna analiza rizika predstavlja subjektivniji pristup pri kojem se resursi, rizici i protivmere posmatraju relativno s obzirom na sistem. Za provođenje kvalitativne analize nije nužno egzaktno poznavanje materijalne vrednosti pojedinih resursa, već je za njihovo vrednovanje bitno poznavati važnost za pojedine poslovne procese.

Rezultat kvalitativne analize iskazuje samo relativan odnos vrednosti šteta nastalih delovanjem neke opasnosti i uvođenja protivmera. Pri tom valja imati na umu da je ta procena subjektivne prirode te je stoga podložna greškama. Kvalitativni kriterijumi koriste reči kao što su verovatno, moguće, često, retko kako bi se opisala verovatnoća pojave i reči kao što su nezatno, katastrofalno itd. kako bi se opisale posledice događaja.

*Tabela 4.2. Tipične verovatnoće rizika*

Verovatnoća pojave		Kriterijum
Kvalitativne	Kvantitativne	
Vrlo retko	<0.1	Procenjena verovatnoća pojave ne prelazi 10%, odnosno verovatnoća ponavljanja prevazilazi period od 10.000 godina
Retko	>0.1 ali <0.4	Procenjena verovatnoća pojave ne prelazi 40%, ali je veća od 10%, odnosno verovatnoća ponavljanja prevazilazi period od 1000 godina
Verovatno	>0.4 ali <0.8	Procenjena verovatnoća pojave prelazi 40%, ali nije veća od 80%, odnosno verovatnoća ponavljanja se kreće u periodu od 0 do 1000 godina
Vrlo verovatno	>0.8	Procenjena verovatnoća pojave prelazi 80%, odnosno verovatnoća ponavljanja je manja od 10 godina

#### *Kvalitativni pristup (matrica rizika)*

Ovaj metod započinje dodeljivanjem kvalitativnih vrednosti verovatnoćama događaja i posledica koje se kasnije koriste pri determinisanju kvalitativnog faktora rizika. Ključne karakteristike ovog metoda su da:

- omogućava nezavisno određivanje verovatnoća i posledica rizika
- obezbeđuje kvalitativno definisanje rizika i njegove težine

Metodologija se odvija u koracima:

1. Adresiranje svake rizične situacije na osnovu pojedinačnih formi za određivanje rizika.

2. Determinisanje kvalitativne verovatnoće pojave (P) za svaki rizik na podesan način na osnovu realnog kriterijuma. U tabeli 4.3. prikazani su tipični kriterijumi za ustanovljavanje kvalitativnih vrednosti verovatnoća.
3. Determinisanje kvalitativnih vrednosti posledica pojave (C) za svaki rizik na podesan način i na osnovu realnog kriterijuma.

Tabela 4.3. Tipične posledice rizika

Posledice pojave		Kriterijum
Kvalitativne	Kvantitativne	
Beznačajne	<0.1	Minimalne ili nebitne posledice
Neznatne	Od 0.1 do 0.4	Neznatno utiču na proces koji se analizira
Znatne	Od 0.4 do 0.8	U velikoj meri doprinose povećanju troškova
Kritične	Od 0.8 do 0.9	Ozbiljno ugrožavaju proces, osoblje
Katastrofalne	>0.9	Katastrofalne posledice po preduzeće,

Kvantitativna analiza rizika, kvantitativni pristup<sup>20</sup>, Kvantitativni kriterijumi koriste numeričke vrednosti kako bi opisali verovatnoću i posledice događaja. Kvantitativna analiza podrazumeva iskazivanje rizika u očekivanim novčanim troškovima na godišnjem nivou. Neke organizacije preferiraju ovakav način analize pošto im je tako omogućeno planiranje novčanih sredstava, a upravi se omogućuje da bez tehničkih pojedinosti može doneti odgovarajuće odluke. Pri tome valja imati na umu da vrednost nekih resursa nije uvek moguće iskazati novčano, a kao rezultat toga mogu se pojaviti i brojke koje ne predstavljaju stvarno stanje. Ovaj metod se zasniva na dodeljivanju kvantitativnih vrednosti verovatnoćama pojave i posledicama događaja, koje se koriste za determinisanje kvantitativnog faktora rizika. Ključne karakteristike metoda ogledaju se u sledećem:

- omogućava kvalitativno definisanje rizika, ali na osnovu kvantitativnih podataka kao nivou rizika,
- pruža finiju izdiferenciranost unutar nivoa rizika.

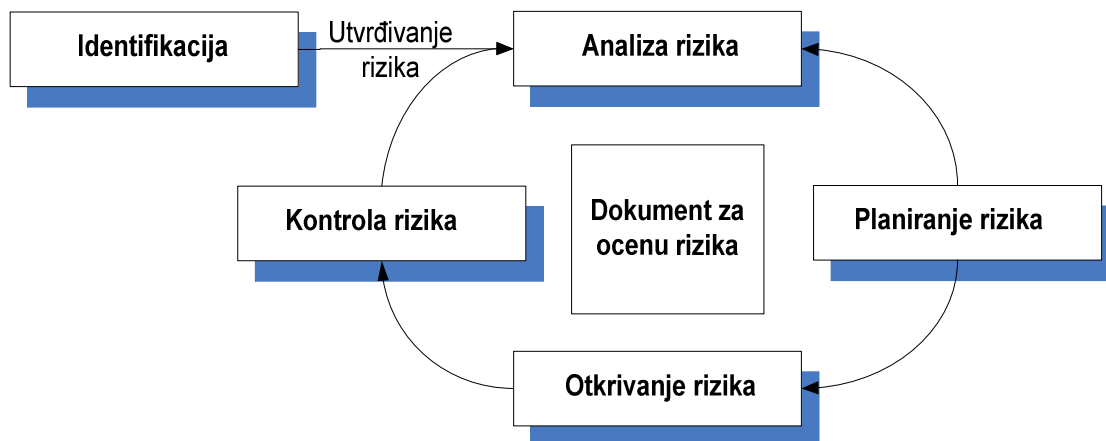
#### 4.4. UPRAVLJANJE RIZIKOM U ELEKTRANAMA

Identifikacija rizika je prvi korak u proaktivnom pristupu upravljanja rizikom. Na slici 4.7. su prikazani ulazi, izlazi i aktivnosti procesa identifikacije rizika. Identifikovanje rizika daje mogućnosti, načine reagovanja i informacije koje omogućavaju timu da otkrije važne rizike koji mogu nepovoljno uticati na projekat<sup>21</sup>.

Da bi identifikovali rizike, članovi tima sprovode seriju „brainstorming“ diskusija i otvorenih razgovora da bi odredili važnost rizika za projekat. Da bi se olakšao ovaj proces faktori rizika se grupišu po raznim oblastima. U okviru svake oblasti, faktori mogu dalje biti grupisani u kategorije kao što su faktori misije i ciljeva, donosilaca odluka, rukovodilaca organizacije i raspoloživih novčanih sredstava i troškova.

<sup>20</sup> Stamenović D., Vasić L., Grbović M., *Risk menadžment i osiguranje*, Preventivno Inženjerswto,

<sup>21</sup> Vujović R., Todorović J., Stanković M., *Upravljanje rizikom i osiguranje u idustriji, transportu i skladištenju*



Slika 4.7. Procesi upravljanja rizikom

Ciljevi identifikacije rizika su stvaranje liste rizika koja treba da pokrije sve delove projekta. Identifikacija rizika može se sprovoditi po rasporedu (npr. dnevnom, nedeljnom i ili mesečnom), cilju (u planu projekta), ili događaju (značajnim negativnim dešavanjima u poslovanju, tehnologiji, organizacionim ili ekološkim uslovima). Aktivnosti identifikacije rizika treba da se sprovedu povremeno, prema ciljevima koje određuje tip projekta.

Za bilo koji rizik, koji se otkrije kao rezultat pravljenja tabele faktora rizika, trebalo bi naznačiti njegovo postojanje i trebalo bi ga staviti u prvi plan. Rizik mora biti jasno objašnjen i definisan pre nego što se može njime upravljati. Prilikom utvrđivanja rizika, trebalo bi razmatrati ne samo manifestacije rizika, već i njihove uzroke i rezultate<sup>22</sup>.

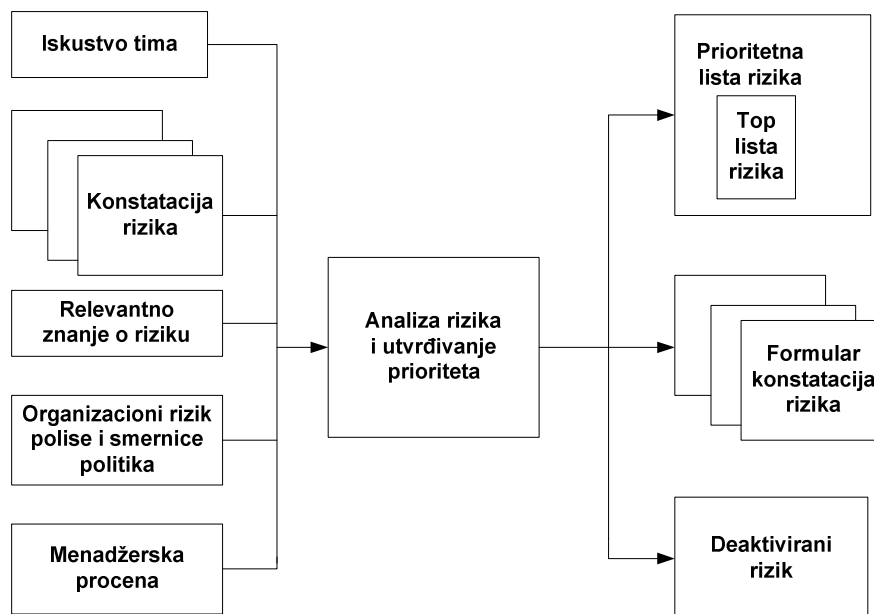
Analiza rizika podrazumeva pretvaranje podataka o riziku u formu koja pospešuje donošenje odluka. Određivanje prioriteta rizika obezbeđuje da članovi tima najpre tretiraju najvažnije rizike projekta. U analizi rizika tim proučava listu rizika određuje prioritete i definiše "glavne rizike" za koje će odrediti resurse za planiranje i sprovođenje određene strategije. Tim može, takođe, da odredi koji rizici nisu prioritetni tako da se mogu izbaciti sa liste. Ulazi i izlazi ovog koraka su prikazani na slici 4.8. Postoje mnoge kvalitativne i kvantitativne tehnike za određivanje prioriteta na listi rizika. Dve najčešće tehnike za određivanje prioriteta rizika su: verovatnoća i moć rizika. Ovi pokazatelji služe za određivanje izloženosti riziku.

Verovatnoća rizika podrazumeva verovatnoću da će se neki događaj stvarno i dogoditi. Običan procenat između 0 i 100 možemo poslužiti da izvršimo rangiranje rizika. Samo rizici koji imaju procenat verovatnoće veći od 0 se posmatraju. Samo rizici koji imaju 100 verovatnoću su sigurni, odnosno postoje kao problemi. Može se smatrati da je efikasnija skala koja koristi brojeve od 1 do 3 koji odgovaraju verovatnoćama od 25, 50 i 75 procenata, zbog toga što su često nejasni argumenti koji prave razliku između verovatnoće od 60 i 70 procenata.

Moć rizika meri jačinu nepovoljnog dejstva ili veličinu štete koju može da prouzrokuje ostvarenje rizika. Određivanje načina merenja dobijenih gubitaka nije jednostavan problem. Ako rizik utiče na finansijske gubitke, onda se za meru može koristiti evro. Finansijski gubici mogu biti dugoročni troškovi u primeni i za podršku, smanjenje

<sup>22</sup>Jurić S., Radić R., Adamović Ž., Kenjić Z., *Troškovi održavanja postrojenja u elektroprivredi*, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije

zastupljenosti priroznova na tržištu, jednokratni dodatni troškovi ili troškovi izgubljene šanse. Kada se shvate finansijski gubici, rizici se po svojoj moći mogu svrstati u kategorije od 1 do 5, s tim da najopasniji rizici pripadaju 5. grupi. Visoke vrednosti ukazuju na ozbiljne štete za projekat, dok srednje vrednosti govore o tome da se mogu dogoditi štete za neki deo projekta ili na smanjenje efikasnosti.



Slika 4.8. Analiza rizika i prioriteta

Nakon rangiranja rizika prema izloženosti riziku, trebalo bi da se usmere svoje aktivnosti na određivanje strategije i kako da planove za prevenciju uključe u celokupnu viziju projekta.

U koraku *Planiranja rizika* informacije o riziku se pretvaraju u akcije. Planiranje rizika uključuje planiranje akcija za svaki rizik ponaosob, određivanje prioriteta akcije, i kreiranje dokumenta za ocenu rizika. Cilj je da se razviju detaljni planovi za kontrolisanje rizika identifikovanih tokom analize i integrisati ih u standardne projektne upravljačke procese da bi se osiguralo da su završeni. Na slici 4.9. je prikazan proces planiranja rizika<sup>23</sup>.

Tokom planiranja trebalo bi da se razmotri četiri osnovna aspekta vezana za svaki rizik:

- 1) Istraživanje - Da li se zna dovoljno o riziku? Da li je u daljem radu neophodno sakupiti dodatne informacije i bolje odrediti karakteristike svakog rizika pre nego što se donesu odluke u vezi sa tim koje akcije treba sprovesti?
- 2) Prihvatanje - Da li se možemo suočiti sa posledicama realizacije rizika? Da li se rizik može prihvatiti i ići dalje bez ikakve akcije.
- 3) Upravljanje - Da li može da se uradi nešto što će da smanji štetu ukoliko se rizik dogodi?

<sup>23</sup> Williams C., Heins R., *Risk Management and Insurance*, Mc Graw-Hill, New York, 1976.

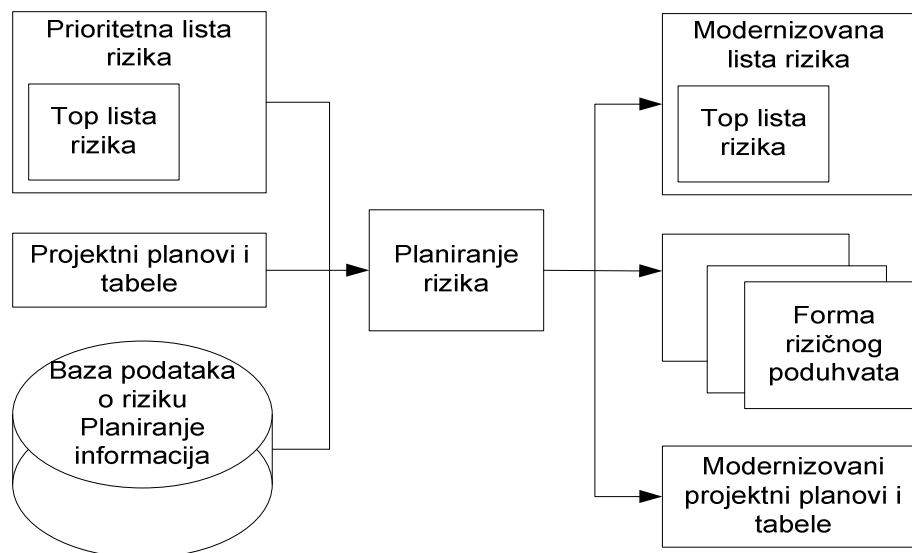


4) Izbegavanje - Da li se rizik može izbeći? Kada se odrede rizici koje zahtevaju akcije, tada treba preduzeti jednu od tri moguće akcije:

- smanjenje verovatnoće realizacije rizika
- smanjiti veličinu štete
- promeniti posledice rizika

Da bi se pristupilo kreiranju glavnog plana ocene rizika potrebno je identifikovati nekoliko ključnih pojmova za svaki rizik:

- identifikator rizika - jedinstveno određuje rizik
- opis rizika - opisuju se uslovi koji vode realizaciji rizika, i posledice koje tim putem nastaju
- strategija za upravljanje rizikom - opis akcija koje će se preduzeti vezano za određeni rizik, uključujući i uvedene pretpostavke, merenje uspešnosti strategije
- verovatnoća - opisuje verovatnoću da će se pojaviti šteta prouzrokovana realizacijom nekog rizika
- moć rizika - šteta za projekat koja će nastati u slučaju realizacije rizika
- izloženost riziku - obuhvata paralelnu analizu moći i verovatnoće rizika
- akcija - opisuje akcije koje će tim sprovesti u upravljanju rizikom. Sve akcije će biti uključene u sistem za otkrivanje rizika
- rokovi - datumi do kojih moraju biti završene sve planirane akcije
- kontingencijska strategija - opisuje se plan koji će se primeniti ukoliko plan akcija ne uspe u upravljanju rizika



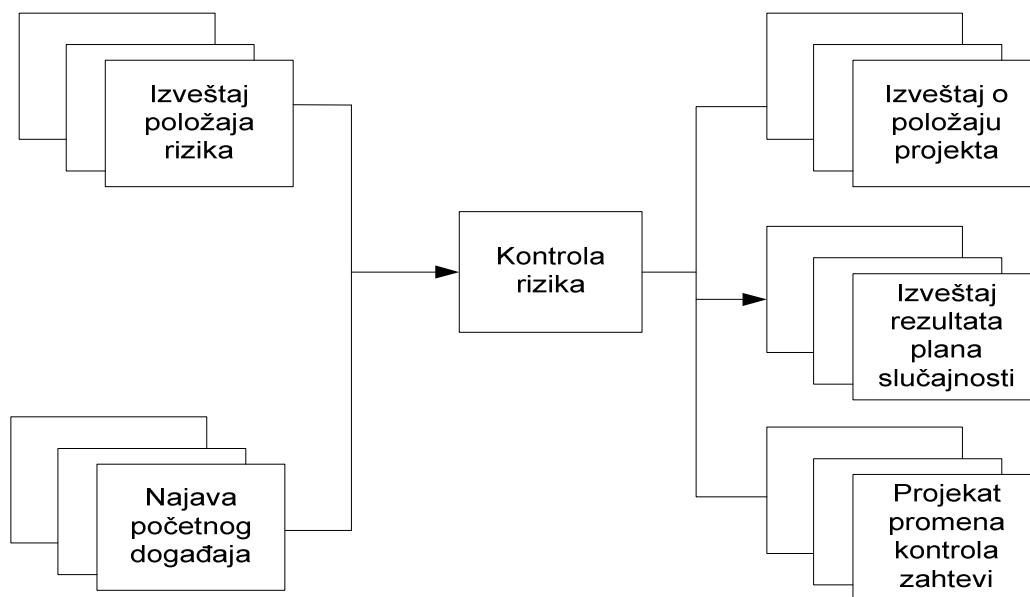
Slika 4.9. Planiranje rizika

Otkrivanje rizika predstavlja suštinu za uspešno definisanje plana akcije. To je proces u kome tim proverava stanje rizika i akcije koje će biti preduzete da bi se rizik ublažio. Izveštaji o stanju rizika mogu identifikovati jedno od četiri moguće situacije:

- rizik je eliminisan, i plan akcije je gotov
- akcije teku kako je i planirano, i u tom slučaju nastavlja se rad na planu akcija

- akcije ne teku kako je planirano, i u tom slučaju treba preduzeti korektivne mere ili treba primeniti kontingencijski plan
- situacija se značajno promenila u odnosu na jedan ili više rizika i potrebno je izvršiti reviziju ocena

Tokom preduzimanja akcija za upravljanje rizikom, ukupna izloženost riziku bi trebalo da se smanjuje. Peti korak u procesu upravljanja rizikom je kontrola rizika. U toku ovog koraka, aktivno se izvršavaju aktivnosti vezane za kontrolu rizika. Ovaj korak je prikazan na slici 4.10.



Slika 4.10. Kontrola rizika

Posle definisanja vrednosti okidača za rizike, težak deo upravljanja je završen. Sada se upravljanje rizikom sjedinjuje sa procesom upravljanja projektom koji uključuje:

- plan akcija za kontrolu rizika
- korekcije u slučaju odstupanja od planova
- reagovanje na određene vrednosti okidača
- poboljšanje procesa upravljanja rizicima

Učenje iz rizika je od stratejske važnosti za aktivnosti upravljanja rizikom. Faza učenja se ponekad naziva moć rizika pri čemu se naglašava vrednost i značaj koji organizacija ostvaruje u poboljšanja u procesu upravljanja rizikom.

#### 4.5. PRIMER UPRAVLJANJA RIZIKOM U ELEKTRANAMA

Koristi od upravljanja rizikom su mnogostruke, a pre svega omogućavaju organizacijama da:

1. budu usaglašene sa svim regulatornim zahtevima za poslovanje na globalnom tržištu
2. obezbede efikasne procese donošenja odluka

3. unaprede poslovanje
4. obezbede kontinuitet u poslovanju
5. smanje mogućnost nastajanja neželjenih događaja (prekid proizvodnje, opozivi, gubljenje licence za rad, plaćanje kazni, gubitak reputacije na tržištu)

Pristupi zasnovani na riziku su važan koncept u menadžmentu kvalitetom koji obezbeđuju zaštitu proizvoda. Oni smanjuju subjektivnost (na nauci zasnovan i dokumentovan proces), kategorišu rizik, daju listu prioriteta, olakšavaju donošenje odluka, poboljšavaju transparentnost (unutar organizacije i kod regulatora). Obuka zaposlenih i u industriji i u regulativi, kad je u pitanju upravljanje rizikom kvaliteta, osigurava bolje poznavanje i sposobnost donošenja odluka i gradi poverenje u ishode postupka.

Odlučivanje u elektranama (tehničkim sistemima) se rangira kao odluke visokog rizika, jer imaju posledice na energetska sistema:

1. mora da se isporučuje dogovorena energija sistemu
2. mora da se dugoročno planira rad tehničkog sistema

Glavni elementi (faze) procesa menadžmenta rizikom u oblasti kvaliteta (ORM) su: odgovornosti, priprema za analizu, procena rizika (identifikacija rizika, analiza rizika), kontrola rizika - razmatranje rizika, reagovanje, smanjenje rizika, prihvatanje rizika.

### **Odgovornosti**

Aktivnosti upravljanja rizikom kvaliteta preuzima poseban tim stručnjaka koji formira nadležni organ rukovođenja u preduzeću. Ovaj tim treba da uključuje stručnjake koji su radili na identifikaciji rizika, stručnjake iz oblasti mašinstva, elektrike, informatičare, statističare i predstavnike organa uprave i mnoge druge. Tim ima vođu ili rukovodioca tima koji rukovodi, koordinira, upravlja i izveštava o aktivnostima tima i rezultatima.

### **Priprema za analizu**

Upravljanje rizikom kvaliteta obuhvata sistematske procese u cilju koordiniranja, olakšavanja i poboljšanja naučno zasnovanih odluka u vezi sa rizikom. Mogući koraci u iniciranju i planiranju procesa upravljanja rizikom kvaliteta obuhvataju:

- sakupljanje svih dodatnih podataka o potencionalnom riziku
- određivanje lidera i potrebnih resursa
- određivanje vremenskog okvira u procesu upravljanja rizikom

### **Procena rizika**

Procena rizika obuhvata identifikaciju hazarda (opasnosti), analizu i procenu rizika pri izlaganju tim opasnostima. Osnovna pitanja koja se postavljaju su:

- 1) Šta može da krene naopako?
- 2) Kakva je mogućnost da se to desi?
- 3) Koje su posledice toga?

### *-Identifikacija rizika*

Identifikacija rizika se obavlja na početku projekta, pri ocenama napretka projekta i u ostalim prilikama, kada se donose značajne odluke<sup>24</sup>.

Potencijalni rizici u elektranama mogu predstavljati:

- greške na generatoru
- greške na turbini
- greške na ležaju L1, L2, L3
- greške na sistemu za hlađenje i sistemu za podmazivanje
- greške na vratilu
- neadekvatna oprema u kontroli kvaliteta, kao i drugi identifikovani rizici

### *-Analiza rizika*

Analiza rizika je procena rizika u skladu sa identifikovanim opasnostima. To je kvalitativan ili kvantitativan proces povezivanja verovatnoće nastajanja i posledica tih opasnosti<sup>25</sup>.

Cilj analize rizika je da se :

- odvoje prihvatljivi rizici od onih koji se nikako ne mogu prihvatiti
- predvidi obim posledica i veličina štete
- obezbede mere koje će pomoći u rešavanju i postupanju sa rizicima

Koraci analize rizika obuhvataju:

- pripremu za analizu
- preliminarne analize
- razmatranje rizika
- razmatranje njihovih posledica i verovatnoće da se posledice mogu javiti
- prikaz razvoja mogućih događaja
- strategije za upravljanje rizikom

Osnov za analizu rizika je dijagram toka procesa (slika 4.11.) koji mora prikazati:

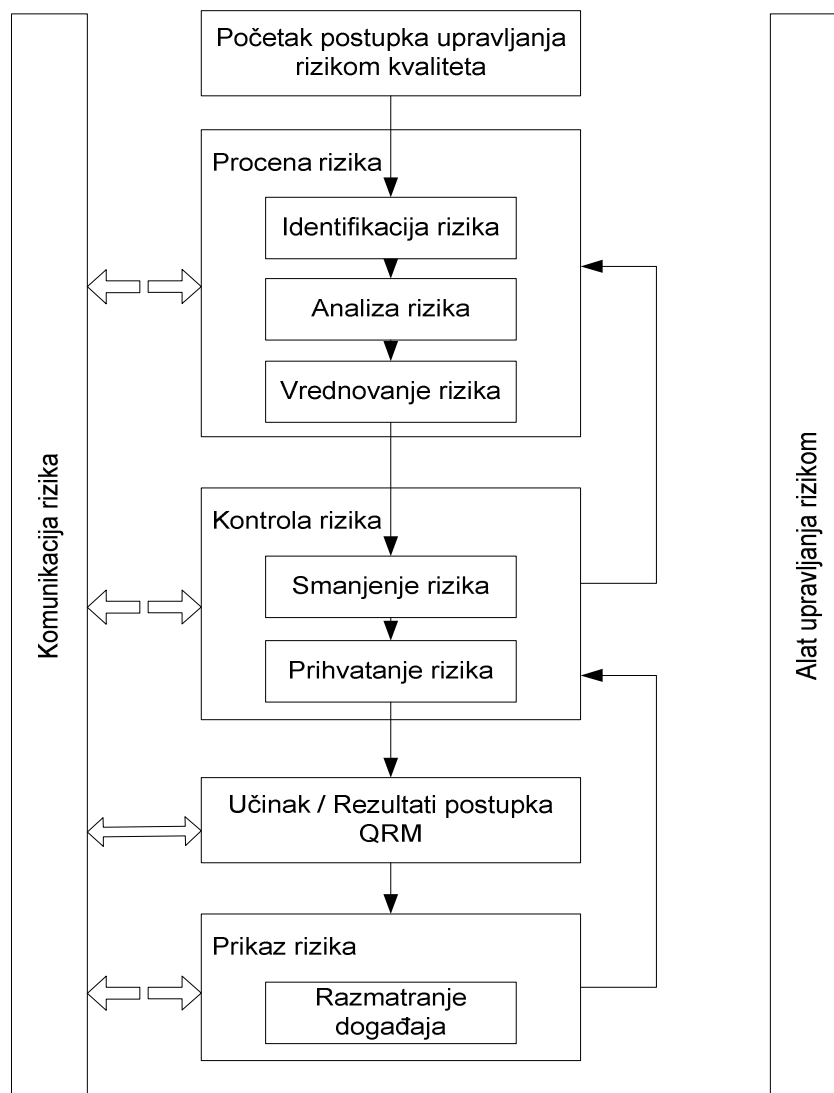
- Detalje o svim aktivnostima u procesu
- Ulazne elemente procesa
- Izlaze iz procesa

Dijagram toka procesa je grafički prikaz toka procesa i predstavlja osnovu za analizu rizika koji olakšava identifikovanje mogućih izvora, upravljačke mere u procesu i usmerava rad tima.

---

<sup>24</sup> Andrijanić I., Klasić K., *Tehnika osiguranja i reosiguranja*, Zagreb, 2002.

<sup>25</sup>Gustavson, T., *Risk Management and Insurance*, 10<sup>th</sup> Edition, South-Western College Publication, International Thompson Publishing, USA, 1998.



Slika 4.11. Dijagram toka procesa

Tehnike za analizu rizika mogu da se grupišu prema:

#### I KATEGORIZACIJA - Prema tipu razmišljanja

- Induktivne tehnike - daju odgovor na pitanje "Šta ako se dogodi X situacija?"
  - „razmišljaju unapred"
  - Ograničenja tehnike: u analizu nisu uključeni efekti o kojima se nije raspravljalo, proučavaju samo jednu štetu u jednom trenutku.
- Deduktivne tehnike- daju odgovor na pitanje „Šta je uzrokovalo taj događaj?"
  - „pogled unazad"
  - Ograničenja tehnike: Grafička prezentacija situacija može biti komplikovana,
  - samo se „vrhunski događaj" proučava.

#### II KATEGORIZACIJA- Prema interpretaciji rezultata

- Tabelaarne
- Grafičke („Stabla” - Dijagrami)

### III KATEGORIZACIJA - Prema prirodi rezultata

- Kvalitativne (nizak, visok, opasan)
- Kvantitativne (istorijski, objavljeni podaci)
- Polukvantitativne ("5"- umerena opasnost; "10" - strašan rizik)

Bez obzira za koju tehniku se odlučimo, priprema za analizu rizika je ista. Pošto je rizik određen kombinacijom verovatnoće i posledice, grafički prikaz rizika može da izgleda ovako:

*Tabela 4.4. Grafički prikaz rizika*

Verovatnoća	Posledice				
	Beznačajne 1	Mali 2	Srednje 3	Velike 4	Katastrofalne 5
A (skoro sigurno)	V	V	E	E	E
B (Verovatno)	S	S	V	E	E
C (Srednje)	N	S	S	E	E
D(Neverovatno)	N	N	S	V	E

gde je:

E: ekstremni rizik; zahteva momentalnu akciju (preduzimanje mera)

V: visok rizik; zahteva pažnju višeg (senior) menadžmenta

S: srednji rizik; mora biti specificirana odgovornost menadžmenta

N: nizak (mali) rizik; upravljanje uobičajenim procedurama

### Vrednovanje rizika

Rizik se analizira kombinovanjem procena posledica i verovatnoće.

Procenom rizika treba da definišemo nivo ozbiljnosti rizika tj. da ga kategorišemo:

- Mali rizik, 1, ukazuje da nije neophodno preduzimanje posebnih mera
- Srednji rizik, 2, podrazumeva periodično preduzimanje mera
- Veliki rizik, 3, zahteva mere kontrole: održavanja; etaloniranja; procesa nabavke (Kod ove grupe rizika mere se najčešće označavaju kao kontrolne tačke - CP)
- Kritičan rizik, 4, neophodne su posebne mere kontrole - kritične kontrolne tačke (GCP)

### Kontrola rizika

Nakon procene rizika, treba razmotriti način reagovanja na identifikovani rizik.

Kontrola rizika obuhvata donošenje odluka u cilju smanjenja i/ili prihvatanja rizika. Svrha kontrole rizika je da se smanji rizik na prihvatljiv nivo<sup>26</sup>.

Strategije za upravljanje rizikom:

- Izbegli rizik - nastojati da se eliminiše izvor pretnji
- Preneti rizik - nastojati da se vlasništvo nad rizikom i obaveze uklanjanja posledica prenese na treću stranu
- Ublažiti posledice rizika - nastojati da se smanji intenzitet izloženosti pretnji ispod nivoa koji se može smatrati prihvatljivim. Važno je definisati šta je prihvatljiv rizik
- Prihvatiti rizik - priznati postojanje preostalog rizika i izabrati mere za njegovu kontrolu

Preporučuje se da se prvo prouče strategije izbegavanja rizika (npr. zameniti ležaj ili deo na ležaju).

Nakon toga bi trebalo uzeti u obzir mogućnosti da se rizik prenese na treću stranu iako su one sve ograničenije.

Treći izbor je ublažavanje posledica rizika, tj. smanjivanje mogućnosti pojave greške.

Kao poslednja se ostavlja strategija prihvatanja rizika kada su sve ostale mogućnosti iscrpljene. U slučaju prihvatanja rizika treba znati mere za kontrolne tačke, tj. treba znati šta uraditi ako se nešto desi i ko to treba da uradi (npr. zamena ventila na sistemu za hlađenje).

### **Komunikacije i konsultacije**

Komunikacija je razmena informacija o riziku i upravljanju rizikom između donosioca odluka i drugih u svim fazama procesa RM.

Ovaj korak je od ključnog značaja za svaku od donetih odluka i razloga zašto se zahteva određena aktivnost u procesu upravljanja rizikom. Rezultat procesa upravljanja rizikom konkretnog problema i njegovog uticaja na kvalitet, tim za analizu rizika mora da dokumentuje na obrascu „Izveštaj analize rizika“.

### **Prikaz rezultata analize rizika**

Aktivnosti procesa upravljanja rizikom treba da budu implementirane tokom celog procesa upravljanja kvalitetom. Rezultati procesa upravljanja rizikom treba da se usvoje kao nova znanja i iskustva. Jednom završen proces upravljanja kvalitetom treba da se nastavi u slučaju događaja koji mogu uticati na rezultate, odnosno odluke završene analize.

Učestalost pregleda analiza rizika zavisi od nivoa samog rizika. Pregled rizika može da uključuje i preispitivanje odluka o prihvatanju rizika.

---

<sup>26</sup> Adamović Ž., Voskresenski, V., Tul, R., *Održavanje na bazi rizika*, Društvo za tehničku dijagnostiku, Beograd, 2007.

#### 4.6. METODOLOGIJA OTKRIVANJA SLABIH MESTA

U ovoj metodologiji traženje slabih mesta se zasniva na određivanju troškova (gubitaka) koje sa sobom nosi eksploatacija određenog dela sistema, usled izgubljene proizvodnje zbog otkaza i usled potrebe za održavanjem<sup>27</sup>. Označeni troškovi za j-ti od n delova sistema odnosno mašine, izraženi novčano i svedeni na jedan čas rada sistema, iznose:

$$C_j = C_r K_i + \frac{C_{oj}}{T_i}, \quad (4.6.)$$

gde je:

$C_j$  - vrednost rada mašine, odnosno sistema mašina, ako je mašina redno povezana u tehnološkom lancu (novčanih jedinica/čas)

$T_i$  - vreme rada mašine ostvareno u periodu posmatranja

$C_{oj}$  - troškovi održavanja j-tog dela u periodu posmatranja

$K_i$  - koeficijent otkaza dela j, definisan izrazom:

$$K_i = \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^{i=m} t_i \quad (4.7.)$$

gde je:

$m$  - broj otkaza dela „j“ u periodu posmatranja ( $i = 1, 2, \dots, m$ )

$t_i$  - vreme trajanja  $i$  - te opravke dela „j“

Uzimajući u obzir definiciju koeficijenta otkaza, može se dati:

$$C_j = \frac{C_r}{T_i} \sum_{i=1}^{i=m} t_{1i} + \sum_{i=1}^{i=m} t_{2i} \frac{C_{dj}}{T_i} + \frac{C_{sj}}{T_i}. \quad (4.8.)$$

gde je:

$t_{1i}$  - tehničko vreme  $i$ -te opravke j-tog dela (vreme neposrednog rada na opravi)

$t_{2i}$  - organizaciono vreme  $i$ -te opravke j-tog dela (vreme čekanja ekipe radnika koja treba da izvrši opravku, čekanje rezervnih delova, mehanizacije i sl.)

$C_{dj}$  - vrednost rezervnih delova utrošenih pri održavanju dela „j“ u periodu posmatranja

$C_{sj}$  - ostali troškovi održavanja na delu „j“ u periodu posmatranja

Na osnovu izloženog, može se dati sledeća definicija: Slabo mesto, sa gledišta korisnika proizvodnog sistema u privredi jeste svaka ona mašina, deo procesa, sklop ili detalj, čija je eksploatacija praćena nepovoljnim posledicama izraženim u gubicima proizvodnje, zbog otkaza i u troškovima održavanja - iznad nivoa koji je za korisnika prihvatljiv.

<sup>27</sup> Grothus H., *Pronalaženje i otklanjanje u slabim tačkama sredstava za rad*, Institut za tehniku postrojenja



Ovako shvaćeno slabo mesto ne odražava samo slabosti konstrukcije u određenim radnim uslovima već i slabosti službe održavanja u odnosu na svaki od  $n$  - delova, kao i druge činioce ranije opisane. Iz definicije proizilazi da se određivanje slabih mesta ne završava izračunavanjem vrednosti  $C_j$  za svaki od  $n$  delova, već je potrebno da se za svako  $C$ , posebno odluči da li je ta vrednost prihvatljiva.

Izloženi pristup problematici slabih mesta sa gledišta korisnika znatno je širi od pristupa koji ima konstruktor. Konstruktor posmatra slabo mesto u prvom redu kroz osobinu pouzdanosti, a u novije vreme i kroz osobinu pogodnosti za održavanje.

#### 4.6.1. ANEO POSTUPAK

Šta je ANEO? To je sistemska tehnika rada i formalna pomoć u mišljenju, koja omogućuje da se slaba mesta tehničkog sistema poznata iz iskustva, kao i potencijalni otkazi, njihove posledice i rizici blagovremeno iskažu i unesu u proces odlučivanja, zajedno sa merama otklanjanja. ANEO je korisna u razvoju i kreiranju novih proizvoda, kod novih postupaka izrade, kod sigurnosnih i odgovornih delova, kao i kod svih promena i organizacionih postupaka rada. ANEO je sredstvo racionalizacije pomoću sistematizacije.

Postupak ANEO sadrži sledeće osnovne korake:

*a) Identifikacija i definicija svih mogućih načina otkaza svakog sastavnog dela (SD).* Postupak za prikupljanje podataka o relativnom dešavanju pojedinih načina otkaza delova tehničkog sistema, u aproksimativnom procentu događanja, može se organizovati na više načina, kao što su:

1. obavezni tehnički pregledi tehničkog sistema
2. korektivno održavanje tehničkog sistema
3. integralno ispitivanje pouzdanosti tehničkog sistema, ili
4. posebno organizovano ispitivanje načina otkaza delova

U okviru 3. i 4. definišu se: ciklus ispitivanja (temperaturni ciklus, vibracije, relativna vlažnost, električna opterećenja i cikliranja), tok ispitivanja, postavljanje SD, merenje i utvrđivanje otkaza, akcije pri otkazu (klasifikacija otkaza i analiza otkaza u cilju određivanja uzroka i načina otkaza) i sl.

Za SD višeg nivoa ANEO se zasniva na načinu otkaza funkcije SD (otkaz u unapred zadatom vremenu, otkaz u trenutku prestanka rada, otkaz za vreme rada, rad van tolerancija itd.), relativni udeo načina otkaza, prema svim otkazima SD, procenjuje se i revidira na osnovu dostupnih informacija.

*b) Identifikacija i definicija efekta svakog načina otkaza SD.*

Efekat načina otkaza je posledica tog načina otkaza na rad, funkciju ili stanja nekog od SD tehničkog sistema. Efekti načina otkaza se klasifikuju kao:

- Lokalni efekat - posledica načina otkaza na SD koji se analizira
- Efekat na sledećem višem nivou - posledica načina otkaza na SD sledećeg višeg nivoa raščlanjavanja do nivoa koji se razmatra

- Krajnji efekat - posledica koju način otkaza ima na rad, funkciju ili stanje tehničkog sistema

c) *Klasifikacija težine efekta načina otkaza.*

Svaki način otkaza klasifikuje se prema težini krajnjeg efekta u jednu od sledeće četiri kategorije:

- Kategorija I- Katastrofalni otkaz: otkaz koji može da rezultuje ozbiljnim oštećenjem ili uništenjem tehničkog sistema
- Kategorija II-Kritičan otkaz: otkaz koji može da rezultuje gubitkom misije tehničkog sistema
- Kategorija III-Polovičan (graničan) otkaz: otkaz koji može da prouzrokuje manja oštećenja tehničkog sistema koja rezultuju degradiranjem performansi ili degradiranjem operacija tehničkog sistema
- Kategorija IV-Neznatan (zanemarljiv) otkaz: otkaz koji nije toliko težak da bi bio klasifikovan u kategoriju I, II, III, ali koji može zahtevati korektivno održavanje

d) *Identifikacija i definisanje metoda detekcije otkaza.*

Daje se opis metoda za detekciju otkaza pomoću kojih radna snaga za rukovanje uočava način otkaza. Potrebno je da se utvrde načini za detekciju otkaza, kao što su svetlosna i zvučna indikacija, razne vrste senzora, ispitivanja bez razaranja i sl.

Pored napred navedenih indikacija, potrebno je dati opis drugih indikacija da tehnički sistem neispravno radi ili je U OTKAZU, koje su evidentne radnoj snazi za rukovanje i održavanje.

Pored toga, potrebno je identifikovati kako normalne tako i nenormalne indikacije. Ako nema indikacije, treba identifikovati nedetektovan otkaz koji ugrožava ciljeve misije i/ili bezbednost radne snage. Ako nedetektovani otkaz dozvoljava da tehnički sistem ostane u stanju sigurnog rada, potrebno je istražiti situaciju drugog otkaza za koji postoji indikacija za radnu snagu za rukovanje, a koji bi ukazivao na prvi. Indikacije radnoj snazi za rukovanje treba da se opišu kao:

- Normalna - kao indikacija koja je evidentna radnoj snazi za rukovanje kada tehnički sistem radi normalno
- Nenormalna - kao indikacija koja je evidentna radnoj snazi za rukovanje kada tehnički sistem ne radi ispravno ili je U OTKAZU, i
- Pogrešna - kao pogrešna indikacija radnoj snazi za rukovanje, koja je prouzrokovana neispravnim radom ili otkazom nekog elementa.

Metod detekcije otkaza treba da uključi i izolaciju neispravnosti ili otkaza, kao najdirektniji postupak koji omogućuje radnoj snazi za rukovanje da izoluje neispravnost ili otkaz. U cilju izolacije neispravnosti ili otkaza, obično je potrebno da se sprovede neka od specifičnih akcija, kao što je izvršenje ugrađenog samotestiranja (built-in-test). U analizi mora da se ima u vidu da posmatrani otkaz može biti od manjeg značaja ili manje verovatan od nekog drugog otkaza koji prouzrokuje iste simptome. Postupci izolacije neispravnosti zahtevaju da radna snaga za rukovanje sprovede određenu akciju ili niz akcija praćenih proverom ili uporednim pregledom instrumenata i uređaja za kontrolu. Ova procedura se nastavlja sve dok se ne odredi zadovoljavajući tok akcija.

e) *Identifikacija mera kompenzacije svakog načina otkaza.*

Ove mere obuhvataju tehnička rešenja za kompenzaciju načina otkaza i akcije radne snage za rukovanje koje prevazilaze ili umanjuju efekat otkaza. Tehnička rešenja za kompenzaciju načina otkaza uključuju:

- Redundantne (nebitne) SD koji omogućavaju normalan i bezbedan rad tehničkog sistema
- Sigurnosna sredstva, kao što su sredstva za kontrolu ili alarmiranje koja omogućavaju efikasan rad ili ograničeno oštećenje
- Alternativne načine rada, kao što su SD u pasivnoj redundansi i sl.

Mere kompenzacije zahtevaju često akcije radne snage za rukovanje u cilju prevazilaženja ili ublažavanja efekta utvrđenog otkaza. Mere kompenzacije koje najbolje zadovoljavaju uočene indikacije otkaza često zahtevaju razvoj pomoćnih sredstava za određivanje najcelishodnijih akcija radne snage za rukovanje.

#### 4.6.2. SPROVOĐENJE ANALIZE KRITIČNOSTI

Cilj analize kritičnosti (AK) je da se na osnovu sprovedene ANEO za svaku kategoriju težine efekata načina otkaza izvrši rangiranje (gradacija) svakog potencijalnog načina otkaza, koristeći uslovnu verovatnoću nastajanja te težine efekta otkaza.

a) Kvalitativni pristup

U slučaju kada tehnički sistem nije raščlanjen na SD ili nisu poznati podaci o intenzitetima otkaza, način otkaza SD, ili efekat rezultuje u određenu težinu, procenjuje se na osnovu verovatnoće događanja. Pojedinačne verovatnoće događanja određene težine efekta za dati način otkaza, klasifikuju se u različite, logički definisane nivoe, koji kvalitativno prikazuju nivo verovatnoće dešavanja određene težine otkaza za dati način otkaza.

Nivoi verovatnoće dešavanja efekta otkaza određene težine za dati način otkaza, u toku vremenskog intervala rada SD, definisani su u tabeli T-4.5.

*Tabela T-4.5. Verovatnoće događanja efekta otkaza*

Red.br.	Oznaka i naziv nivoa	Verovatnoća događanja ( $p$ )
1	Nivo A – Čest	$0.2 \leq p < 1.0$
2	Nivo B – Umereno verovatan	$0.1 \leq p < 0.2$
3	Nivo C – Povremen	$0.01 \leq p < 0.1$
4	Nivo D – Neznatan (neverovatan)	$0.001 \leq p < 0.01$
5	Nivo E – Krajnje neverovatan	$p < 0.001$

Naglašava se da u tabeli T - 4.5.,  $p$  se računa u odnosu na ukupnu verovatnoću otkaza SD tehničkog sistema u toku vremenskog intervala rada SD.

b) Kvantitativni pristup

Kvantitativni pristup se koristi u slučaju kada su poznati intenziteti otkaza SD.

Kritičnost načina otkaza za  $p$  - tu težinu efekta otkaza ( $p = I, II, III, IV$ ), odnosno broj otkaza koji postiže od  $j$  - tog načina otkaza  $i$  - tog SD i rezultuje u  $p$ - tu težinu efekta otkaza, definiše se sledećom jednačinom:

$$(CR)_{ij}^{(p)} = \alpha_{ij} \cdot \beta_{ij}^{(p)} \cdot \lambda_{ij} \cdot t_i \quad (4.9.)$$

gde su:

$\alpha_{ij}$ - Relativni udeo (tehnički udeo, mera učestalosti)  $j$  – tog načina otkaza  $i$  - tog SD tehničkog sistema prema svim otkazima  $i$  - tog SD, pri čemu je:  $0 < \alpha_{ij} < 1$ . Vrednosti za  $\alpha_{ij}$  mogu se dobiti iz raznih izvora podataka intenzitetima otkaza, iz provedenih ispitivanja ili iz eksploatacije. Ako podaci o načinima otkaza SD nisu dostupni, tada  $\alpha_{ij}$  treba da predstavlja procenu koja se zasniva na analizi funkcije SD

$\beta_{ij}^{(p)}$ - Uslovna verovatnoća da će  $j$ -ti način otkaza  $i$  - tog SD rezultovati u naznačenoj klasifikaciji težine otkaza tehničkog sistema pod uslovom da se desio  $j$  - ti način otkaza  $i$  - tog SD. Vrednost za  $\beta_{ij}^{(p)}$  predstavlja procenu u vidu uslovne verovatnoće da će se desiti gubitak. Sugerisana skala data je u tabeli T-4.6

$\lambda_{ij}$  - Intenzitet otkaza  $i$  - tog SD. Prognozirani intenzitet otkaza u fazi realizacije preprojecka (projekta) ili izračunati intenzitet otkaza u fazi realizacije prototipa, nulte serije ili serije

$t_i$  - Ukupno vreme rada SD u toku trajanja misije, dobijeno iz podataka datih u definiciji tehničkog sistema

Tabela 4.6. Uslovna verovatnoća

Efekat otkaza	Vrednost $\beta_{ij}^{(p)}$
Siguran gubitak	$\beta_{ij}^{(p)} = 1$
Verovatan gubitak	$0.1 < \beta_{ij}^{(p)} < 1$
Moguć gubitak	$0 < \beta_{ij}^{(p)} < 0.1$
Nikakav gubitak (bez efekta)	$\beta_{ij}^{(p)} = 0$

## 5.0. RAZVOJ MODELA RIZIKA ZA PROCENU NIVOVA VIBRACIJA TEHNIČKIH SISTEMA

### 5.1. PROCENA RIZIKA

U procesnoj industriji menadžment rizika je tradicionalno fokusiran na razmatranje verovatnoće specifičnih događaja ili havarijskih situacija. U energetske postrojenjima koja predstavljaju najznačajnije polje primene, od 70-ih godina prošlog veka u SAD je uveden strukturirani pristup za identifikaciju scenarija otkaza i koncipiranje matematičkih alati u numeričkom procenivanju rizika – Procena verovatnoće rizika (PSA) (*PSA-Probabilistic Safety Assessment*).

Procena rizika predstavlja proces odlučivanja u odnosu na to da li se postojeći rizici nalaze u opsegu prihvatljivog rizika i da li su postojeći postupci za kontrolu rizika adekvatni. Glavni razlog zbog čega je potrebno napraviti procenu rizika je mogućnost za upravljanje rizikom, njegovo smanjenje ili eliminaciju<sup>28</sup>.

Procena rizika treba da bude što je moguće objektivnija i da ista zavisi od naučnih kriterijuma. Po dobijanju informacije u vezi sa rizikom, možemo početi sa primenom efektivnih metoda za njegovo smanjenje, čime ćemo ostvariti povećanje efikasnosti u smanjenju rizika. Za tok procedure procene rizika, možemo reći da bi on trebao biti sledeći:

- pokretanje postupka procene rizika
- plan sprovođenja postupka procene rizika
- opis tehnološkog i radnog procesa, opis sredstava za rad i sredstava i opreme za ličnu zaštitu na radu poslovnog sistema
  - prikaz tehnološkog procesa u poslovnom sistemu
  - prikaz radnih procesa u poslovnom sistemu
  - prikaz sredstava za rad
- objekti poslovnog sistema
- oprema za rad u poslovnom sistemu
- ostala sredstva
  - sredstva i oprema za ličnu zaštitu koja se koriste u poslovnom sistemu
  - sirovine i materijali koji se koriste u poslovnom sistemu
- snimanje organizacije rada u poslovnom sistemu
- stanje bezbednosti i zdravlja na radu u poslovnom sistemu
  - stručni nalazi o izvršenim pregledima i ispitivanjima
- opreme za rad koja se koristi u poslovnom sistemu
- radne okoline poslovnog sistema
  - dokumentacija za opremu za rad
  - sredstva i oprema za ličnu zaštitu
  - opasne materije koje se koriste u poslovnom sistemu

---

<sup>28</sup> Adamović Ž., Voskresenski, V., Tul R., *Održavanje na bazi rizika*, Društvo za tehničku dijagnostiku

- izveštaji o prethodnim i periodičnim lekarskim pregledima
  - podaci vezani za povrede na radu u poslovnom sistemu
  - podaci vezani za profesionalna obolenja i obolenja u vezi sa radom u poslovnom sistemu
  - evidencije iz oblasti bezbednosti i zdravlja na radu u poslovnom sistemu (čl. 49. Zakona o bezbednosti i zdravlja na radu)
  - ostala dokumentacija koju poseduje poslodavac, a koja se odnosi na bezbednost i zdravlje na radu
- identifikovane opasnosti i štetnosti na radnom mestu u poslovnom sistemu, utvrđivanje liste opasnosti i štetnosti, kao procena rizika
    - identifikovane opasnosti i štetnosti
    - procena rizika
  - način i mere za otklanjanje, smanjenje ili sprečavanje rizika
  - zaključak

## 5.2. PROCENA RIZIKA PRIMENOM KINNEY METODE

Kinney metoda se može primeniti za procenu i vrednovanje rizika u poslovnom sistemu identifikacijom potencijalnih opasnosti i štetnosti, tj. bazira se na analizi:

- verovatnoće mogućeg neželjenog događaja  $V$  (pojave višeg nivoa vibracija)
- posledice koje će se dogoditi usled pojave neželjenog događaja  $P$
- učestalosti pojavljivanja neželjenog događaja  $U$

Na osnovu utvrđene verovatnoće, posledica i učestalosti, vrednovanje rizika  $R$  računa se na sledeći način:

$$R = V \cdot P \cdot U \quad (5.1.)$$

gde je:  $V$  – verovatnoća,  $P$  – posledica,  $U$  – učestalost.

Odavde se verovatnoća pojave povišenog nivoa vibracija koje dovodi do rizika za nastanak neželjenog događaja može izračunati

$$V = \frac{R}{P \cdot U} \quad (5.2.)$$

Istraživanja na generatorima, kompresorima, tekstilnim mašinama i pumpama, u periodu 2012 – 2017, doprinela su da se sistematizuju sledeće tabele (nivo vibracija je bio 40 – 100  $\mu\text{m}$ ).

Kriterijum – *verovatnoća* ( $V$ ) pojave povišenog nivoa vibracija se rangira počev od 0,01 (jedva verovatna) do 10 (sasvim očekivana). U tabeli 5.1. predstavljen je opis kriterijuma za procenu verovatnoće pojave neželjenog događaja.

*Tabela 5.1. Opis kriterijuma za procenu verovatnoće*

<b>VEROVATNOĆA</b>	
RANG	OPIS KRITERIJUMA
0,01	malo verovatno
0,02	praktično neverovatno
0,05	postoji, ali samo malo verovatno
1	mala verovatnoća, ali moguće u ograničenim slučajevima
3	malo moguće
6	sasvim moguće
10	sasvim očekivano

Kriterijum – posledice (P) pojava otkaza, zastoja ili havarije, udesa, nesreće rangira se počev od 1 (male) do 10 (katastrofalne). U tabeli 5.2. predstavljen je opis kriterijuma za procenu posledica kod pojave neželjenog događaja.

*Tabela 5.2. Opis kriterijuma za procenu posledica*

<b>POSLEDICE</b>	
RANG	OPIS KRITERIJUMA
0,5	male posledice
1	znatne posledice
2	ozbiljne posledice
5	veoma ozbiljne posledice
10	katastrofalne posledice

Kriterijum – učestalost (U) pojava otkaza, zastoja, havarije, udesa, nesreće, smrtnih događaja rangira se od 1 (godišnje) do 10 (trajno, kontinualno). U tabeli 5.3. predstavljen je opis kriterijuma za učestalost pojavljivanja neželjenog događaja.

*Tabela 5.3. Opis kriterijuma za učestalost*

<b>UČESTALOST</b>	
RANG	OPIS KRITERIJUMA
0.5	godišnje pojavljivanje
1	mesečno pojavljivanje
2	nedeljno pojavljivanje
5	dnevno pojavljivanje
10	trajno, kontinuirano pojavljivanje

Rizik (R) se rangira od prihvatljivog (zanemarljivo malog rizika) ranga R1 do ekstremno visokog rizika ranga R5, koji ne dozvoljava da aktivnost niti počne niti nastavi, dok se nivo rizika ne smanji. U tabeli 5.4. predstavljeni su kriterijumi za određivanje ranga rizika.

Za rizike ranga R1 i R2 možemo reći da su to prihvatljivi rizici, rizik ranga R3 je uslovno prihvatljiv rizik, a rizici ranga R4 i R5 su neprihvatljivi rizici.

Tabela 5.4. Kriterijumi za određivanje ranga rizika

Ukupna ocena	Rang rizika	Klasifikacija nivoa rizika	AKTIVNOST
0,1-10	R1	Prihvatljiv, zanemarljivo mali rizik	Ne zahteva se nikakva aktivnost
10-50	R2	Mali rizik	Nema potrebe za dodatnim aktivnostima pri upravljanju operacijom. Može se razmotriti ekonomski isplativije rešenje ili unapređenje bez dodatnih ulaganja.
50-100	R3	Srednji rizik	Potrebno je uložiti napor kako bi se smanjio rizik, ali troškovi prevencije moraju biti pažljivo planirani i ograničeni do izvesnog nivoa. Potrebno je definisati rok za sprovođenje unapređenja. Kod onih događaja kod kojih mogu nastupiti izuzetno opasne posledice, potrebno je dodatno proveriti verovatnoću nastanka takvog događaja kako bi se definisao potreban nivo aktivnosti na ublažavanju rizika.
101-200	R4	Visok rizik	Ne sme se započeti sa datom aktivnošću dok nivo rizika ne bude snižen. Mogu biti potrebna dodatna sredstva kako bi se rizik smanjio. Ako se rizik odnosi na sve započete aktivnosti, potrebno je preduzeti hitne akcije na smanjenju nivoa rizika.
Preko 200	R5	Ekstremno visok rizik	Aktivnost ne sme biti započeta, ni nastavljena sve dok se nivo rizika ne smanji. Ako ni ulaganjem neograničenih sredstava nije moguće smanjiti nivo rizika, aktivnost mora biti zabranjena.

### 5.3. PROCENA RIZIKA PRIMENOM “SINGAPURSKOG” (3x3)

U realizaciji „Singapurskog“ modela (3x3), rizik se predstavlja kao proizvod *verovatnoće* nastanka neželjenog događaja ( $V$ ) i posledica *težine* neželjenog događaja ( $T$ ), tj.:

$$R = V \cdot T \quad (5.3.)$$

Oдавde je verovatnoća nastanka povišenog nivoa vibracija

$$V = \frac{R}{T} \quad (5.4.)$$



Sprovedena istraživanja na generatorima, kompresorima, tekstilnim mašinama i pumpama za vibracije 70 – 100  $\mu\text{m}$  data su u sledećim tabelama<sup>29</sup>.

Vrednovanje procene rizika se postiže prikazom modela matrice. Postoje matrice sa različitim brojem nivoa, ali najjednostavniji model matrice rizika 3x3 sa tri nivoa rizika. U tabeli 5.5. su predstavljeni nivoi verovatnoće i dat je njihov opis, u tabeli 5.6. date su posledice težine neželjenog događaja i njihov opis, a u tabeli 5.7. je prikazana matrica za određivanje nivoa rizika. Na osnovu matrice za ocenu rizika definiše se rang rizika za klasifikaciju i karakterizaciju procene rizika kao što je prikazano u tabeli 5.8.

Tabela 5.5. Nivoi verovatnoće i njihov opis

Verovatnoća nastanka neželjenog događaja (V)		Opis
Mala verovatnoća	0,5	Neželjeni događaj verovatno neće se dogoditi
Srednja verovatnoća	1	Moguće je nastajanje neželjenog događaja (poznato je da se događa)
Velika verovatnoća	2	Neželjeni događaj se događa često ili se ponavlja

Tabela 5.6. Posledice težine neželjenog događaja i njihov opis

Posledica težine neželjenog događaja (T)		Opis
Male posledice	0,5	Na primer ako je povreda na radu, zahteva se samo mera prve pomoći (manje posekotine, iritacija kože, itd.).
Srednje posledice	1	Na primer ako je povreda na radu, zahteva se medicinska pomoć, obolenje izaziva privremenu nesposobnost ili invalidnost (opekotine, uganuća, prelomi malih kostiju, naglupost i dr.
Velike posledice	2	Na primer ako je povreda na radu, imamo smrtni ishod, teške povrede, profesionalne bolesti praćene teškim posledicama (amputacije, prelomi velikih kostiju, rak, teška trovanja, bolesti opasne po život i dr.

Tabela 5.7. Matrični model procene rizika kod „Singapurske“ metode

Posledica težine neželjenog događaja (T)		Verovatnoća nastanka neželjenog događaja (V)		
		Mala	Srednja	Velika
		1	2	3
Velika	2	Mali rizik 2	Veliki rizik 4	Vrlo veliki rizik 6
Srednja	1	Vrlo mali rizik 1	Umeren rizik 2	Veliki rizik 4
Mala	0,5	Zanemarlivo mali rizik 0,5	Vrlo mali rizik 1	Mali rizik 2

<sup>29</sup>Jurić S., Bursać Ž., *Optimizacija troškova pouzdanosti motornih gaskompresora*, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije

Tabela 5.8. Kriterijumi za klasifikaciju i karakterizaciju procene rizika

Procena ranga rizika	Klasifikacija nivoa rizika	Karakterizacija rizika
R1	Zanemarivo mali rizik	Prihvatljiv rizik
R2	Vrlo mali rizik	
R3	Mali rizik	Povećani rizik
R4	Umeren rizik	
R6	Veliki rizik	Neprihvatljiv rizik
R9	Vrlo veliki rizik	

#### 5.4. PROCENA RIZIKA PRIMENOM METODE GUARDMASTER

Metoda Guardmaster je namenjena da se podstakne metodičan način procene rizika. Ova metoda se razlikuje od ostalih polukvantitativnih metoda za procenu rizika u tome što se rizik računa kao zbir *verovatnoće* pojave neželjenog događaja, *učestalosti* izlaganja neželjenom događaju i *posledice* neželjenog događaja, tj. prema sledećem obrascu:

$$R = V + U + P \quad (5.5.)$$

gde je:

$V$  – verovatnoća pojave neželjenog događaja

$U$  – učestalost izlaganja neželjenom događaju

$P$  – posledica neželjenog događaja

Odavde je pojava povišenog nivoa vibracija

$$V = R - ( U + P ) \quad (5.6.)$$

Istraživanja na generatorima, tekstilnim mašinama i pumpama, za vibracije 40 – 100  $\mu\text{m}$ , data su u sledećim tabelama.

Verovatnoća pojave neželjenog događaja ( $V$ ) kao faktor rizika, definiše se pomoću skale sa 4 nivoa rangiranja. Rangiranje verovatnoće nastanka neželjenog događaja je predstavljeno u tabeli 5.9. učestalost izlaganja neželjenom događaju ( $U$ ) kao faktor rizika, definiše se pomoću skale sa 3 nivoa rangiranja. Rangiranje učestalosti izlaganja neželjenom događaju je predstavljeno u tabeli 5.10. Treći faktor rizika je posledica neželjenog događaja ( $P$ ) i on se definiše pomoću skale sa 4 nivoa rangiranja. Rangiranje posledice neželjenog događaja je dato u tabeli 5.11. Rizik se kategoriše na skali od 3 do 20, pri čemu najmanji rizik ima ocenu „3“ (1+1+1), a najveći rizik ocenu „20“ (6+4+10). Na kraju, nivo rizika ( $R$ ) definiše se pomoću skale sa 4 nivoa rangiranja (tabela 5.12.)

Ukoliko se utvrdi neki od korekcionih faktora predstavljenih u tabeli 5.13. može se realizovati korekcija procenjenih vrednosti pre samog definisanja nivoa rizika.

Tabela 5.9. Rangiranje verovatnoće nastanka neželjenog događaja

VEROVATNOĆA (V)		
RANG	Numerička vrednost	Opis verovatnoće
0,5	0,5	Mala
1	1	Moguća
2	2	Verovatna
3	3	Sigurna

Tabela 5.10. Rangiranje učestalosti izlaganja neželjenom događaju

UČESTALOST (U)		
RANG	Numerička vrednost	Opis učestalosti
0,5	0,5	Retko - jednom nedeljno ili ređe
1	1	Povremeno - dnevno ili ređe
2	2	Često - puta u toku dana

Tabela 5.11. Rangiranje posledice neželjenog događaja

POSLEDICE (P)		
RANG	Numerička vrednost	Opis posledice
0,5	0,5	Lakše posledice
1	1,5	Srednje teške posledice
2	3	Teške posledice
3	5	Katastrofalne posledice

Tabela 5.12. Nivoi (rang) rizika

NIVO RIZIKA (R)			
RANG	Numerička vrednost	Opis nivoa (ranga) rizika	
0,5	oko 1 i 2	Zanemarljiv rizik	RADNO MESTO NIJE SA POVEĆANIM RIZIKOM
1	<4	Mali rizik	
2	4÷10	Umeren rizik	
3	>10	Visok rizik	RADNO MESTO SA POVEĆANIM RIZIKOM

Tabela 5.13. Korekcionni faktori prilikom procene rizika

Red. broj	Karakteristični faktori	Korekcije
1	Opasnostima je izloženo više od jedne osobe	Pomnožiti faktor P – težina povrede sa brojem ugroženih osoba
2	Rukovalac mašinom je neiskusni i neobučeni	Dodati 2 poena na ukupnu ocenu rizika
3	Veoma dugačak interval (duži od godinu dana) između dva izlaganja	Dodati poene tako da faktor U- učestalost izlaganja bude maksimalan
4	Produženo vreme zadržavanja u opasnoj zoni bez potpunog isključivanja mašine sa energije napajanja	Ukoliko je vreme duže od 15 minuta po izlaganju, dodati 1 poen na faktor U – učestalost izlaganja

## 5.5. PROCENA RIZIKA PRIMENOM METODE PILZ

Kod Pilz metode za procenu rizika, rizik se predstavlja kao proizvod *verovatnoće* nastanka neželjenog događaja ( $V$ ), *učestalosti* izlaganja neželjenom događaju ( $U$ ), *posledice* neželjenog događaja ( $P$ ) i *broja osoba* izloženih neželjenom događaju ( $B$ ), tj.:

$$R = V \cdot U \cdot P \cdot B \quad (5.7.)$$

Odavde je verovatnoća pojave povišenog nivoa vibracija

$$V = \frac{R}{U \cdot P \cdot B} \quad (5.8.)$$

Verovatnoća pojave neželjenog događaja ( $V$ ) kao faktor rizika, definiše se pomoću skale sa 8 nivoa rangiranja. Rangiranje verovatnoće nastanka neželjenog događaja je predstavljeno u tabeli 5.14. Učestalost izlaganja neželjenom događaju ( $U$ ) kao faktor rizika, definiše se pomoću skale sa 7 nivoa rangiranja. Rangiranje učestalosti izlaganja neželjenom događaju je predstavljeno u tabeli 5.15. Treći faktor rizika je posledica neželjenog događaja ( $P$ ) i on se definiše pomoću skale sa 7 nivoa rangiranja. Rangiranje posledice neželjenog događaja je dato u tabeli 5.16. Na kraju, četvrti faktor rizika je broj osoba ( $B$ ) i on se definiše pomoću skale sa 5 nivoa rangiranja, a rangiranje je predstavljeno u tabeli 5.17. Nivo rizika ( $R$ ) definiše se pomoću skale sa 5 nivoa rangiranja (tabela 5.18.).

Tabela 5.14. Rangiranje verovatnoće nastanka neželjenog događaja

VEROVATNOĆA ( $V$ )		
RANG	Realna vrednost	Opis verovatnoće
0,5	0,020	moguće samo u ekstremnim situacijama
1	0,180	vrlo malo verovatno
2	1,0	malo verovatno
3	1,5	moguće (ali nije uobičajeno)
4	3,5	50% moguće
5	6	verovatno (nije iznenađenje)
6	8	verovatno (treba očekivati)
7	10	izvesno (sigurno će se desiti)

Tabela 5.15. Rangiranje učestalosti nastanka neželjenog događaja

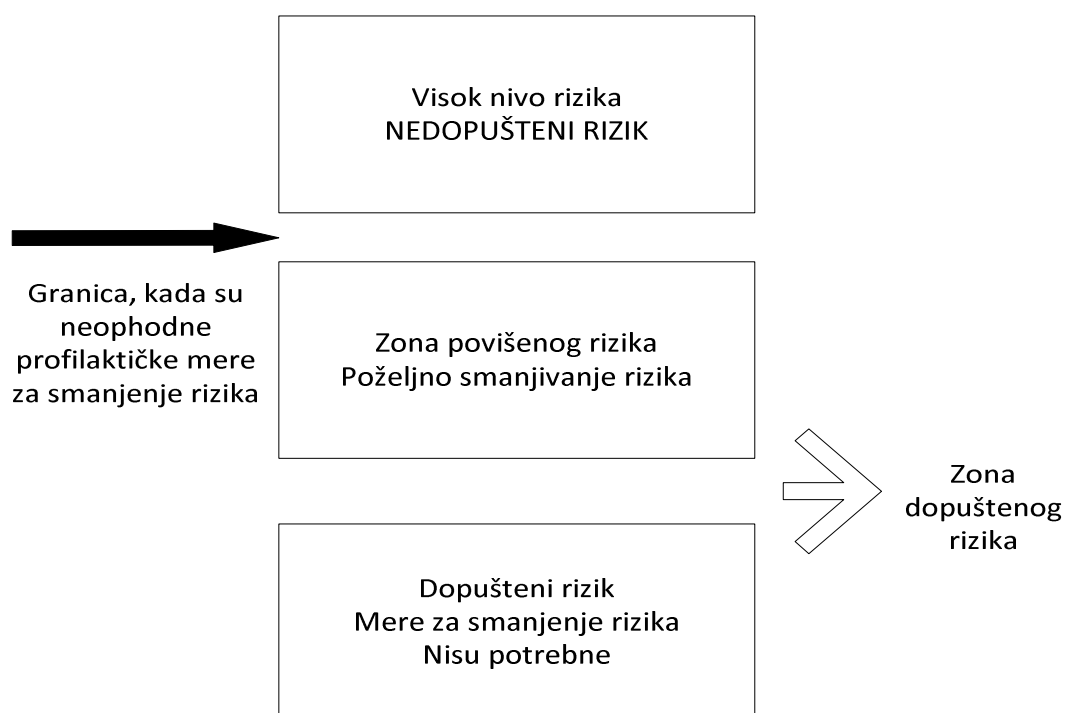
UČESTALOST ( $U$ )		
RANG	Realna vrednost	Opis učestalosti
0,5	0,05	Jedanput u radnom veku
1	0,25	Godišnje
2	0,5	Mesečno
3	2	Nedeljno
4	3,0	Dnevno
5	3,5	Časovno
6	4	Konstantno

Tabela 5.16. Rangiranje posledice neželjenog događaja

<b>POSLEDICE (P)</b>		
RANG	Numerička vrednost	Opis posledice
0,5	0,05	ogrebotina, nagnječenje
1	0,2	posekotina, ubod, lakša opekotina
2	1	lomljenje manje kosti, opekotina ili blaga bolest (privremena)
3	2	lomljenje veće kosti, teža opekotina, ozbiljna bolest (privremena)
4	3	gubitak uda, oka, vida, trajna obolenja
5	5	gubitak dva uda, očiju, teža trajna obolenja
6	10	Fatalnost

Tabela 5.17. Rangiranje faktora broj osoba izloženih neželjenom delovanju

<b>BROJ OSOBA (B)</b>		
RANG	Numerička vrednost	Opis broja osoba
0,5	1	1 – 2 osobe
1	2	2 – 5 osoba
2	4	5 – 10 osoba
3	7	10 – 30 osoba
4	10	preko 30 osoba



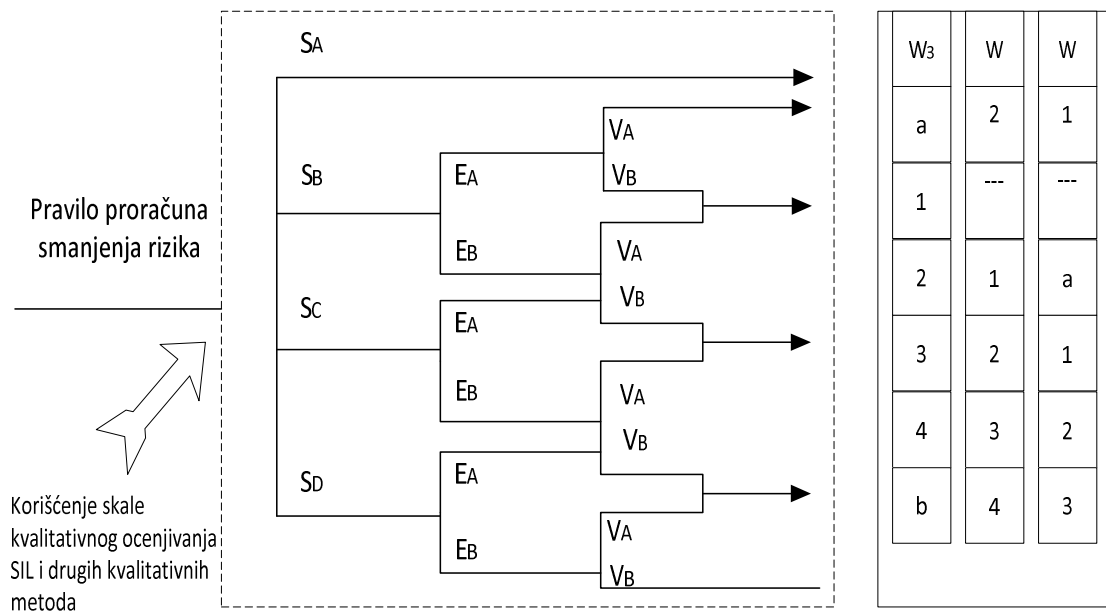
Slika 5.1. Šema zona dopuštenog rizika

Tabela 5.18. Nivoi (rang) rizika

NIVO RIZIKA (R)		
RANG	Numerička vrednost	Opis nivoa (ranga) rizika
0,5	0÷3	zanemarljiv rizik
1	4÷30	nizak rizik (ali postoji)
2	30÷100	umeren rizik
3	100÷300	visok rizik
4	preko 300	neprihvatljiv rizik

## 5.6. MATRICA (XI) (Standard of Safety Instrumental System – SIL, Bently, Nevada, USA)

Metod SIL se koristi da bi se uprostile kvantitativne metode analize “Analiza stabla grešaka” ili Markovljeva metoda.



Slika 5.2. Analiza stabla grešaka

**S** – parameter posledica  
**E** – parameter vremena delovanja  
**V** – verovatnoća izbegavanja opasnosti  
**W** – veličina koja opisuje potrebu za zaštitom

----- - zaštita nije nužna  
**a** – nije potrebna specijalna zaštita  
**b** – zaštitna sredstva su nedovoljna  
**1,2,3,4**-stepen integracije bezbednosti (SIB)

Tabela 5.19. Veza parametara rizika sa nedaćama

Parametri rizika		Klasifikacija	Primeri
Posledice (S)	S <sub>A</sub>	Nedaća minimalna. Katkad može uticati na ispunjenje proizvodnog plana.	Neveliko isticanje iz gornjeg ventila. Isticanje iz rezervoara. Neveliko zagađenje sredine mašću iz mašine.
	S <sub>B</sub>	Nedaća izaziva ozbiljna oštećenja.	Oblak pare, nastao isticanjem hemijskih supstanci. Oštećenje kompresora.
	S <sub>C</sub>	Nedaća izaziva velika oštećenja, ali ih je moguće brzo eliminisati.	Količina aerosoli/pare u vazduhu tolika je, da počinje da zagađuje radnu sredinu i izaziva trovanje. Kontrolise se zagađenje otekle vode.
	S <sub>D</sub>	Nedaća izaziva velika oštećenja, ali ih je nemoguće brzo ukloniti.	Količina pare ili oteklih voda tolika je, da izaziva zagađenje sredine.

## a) Stepni integracije bezbednosti: planiranje/proračun verovatnoće nedaće

Tabela 5.20. Stepni integracije bezbednosti za proračun rizika

Zahtevani režim operacija		
Stepen integracije bezbednosti	Proračunata srednja verovatnoća otkaza (SVO)*	Umanjenje rizika
3	$< 10^{-4}$ do $10^{-3}$	$> 5000$ do $< 1$
2	$< 10^{-3}$ do $10^{-2}$	$> 5000$ do $< 6000$
1	$< 10^{-2}$ do $10^{-1}$	$> 50$ do $< 500$
0,5	$< 10^{-1}$ do $10^{-0,5}$	$> 5$ do $< 50$

\*Postoji mogućnost da će sistem prestati da radi.

## b) Stepni integracije bezbednosti: učestalost opasnih nedaća na sat

Tabela 5.21. Stepni integracije bezbednosti za pregled nedaća

Stepen integracije bezbednosti (SIB)	Učestalost opasnih nedaća na sat
3	$< 10^{-8}$ do $10^{-7}$
2	$< 10^{-7}$ do $10^{-6}$
1	$< 10^{-6}$ do $10^{-5}$
0,5	$< 10^{-5}$ do $10^{-4}$

Metod, takođe, pruža mogućnost prognoziranja podesnosti ili pripremljenosti tehnološke produkcije, određujući tzv. "Stepen integracije podesnosti – SIP", i to ako su uključeni sledeći parametri: SVIN – srednje vreme između nedaća (vremenski interval kada se može očekivati nedaća); SVRS – srednje vreme za remont sistema (uređaja itd) i srednja verovatnoća otkaza.

U proceni se koriste zavisnosti :  $SVO = (\text{brzina pojavljivanja nedaća})^2 \times \text{interval testiranja}$   
 Brzina pojavljivanja nedaća =  $1/SVIM$

$$SIP = a - \frac{b \times c \times d}{e}, \text{ gde je} \quad (5.9.)$$

SIP – stepen integracije podesnosti; a- vreme potrošeno na remont i opsluživanje (u poređenju s radnim vremenom), %; b – potrošena suma novca u jedinici vremena; s – SVRS; d – SVN (verovatnoća opasne nedaće po jedinici vremena); e – sadašnji rashodi po jedinici vremena.

### Drugi primeri verovatnoće za rotacione mašine:

Tabela 5.22. Veza rizika sa verovatnoćama dešavanja događaja

Mogućnost	Opis	Verovatnoća
Visoka	Velika mogućnost dešavanja	Stepen = 0,5 – 1
Srednja	Događaj će se desiti ravnomerno	Stepen = 0,2 – 0,5
Niska	Događaj će se desiti	Stepen = 0,05 – 0,2
Vrlo niska	neravnomerno	Stepen = 0,001 – 0,6
Krajnje niska	Događaj će se desiti retko	Stepen = 10 <sup>-5</sup> – 0,0015
Neznatna	Događaj će se desiti veoma retko Događaj se praktično neće ni desiti	Stepen = 0 – 10 <sup>-7</sup>

Tabela 5.23. Podela verovatnoće dešavanja događaja

Opis	Verovatnoća
Redak slučaj	0,00 – 0,015
Malo verovatan slučaj	0,15 – 0,055
Moguć slučaj	0,055 – 0,210
Često moguć slučaj	0,21 – 0,510
Slučaj se dešava konstantno	0,51 – 1,50

Ovi podaci dobijeni su ispitivanjem kompresora u preduzeću.

## 5.7. MATRICA (IV) (Long and John) – Pojava nesposobnosti radnika za rad

Kategorija rizika ili učestalosti zbivanja (matrica IV):

Visoka – jedanput mesečno  
Srednja – jedanput godišnje  
Niska – jedanput u tri godine  
Veoma niska – jedanput u 10 godina

Obim posledica (matrica IV):

A – veoma ozbiljne (radna nesposobnost duža od 200 dana) ili smrt  
B – ozbiljne (prolazna radna nesposobnost u trajanju od 20 do 199 dana)  
C – приметne (prolazna radna nesposobnost u trajanju od 2 do 19 dana)  
D – nevelike (prolazna radna nesposobnost od 1 do 2 dana)



Učestalost ↑	Visoka	C	B	A	A
	Srednja	C	B	B	A
	Niska	D	C	B	B
	Veoma niska	D	D	C	B
		Visoka	Visoka	Visoka	Visoka
		→ Posledice →			

*Slika 5.3. Zavisnost učestalosti zbivanja od obima posledica*

## 6.0. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

### 6.1. UVOD

Ubrzani tehničko-tehnološki progres uslovljen razvojem novih tehnologija, materijala i informacionih sistema dovodi do promena u sadržaju i karakteru sistema održavanja tehničkih sistema. Metode održavanja na bazi rizika nisu zamena za "tradicionalne" metode održavanja, već suštinski predstavljaju njihovu važnu i korisnu dopunu. Osim toga, upravljanje održavanjem na bazi rizika vibracija usmerava se pre svega na preventivno održavanje prema stanju, i to posebno na obavljanje tehničkih pregleda energetskih postrojenja, odnosno za odlučivanje šta, gde, kada i kako treba pregledati.

Kod vibracione dijagnostike se ispitivanja izvode u pogonskim uslovima, bez zaustavljanja pogona (on-line metoda). Ugradnja senzora je jednostavna (izrada provrta s odgovarajućim navojem). Kao i većina dijagnostičkih metoda i ova metoda zahteva veliko iskustvo i relativno složenu mernu opremu.

Turbine predstavljaju dinamički sistem sa specifičnim karakteristikama. Normalan radni režim odlikuju različite oscilirajuće hidrauličke i mehaničke veličine. One zavise od mnogih faktora pod kojima su turbine dizajnirane, uslova u kojima će raditi, dinamike cevovoda, rotirajućih elementa i mnogih drugih.

Promatranjem određenih dinamičkih karakteristika može se dobiti celokupna slika o radnom režimu sistema. Program održavanja i kontrole rada opreme na bazi vibracija zasniva se na činjenicama da:

- svi sastavni delovi sistema vibriraju i stvaraju buku zbog manjih ili većih neispravnosti
- prekomerne vibracije ili znatno povišenje normalnih nivoa vibracija ili buke sastavnih delova sistema predstavljaju upozorenje da su neispravnosti postale mehanički, električni ili eksploatacioni problem i
- razne smetnje stvaraju vibracije i buku na razne načine.

Danas su tehnički sistemi sve kompleksniji, produktivniji i skuplji, i od njih se zahteva visok nivo pouzdanosti odnosno minimiziranje stanja u otkazu, do gotovo potpunog eliminisanja otkaza. Umesto klasičnih (neautomatizovanih) dijagnostičkih postupaka koriste se automatizovani dijagnostički modeli bazirani na primeni računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija.

Na tržištu postoji veliki izbor opreme za merenje vibracija, kojom je moguće provesti frekvencijsku analizu vibracija. Vibracije se registruju analognim putem – pretvaranjem mehaničkih pomeraja u analogne električne signale (strujne ili naponske)<sup>30</sup>. Senzori vibracija mogu da budu kontaktni i beskontaktni, pri čemu prvi mere apsolutne, a drugi relativne vibracije. Osim toga, na njihov izbor utiče i odnos snage izvornog signala i provodljivost veza do mernog mesta. Kontaktni senzori mogu meriti ubrzanje vibracija

---

<sup>30</sup> N. S. Feng and E. J. Hahn 1995 *Including foundation effects on the vibration behaviour of rotating machinery, Mechanical Systems and Signal Proces*

(piezoelektrični), brzinu (induktivni) i pomeraj (seizmički). Beskontaktni senzori se uglavnom izvode na induktivnom ili kapacitativnom principu.

Mesta vibracionih kontrola obrtnih mašina određena su normativnim dokumentima i u pravilu su to mesta uležištenja osovina, odnosno mesta na kućištima samih ležajeva. Detaljna ispitivanja vibracija su vršena u hidroelektrani „Bočac“ na turbini jedan i dva. Druga elektrana na kome su vršena ispitivanja su „Jajce I“. Tako dobijeni rezultati su poređeni sa rezultatima na drugim elektranama. Druga ispitivanja su vršena na rotacionim predilicama u tekstilnoj industriji „Svila“ Čelinac i na pumpama i kompresorima u livnici čelika „Jelšingrad“ Banja Luka.

## 6.2. METODOLOGIJA I OBIM ISPITIVANJA

### 6.2.1. OBIM ISPITIVANJA

#### Ispitivanja u HE „Bočac“ su:

Analiza podataka sa instalisanim sistemom COMPAS za stalno praćenje vibracija u HE Bočac, kao i paralelna snimanja su rađena od 25.08. do 31.10. 2015. god. Osnovni zadatak istraživanja bila je analiza dinamičkog ponašanja hidroagregata, analizirajući njegov trenutni rad i rad između dva remonta. Potrebno je bilo razviti takav dijagnostički sistem koji paralelno sa instalisanim sistemom COMPASS koji je instalisan u Hidroelektrani može izvršiti validaciju mernih podataka i podešavanje instalisanog sistema. Na bazi svih tih merenja treba uraditi: ocenu dinamičkog stanja hidroagregata, analizirati dinamičko ponašanje i na bazi utvrditi postojanost pobudnih sila, odnosno neispravnosti u radu te dati preporuke za dalju eksploataciju<sup>31</sup>.

U prvoj fazi istraživanja rađene su sledeće aktivnosti:

- Razvoj novih elektronskih dijagnostičkih baza za hidroagregate u HE „Bočac“
- Izrada metodologije merenja i razvoj vibrodijagnostičkih prikaza za potrebe dijagnostičkih analiza
- Validacija merenja i podešavanje COMPASS sistema, koristeći se prenosnom dijagnostičkom opremom
- Analiza apsolutnih vibracija u svim režimima rada (tranzijentni način rada, malo opterećenje, nominalno opterećenje), u skladu sa međunarodnim standardom ISO 10816-5 i standardima proizvođača opreme. Analiza uključuje: analizu ukupnog nivoa vibracijske brzine i vibracijskog pomeranja i spektralnu analizu. Ove analize su rađene na bazi novorazvijenih elektronskih dijagnostičkih baza<sup>32</sup>.

U drugoj fazi istraživanja rađene su sledeće aktivnosti:

- Analiza rotornih vibracija u svim režimima rada hidroagregata (mirovanje, tranzijentni način rada, malo opterećenje, nominalno opterećenje), u skladu sa međunarodnim standardom ISO 7919. Analiza uključuje: analizu ukupnog

---

<sup>31</sup> Adamović Ž., Ašonja A., Milošević D., *Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

<sup>32</sup>Barret. L.E., Gunter, E.J., and Allaire, P.E. 1978 *Optimum Bearing Support Damping for Unbalance Response and Stability of Rotating Machinery*, *Journal of Engineering for Power*,

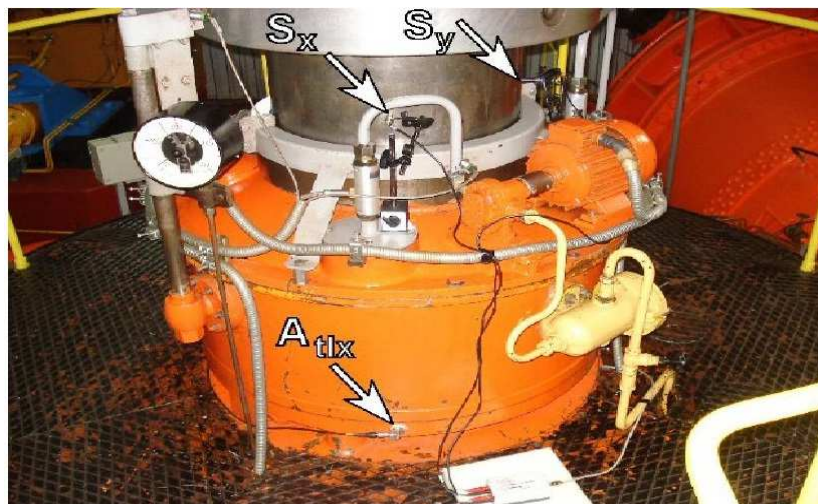
- nivoa vibracijskog pomeranja, spektralnu analizu, DC analizu pozicije rukavca u ležaju, analizu kinetičke putanje rukavca, orbitalnu analizu i analizu redova,
- Analiza vazdušnog zazora, temperaturna i korelaciona analiza.

### Ispitivanja u HE „Jajce I“ su:

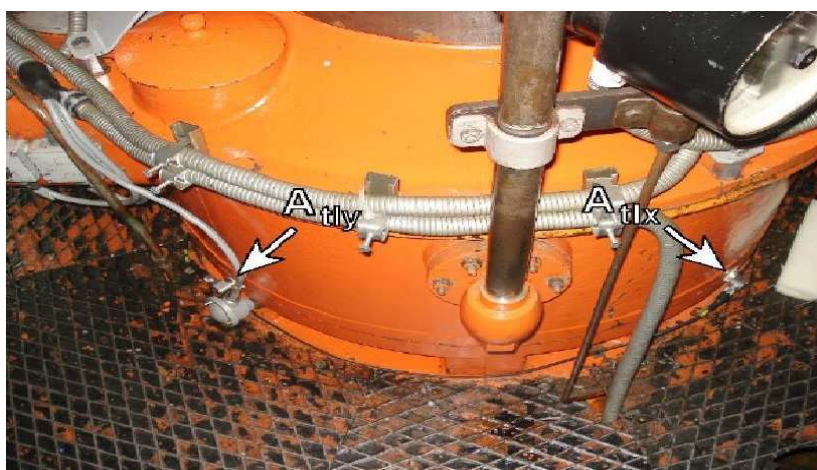
Merenje dinamičkih karakteristika agregata podrazumevaju merenja različitih veličina kao što su:

- vibracije generatorskog nosećeg ležaja u X,Y i Z smeru  $Anlx$  ,  $Anly$  ,  $Anlz$ ,
- vibracije turbinskog vodećeg ležaja u X i Y smeru  $Atlx$  ,  $Atly$ ,
- vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja (samo na agregatu 1) u X smeru  $Advlx$ ,
- odstupanja od ose turbinskog vratila u dva smera  $Sx$  i  $Sy$ <sup>33</sup>.

Na slikama 6.1. do 6.3. prikazana su mesta ugradnje senzora za merenja dinamičkih karakteristika na tehničkom sistemu (hidroelektrane).

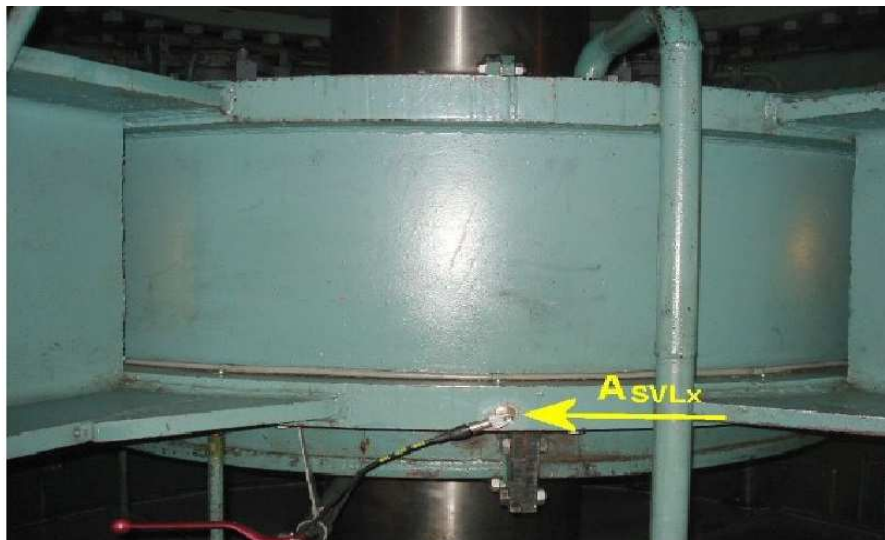


Slika 6.1. Senzori za merenje odstupanja od ose vratila i vibracija na turbinskom ležaju



Slika 6.2. Senzori za merenje vibracija na turbinskom ležaju u x i y smeru

<sup>33</sup> Blanchard B. *Maintainability principles and practices*, Me Graw-Hill Book Company, New York, 1969.



Slika 6.3. Senzor za merenja na generatorskom donjem vodećem ležaju – x smer

### Ispitivanja na OE-predilici „Svila“ Čelinac<sup>34</sup>

Vibracije nastaju prinudno na sastavnim delovima analiziranih sklopova OE – predilice i posledica su delovanja dinamičkih sila koje se menjaju unutar sistema po svom pravcu i veličini - intezitetu.

U svome radu sastavne komponente ovih sklopova su veoma opterećene jer su izložene procesima habanja zbog velikih ugaonih brzina, a s time dolazi do pojave vibracija.

Sklop boksa pređenja i sklopa za namotavanje kalemova gotovom pređom se može reći da predstavlja srce OE – predilice pa se merenja baziraju na određivanju vibracija na njima.

Oba sklopa su redno povezana, čime rad jednog neposredno uslovljava rad drugog i obrnuto. Svaka sekcija ima po 20 rotorskih mesta pređenja (boksa pređenja) i isto toliko i sklopova za namotavanja kalemova gotovom pređom.

Neophodno je izvršiti lokaciju mernih mesta za praćenje nivoa vibracija tj. merenje oscilacija i to da odabrana merna mesta daju pouzdane - sigurne rezultate vibracija.

Kod ove analize uzeto je 6 mernih mesta i to:

- od 1-4 kod sklopa boksa pređenja i
- i 5-6 na sklopu za namotavanje kalemova gotovom pređom.

Merenja vibracija su obuhvatila sedam izabраниh mernih mesta i to:

- I merno mesto: nalazi se odmah pored poluge za otvaranje poklopca rotora (dekle)
- II merno mesto: nalazi se pri vrhu kosog dela poklopca rotora (onoliko blizu koliko dozvoljava prostor za pristup akcelometra)
- III merno mesto: nalazi se na rukavcu točkića za vođenje pređe

<sup>34</sup>Jurić S., Radić R., Blaženović R. *Value analysis of worker reliability of integral parts of a circuit for coil winding with finished yarn of oe – spinning machine from the aspect of technology of maintenance*, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA),

IV merno mesto: nalazi se na sredini poklopca (kućišta) mehanizma za parafinisanje pređe

V merno mesto: nalazi se u donjem delu poluge opružnog mehanizma podizača kalemova

VI merno mesto: nalazi se na suprotnoj strani držača kalemova i to na vrhu poluge opružnog mehanizma podizača kalemova

Izbor položaja mernih mesta je biran iz sledećih razloga:

- Merno mesto I, izabrano je tako što se u tom položaju mogu odrediti parametri mehaničkih oscilacija koje nastaju u radu elektromagnetne spojnice i valjka za otvaranje pramenova kardirane trake
- Merno mesto II, izabrano je na kosom delu poklopca rotora (dekle) i to tako da bi se što bliže prišlo rotoru i aeroležaju. Rotor (turbina) i aeroležaj su zatvoreni u posebnoj kućištu tako da nije moguće izvršiti merenje u njihovoj zoni rada, već se to mora uraditi preko poklopca rotora
- Merno mesto III, izabrano je na suprotnoj strani točkića za vođenje pređe, i to na držaču odnosno kućištu rukavca u kome se oslanja točkić
- Merno mesto IV, izabrano je na sredini poklopca tj. na kućištu mehanizma za parafinisanje prediva. Ovim položajem mernog mesta, vrše se merenja vibracija koje izazivaju prolazak prediva preko parafinskog punjenja odnosno koje izaziva opružni sistem potiskivanja parafina
- Merno mesto V, izabrano je tako da se sa ove lokacije kontrolišu vrednosti vibracija koje nastaju pravolinijski - oscilatornim kretanjem vođica niti, i kružnim kretanjem valjka za okretanje kalemova pri namotavanju kalemova gotovom pređom. Ovaj valjak i konusni valjak na kome se namotava gotova pređa su u paru
- Merno mesto VI, izabrano je tako da se sa ove lokacije mogu meriti vrednosti vibracija koje nastaju pri radu držača kalemova (plastičnog umetka kao držača koji je navučen na kotrljajni ležaj, a sve se to oslanja na gornji deo poluge opružnog mehanizma za podizanje kalemova)

Ovo je odabrano što su oba analizirana sklopa osnova konstrukcije OE- predilice. Postupkom primene tehnologije preventivnog održavanja i metode dijagnosticanja može se uticati na oko 60 – 70% sigurnosti funkcionisanja rada sklopova OE - predilice. Formira se prema stepenu savršenstva optimalni model sigurnosti funkcionisanja rada analiziranih sklopova na izabranim mernim mestima sve na osnovu uticaja mehaničkih oscilacija. Formiranjem njegovim data je zavisnost frekventnih sigurnosti u vremenu rada analiziranih sklopova OE predilice.

## 6.2.2. METODOLOGIJA ISPITIVANJA

U svrhu izbora potrebnih vibrodijagnostičkih formata koji su neophodni za sveukupnu dijagnostičku analizu koju je trebalo napraviti u svrhu realizacije ovog istraživanja u HE „Bočac“, potrebno je bilo analizirati sledeće vibrodijagnostičke prikaze, u zavisnosti od režima rada hidroagregata<sup>35</sup>.

### 1. Mašina nije u radu (mirovanje)

#### Apsolutne vibracije

- ukupni nivoi vibracijske brzine  $V_{rms}$  sa merenja apsolutnih vibracija
- spektralni prikaz apsolutnih vibracija

<sup>35</sup>Tolmač, D., Prvulović, S., Blagojević Z., *Balancing of turbine and maintenance*, časopis Tehnička dijagnostika, br.1-2, p. 35-39, 2009. Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije "TEHDIS"

## Rotorne vibracije

- Položaj ose rotora (polarni prikaz)

## 2. Startovanje mašine

## Apsolutne vibracije

- ukupni nivo vibracijske brzine  $V_{rms}$
- spektralni prikaz (kaskadni spektar zavisan od broja obrtaja)
- Bodeovi prikazi 1X i 2X harmonika vibracija (ili polarni)

## Rotorne vibracije

- Ukupni nivoi vibracijskog pomeranja  $A_{p-p}$
- spektralni prikaz (kaskadni spektar zavisan od broja obrtaja)
- Polarni prikaz položaja ose rotora (DC komponenta vibracija)

## 3. Sinhronizacija i malo opterećenje hidroagregata

## Apsolutne vibracije

- ukupni nivoi vibracijske brzine  $V_{rms}$
- spektralni prikaz vibracija

## Rotorne vibracije

- ukupni nivoi vibracijskog pomeranja  $A_{p-p}$
- spektralni prikaz vibracija
- Polarni prikaz položaja ose rotora (DC komponenta vibracija)

## 4. Nominalno opterećenje hidroagregata

## Apsolutne vibracije

- ukupni nivoi vibracijske brzine  $V_{rms}$
- spektralni prikaz vibracija
- Polarni prikazi 1X i 2X harmonika vibracija

## Rotorne vibracije

- ukupni nivoi vibracijskog pomeranja  $A_{p-p}$
- $S_{max}$
- spektralni prikaz vibracija
- Polarni prikaz položaja ose rotora (DC komponenta vibracija)
- Prikaz Orbita
- Merenje aksijalnog pomaka

## 5. Zaustavljanje mašine

## Apsolutne vibracije

- ukupni nivo vibracijske brzine  $V_{rms}$
- spektralni prikaz (kaskadni spektar zavisan od broja obrtaja)

Rotorne vibracije<sup>36</sup>

- Ukupni nivoi vibracijskog pomeranja  $A_{p-p}$
- spektralni prikaz (kaskadni spektar zavisan od broja obrtaja)
- Polarni prikaz položaja ose rotora (DC komponenta vibracija)

Analiza vibracija je rađena u vremenskom periodu praćenja stanja i urađena je u korelaciji sa procesnim parametrima i temperaturnom analizom. Dijagnostička analiza stanja agregata je rađena na bazi mernih rezultata koje snima instalisani on-line nadzorni sistem COMPASS i analize mernih podataka. Analize su rađene prenosnom

---

<sup>36</sup> Prvulović S., Tolmač, D., Dimitrijević D., Tolmač, J., *Research of sensibility and tendency rotors to imbalance*, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA)

dijagnostičkom opremom, sa namenski razvijenim dijagnostičkim bazama, za ona merenja koja nisu uključena u COMPASS sistem, a koja su predviđena po standardu ISO 10816. U narednom tekstu opisana je suština i osnovna namena gore pomenutih vibrodijagnostičkih prikaza.

### **Merenje vibracija na nerotirajućim delovima HE „Jajce“ I<sup>37</sup>**

Vibracije se mere na ležajevima, kućištima ležajeva ili drugim delovima na koje se prenose vibracije. Smer merenih vibracija mora biti isti kao smer opterećenja (radijalni za vodeće ležajeve i aksijalni za noseće ležajeve). Merna mesta variraju u zavisnosti od tipa stroja u skladu s odgovarajućim preporukama i standardima (ISO 10816, ISO 7919). Za upotrebu su primenjeni akcelerometri, sposobni za merenja frekvencija u širokom pasu sa ravnomernim frekvencijskim odzivom.

Dinamičke karakteristike turbine se mere posebnim sistemom tj. instrumentima za svaku tačku.

Dinamički oscilujuć signal mogu se uvek tretirati kao suma dva tipa signala: periodične islučajne oscilacije. Metode procesiranja signala baziraju se na izabranoj mernoj metodi i nameni samog testiranja. Uobičajene metode za obradu dinamičkog signala su sledeće (IEC60994):

- peak-to-peak ili peak analiza (analiza maksimalnih amplituda)
- analiza efektivne vrednosti (Vrms ili standardna devijacija)
- statistično procesiranje signala
- spektralna analiza signala (spektralna gustoća amplitude ili snage signala)

Na drugi način možemo metode procesiranja signala podeliti na metode koje se baziraju na obradi signala u vremenskoj domeni (amplitude) i one koje se baziraju u frekventnoj domeni (frekvencije).

### **Merenje vibracija na rotacionoj predilici<sup>38</sup>**

Obuhvatilo je metodologiju rada pri analizi vibracija i to dijagnostičke metode istraživanja koje su sprovedene primenom amplitudno - frekventne analize. Za merenje vibracija na sastavnim delovima analiziranih sklopova OE predilice tj. za sprovođenje frekventne analize korišteni su savremeni instrumenti za merenje vibracija–vibrometri. Na osnovu dobijenih rezultata merenja (tj. analize spektra vibracija), dobijene su veličine njenih nivoa (pojasa) na sastavnim komponentama analiziranih sklopova koje su poslužile kao osnova u sprovođenju analize modela rizika i amplituda vibracija.

---

<sup>37</sup>International Standard of Organisation ISO 10816-1:1995, *Mechanical vibration — Evaluation of machine vibrations by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines, ISO Standard 1995.*

<sup>38</sup>Jurić S., Radić R., Blaženović R. Value analysis of worker reliability of integral parts of a circuit for coil winding with finished yarn of oe – spinning machine from the aspect of technology of maintenance, *Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA)*



U sklop boks pređenja i sklop za namotavanje kalemova gotovom pređom eksperiment je obuhvatio kombinacije merenja nivoa vibracija na konstruktivnim komponentama. Sa ovim se težilo da se dobiju što precizniji rezultati merenja vibracija.

Na izabranim mernim mestima, merenje vrednosti vibracija izvršeno je mernom opremom koja sačinjava merni lanac:

1. Merenje vrednosti vibracija, delta kolektor 2526 MK2
2. Akcelometar 4391
3. Paket za obradu podataka, softverski program SENTINEL

### 6.3. VIBRACIJE NA POSTROJENJIMA HIDROELEKTRANE

#### 6.3.1. ANALIZA APSOLUTNIH VIBRACIJA HE BOČAC

Ukupni nivo vibracija je, bez obzira da li se meri amplituda vibracijskog pomaka, vibracijske brzine ili vibracijskog ubrzanja, indikator inteziteta poremećajne sile i ozbiljnosti problema. Ona daje prikaz iznosa energije vibracija koji je sadržan između dve određene frekvencije.

Zavisno od karakteristika vibracijskih senzora mogu se meriti amplitude: vibracijskog pomaka (pomoću bezkontaktnih senzora koji rade na principu vrtložnih struja), vibracijske brzine (pomoću induktivnih senzora) i vibracijskog ubrzanja (pomoću akcelometara)<sup>39</sup>.

1. Nula -Vrh (z-p)- najčešće se primenjuje kod merenja vibracijskog pomaka kućišta mašina te kod merenja amplitude vibracijske brzine i vibracijskog ubrzanja, a odgovara vrednosti,
2. Vrh-Vrh (p-p)- najčešće se primenjuje kod merenja vibracijskog pomaka relativnih vibracija,
3. RMS, za sinusoidni oblik signala (vibracije) odgovara 0,707 vrednosti amplitude (z-p), a izračunava se po obrascu:

$$v_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{(t)}^2 dt, \quad (6.1.)$$

4. Srednja vrednost amplitude vibracija, koja odgovara vrednosti  $0,90 \cdot v_{RMS}$ .

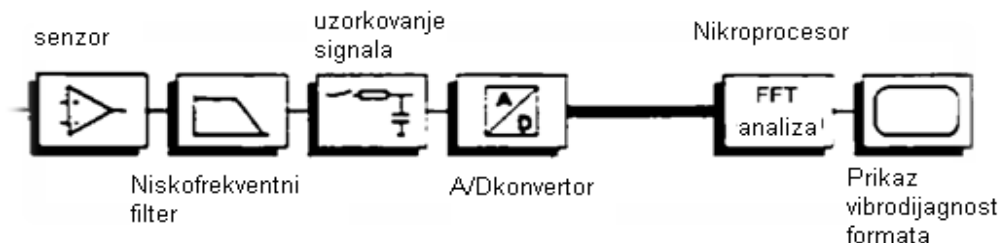
Proizvođači rotacionih mašina i pojedini eminentni stručnjaci su postavili kriterijume prihvatljivosti i kriterijume za ocenu stanja mašine na osnovu ukupnog nivoa vibracija. Promena ukupnog nivoa vibracija, u opštem slučaju znači promenu u mehaničkom ili procesnom stanju mašine. Pri tome treba naglasiti da promena ne mora obavezno biti u smeru povećanja ukupnog nivoa iako je to najčešći slučaj. Budući da se kompleksna vibracija mašine sastoji od niza komponenti različitih frekvencija, ukupni nivo vibracija odgovara veličini vektorskog zbira vektora pojedinih komponenti. Nivo ukupnih vibracija će zavisiti od veličine amplitude pojedinih komponenti te odnosa njihovih faznih uglova.

Spektralni prikaz

<sup>39</sup>Donald, E. Bently 1990 *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, Edited by Bob Grissom.

Merni signal sa senzora je funkcija vremenskog domena. Za analizu je pogodniji prikaz signala u frekventnom domenu. FFT analiza je dobar matematički aparat za transformaciju signala iz vremenskog u frekventni domen, tako da je ona i glavna tema analizatora vibracija.

Za praktično izračunavanje na digitalnom računaru, obično se koristi tzv. Diskretna Furijerova Transformacija (DFT) i ona je neophodan alat u spektralnoj analizi signala. Blok dijagram FFT analizatora je prikazan na sledećoj slici 6.4.



Slika 6.4. Spektralna analiza

Uloga analognog niskofrekventnog filtera je da smanji snagu ulaznog signala iznad frekvencije  $f = f_s/2$ , u praktičnim realizacijama postupka odabiranja ovaj filter sprečava pojavu preklapanja u spektru zbog prisustva visokofrekventnih signala.

Spektralna FFT analiza podrazumeva prikaz spektara koji je, u stvari, prikaz diskretnih frekvencija sa pripadajućom amplitudom određenog vibracijskog signala. Spektar je neizostavni vibrodijagnostički format, a sam dijagnostički prilaz polazi od činjenice da svaki uzrok dinamičkog problema ima karakterističan spektralni odziv.

Usrednjavanje je put eliminisanja slučajnih komponenti iz signala, odnosno poboljšanja spektralnog prikaza. Usrednjavanje može da se vrši u vremenskom domenu (sinhrono usrednjavanje) ili u frekventnom domenu (eksponencijalno usrednjavanje). Ako se uzimanje signala vrši pomoću spoljašnjeg trigera, onda se usrednjavanje vrši u vremenskom domenu.

Analiza maksimalnih amplituda (peak-to-peak ili peak vrednosti) u HE „Jajce I“

Peak vrednosti predstavljaju indikaciju maksimalnih vrednosti kod pojedinačne mernetačke. Kontinuiran signal dinamičkih veličina razdelimo na pojedinačne kraće delove (frames) odgovarajuće dužine gde se vidi kako amplitude osciliraju sa vremenom. Reprezentativne maksimalne amplitude mogu se izračunati kao prosečna vrednost ovih maksimalnih (peak) vrednosti<sup>40</sup>.

Druga opcija za proračun maksimalnih amplituda je upotreba statističke procedure, kod koje ustanovimo maksimalnu amplitudu sa 98 % verovatnoćom.

Funkcija amplitudne gustine je numerički dobijena sa izrazom:

$$p(x,k) = \frac{1}{T_{\Delta x}} \sum_{i=0}^n \Delta t_i \quad (6.2.)$$

Integral ove funkcije amplitudne gustine nam daje kumulativnu raspodelu gustine od 0

<sup>40</sup>B.T. Runov *Investigation of vibration steam turboaggregate*, Energoizdat, Moscow 1982.

do 1(100 %) u zavisnosti od amplitude  $x$ . Ako je  $x$  jednaka  $x_{\max}$ , onda je verovatnoća 1 (odnosno 100 % maksimalna amplituda). Kod diskretnih (digitalnih) signala umesto matematičke funkcije gustine upotrebljava se histogram.

1 % i 99 % verovatnoća amplitude može se jednostavno definisati iz integrala gustine, isto tako je 98 % amplitude definisana:

$$A_{98\%} = A_{99\%} - A_{1\%}$$

Ova maksimalna peak-to-peak amplituda sa 98 % verovatnoćom često se upotrebljava u svim analizama kao reprezentativna vrednost amplitude dinamičkog signala. Prednost ove amplitude u poređenju sa čistom peak-to-peak amplitudom je manja osetljivost za moguća odstupanja u nivou signala koja su često posledica raznih smetnji, a ne samog fizikalnih pojava. Po drugoj strani, ako su ovi maksimalni vrhovi amplituda značajni, onda je bolje upotrebiti čistu peak-to-peak analizu.

#### Analiza efektivnih amplituda

Za procese koji su većinom slučajni upotreba peak-to-peak analize je nedovoljna. U ovom primeru je analiza efektivne vrednosti primernija za upotrebu.

Kod efektivne amplitude podrazumeva se RMS amplituda, koja predstavlja merilo za energiju signala:

$$u_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u_i^2} \quad (6.3.)$$

Po definiciji je RMS amplituda uvek pozitivna. Ako je srednja vrednost signala nula (kada se analizira samo oscilirajući deo signala), onda je RMS vrednost jednaka merilu za disperziju signala odnosno standardnoj devijaciji:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (u_i - \bar{u})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i^2} \quad (6.4.)$$

#### Spektralna analiza signala

Spektralna analiza signala nam pomaže da dobijemo informacije o različitim frekvencijama, kod kojih se pojavljuju oscilacije. U frekventnom domenu signal možemo analizirati sa amplitudnim frekventnim spektrom ili funkcijom jačine spektralne gustoće (power spectrum density). Oba načina analize se upotrebljavaju i međusobno se dopunjavaju.

U današnje doba za proračun Fourierove transformacije obično se upotrebljavaju brzi FFT (fast Fourier transform) algoritmi. Ovi algoritmi zahtevaju  $2N$  tačaka u vremenskom domenu, i dovoljno dug signal za korektnu analizu oscilacija sa niskim frekvencijama. Zbog minimiziranja grešaka kod ove transformacije upotrebljavaju se posebne numeričke metode.

### 6.3.2. ANALIZA ROTORNIH VIBRACIJA

#### Prikaz ukupnog nivoa rotornih vibracija ( $S_{max}$ ) u HE „Bočac“

Relativne vibracije rotora su kretanje rukavca vratila naspram ležaja. Te se vibracije mere u ležišnoj ravni sa dva međusobno okomito postavljena beskontaktna senzora. Kod rotacionih mašina koje imaju klizne ležajeve zbog velikog prigušenja i krutosti uljnog filma, ne dozvoljavaju znatni prenos vibracija na statičke delove mašine<sup>41</sup>. Amplituda relativnih vibracija je najbolji parametar za zaključivanje o stepenu mirnoće rada mašine jer meri direktno dinamičko ponašanje onog dela mašine koji direktno izvodi mehaničko kretanje i prenosi obrtni moment, odnosno snagu. Naime, pomoću dva induktivna senzora se meri ukupni nivo vibracija vratila u dva ortogonalna pravca. Svaki od senzora meri ukupni nivo vibracije vratila u smeru njegove ose ugradnje. Fazni zbir vibracija  $s_1(t)$  i  $s_2(t)$  daje kinetički pomak središta vratila u toj ravni  $s_k(t)$ , tj. kinetičku putanju vratila. Merna veličina za relativne vibracije je vibracijski pomak u  $\mu m$ <sup>42</sup>.

U Evropi je udomaćen nadzor maksimalnog pomaka  $S_{max}$ , koji je definisan kao najveća vrednost kinetičkog pomaka vratila, u mernoj ravni  $S_{max}=s_k(t)_{max}$ . To odgovara zahtevu VDI-smernica 2059, koje isključivo govore o preporukama za granične vrednosti na osnovu maksimalnog pomaka<sup>43</sup>.

#### Prikaz orbite

Orbita je dvodimenzionala dinamička putanja ose rotora u poprečnoj ravni vibracijskih senzora. Kao što se svaki vibracijski signal može prikazati kao suma sinusoidalnih signala određenih frekvencija, tako se i svaka orbita može prikazati kao zbir orbita pojedinih vibracijskih harmonika<sup>44</sup>. Orbite pojedinih vibracijskih harmonika su u principu elipse, a svaka se elipsa može dobiti zbrajanjem dva rotirajuća vektora iste frekvencije koji rotiraju u suprotnom smeru. U opštem slučaju, kada posmatramo  $n$  vibracijskih harmonika, ukupna orbita se može dobiti vektorskim zbirom  $n$  filtriranih orbita<sup>45</sup>.

$$\vec{O} = \sum_{i=1}^n (R_{i+} e^{j(\omega_i t + \alpha_i)} + R_{i-} e^{-j(\omega_i t + \beta_i)}) \quad (6.5.)$$

Ovde su sa  $R_{i+}$  i  $R_{i-}$  označeni radijusi pozitivne i negativne filtrirane obrtne frekvencije a sa  $\omega_i$ ,  $\alpha_i$  i  $\beta_i$  fazni uglovi pozitivnog i negativnog vibracijskog harmonika.

Sa orbitalnog prikaza može se jasno videti:

- najveća amplituda vibracije
- smer najveće amplitude
- uticaj asimetrije krutosti nosive strukture
- prisustvo sila koje deluju na rotor
- smer precesije rotora

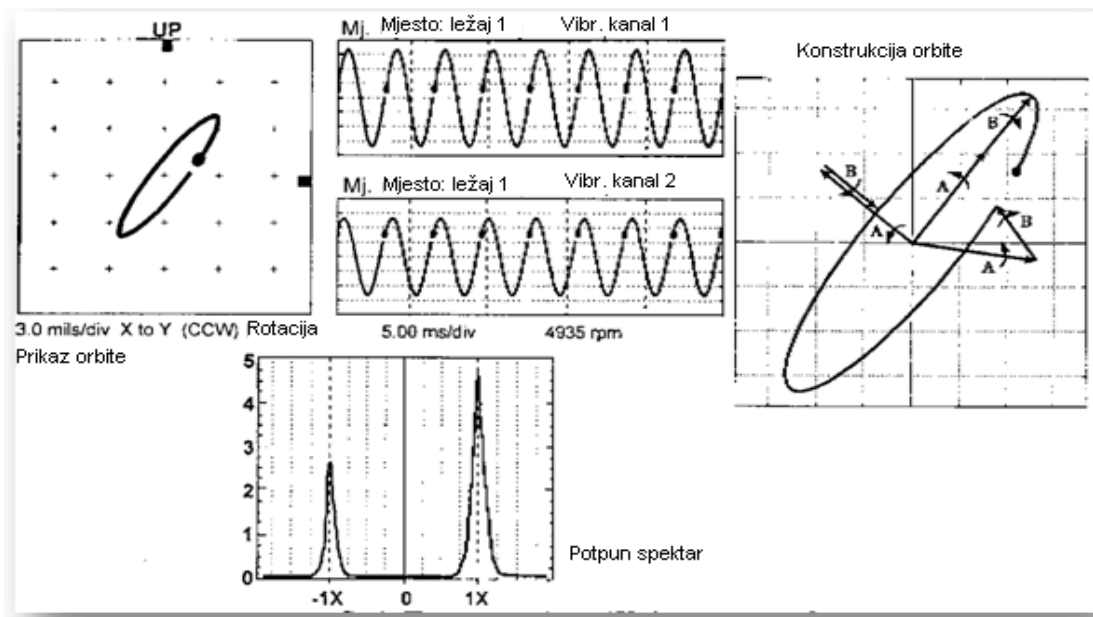
<sup>41</sup>Donald, E. Bently 1990 *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, Edited bay Bob Grissom

<sup>42</sup>Biderman V.L.: *Theory of Mechanical Vibrations*, Vysshaya SHKOLA, Moscow, 1980.

<sup>43</sup>Bolotin, V. V.: *Prediction of Machines and Structures Life*, Mashinostroenie, Moscow, 1984.

<sup>44</sup>C. Frigeri, G.A. Zaneta and A. Vallini 1988 *Institution of Mechanical Engineers Conference on Vibrations in Rotating Machinery*, Paper C302/88

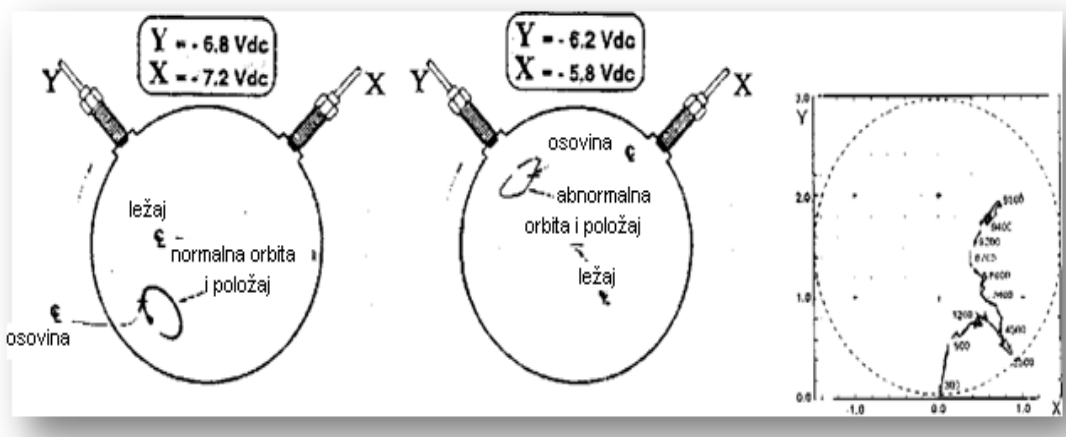
<sup>45</sup>Gaylo, B., A perctical reliability and availability program for power plants, Combustion, september. 19809



Slika 6.5. Prikaz nastajanja 1X filtrirane orbite

#### Analiza pomeranja rukavca vratila u ležaju (DC analiza)

Ova analiza se uglavnom koristi kod određivanja položaja obrtne ose rukavca vratila u odnosu na ležaj. Praćenje promene položaja centra rukavca rotora za vreme startovanja mašine je vrlo važno jer može ukazati na delovanje statičkih sila na rotor, usled npr. necentričnosti izazvanih nejednakim toplinskim dilatacijama kućišta, lošim centriranjem spojnice ili oštećenja ležaja, pri čemu rotor tone pa taj položaj nije u pravom položaju<sup>46</sup>. Na sledećoj slici je prikazan način merenja položaja obrtne ose rukavca vratila (merenje DC komponente vibracija iz dva ortogonalna pravca) i dat je primer izgleda putanje tokom startovanja mašine.



Slika 6.6. Način merenja i prikaz položaja ose rukavca vratila tokom startovanja mašine

Na bazi urađenih analiza, data je ocena stanja hidroagregata, dijagnostički nalaz i predlog korektivnih aktivnosti.

<sup>46</sup>Prvulovic, S., Tolmac, D., Brkic, M., Radovanovic, L., *The analysis of energetic and economic parameters during the utilization of corn grain as a fuel for cereal dryers*, (2013)

### **Merenje odstupanje ose vratila u HE „Jajce I“**

Radijalne relativne vibracije vratila odstupanje ose su izmerene kod glavnog nosećeg ležaja. Korišteni su induktivni davači bez neposrednog kontakta. Njihova osetljivost je dovoljna da se tačno zabeleže i najmanje odstupanje ose vratila u mikrometrima, a samim tim pokrije celi frekvencijski spektar vibracija vratila (obično najmanje do dva puta BPF – blade passing frequency – frekvencija zavisna od broja lopatica rotora i brzine obrtanja). Instalacija je bila izvedena sa dva senzora u jednoj ravni. Senzori su uzajamno pomaknuti za ugao od 90°, da bise dobio vektor pomaka ose vratila u odnosu na mernu ravan.

Za merenja na HE „Jajce I“ korišteni su induktivni senzori Telemecanique XS1 M12AB120, sa opsegom 0,2...2 mm i izlaznom jačinom od 4...20 mA. Pozicionirani su na vrhu glavnog nosećeg ležaja.

### **6.3.3. RAZVOJ DIJAGNOSTIČKIH BAZA HIDROAGREGATA**

Radni uslovi hidroturbine (opterećenje, nivo vode u akumulaciji, klimatske i atmosferske prilike i sl.) često diktiraju zastoje u proizvodnji i vremena koja stoje na raspolaganju za korektivne aktivnosti. Raniji koncepti koji su bili zasnovani na čisto subjektivnom praćenju stanja opreme imali su za posledicu održavanja „do loma“ sa svim negativnim implikacijama koje ovaj pristup nosi. Napredak u održavanju predstavljalo je implementiranje principa po "vremenskom resursu" koji je i danas zastupljen u najvećem broju slučajeva. Nedostaci ovoga se ogledaju kako u operativnim tako i u finansijskim slabostima. Ukoliko intervali zastoja, koji su najčešće diktirani spoljnim uslovima nisu optimalno postavljeni intervencije ne mogu biti optimalne; i konačno, na bazi čega planirati korektivne mere? Ukoliko su intervali zastoja postavljeni mnogo kraće nego što je srednje vreme do otkaza komponente koja se prati vreme zastoja i novac utrošen za servis i delove su potpuno nepotrebni<sup>47</sup>.

Kod kontinualnog (permanentnog on-line) monitoringa sistema koncepcija praćenja je bitno drugačija. Zahvaljujući dijagnostici promena stanja i vrsta promene, odnosno tip greške se uočava u najranijem stadijumu. To omogućuje da se korektivne mere primene na vreme i pod najpovoljnijim okolnostima, čime se bitno utiče na preostali radni vek.

Prikazan sistem u velikoj meri omogućava da se u prvom redu poveća vreme odlučivanja, odnosno da se zastoji predviđeni za korektivne mere prilagode operativnim i tehničkim uslovima. Prednosti ovog pristupa su evidentne. Sa druge strane, na sistem se postavljaju zahtevi da broj veličina koje se moraju meriti i analizirati bude značajan, i da se obuhvate svi parametri koji su operativno relevantni<sup>48</sup>.

Konkretno, u slučaju zaštite i monitoringa hidroturbinskih postrojenja u „on-line“ režimu u nivou 2, a primenom OneproD filozofije koristi se OneproD MVX višekanalni merni sistem podržan OneproD XPR V3 dijagnostičkim ekspertskim softverom.

OneproD-MVX je modularni monitoring sistem u 16-kanalnoj varijanti (u jednom kućištu). Njegove superiorne mogućnosti simultane akvizicije na svim kanalima, u

<sup>47</sup>Biderman V.L. :*Theory of Mechanical Vibrations*, Vysshaya SHKOLA, Moscow, 1980.

<sup>48</sup>Tolmač D., Prvulović S., Blagojević Z., *Balancing of turbine and maintenance*, časopis Tehnička dijagnostika, br.1-2, p. 35-39, 2009. Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, 2006.

kombinaciji sa programiranjem različitih radnih režima i definisanje vrste akvizicije i alarmnih vrednosti za svaki radni režim čini sistem izuzetno moćnim rešenjem za monitoring i online dijagnostiku svih kompleksnih rotirajućih mašina. OneproD-MVX omogućava prihvatanje svih vrsta senzora vibracija (ICP akcelerometri, davači brzine, proximity probe za monitoring relativnih vibracija na hidrodinamičkim kliznim ležajevima), senzora temperatura, senzora stanja ulja kao i senzora procesnih veličina (naprezanja, pritisaka, struje, napona i sl.)<sup>49</sup>.

OneproD-MVX uključuje veliki broj različitih onboard (analiza u samom mernom sistemu - nije potreban download na PC i postprocesno sračunavanje vibracionog parametra) procesiranja primenljivih kroz različite tehnike monitoringa i tehničke vibrodijagnostike nad kotrljajnim i kliznim ležajevima. Recorder modul omogućuje snimanje dugih vremenskih signala za naknadnu analizu harmonijskih redova (snimanje startanja i usporenja turbine).

Zahvaljujući postojanju mogućnosti uslovne akvizicije i komunikacije preko Ethernet-a, MVX sistem se može primeniti kao:

- Merni sistem za uslovnu akviziciju i praćenje vibracija
- Merni sistem za samostalnu dijagnostiku
- Merni sistem za dijagnostiku udaljenih mašina i
- Merni sistem za praćenje vibracija i procesnih parametara na mašinama

### **Relativna pomeranja vratila u prelaznim režimima, parametri rotora u prelaznim režimima**

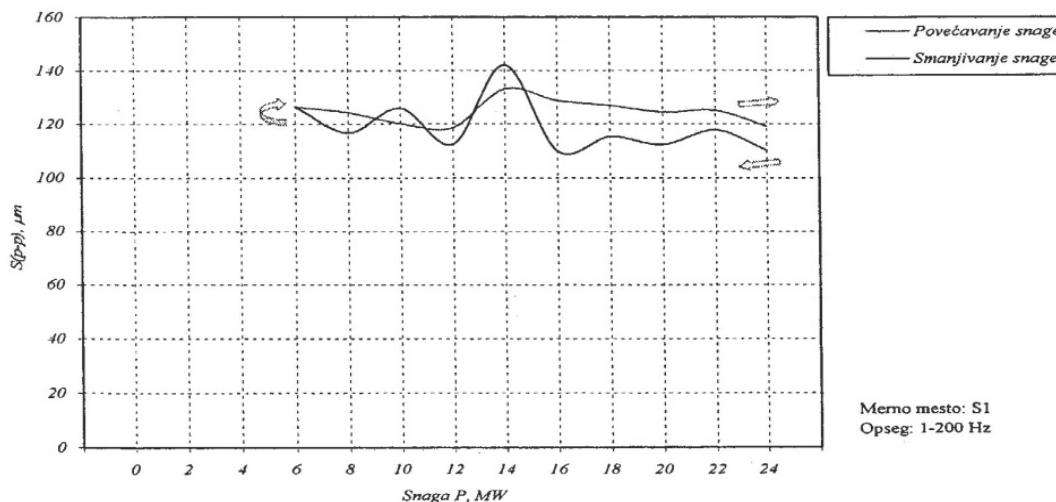
Metode i sredstva za procenu stanja razvijani su korak po korak. U početku su kontrolisani različiti parametri mašina. Zatim je korištena kontrola prema stanju, i konačno su razvijeni dijagnostički i prediktivni (prognozirajući) sistemi. Sa svakim novim tipom sistema proizvođač dobija nove mogućnosti za izvođenje održavanja prema stanju.

Sredstva za merenje i analizu signala korištena u "on-line" dijagnostičkim sistemima suštinski se ne razlikuju od sredstava korištenih u "off-line" sistemima. Jedina razlika je neophodnost ponavljanja merenja na istim kontrolnim tačkama u malim vremenskim intervalima da bi se obezbedilo gašenje mašine na vreme, čak i samo u slučaju razvoja defekata, a u cilju sprečavanja otkaza mašine.

Moderni sistemi za nadgledanje stanja koriste dijagnostičke metode i za identifikaciju defekata i za identifikaciju promena uslova rada. Takva kombinacija nadgledanja stanja i dijagnostike često povećava kvalitet dijagnoze zato što promene u režimu rada mašina često menjaju dijagnostičke simptome defekata .

---

<sup>49</sup>Mitochell R. and Baurgese J., *Justifying a Computer for Maintenance Management*, Plant Engineering, August 7, New York, 1980.



Slika 6.7. Relativno pomeranje vratila pri povećanju/smanjenju snage, toplote stanja, merno mesto S1, opseg 1 – 200 Hz

Sofisticiranije metode za nadgledanje stanja i dijagnostiku vode povećanju mernih tačaka, a prema tome i povećanju cene sistema. Za nadgledanje stanja i dijagnostiku bira se ograničen broj kontrolnih tačaka za agregat kada u njemu nisu prisutni snažni izvori vibracija, ali koji mogu definisati njegov životni vek. Najčešće su ove tačke na nosećim ležajevima. Za brze mašine, u kojima su ležišta glavni izvori vibracija, koriste se dodatno dve do tri tačke na kućištu mašine koje su udaljene od ležišnih delova.

Zadatak nadgledanja stanja je detekcija promena forme vibracija u HE i njenim delovima, a koji se postiže stalnim merenjem. Kada su i najmanje promene otkrivene, aktivira se sistem za dijagnostiku stanja i on izvršava puno dijagnostičko merenje korištenjem stacionarno postavljenih pretvarača. Jedino kada su nadgledajući i dijagnostički podaci nedovoljni za identifikaciju uzroka detektovanih promena, donosi se odluka o preuzimanju dodatnih merenja pomoću "off line" instrumenata.

Daje se mnogo pažnje projektovanju "on-line" i "off-line" sistema za automatsku dijagnostiku i predviđanje stanja. Za potrebe ovih analiza razvijene su nove elektronske baze hidroagregata za vibrodijagnostička ispitivanja u namenskom softverskom paketu Data Explorer v.1.9.2, koji je integrisan u prenosni ME 32 analizator vibracija je ONEPROD MVX dijagnostički akvizicioni sistem hidroturbine. S obzirom na tehnološke pozicije ispitnih mesta na hidroagregatima, razvijena je elektronska baza podataka "Bočac 2015" sa mernom strukturom koja je prilagođena sa propisanom metodologijom.

Kao što se vidi, struktura baze je razvijena tako da se prikupljaju podaci merenja vibracija sa svih ležajeva hidroagregata u sva tri merna pravca i analizira se: ukupni nivo vibracija, spektralni prikaz i izrada automatizovane vibrodijagnostičke analize.

Detaljni rezultati ovih merenja i analiza prikazani su u poglavlju 6.4. ovog ispitivanja.



### 6.3.4. KORIŠTENA MERNA OPREMA

Oprema koja se koristi za ova ispitivanja u HE „Bočac“ je: on-line COMPASS dijagnostički sistem, proizvođača Bruel & Kjar koji je instalisan u objektu<sup>50</sup>.

COMPASS (COMputerised Predictive Analysis and Safety) je računarom upravljani vibrodijagnostički sistem, koji služi za nadzor mehaničkog stanja rotacionih mašina i predviđanje potencijalnih otkaza na mašini PFM (Potential Failure Mode) (slika 6.8.). Sastoji se od VM monitora i CVM računarskog sistema. Funkcija VM monitora je da izvrši strategiju nadzora i implementaciju u on-line COMPASS baze podataka. Distributivno digitalno procesiranje signala obezbeđuje analizu signala u realnom vremenu. CVM je Intel-ov mikroprocesorski sistem baziran na SCO UNIX platformi, namenjen je za Compass aplikativne pakete i Compass-ovu bazu podataka. Za prikupljanje vibracionih i procesnih podataka u off-line COMPASS-ovu bazu služi Data Kolektor 2526/2526E. U okviru COMPASS dijagnostičkog sistema, razvijen je i ekspertski sistem ADVISOR koji, pored standardne baze znanja, omogućava unošenje i korisničke baze znanja. Sve to doprinosi razvoju automatizovane dijagnostike.

Softverski moduli mogu obavljati širok spektar funkcija za potrebe dijagnostike, kao što su: merenje ukupnog nivoa vibracija paralelno sa svih senzora, prikaz trenda ukupnog nivoa vibracija, orbitalni prikaz, Bodeov i Polarni prikaz pojedinih harmonika, spektralni trend prikaz, kaskadni spektralni prikaz, trend X-Y pozicije vratila, vibracijskih komponenti itd.

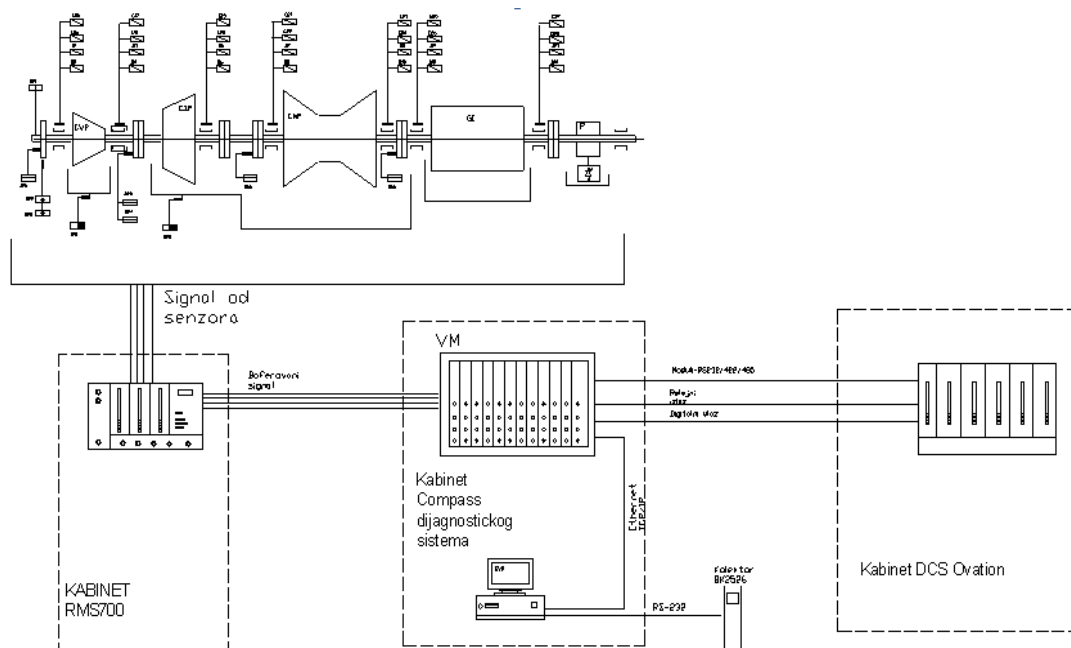
Prenosna dijagnostička oprema:

- Vibro-analizator ME 32 VibTester sa pratećom opremom

Sistem neprekidnog nadzora vibracija se realizuje kada se prati nivo vibracija sa ugrađenim dodatnim relejima koji mogu signalizirati prekoračenje nekog unapred podešenog nivoa vibracija. COMPASS sistem nadzora vibracija, osim praćenja nivoa vibracija na ležajevima i vratilu, prati i fazne uglove vibracija u odnosu na vratilo, a ima i dodatne mogućnosti praćenja procesnih parametara mašine. Ovakav sistem nadzora ima mogućnosti analize i kondicioniranja signala te komunikacije sa računarom i ekspertnim sistemima. On, osim funkcije zaštite, vrši dijagnostičke analize na osnovu kojih se detektuje uzrok vibracija i predlažu mere za njegovo otklanjanje. Ovo se odnosi kako na rad u stacionarnim uslovima, tako i na merenje i analizu vibracija tokom pokretanja/zaustavljanja mašine.

---

<sup>50</sup>Reliability Engineering for electronic systems, Edited by Myers, Wong Gordy, John Wiley Sons, 1967.



Slika 6.8. Šematski prikaz instaliranog COMPASS dijagnostičkog sistema u He „Bočac“

Oprema koja se koristi za ova ispitivanja u HE „Jajce I“ je: sistem neprekidnog nadzora vibracija na ležajevima turbine realizovan pomoću OneproD MVX merno akvizicionog sistema podržanog OneproD VIO (View) softverom. Kao senzori brzine vibracija koristi se 16 ICP akcelerometara (piezoelektrični akcelerometri sa integrisanim pretpojačalima naboja)<sup>51</sup>. Senzori su kablovima preko priključnih kutija povezani na 16 kanalni OneproD MVX merno akvizicioni sistem, koji se nalazi u namenskom ormaru. OneproD MVX merno akvizicioni sistem je preko Ethernet-a povezan sa centralnim računarom, koji se nalazi u posebnoj kontrolnoj sobi, na kome je instaliran softver OneproD VIO za trenutni prikaz stanja na svakom mernom mestu.

U slučaju pada Ethernet komunikacije, podaci se memorišu na Flash memorijsku karticu od 512 Mb, koja je sastavni deo OneproD MVX merno akvizicionog sistema.

### 6.3.5. VALIDACIJA MERENJA I PODEŠAVANJE U COMPASS SISTEMU

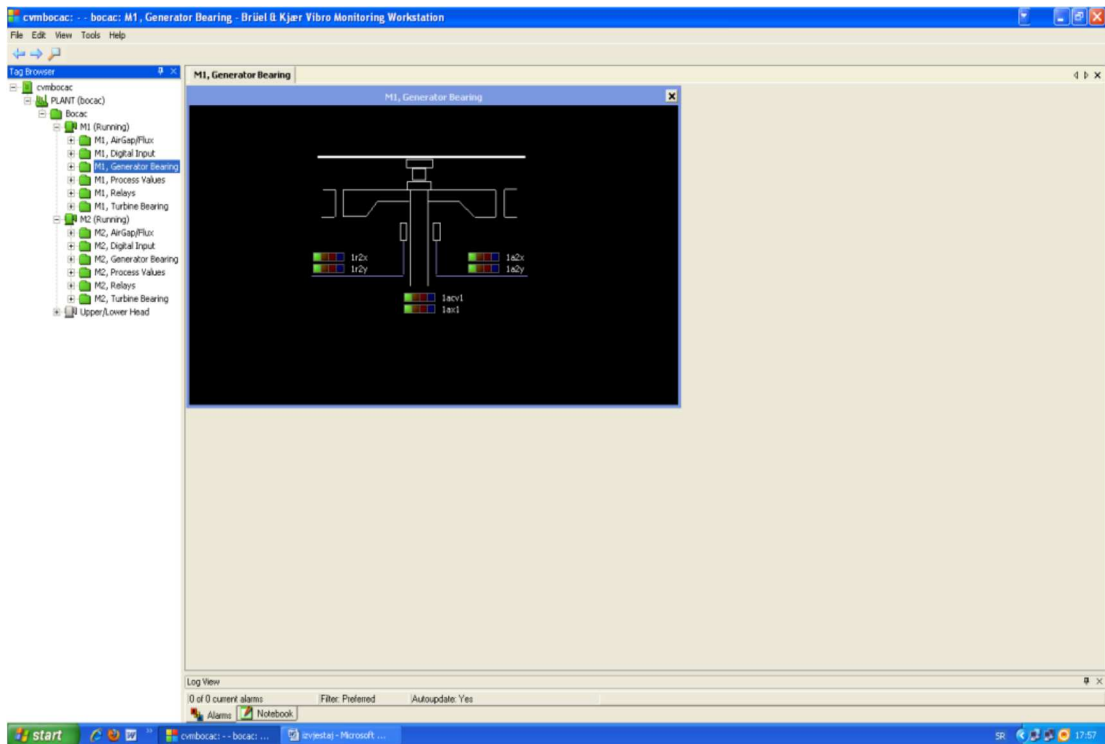
COMPASS (COMputerised Predictive Analysis and Safety) je Bruel & Kjaer CDS (kompjutersko dijagnostički sistem) namenjen za nadgledanje mehaničkog stanja rotacionih mašina. Distributivno digitalno procesiranje signala obezbeđuje analizu signala u realnom vremenu. CVM je Intel-ov mikroprocesorski sistem baziran na SCO UNIX platformi<sup>52</sup>.

<sup>51</sup>Tolmač, D., Prvulović, S., Blagojević, Z. : *Projektovanje i održavanje glavnih mernoregulacionih stanica za gas*, časopis Održavanje mašina, br.5, str.(41-45), Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije "TEHDIS", 2005.

<sup>52</sup>Prvulović, S., Josimović Lj, Tolmač D, *Razvoj daljinskog nadzora i održavanja sistema alatnih mašina*,IMK – 14 – Istraživanje i razvoj, vol. 17 br. 4, str. 33-38, 2011.

### 6.3.5.1. STRUKTURA MERNE „COMPASS-OVE“ BAZE I NOTACIJA MERENJA

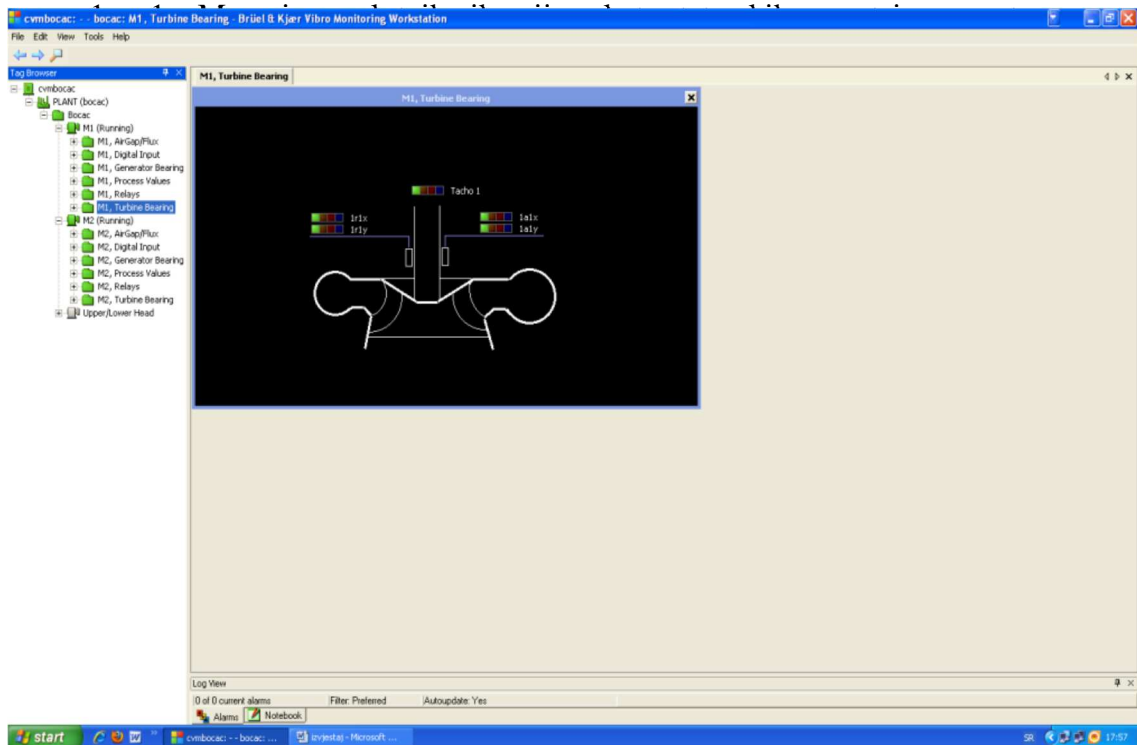
#### Hidroagregat br. 1



Slika 6.9. Prikaz merne baze hidroagregata br.1, gornji vodeći ležaj

1a2x - Merenje apsolutnih vibracija na L1 u x-pravcu  
 1a2y - Merenje apsolutnih vibracija na L1 u y-pravcu  
 1r2x - Merenje rotornih vibracija u L1 u x-pravcu  
 1r2y - Merenje rotornih vibracija u L1 u y-pravcu

1ax1 - Merenje aksijalnog pomeranja rotora na L1  
 1a1x - Merenje apsolutnih vibracija na L3 u x-pravcu  
 1a1y - Merenje apsolutnih vibracija na L3 u y-pravcu  
 1r1x - Merenje rotornih vibracija u L3 u x-pravcu  
 1r1y - Merenje rotornih vibracija u L3 u y-pravcu



Slika 6.10. Prikaz merne baze hidroagregata br.1, donji vodeći ležaj

## Hidroagregat br.2

2a2x -Merenje apsolutnih vibracija na L2 u x-pravcu  
 2a2y - Merenje apsolutnih vibracija na L2 u y-pravcu  
 2r2x - Merenje rotornih vibracija u L2 u x-pravcu  
 2r2y - Merenje rotornih vibracija u L2 u y-pravcu  
 2ax1 -Merenje aksijalnog pomeranja rotora na L1  
 2acv1-Merenje apsolutnih vibracija paketa statorskih namotaja generatora

2a1x -Merenje apsolutnih vibracija na L3 u x-pravcu  
 2a1y - Merenje apsolutnih vibracija na L3 u y-pravcu  
 2r1x - Merenje rotornih vibracija u L3 u x-pravcu  
 2r1y - Merenje rotornih vibracija u L3 u y-pravcu

Po svim mernim kanalima HE „Bočac“ u toku zastoja hidroagregata izvršeno je “nulovanje” sa svih merenja, kao što je prikazano u tabeli 6.1. Takođe su setovana i podešena sva merenja za prikazivanje pojedinih vibrodijagnostičkih formata po svim režimima rada hidroagregata shodno međunarodnim propisima i standardima .

Tabela 6.1. Merni kanali (nulovanje) podešeni za sva vibrodijagnostička merenja

Oznaka merenja	Red.broj Slota	Red. broj Kanala	Naponski "ofset" [V]	Naponski nivo mernih signala po pojedinim mernim mestima u stacionarnom stanju hidroagregata [V]
1r2x	3	3	10,20	9,60
1r2y	3	4	6,12	8,76
1a2x	4	1	8,75	8,72
1a2y	4	2	8,80	8,76
1acy1	5	5	8,94	8,81
1ax1	6	1	13,7	10,80
1r1x	3	1	10,59	9,80
1r1y	3	2	13,47	13,23
1a1x	3	5	9,14	8,81
1a1y	3	6	8,98	8,60
2r2x	4	5	11,3	9,90
2r2y	4	6	7,22	10,23
2a2x	5	4	8,85	8,87
2a2y	5	4	9,80	9,07
2acy1	5	6	10,94	8,99
2ax1	6	2	12,71	8,88
2r1x	4	3	11,39	10,22
2r1y	4	4	11,47	9,91
2a1x	5	1	10,14	8,68
2a1y	5	2	9,18	8,84

Merni kanali i podešavanje merenja u postojećem dijagnostičkom sistemu „Jajce I“  
Merenje vibracija na ne rotirajućim delovima<sup>53</sup>

Vibracije se mere na ležajevima, kućištima ležajeva ili drugim delovima na koje se prenose vibracije. Smer merenih vibracija mora biti isti kao smer opterećenja (radijalni za vodeće ležajeve i aksijalni za noseće ležajeve). Merna mesta variraju u zavisnosti od tipa uređaja u skladu s odgovarajućim preporukama i standardima (ISO 10816, ISO 7919, IEC 60994). Za upotrebu su primenjeni akcelerometri, sposobni za merenja frekvencija u širokom pasu sa ravnomernim frekvencijskim odzivom.

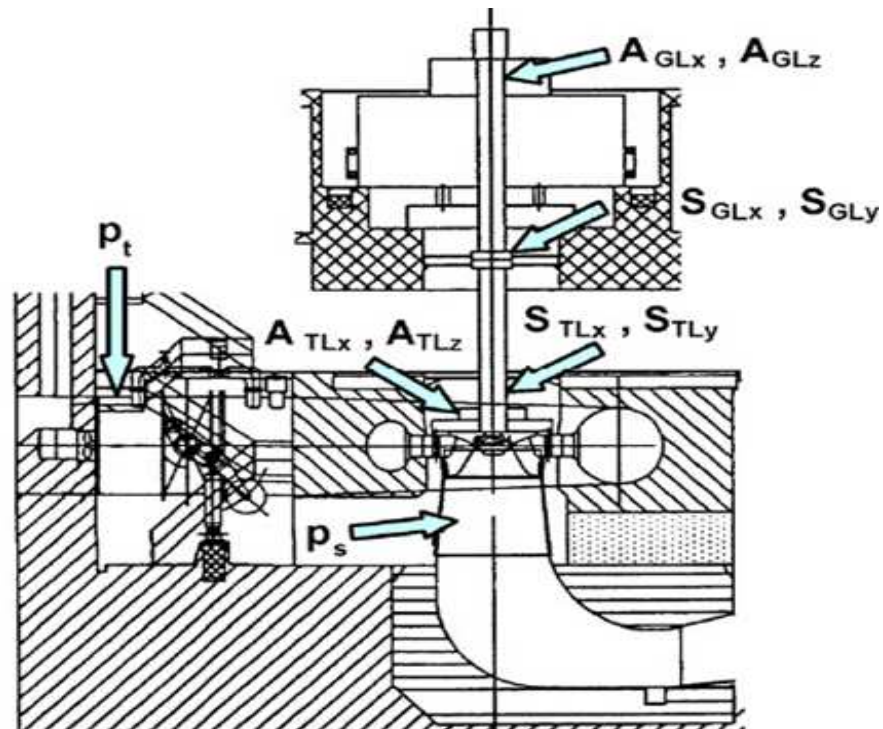
<sup>53</sup>W. Kellenburger 1972 *Should a flexible rotor be balanced in N or N+2 planes*, *Journal of Engineering for Industry*

Tabela 6.2. Izmereni signali i parametri

Br.	Kanal	Oznaka	Opis	Senzor	Osetljivost
1	0	A <sub>NLY</sub>	Vibracije ležaja – noseći (kombinovani) ležaj– y smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
2	1	A <sub>NLZ</sub>	Vibracije ležaja – noseći (kombinovani) ležaj– z smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
3	2	A <sub>NLX</sub>	Vibracije ležaja – noseći (kombinovani) ležaj– x smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
4	3	A <sub>TLY</sub>	Vibracije ležaja – turbinski vodeći ležaj– y smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
5	4	A <sub>TLX</sub>	Vibracije ležaja – turbinski vodeći ležaj– x smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
6	5	A <sub>SVLX</sub>	Vibracije ležaja – generatorski donji vodeći ležaj – x smer	CTCAC230-1A	100 mV/g
7	6	S <sub>y</sub>	Odstupanje vratila – turbinski vodeći ležaj – y smer	Telemecanique XS1M12AB120	0.125 mm/Ma
8	7	S <sub>x</sub>	Odstupanje vratila – turbinski vodeći ležaj – x smer	Telemecanique XS1M12AB120	0.125 mm/mA
9	8	p <sub>t</sub>	Pulzacije pritiska – ulaz u spiralu	Kistler4285A50	3.125 bar/mA
10	6	p <sub>s</sub>	Pulzacije pritiska – konus usisne cevi	Kistler4285A50	3.125 bar/mA

Programska oprema sa kojom se upravlja ovim sistemom izrađena je u Turbo institutu u programskoj okolini LabVIEW. Analogni signali koje pratimo kod merenja se u realnom vremenu digitalizuju i u obliku binarnih datoteka memorišu neposredno na tvrdi disk.

Pozicije dinamičkih davača tokom merenja su prikazane na slici 6.10.

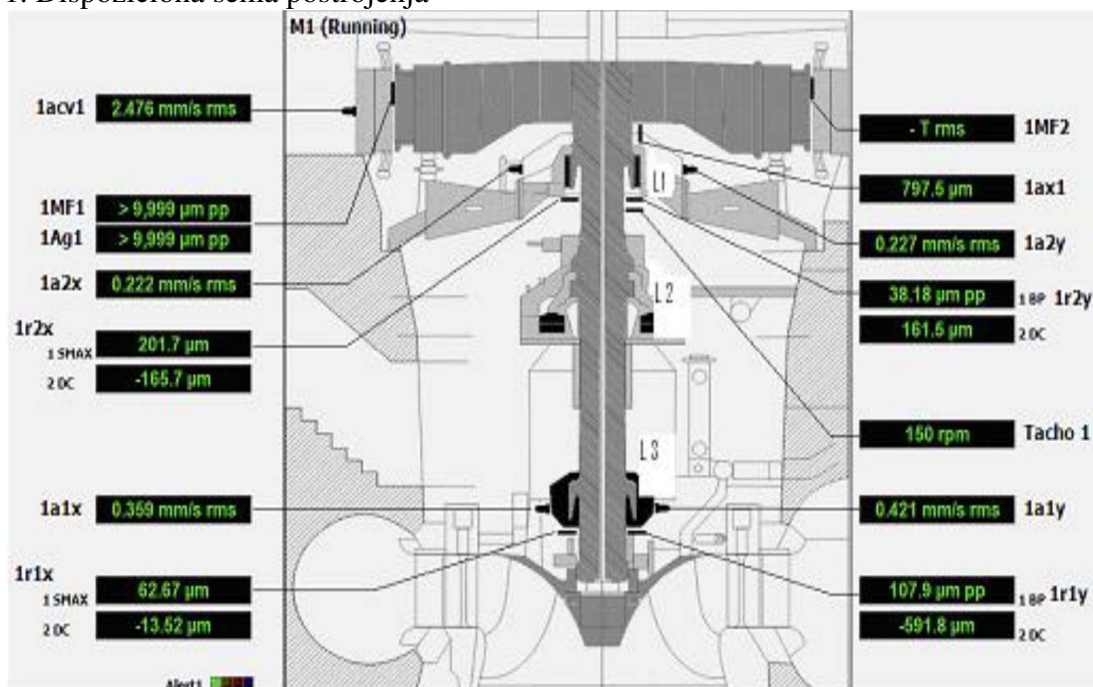


Slika 6.11. Pozicije merenja dinamičkih veličina na HE „Jajce I“

## 6.4. PRIKAZ REZULTATA ISPITIVANJA

### Hidroagregat br.1 „Bočac“

#### 1. Dispoziciona šema postrojenja



Slika 6.12. Dispoziciona šema merenja na hidroagregatu br.1 u COMPASS sistemu

2. Tehnički podaci o sistemu: Instalirana aktivna snaga agregata 55 MW, turbina je Frensisova sa 12 radnih kola, generator ima 20 pari polova.

3. Procesni parametri u nominalnom režimu rada: aktivna snaga 55 MW, reaktivna snaga 0 MVar, brzina obrtanja turbine 150 ob/min, struja pobude 817 A, napon pobude 120V.

4. Parametri dinamičkog stanja

Tabela 6.3. Apsolutne vibracije na ležajevima hidroagregata (prazan hod)

Le žaj	Pravac – x				Pravac – y				Pravac – z				
	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2X	Faz 1x	Faz 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2X	Faz 1x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1x	2x	Faz 1x
L1	<b>0.83</b>	0.28	0.09	-	-	<b>1.10</b>	0.21	-	-	<b>1.16</b>	0.42	-	-
L2	<b>1.54</b>	0.42	0.08	-	-	<b>0.63</b>	0.55	-	-	<b>1.68</b>	0.50	-	-
L3	<b>0.47</b>	0.38	0.05	-	-	<b>0.28</b>	0.20	-	-	<b>0.61</b>	0.40	-	-

Tabela 6.4. Apsolutne vibracije na ležajevima hidroagregata (opterećenje 55MW)

Le žaj	Pravac – x				Pravac – y				Pravac – z				
	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2X	Faz 1x	Faz 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2x	Faz 1x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1x	2x	Faz 1x
L1	<b>1.17</b>	0.2	0.09	-	-	<b>1.11</b>	0.21	-	-	<b>0.84</b>	0.33	-	-
L2	<b>0.57</b>	0.4	0.08	-	-	<b>0.67</b>	0.35	-	-	<b>1.52</b>	0.30	-	-
L3	<b>0.41</b>	0.2	0.05	-	-	<b>0.33</b>	0.29	-	-	<b>0.40</b>	0.41	-	-

Napomena: Nivo vibracija statorskih paketa iznosi  $V_{rms} = 1.85$  mm/s

Tabela 6.5. Rotorne vibracije (opterećenje 55MW)

Le žaj	Pravac – x						Pravac – y						Smax [ $\mu$ m]
	$A_{p-p}$	1x	2x	Faz 1x	Faz 2x	7x	$A_{p-p}$	1x	2x	Faz 1x	Faz 2x	7x	
L1	<b>150</b>	240	3.5	-	-	-	<b>40.0</b>	25.0	-	-	-	-	<b>178.2</b>
L2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L3	<b>116</b>	102	14	-	-	-	<b>118</b>	95	8.1	-	-	-	<b>62.94</b>

## Hidroagregat br.2 Bočac

1. Dispoziciona šema postrojenja je kao na agregatu 1.
2. Tehnički podaci o sistemu: instalisana aktivna snaga agregata 55 MW, turbina je Frensisova sa 12 radnih kola, generator ima 20 pari polova.
3. Procesni parametri u nominalnom režimu rada: aktivna snaga 55 MW, reaktivna snaga 0 MVar, brzina obrtanja turbine 150 ob/min, struja pobude 861 A, napon pobude 130V.
4. Parametri dinamičkog stanja

Tabela 6.6. Apsolutne vibracije na ležajevima hidroagregata (prazan hod)

Le žaj	Pravac – x				Pravac – y				Pravac – z			
	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2X	Faz 1xi 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2 X	Faz 1x i 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1x	2x	Faz 1x i 2x
L1	<b>0.46</b>	0.33	0.09	-	<b>0.48</b>	0.41	-	-	<b>0.55</b>	0.42	-	-
L2	<b>0.38</b>	0.41	0.08	-	<b>0.25</b>	0.15	-	-	<b>0.48</b>	0.30	-	-
L3	<b>0.57</b>	0.28	0.05	-	<b>0.28</b>	0.20	-	-	<b>0.61</b>	0.40	-	-



Tabela 6.7. *Apsolutne vibracije na ležajevima hidroagregata (opterećenje 55MW)*

Ležaj	Pravac – x				Pravac – y				Pravac – z			
	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2X	Faz 1x i 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1X	2x	Faz 1x i 2x	$\sum v_{RMS}$ [mm/s]	1x	2x	Faz 1x i 2x
L1	<b>1.22</b>	0.20	0.09	-	<b>1.25</b>	0.25	-	-	<b>1.35</b>	0.30	-	-
L2	<b>1.31</b>	0.45	0.08	-	<b>1.29</b>	0.35	-	-	<b>0.61</b>	0.40	-	-
L3	<b>0.42</b>	0.20	0.05	-	<b>0.36</b>	0.19	-	-	<b>0.49</b>	0.31	-	-

Tabela 6.8. *Rotorne vibracije (opterećenje 55MW)*

Ležaj	Pravac – x						Pravac – y						Smax [ $\mu$ m]
	$A_{p-p}$	1x	2x	Faz 1x	Faz 2x	7x	$A_{p-p}$	1x	2x	Faz 1x	Faz 2x	7x	
L1	<b>120</b>	149	40	-	-	-	<b>116</b>	100	40	-	-	-	<b>97.20</b>
L2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L3	<b>54.5</b>	74.4	18	-	-	-	<b>35</b>	22	15	-	-	-	<b>78.70</b>

Napomena: Nivo vibracija statorskih paketa iznosi  $V_{rms} = 1.85$  mm/s

**Dinamičke karakteristike turbine „Jajce I“ se mere posebnim sistemom, tj. instrumentima za svaku tačku.**

Tabela 6.9. *Agregat 1 vibracije generatorskog nosećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 radi sa maksimalnom snagom*

Tačka	Anlx	Anly	Anlz
2	2.98	2.07	0.43
3	3.03	2.13	0.39
4	3.01	2.13	0.36
5	2.91	2.01	0.41
6	2.80	1.89	0.47
7	2.68	1.78	0.34
8	2.59	1.71	0.38

Tabela 6.10. *Agregat 1 vibracije generatorskog nosećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 ne radi*

Tačka	Anlx	Anly	Anlz
9	3.40	2.64	0.66
10	3.35	2.59	0.60
11	3.40	2.60	0.42
12	3.40	2.55	0.54
13	3.29	2.51	0.41
14	3.30	2.48	0.62
15	3.32	2.45	0.42
16	3.33	2.42	0.35
17	3.10	2.10	0.39
18	3.40	2.39	0.36
19	3.30	2.26	0.33
20	3.25	2.15	0.35
21	3.40	2.25	0.36

Tabela 6.11. Agregat 1 vibracije turbinskog vodećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 ne radi

tačka	Atlx	Atly
9	0.68	0.67
10	0.64	0.65
11	0.57	0.69
12	0.65	0.65
13	0.56	0.62
14	0.66	0.68
15	0.70	0.73
16	0.75	0.82
17	0.72	0.88
18	0.68	0.91
19	0.68	0.86
20	0.63	0.87
21	0.57	0.84

Tabela 6.12. Agregat 1 vibracije turbinskog vodećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

tačka	Atlx	Atly
2	0.56	0.49
3	0.54	0.48
4	0.57	0.51
5	0.62	0.59
6	0.64	0.63
7	0.65	0.71
8	0.58	0.73

Tabela 6.13. Agregat 1 vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

tačka	Asvlx	Tačka	Asvlx
2	0.090	6	0.090
3	0.090	7	0.090
4	0.090	8	0.090
5	0.090		

Tabela 6.14. Agregat 1 vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 2 ne radi

tačka	Asvlx	Tačka	Asvlx
9	0.09	16	0.09
10	0.12	17	0.09
11	0.09	18	0.09
12	0.09	19	0.09
13	0.09	20	0.09
14	0.11	21	0.09
15	0.09		

*Tabela 6.15. Odstupanja ose turbinskog vratila agregata 1 agregat 2 radi sa maksimalnom snagom*

Tačke	Smax ( $\mu\text{m}$ )	Spp-x ( $\mu\text{m}$ )	Spp-y ( $\mu\text{m}$ )
2	411	728	387
3	405	743	401
4	416	759	416
5	425	775	430
6	422	774	432
7	433	782	439
8	435	780	440

*Tabela 6.16. Agregat 2 vibracije generatorskog nosećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 1 ne radi*

Tačka	Anlx	Anly	Anlz
22	1.01	0.69	0.50
23	1.02	0.65	0.55
24	1.02	0.65	0.60
25	1.01	0.65	0.61
26	0.99	0.61	0.55
27	0.98	0.59	0.54
28	0.96	0.59	0.58
29	0.89	0.59	0.57
30	0.88	0.55	0.53
31	0.86	0.56	0.51
32	0.86	0.54	0.49
33	0.88	0.54	0.40
34	0.85	0.54	0.39
35	0.86	0.52	0.38
36	0.85	0.51	0.33
37	0.85	0.51	0.30
38	0.85	0.50	0.32
39	0.83	0.49	0.33
40	0.81	0.49	0.34
41	0.81	0.48	0.35
42	0.79	0.47	0.36
43	0.80	0.47	0.37
44	0.79	0.47	0.36
45	0.80	0.48	0.35
46	0.79	0.47	0.33
47	0.79	0.47	0.29
48	0.77	0.39	0.27
49	0.77	0.49	0.23
50	0.76	0.48	0.23
51	0.75	0.48	0.22
52	0.73	0.45	0.23
53	0.73	0.43	0.24
54	0.71	0.45	0.23
55	0.70	0.44	0.23
56	0.65	0.43	0.21
57	0.55	0.39	0.26
58	0.70	0.43	0.27

*Tabela 6.17. Agregat 2 vibracije turbinskog vodećeg ležaja Arms (mm/s) agregat 1 ne radi*

Tačka	Atlx	Atly
22	0.55	0.70
23	0.51	0.66
24	0.49	0.55
25	0.49	0.56
26	0.52	0.62
27	0.49	0.68
28	0.33	0.63
29	0.35	0.55
30	0.48	0.58
31	0.35	0.63
32	0.34	0.55
33	0.20	0.58
34	0.25	0.44
35	0.21	0.47
36	0.22	0.49
37	0.25	0.48
38	0.29	0.50
39	0.35	0.53
40	0.42	0.54
41	0.43	0.61
42	0.45	0.71
43	0.46	0.79
44	0.45	0.81
45	0.42	0.82
46	0.32	0.72
47	0.34	0.71
48	0.38	0.70
49	0.34	0.69
50	0.35	0.68
51	0.36	0.65
52	0.37	0.62
53	0.38	0.64
54	0.40	0.66
55	0.43	0.65
56	0.42	0.66
57	0.43	0.68
58	0.45	0.67

*Tabela 6. 18. Odstupanja ose turbinskog vratila agregat 2  
agregat 1 ne radi*

Tačke	Smax ( $\mu\text{m}$ )	Spp-x ( $\mu\text{m}$ )	Spp-y ( $\mu\text{m}$ )
22	85	138	130
23	83	148	127
24	82	148	121
25	81	153	118
26	82	153	118
27	84	150	122
28	83	153	124
29	83	153	127
30	82	150	127
31	81	155	135
32	85	155	140
33	85	155	145
34	87	159	151
35	92	169	165
36	96	181	174
37	98	184	176
38	100	183	201
39	100	210	242
40	110	205	240
41	135	235	291
42	130	237	291
43	155	237	300
44	160	245	313
45	170	245	309
46	165	237	325
47	177	240	310
48	173	245	330
49	185	250	250
50	134	195	155
51	95	178	195
52	113	195	210
53	125	200	191
54	115	200	205
55	117	205	200
56	115	200	200
57	125	210	210
58	125	215	203

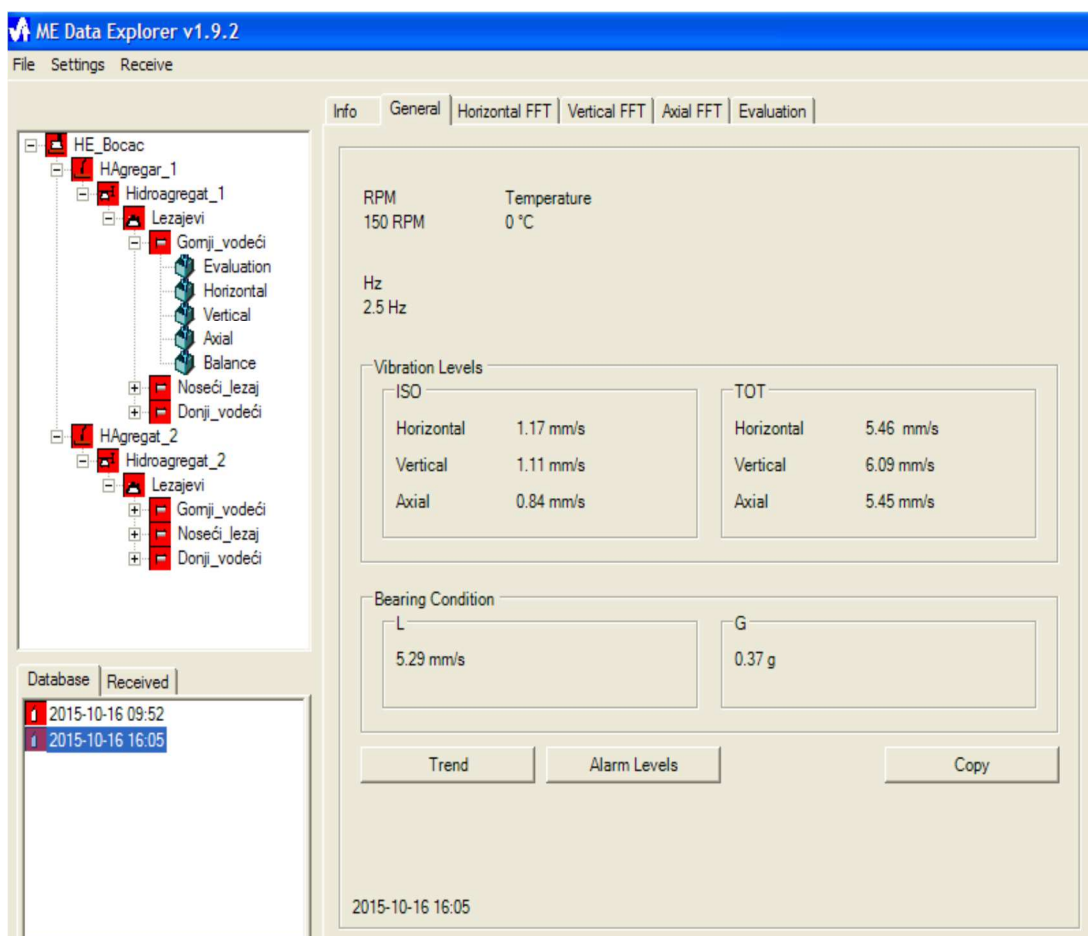
Tabela 6.19. Odstupanja ose turbinskog vratila agregata 1  
agregat 2 ne radi

Tačke	Smax ( $\mu\text{m}$ )	Spp-x ( $\mu\text{m}$ )	Spp-y ( $\mu\text{m}$ )
9	424	785	443
10	426	789	448
11	425	786	446
12	423	790	448
13	432	799	454
14	427	802	454
15	427	802	453
16	444	821	463
17	454	834	471
18	494	873	493
19	495	911	507
20	553	947	530
21	514	907	516

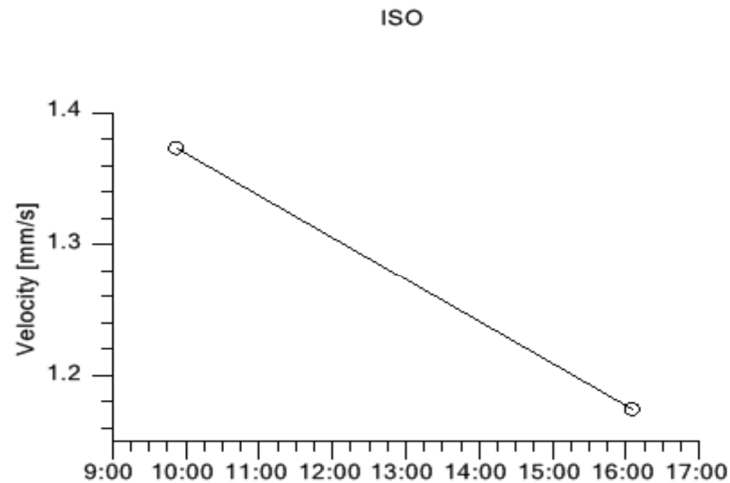
### 6.4.1. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA MERENJA

Prikazani rezultati merenja

Vibracije na gornjem vodećem ležaju (Ležaj L1)

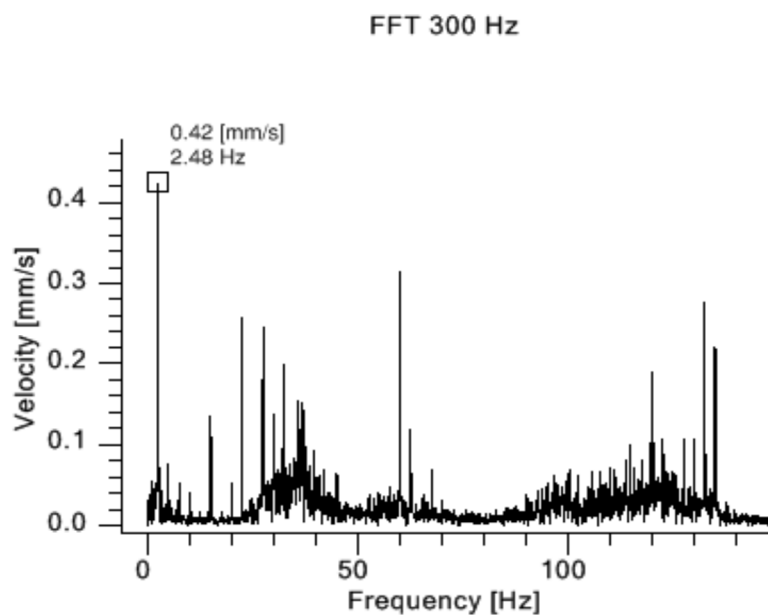


Slika 6.13. Prikaz generalnih merenja na ležaju L1, mereno sa prenosnom opremom



Slika 6.14. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u x-pravcu

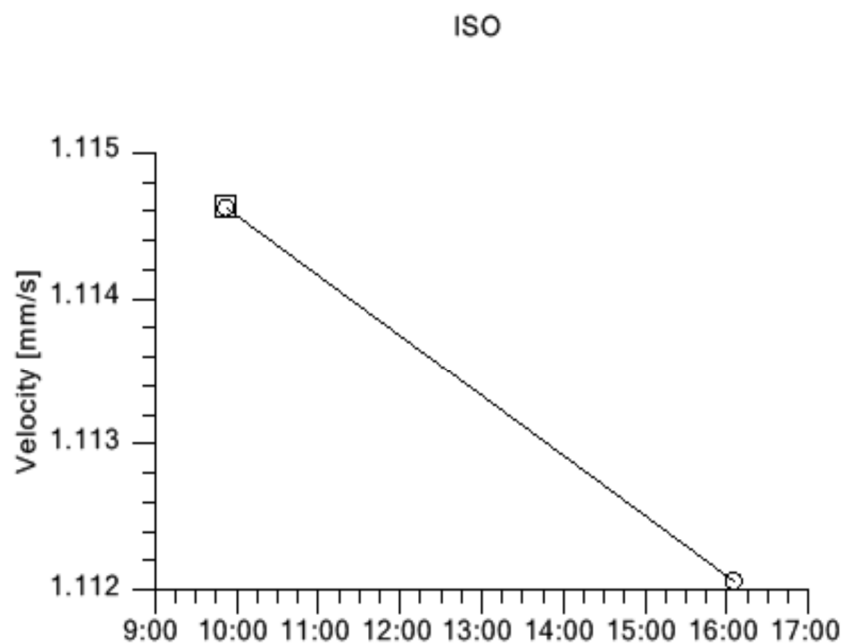
Na slici 6.14. prikazan je dijagram izmerenih nivoa apsolutnih vibracija u praznom hodu i u opterećenju (vidi se da nivo vibracija pada sa povećanjem opterećenja jer magnetno polje hidroagregata vraća osu ka centru rotacije i smanjuje se neuravnoteženost).



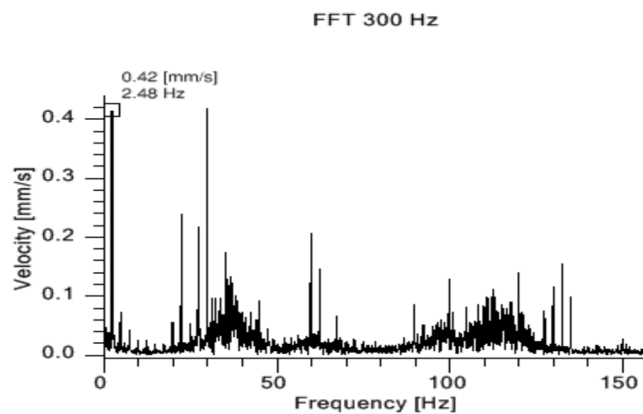
Slika 6.15. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa ležaja L1 u x-pravcu

Slika 6.16. prikazuje dijagram izmerenih nivoa apsolutnih vibracija u praznom hodu i u opterećenju (vidi se da nivo vibracija pada sa povećanjem opterećenja jer magnetno polje hidroagregata vraća osu ka centru rotacije i smanjuje se neuravnoteženost).

-pravac y



Slika 6.16. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u y-pravcu

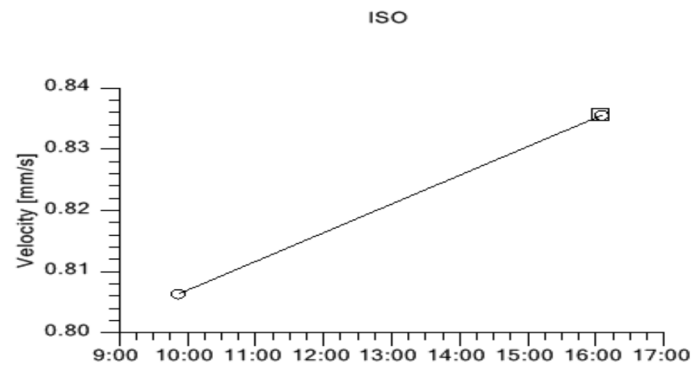


Slika 6.17. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa ležaja L1 u z-pravcu

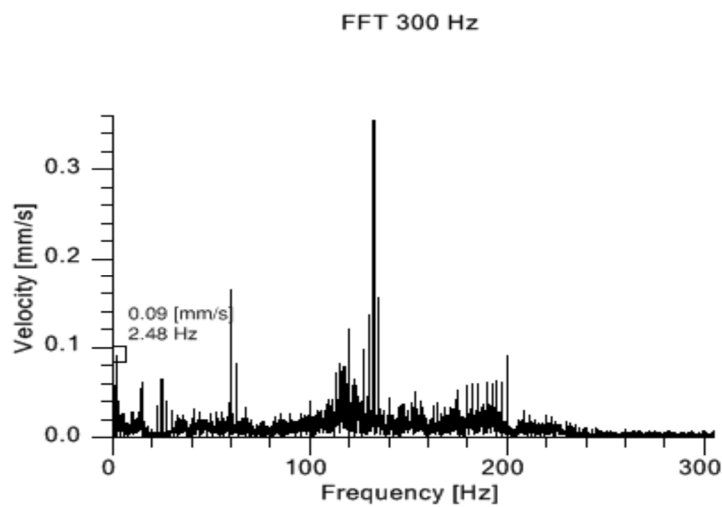
Slika 6.18. prikazuje dijagram izmerenih nivoa apsolutnih vibracija u praznom hodu i u opterećenju (vidi se da nivo vibracija raste sa povećanjem opterećenja jer magnetno polje hidroagregata vraća osu ka centru rotacije i smanjuje se neuravnoteženost, a povećava se opterećenje po z-osi).



-pravac z

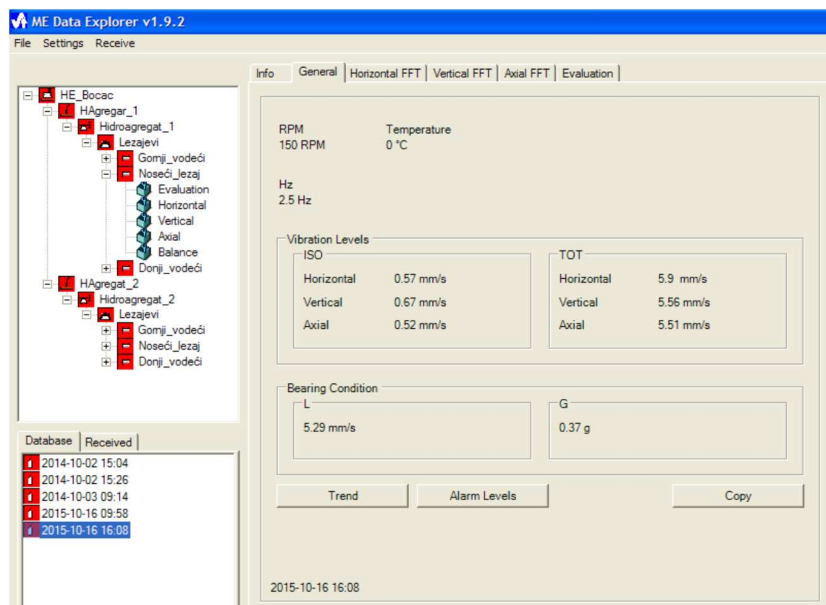


Slika 6.18. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u z-pravcu



Slika 6.19. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa ležaja L1 u z-pravcu

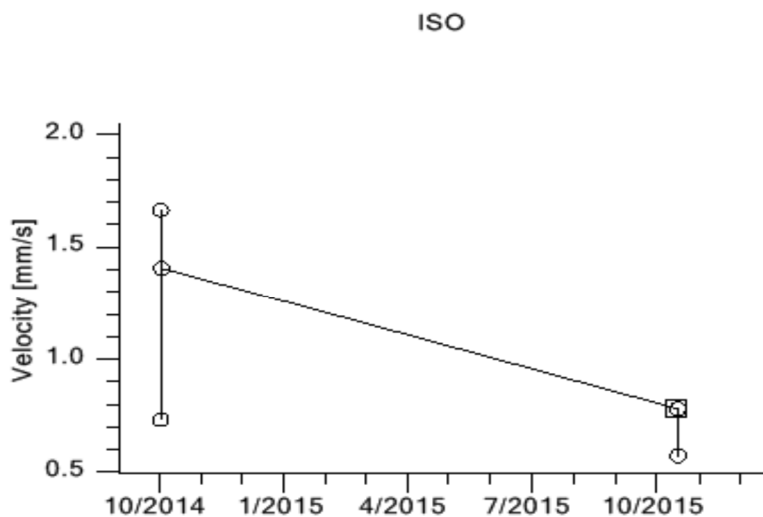
Vibracija sa nosećeg ležaja(ležaj L2)



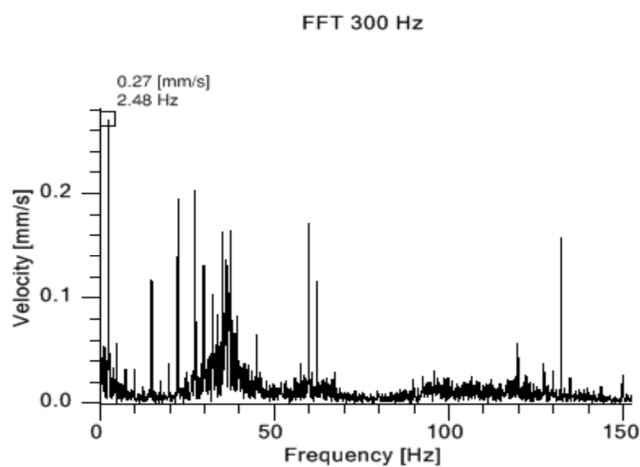
Slika 6.20. Prikaz generalnih merenja na ležaju L2, mereno sa prenosnom opremom

Slika 6.21. dijagram pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregat bez pobude, drugi kad je puno opterećanje i treći kružić najviši kad je data pobuda. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenje agregata).

-pravac x



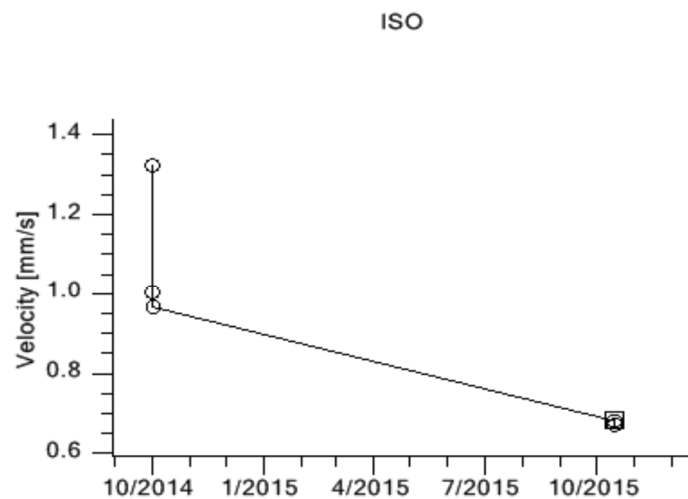
Slika 6.21. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa nosećeg ležaja u x-pravcu



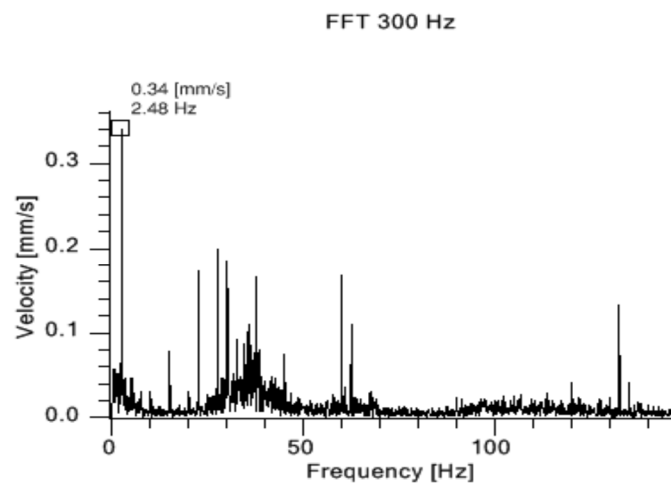
Slika 6.22. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u x-pravcu

Dijagram na slici 6.23. pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata puno opterećanje, drugi kad je data pobuda i treći kružić bez pobude. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenja agregata se poklapaju).

-pravac y



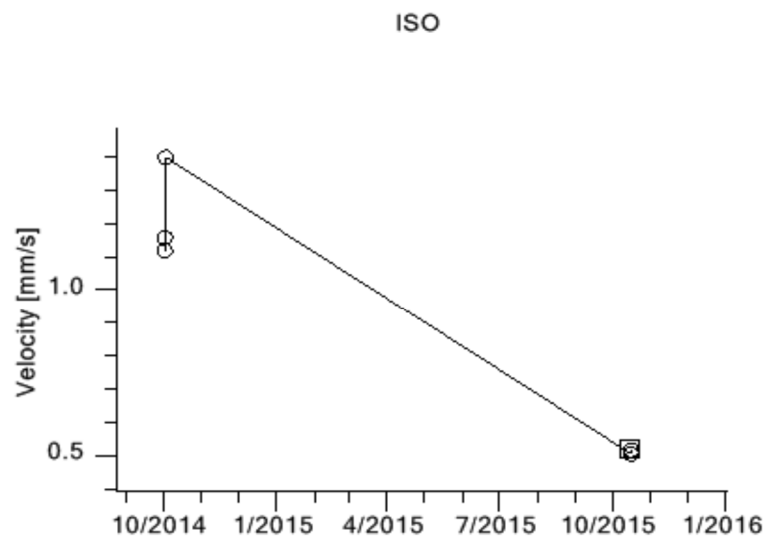
Slika 6.23. Ukupan nivo vibracija u različitim režimima sa nosećeg ležaja u y-pravcu



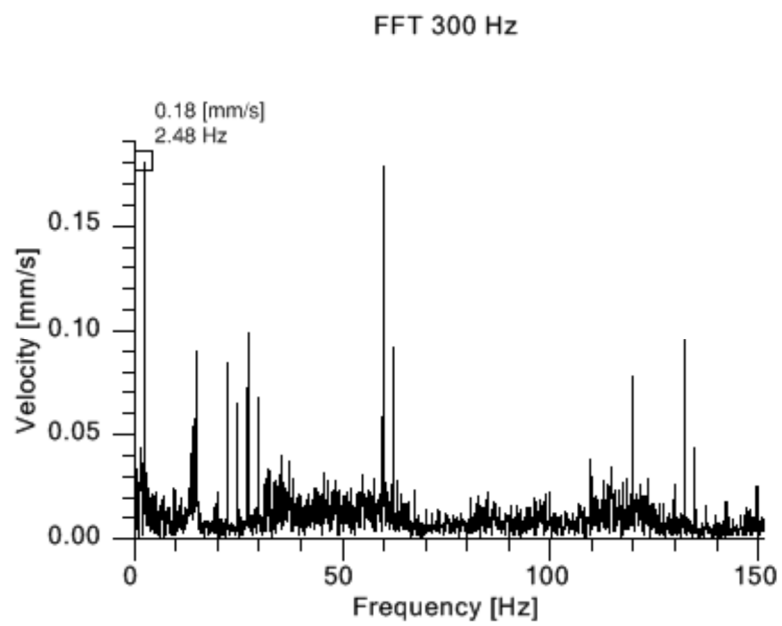
Slika 6.24. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u x-pravcu

Slika 6.25. je dijagram koji pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata bez pobude, drugi kad je data pobuda i treći kružić najviši kad je puno opterećenje. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenja agregata koji se poklapaju).

-pravac z

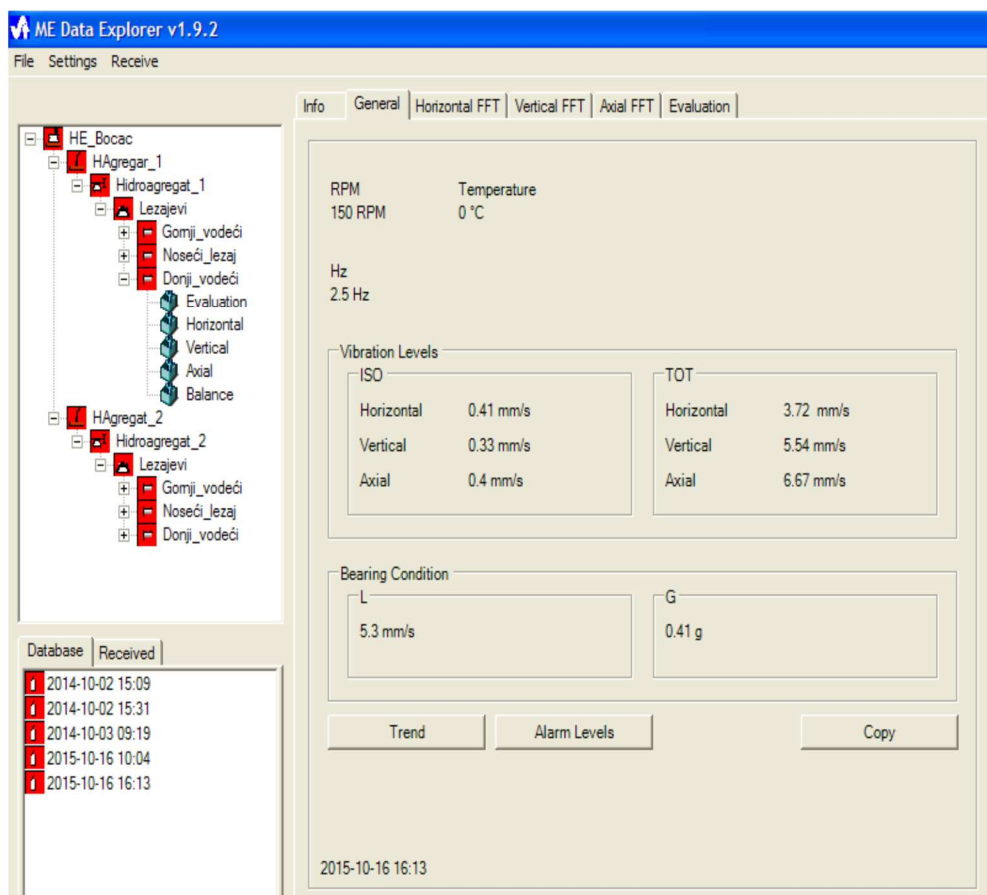


Slika 6.25. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima nosećeg ležaja u z-pravcu



Slika 6.26. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u z-pravcu

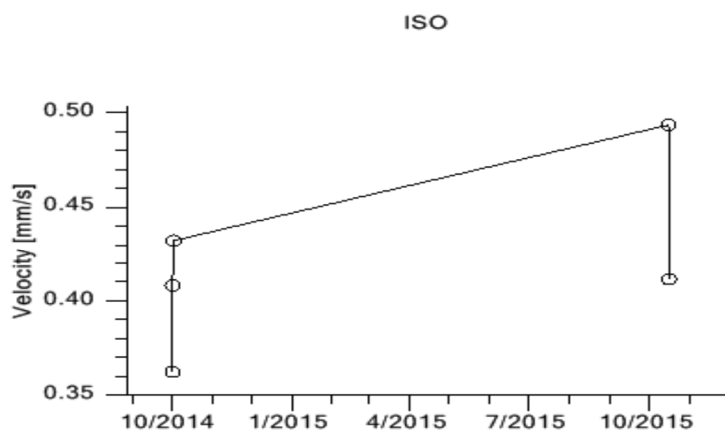
## Vibracije sa donjeg vodećeg (turbinskog) ležaja, ležaj L3



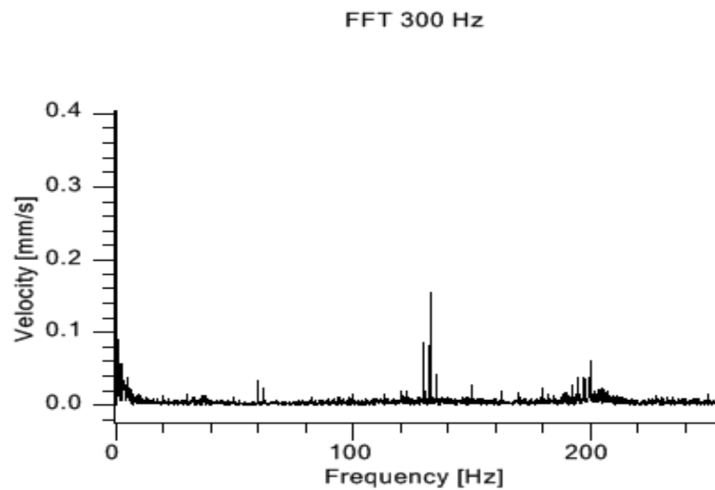
Slika 6.27. Prikaz generalnih merenja na ležaju L3, mereno sa prenosnom opremom

Slika 6.28. pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata bez pobude, drugi kad je data pobuda i treći kružić najviši kad je puno opterećenje. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenje agregata koji se poklapaju).

-pravac x



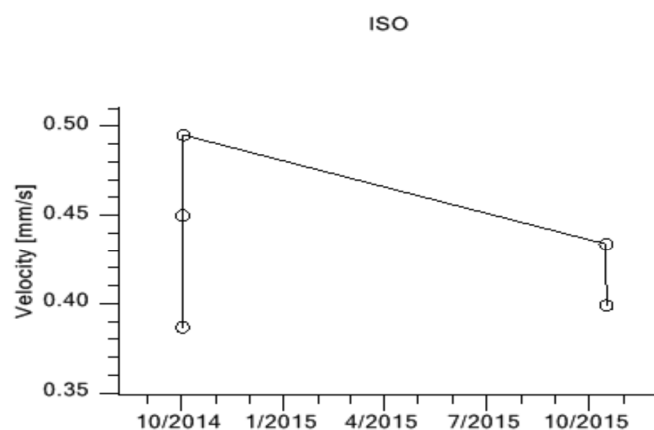
Slika 6.28. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u x-pravcu



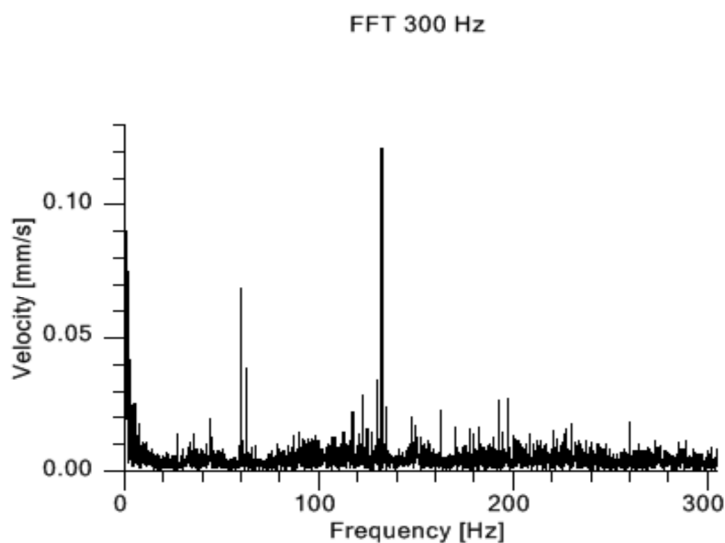
Slika 6.29. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u x-pravcu

Slika 6.30. je dijagram koji pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata bez pobude, drugi kad je data pobuda i treći kružić najviši kad je puno opterećanje. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenje agregata koji se poklapaju).

-pravac y



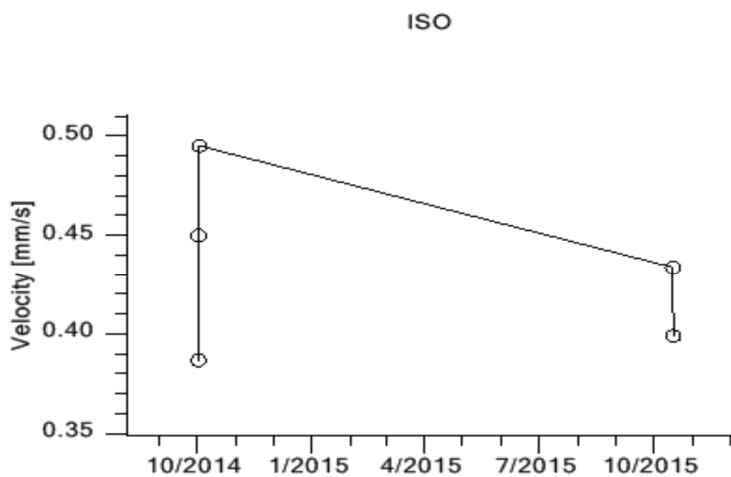
Slika 6.30. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u y-pravcu



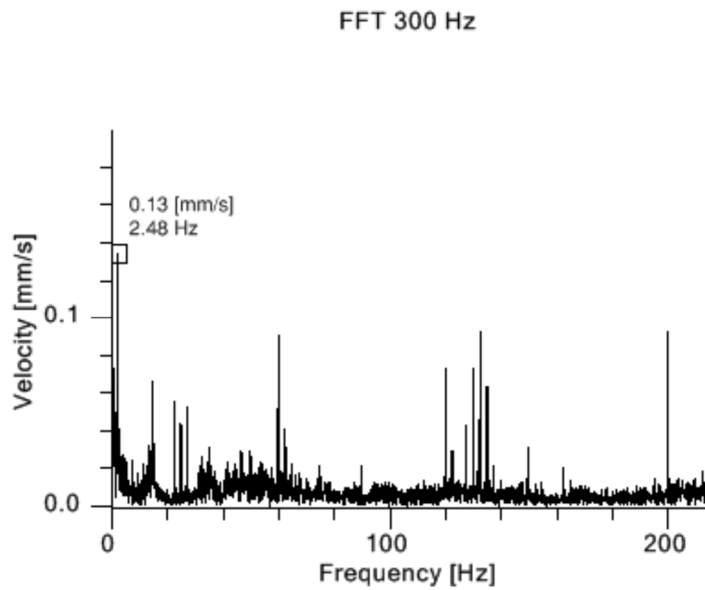
Slika 6.31. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u y-pravcu

Slika 6.32. je dijagram koji pokazuje kako su se vibracije menjale od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva tri kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata bez pobude, drugi kad je data pobuda i treći kružić najviši kad je puno opterećanje. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenje agregata koji se poklapaju).

-pravac z



Slika 6.32. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u z-pravcu



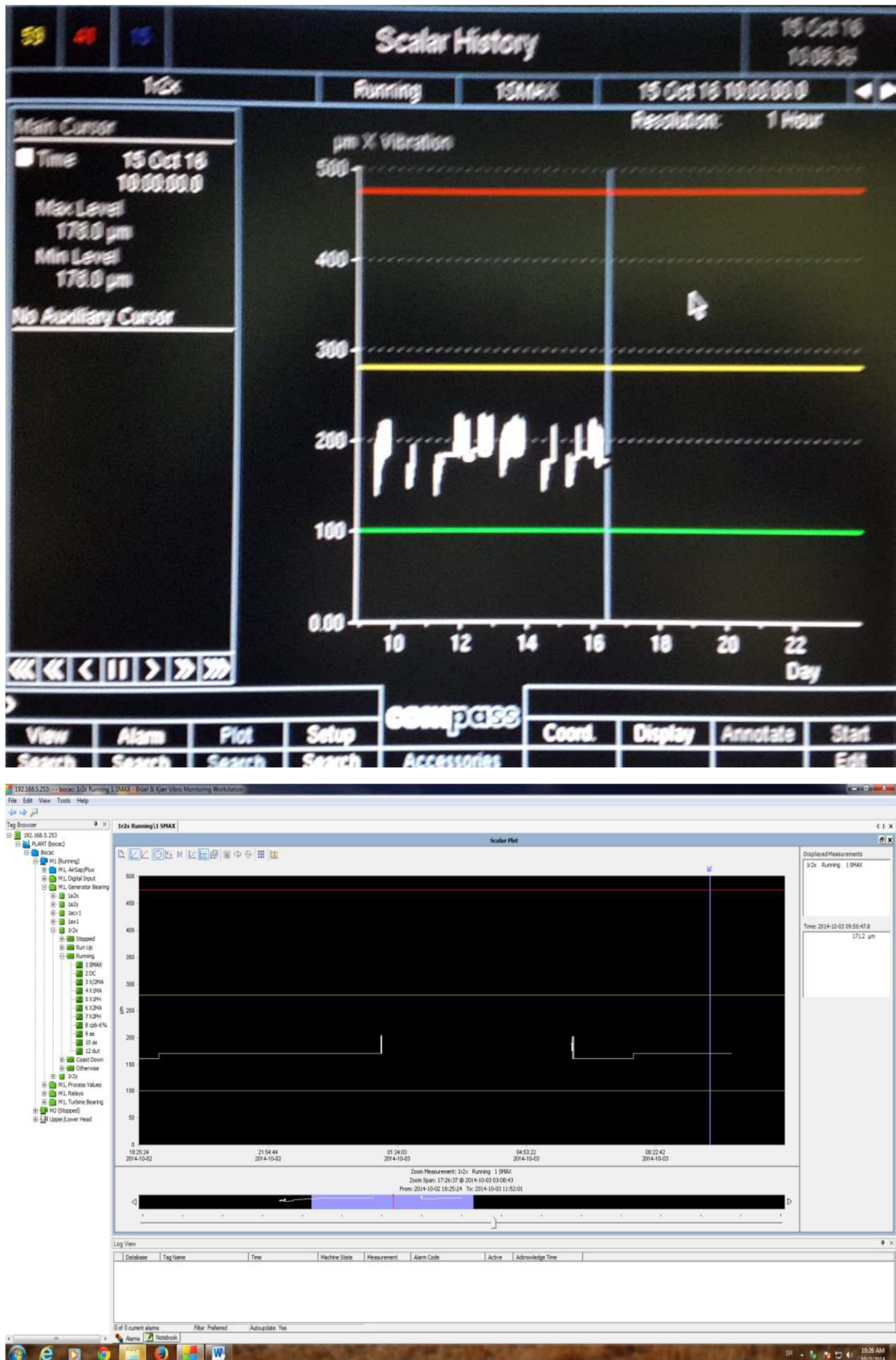
*Slika 6.33. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u z-pravcu*

Rotorne vibracije sa hidroagregata br.1.

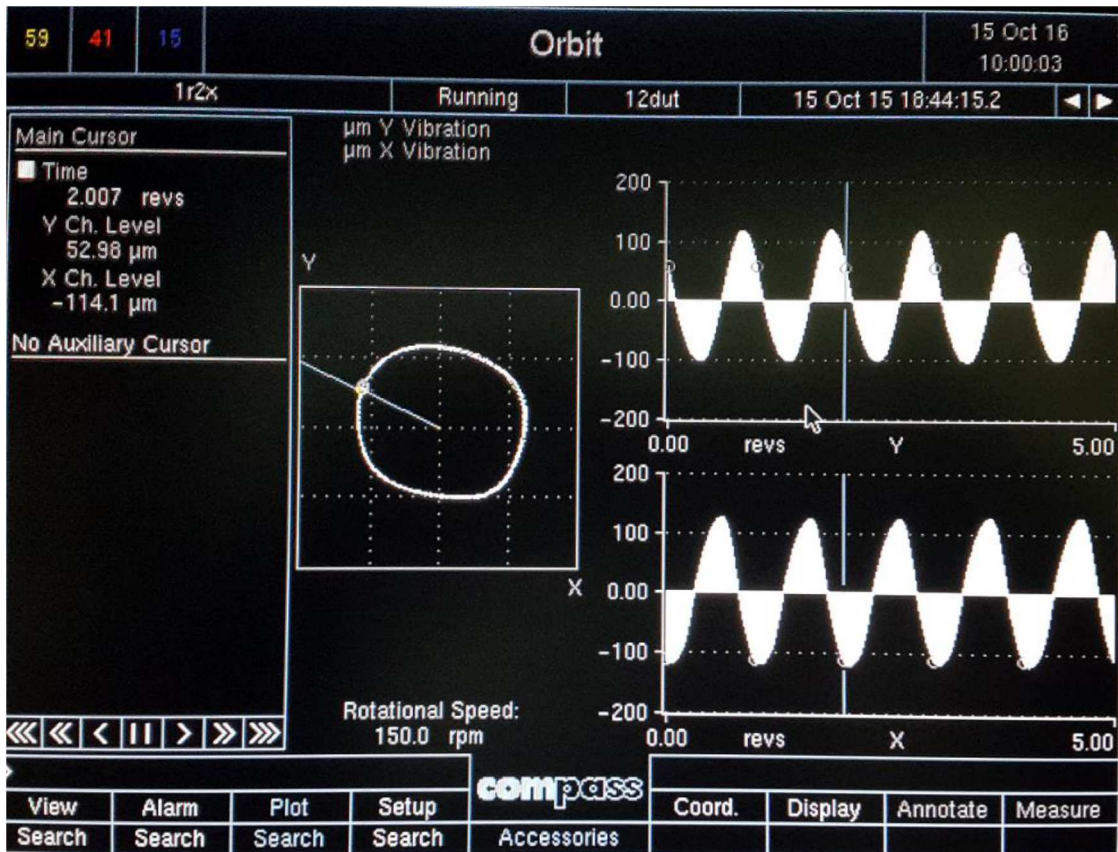
Rotorne vibracije sa generatorskog ležaja

Na slici 6.34. je prikazan trend ukupnog nivoa  $S_{max}$  rotornih vibracija, gde se vidi da je nivo vibracija u skladu sa ISO standardom. Nivo vibracija prelazi granicu A, ne prelazi granicu B, znači pripada području B.



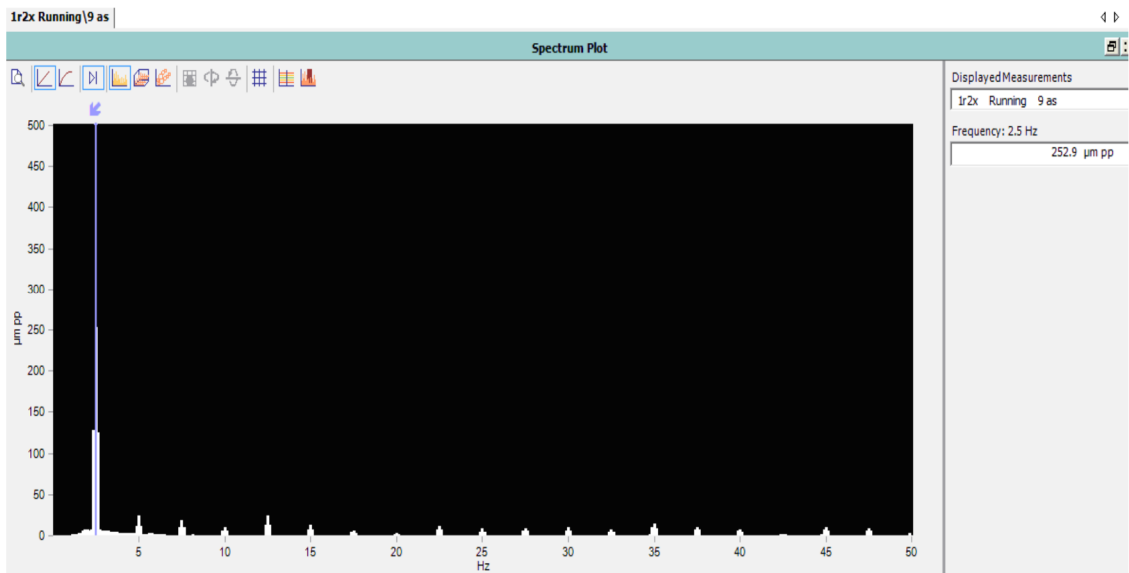


Slika 6.34. Prikaz trenda „Smax“ rotornih vibracija sa L1



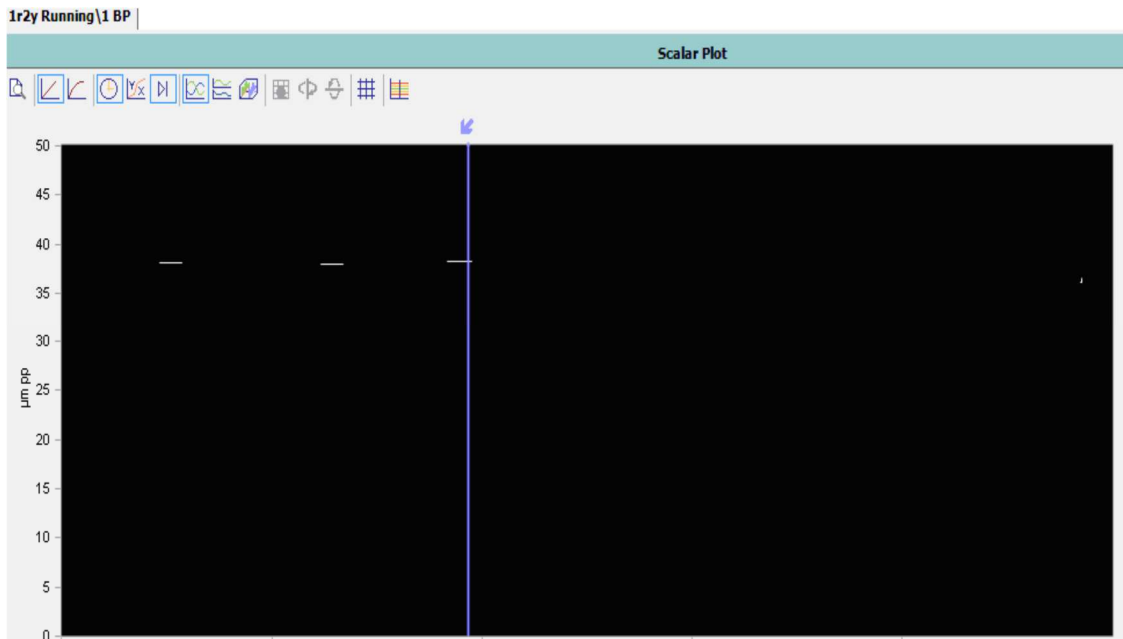
Slika 6.35. Prikaz orbite rotornih vibracija sa L1

Slika 6.35. Orbita je dinamička putanja rukavca i ona ima normalan izgled.



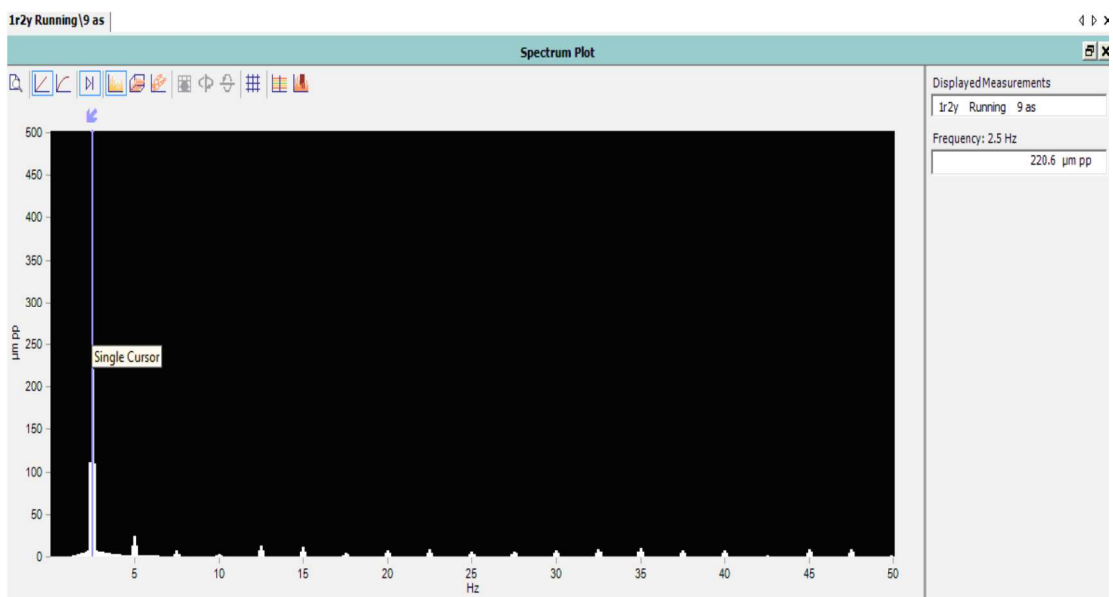
Slika 6.36. Spektralni prikaz rotornih vibracija sa L1 u x-pravcu

Slika 6.36. Po spektru vibracija se vidi da je osnovni izvor pobude neuravnoteženost sistema (izražen 1X harmonik)



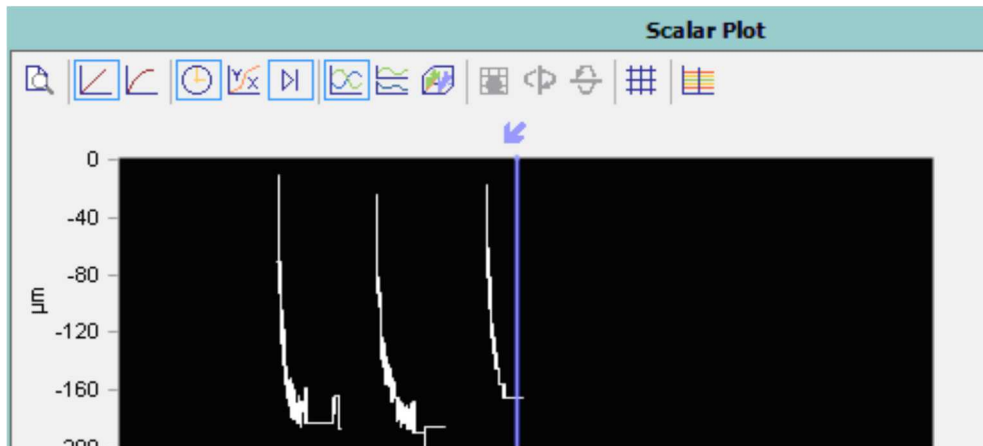
Slika 6.37. Ukupni nivo rotornih vibracija merenih na L1 u y-pravcu

Slika 6.37. Sa spektra se vidi postojanje hidraulične komponente vibracija



Slika 6.38. Spektralni prikaz rotornih vibracija mereno na L1 po y-pravcu

Na slici 6.39. i 6.40. se vidi trend položaja rukavca rotora na L1 i može se pratiti položaj rukavca u ležaju tokom startanja mašine. Sa njih se očitava prisustvo jednosmernih sila tokom startanja. Sa slike se jasno vidi normalno ponašanje rukavca u ležaju bez prisustva značajnijih sila (nema naglih skokova na slikama, rukavac radi normalno u svom fluidnom okruženju).

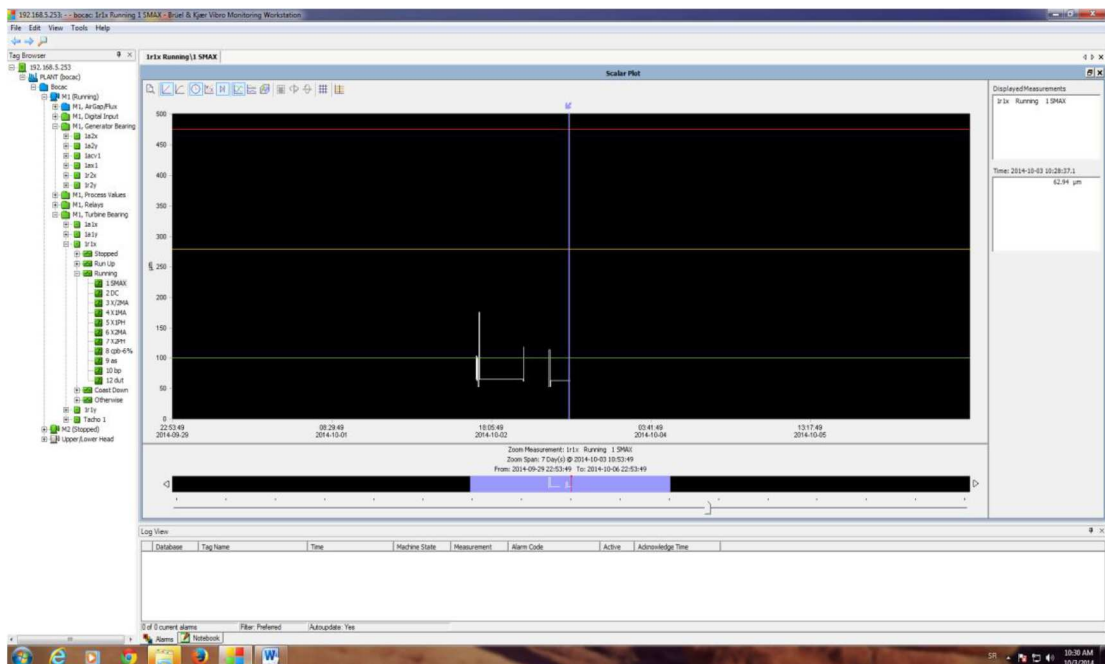


Slika 6.39. Položaj ose rotora tokom startovanja mašine mereno na L1 u x-pravcu



Slika 6.40. Položaj rukavca rotora mereno na L1 po y-pravcu

### Rotorne vibracije sa turbinskog ležaja



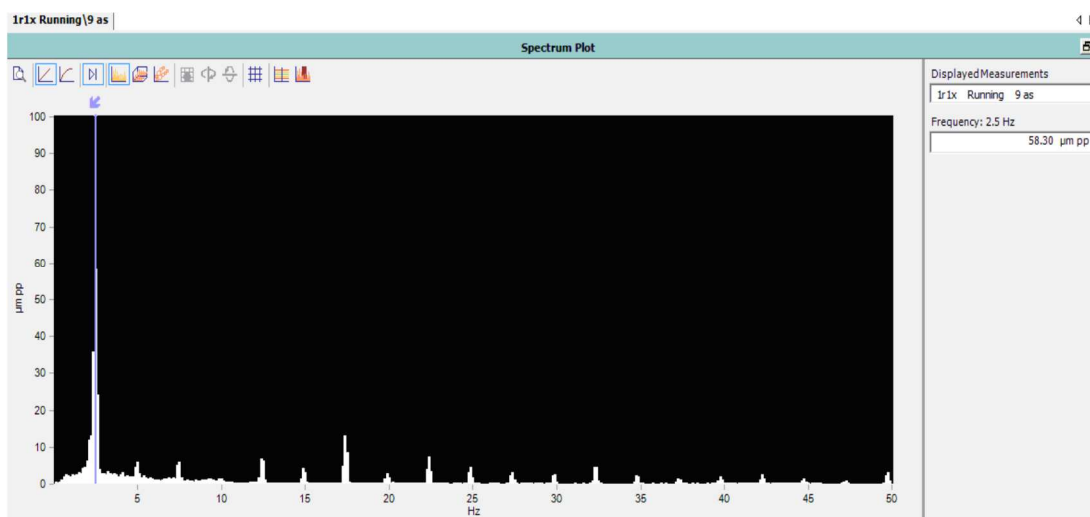
Slika 6.41. Prikaz trenda „Smax“ rotornih vibracija sa L1

Na slici 6.41. prikazan je trend ukupnog nivoa Smax rotornih vibracija, gde se vidi da je nivo vibracija u skladu sa ISO standardima u klasi A-B.



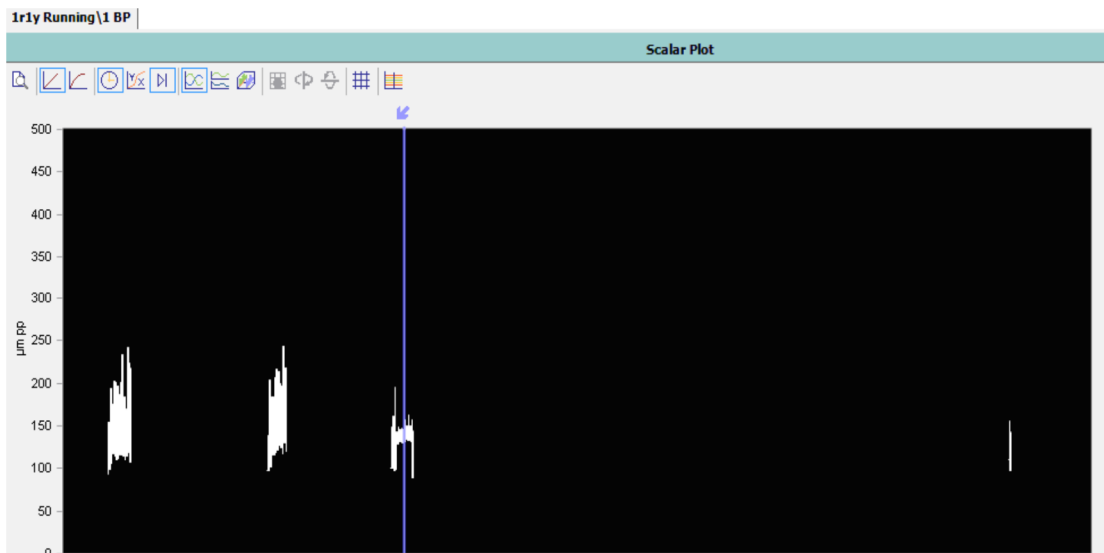
Slika 6.42. Prikaz orbite rotornih vibracija sa L1

Slika 6.42. Orbita je ustvari dinamička putanja rukavca i ona ima normalan izgled.

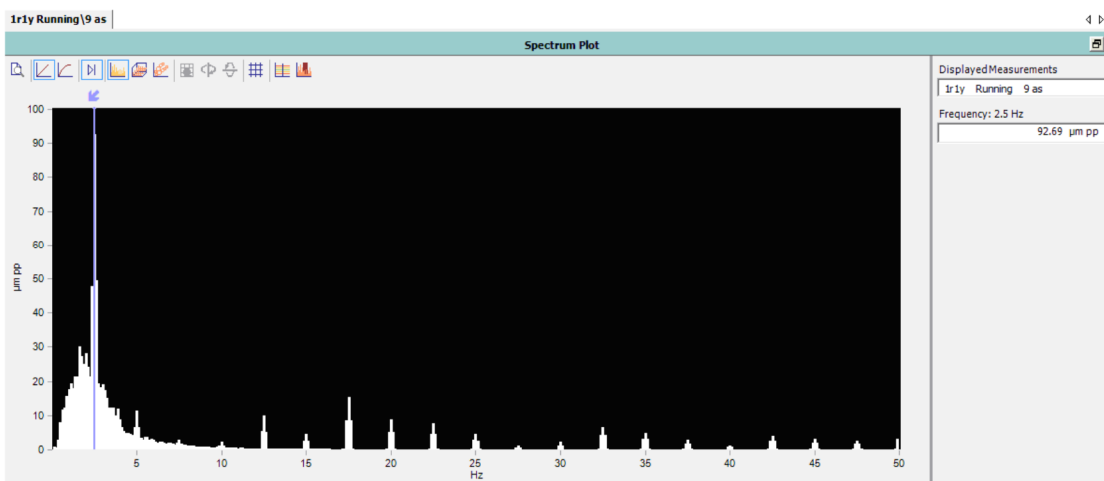


Slika 6.43. Prikaz spektra rotornih vibracija sa L3 mereno u x-pravcu

Slika 6.43. Po spektru vibracija se vidi da je osnovni izvor pobude neuravnoteženost sistema (izražen 1X harmonik)

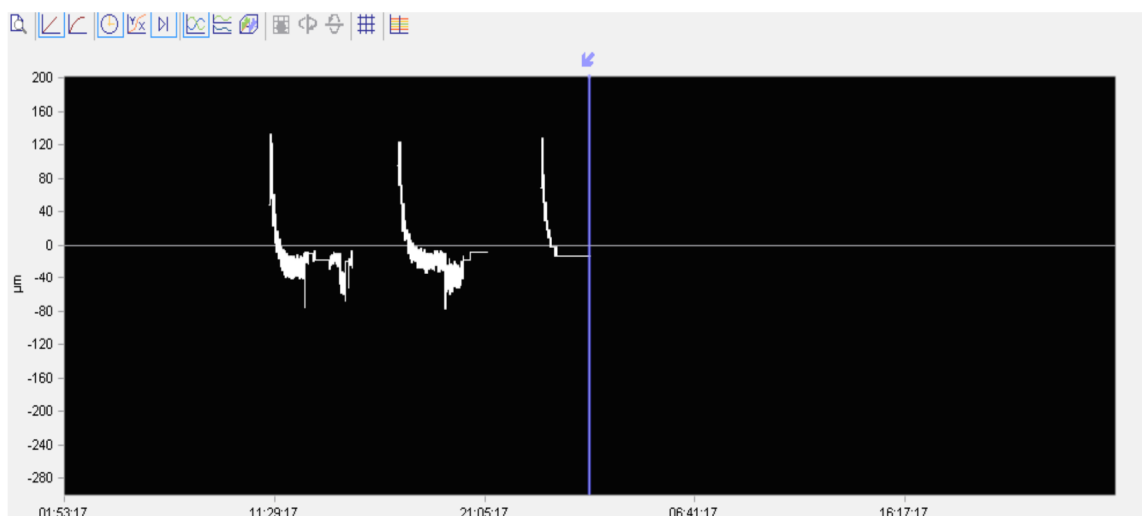


Slika 6.44. Ukupni nivo rotornih vibracija sa L3 u y-pravcu

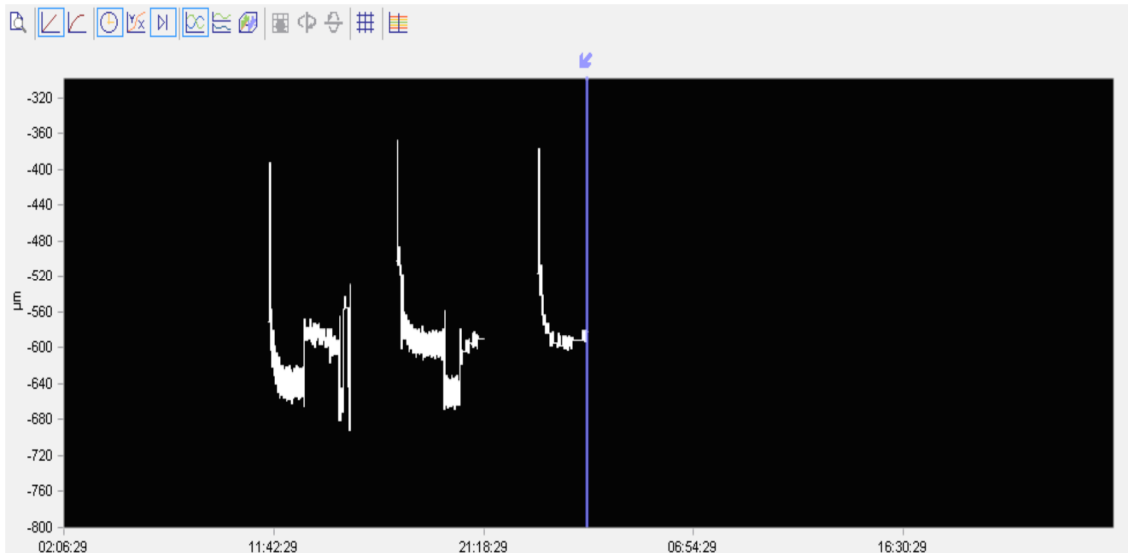


Slika 6.45. Prikaz spektra rotornih vibracija sa L3 mereno u y-pravcu

Slika 6.45. Sa spektra se vidi postojanje hidraulične komponente vibracija

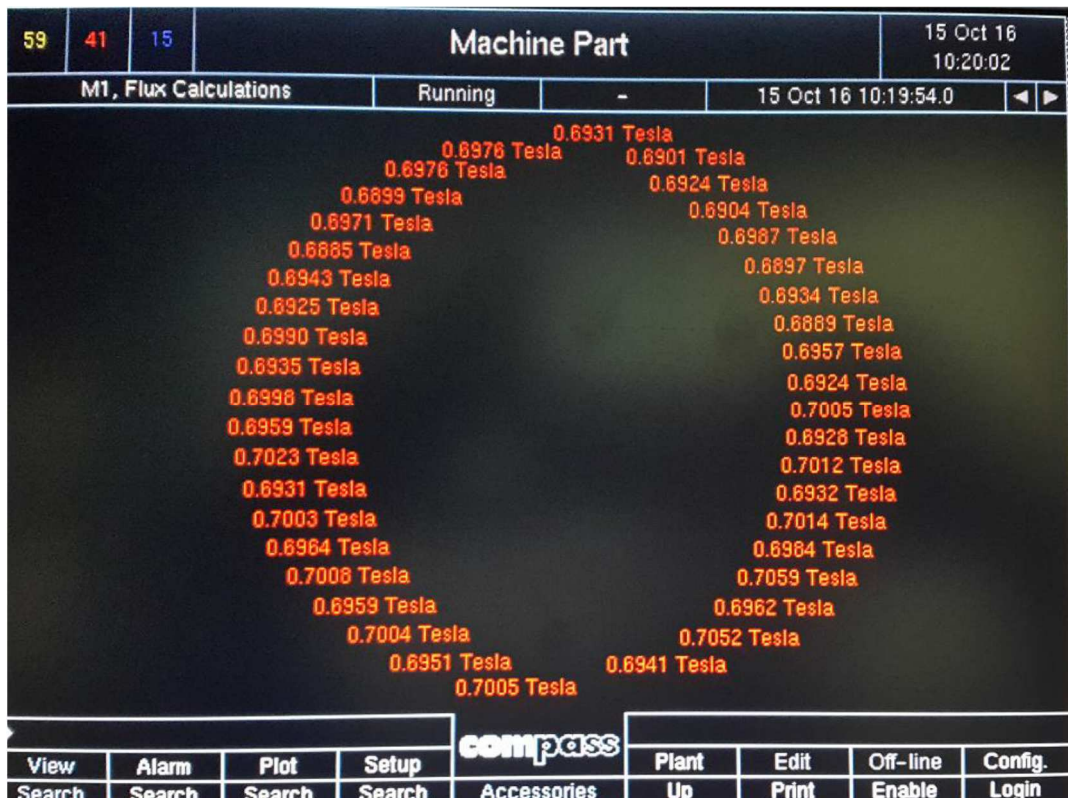


Slika 6.46. Trend položaja rukavca rotora na L3, tokom startovanja i stabilnog rada hidroagregata, mereno u x-pravcu

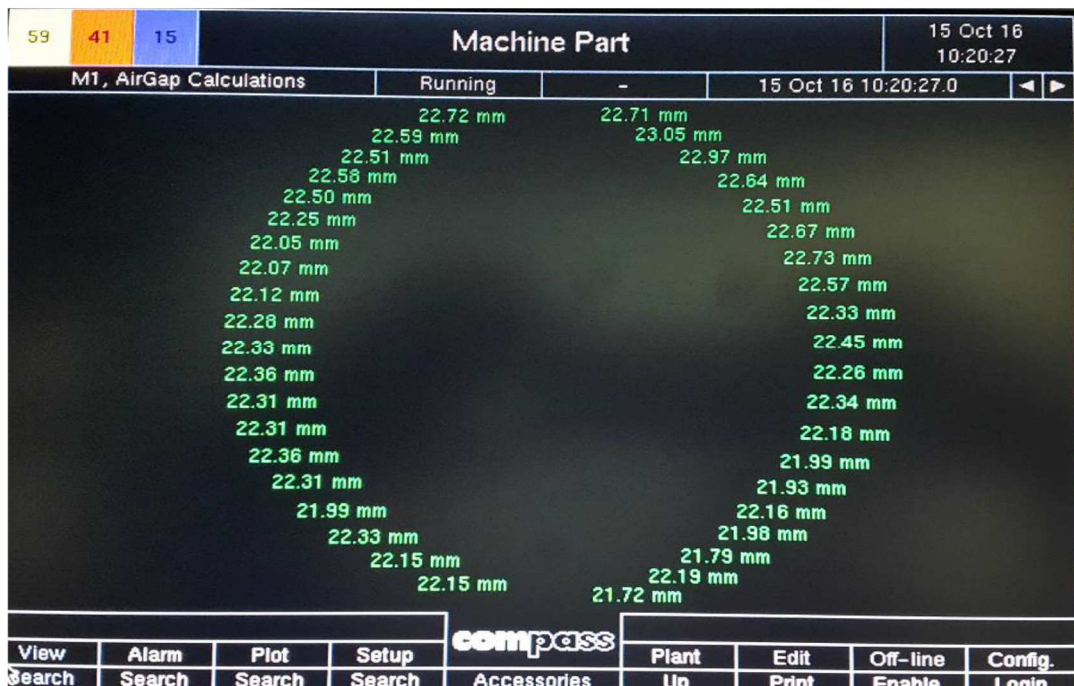


Slika 6.47. Trend položaja rukavca rotora na L3, tokom startovanja hidroagregata, mereno u y-pravcu

Sa slika 6.46. i 6.47. se vidi trend položaja rukavca rotora na L3 i može se pratiti položaj rukavca u ležaju tokom startovanja mašine. Sa njih se očitava prisustvo jednosmernih sila tokom startovanja. Sa slike se jasno vidi normalno ponašanje rukavca u ležaju bez prisustva značajnijih sila (nema naglih skokova na slikama, rukavac radi normalno u svom fluidnom okruženju).



Slika 6.48. Raspored magnetnog fluksa na hidroagregatu br. 1



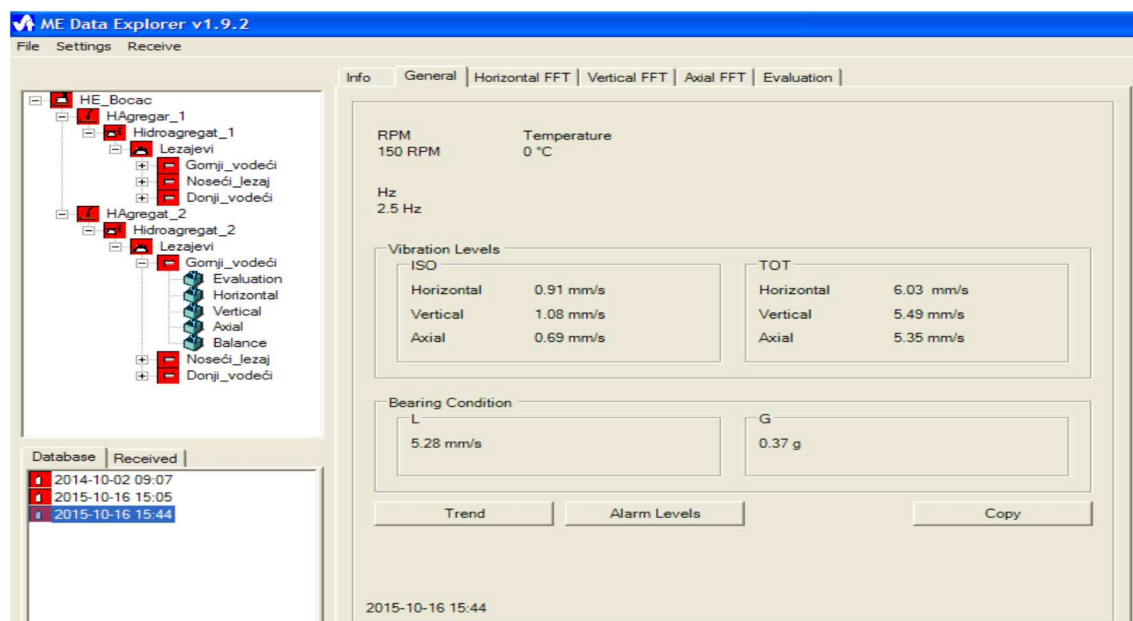
Slika 6.49. Analiza vazdušnog zazora na hidroagregatu br.1

Slike 6.48. i 6.49. pokazuju raspored magnetnog fluksa i veličina vazdušnog zazora, na generatoru na hidroagregatu br.1. Po analizi vrednosti vazdušnog zazora vidi se da je on ravnomerno raspoređen i ima vrlo malu asimetriju magnetnog polja.

Na sledećim slikama su prikazani karakteristični vibrodiagnostički formati sa pojedinih mernih mesta u sistemu tokom pomenutog vremenskog perioda nadzora hidroagregata br.1.

#### Analiza apsolutnih vibracija

##### Vibracija na gornjem vodećem ležaju (Ležaj L1)

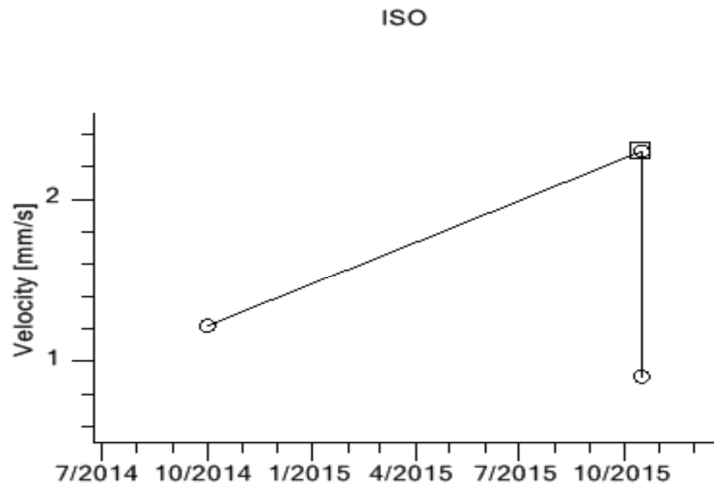


Slika 6.50. Prikaz generalnih merenja na ležaju L1, mereno sa prenosnom opremom

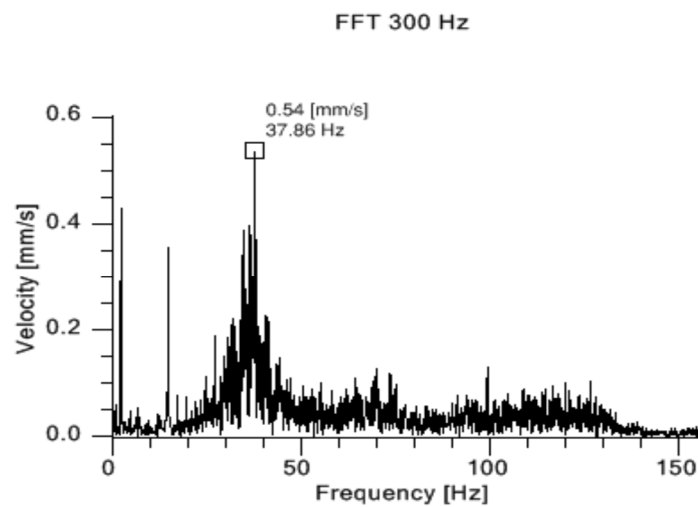


Slika 6.51. pokazuje dijagram promena vibracija od oktobra 2014. do oktobra 2015. Merenje je vršeno pod opterećenjem, rast je linearni što je pozitivno. Drugi kružić u 2015. prikazuje pad vibracija posle opterećenja.

-pravac x



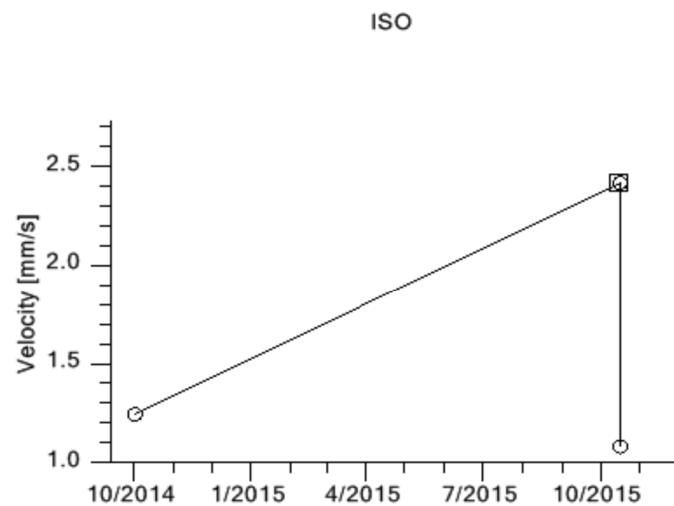
Slika 6.51. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u x-pravcu



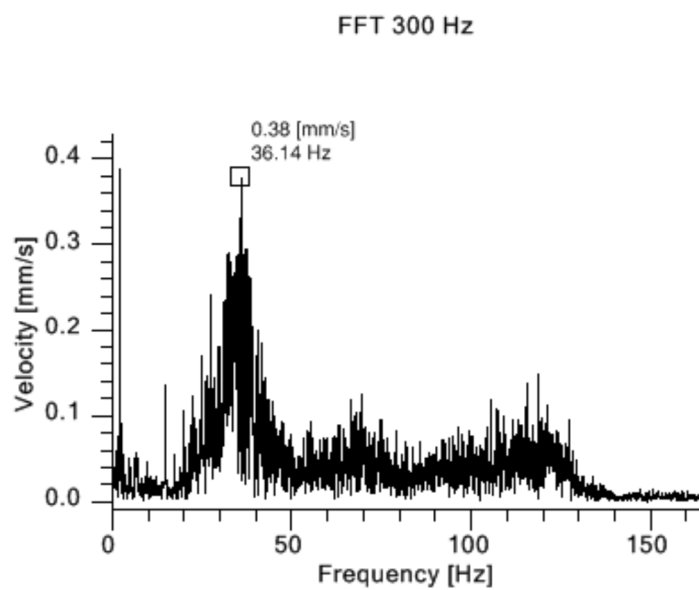
Slika 6.52. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija ca lažaja L1 u x-pravcu

Slika 6.53. pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Merenje je vršeno pod opterećenjem, rast je linearni što je pozitivno. Drugi kružić u 2015. prikazuje pad vibracija posle opterećenja.

-pravac y



Slika 6.53. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u y-pravcu

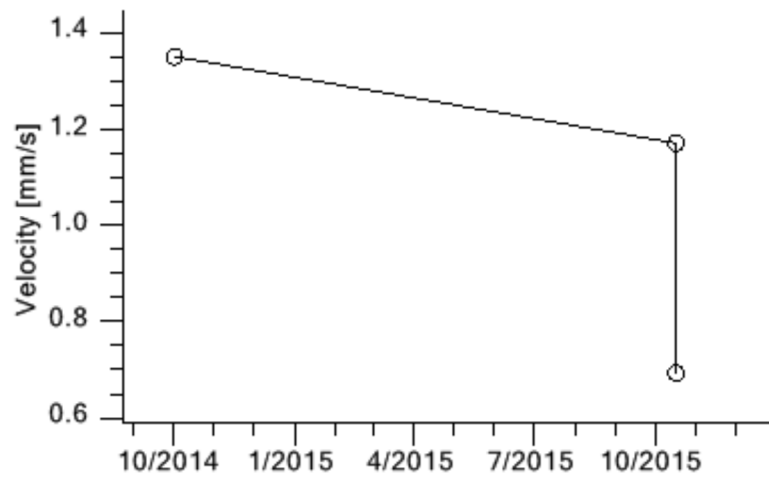


Slika 6.54. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa ležaja L1 u y-pravcu

Slika 6.55. pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Merenje je vršeno pod opterećenjem, pad je linearni što je pozitivno. Drugi kružić u 2015. prikazuje pad vibracija posle opterećenja.

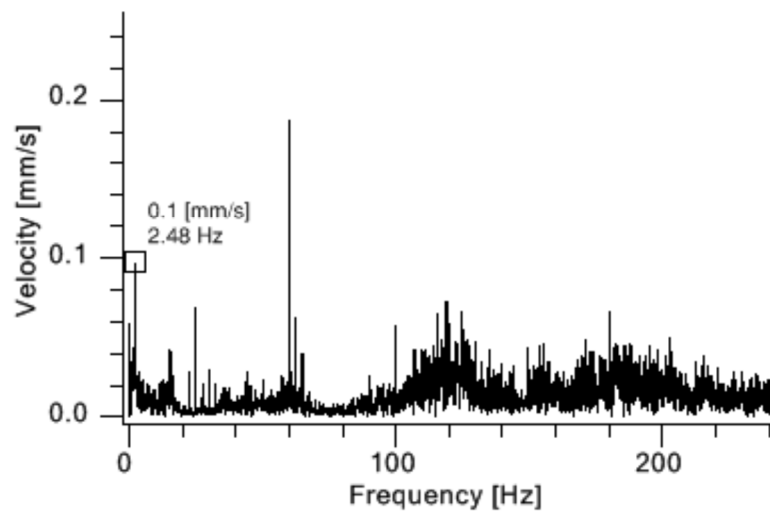
- pravac z

ISO



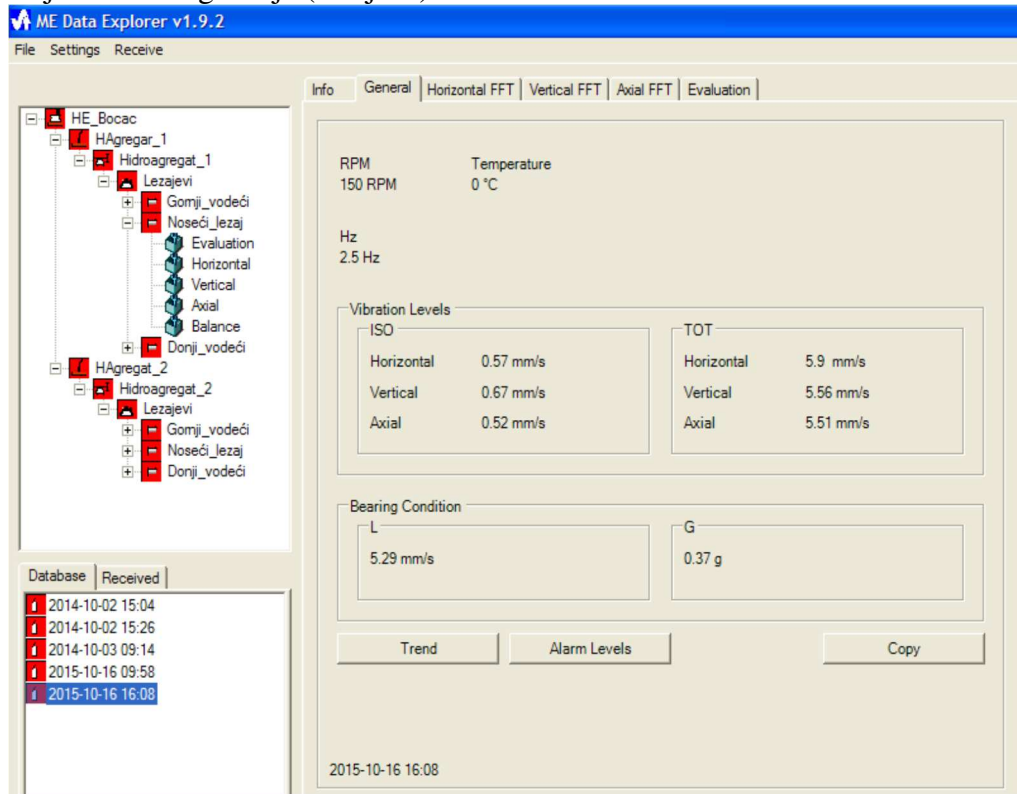
Slika 6.55. Ukupni nivo vibracija, mereno na ležaju L1 u z-pravcu

FFT 300 Hz



Slika 6.56. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa ležaja L1 u z-pravcu

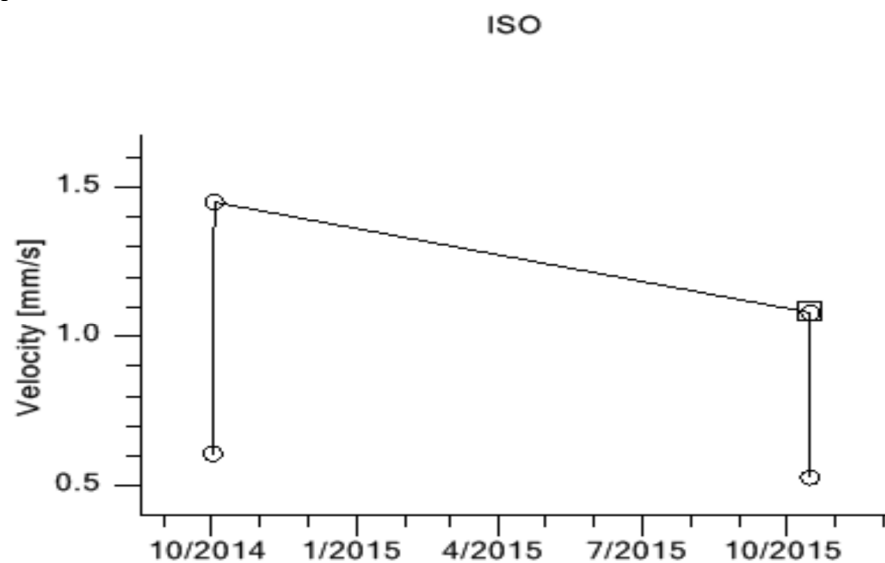
## Vibracije sa nosećeg ležaja (ležaj L2)



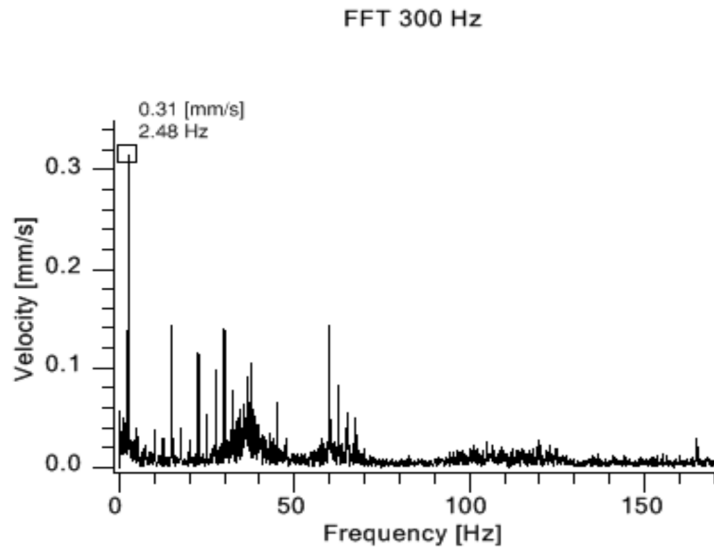
Slika 6.57. Prikaz generalnih merenja na ležaju L2, mereno sa prenosnom opremom

Dijagram slika 6.58. pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregata bez pobude, drugi - puno opterećanje. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi- prazan hod, a drugi - operećenje agregata). Merenje je vršeno pod opterećenjem, pad je linearni. Drugi kružić u 2015. prikazuje pad vibracija posle opterećenja.

-pravac x



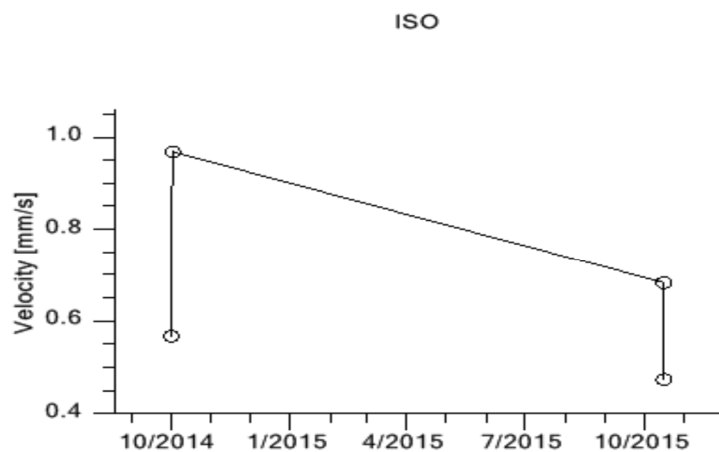
Slika 6.58. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa nosećega ležaja u x-pravcu



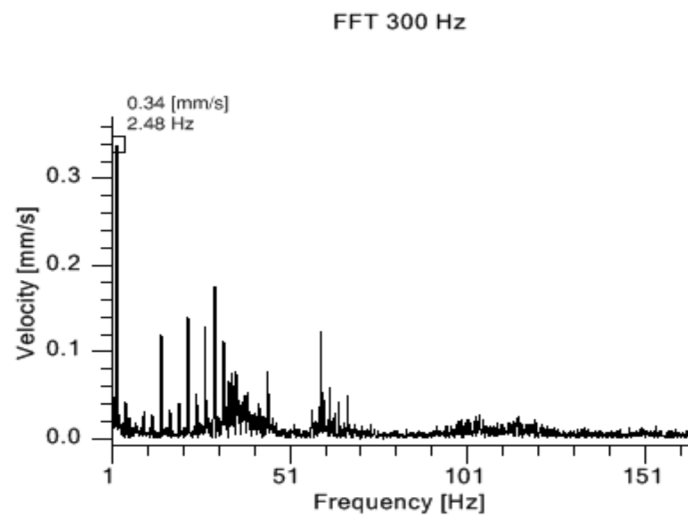
Slika 6.59. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u x-pravcu

Slika 6.60. dijagram pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. prvi kružić - hidroagregat bez pobude, drugi pod punim opterećanjem. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi opterećenje agregata).

-pravac y

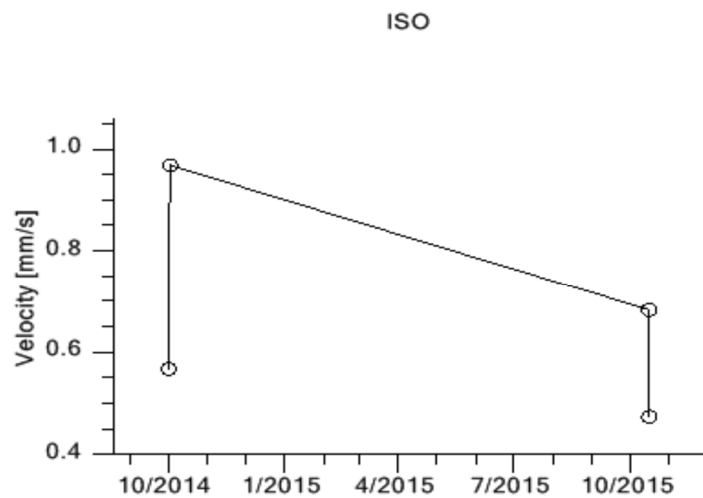


Slika 6.60. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa nosećeg ležaja u y-pravcu



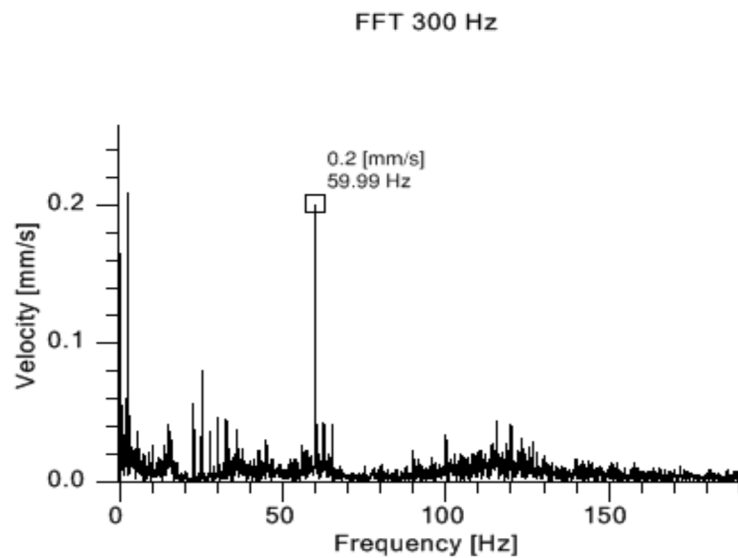
Slika 6.61. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u y-pravcu

-pravac z



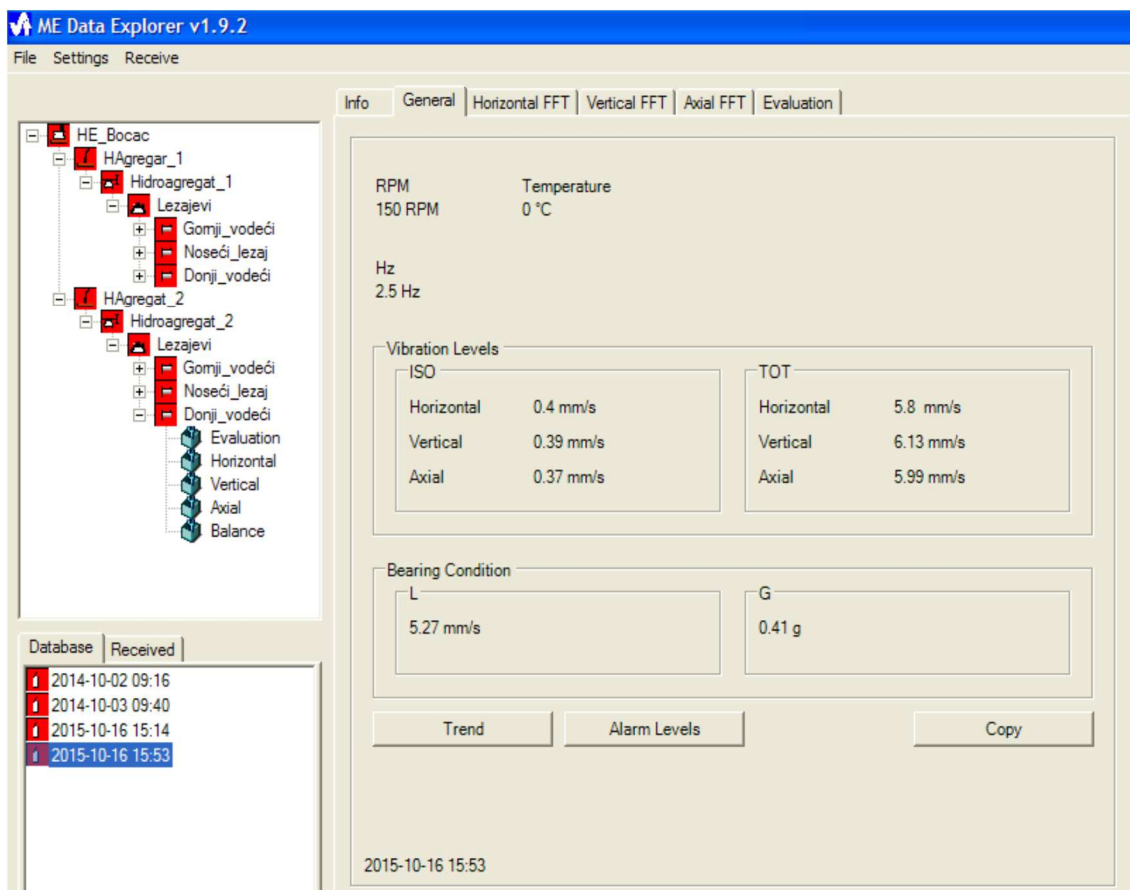
Slika 6.62. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa nosećeg ležaja u z-pravcu

Slika 6.63. je dijagram koji pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić - hidroagregat bez pobude, drugi pod punim opterećanjem. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. prvi prazan hod, a drugi operećenje agregata).



Slika 6.63. Spektralni prikaz vibracija sa nosećeg ležaja u z-pravcu

Vibracije sa donjeg vodećeg (turbinskog) ležaja, ležaj L3

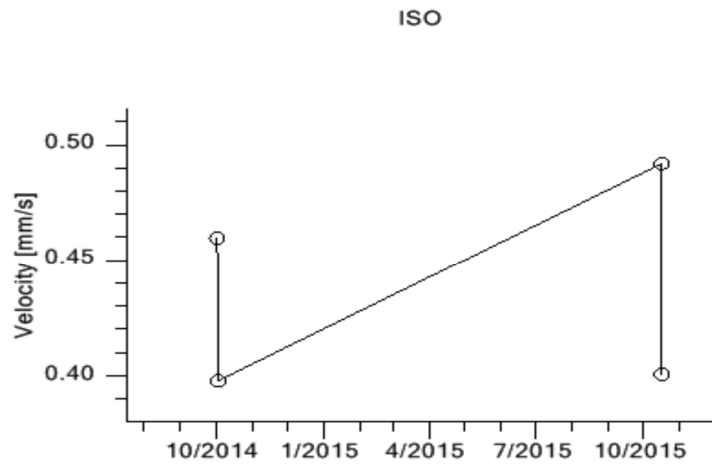


Slika 6.64. Prikaz generalnih merenja na ležaju l3, mereno sa prenosnom opremom

Slika 6.65. pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. (donji

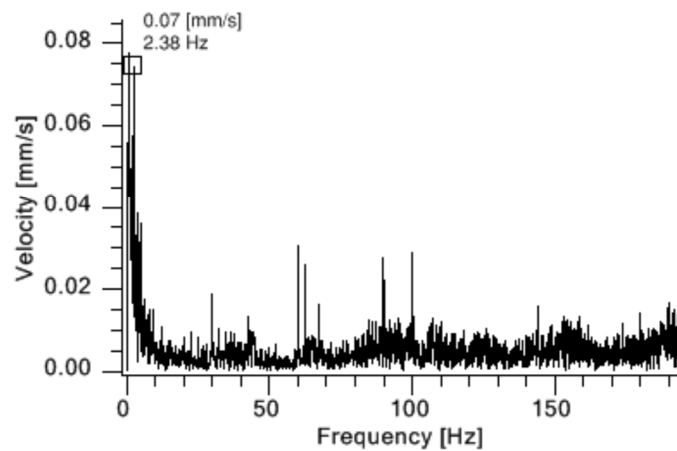
kružić – hidroagregat puno opterećenje, drugi gornji je bez pobude. Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. Prvi donji prazan hod, a drugi gornji opterećenje agregata).

-pravac x



Slika 6.65. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u x-pravcu

FFT 300 Hz

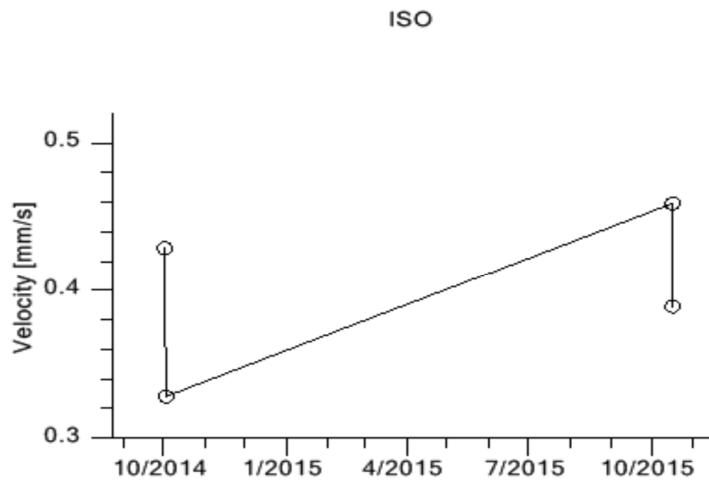


Slika 6.66. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u x-pravcu

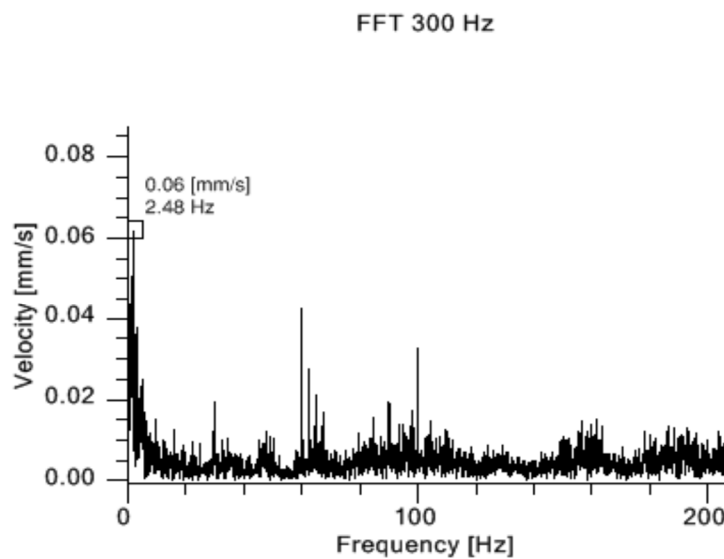
Slika 6.67. pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. (donji kružić – hidroagregat pod punim opterećenjem, drugi gornji je bez pobude). Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. (prvi donji prazan hod, a drugi gornji opterećenje agregata).



-pravac y



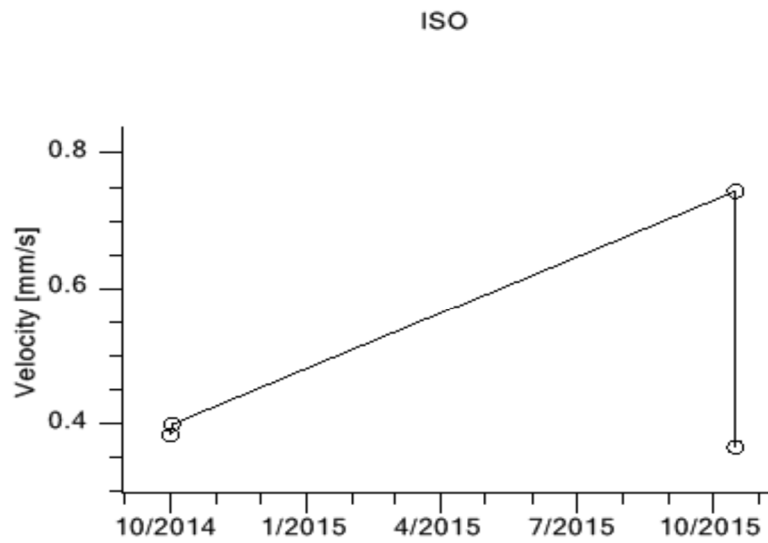
Slika 6.67. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u y-pravcu



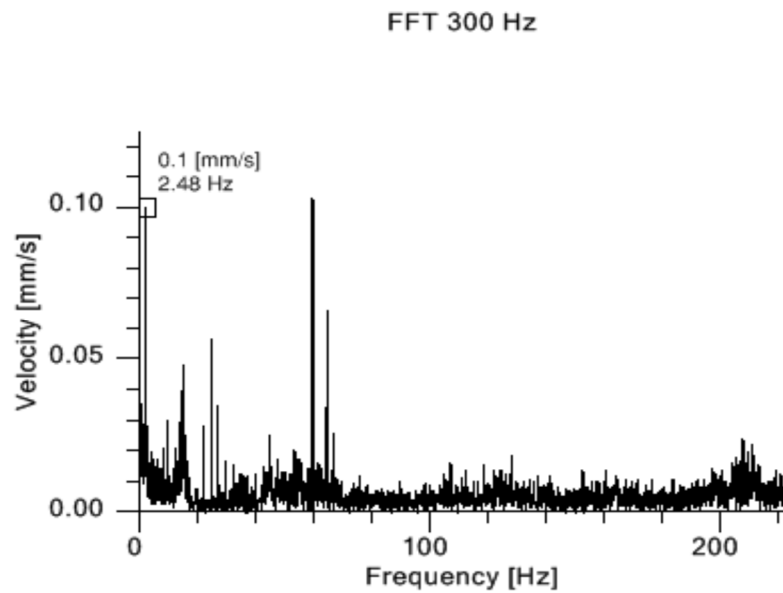
Slika 6.68. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u y-pravcu

Slika 6.69. je dijagram koji pokazuje kako su se menjale vibracije od oktobra 2014. do oktobra 2015. Kružići pokazuju kad su merene vibracije. Prva dva kružića su vibracije iz 2014. (prvi kružić – hidroagregat pod punim opterećanjem, drugi je bez pobude). Poslednja dva kružića su vrednosti vibracija u 2015. (prvi donji prazan hod, a drugi gornji opterećenje agregata).

-pravac z



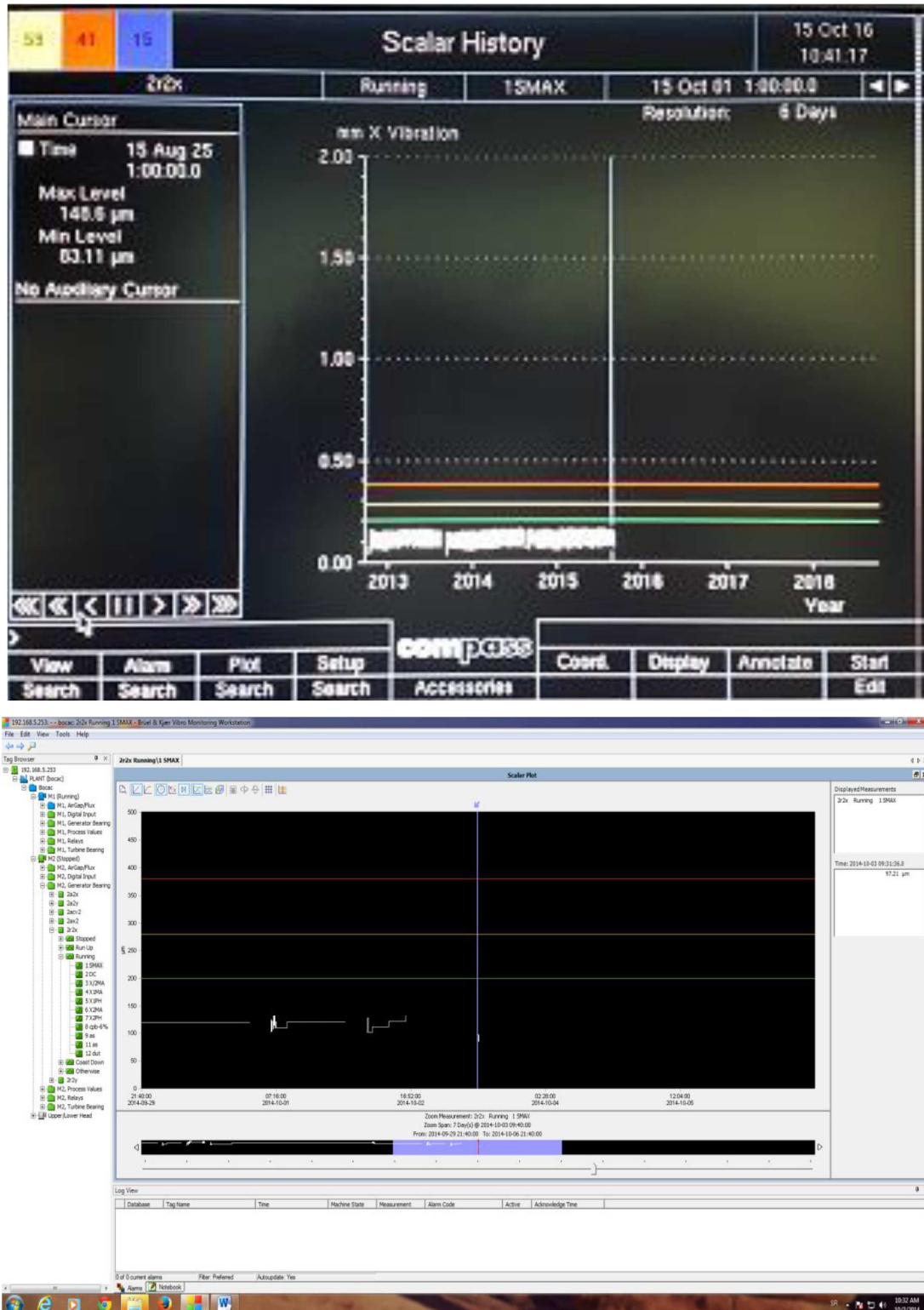
Slika 6.69. Ukupni nivo vibracija u različitim režimima sa turbinskog ležaja u z-pravcu



Slika 6.70. Spektralni prikaz vibracija sa turbinskog ležaja u z-pravcu

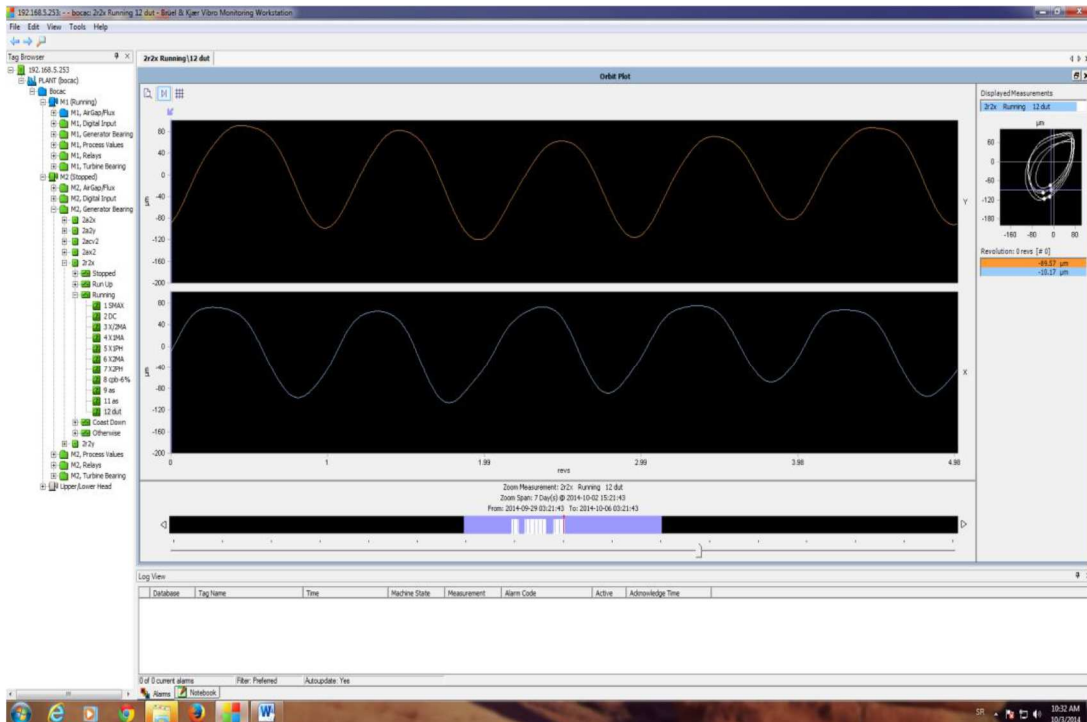
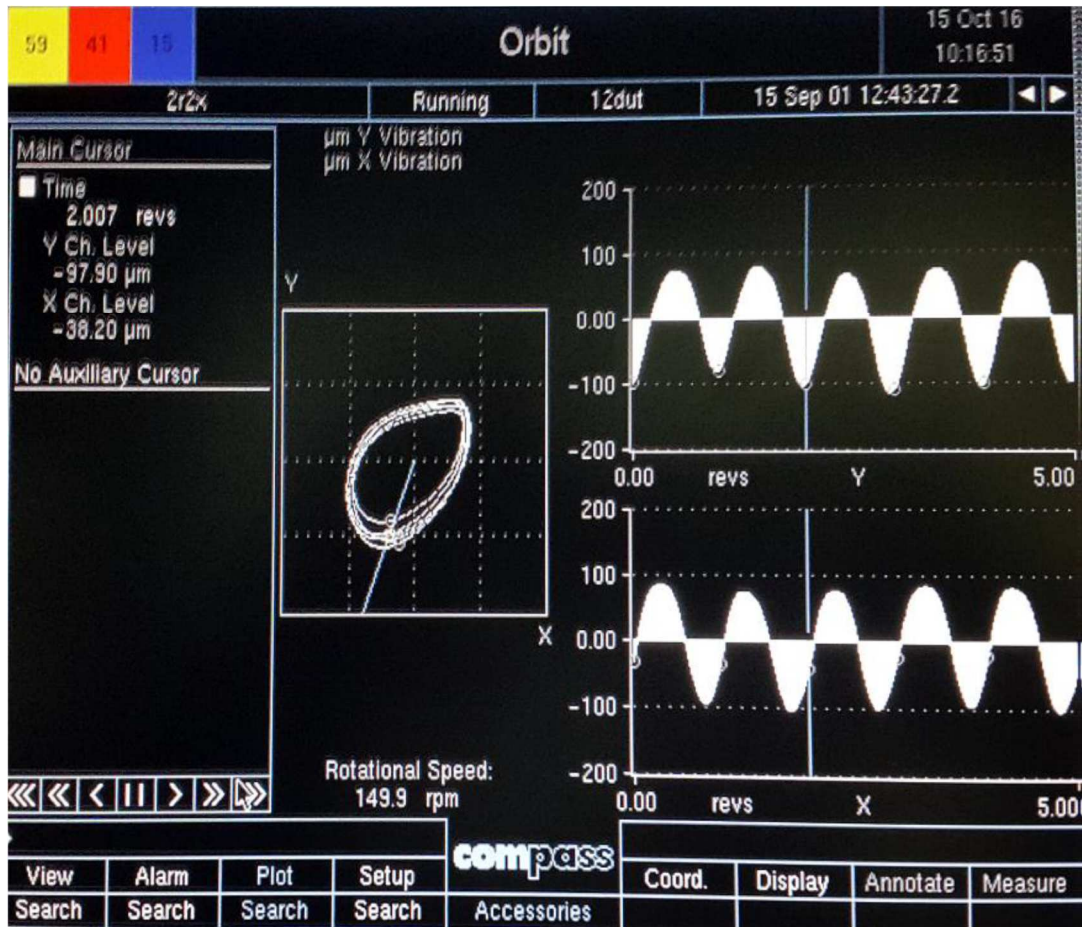
## Relativne vibracije hidroagregata br. 2

## Ležaj L1



Slika 6.71. Trend vrednosti „Smax“ rotornih vibracija sa L1

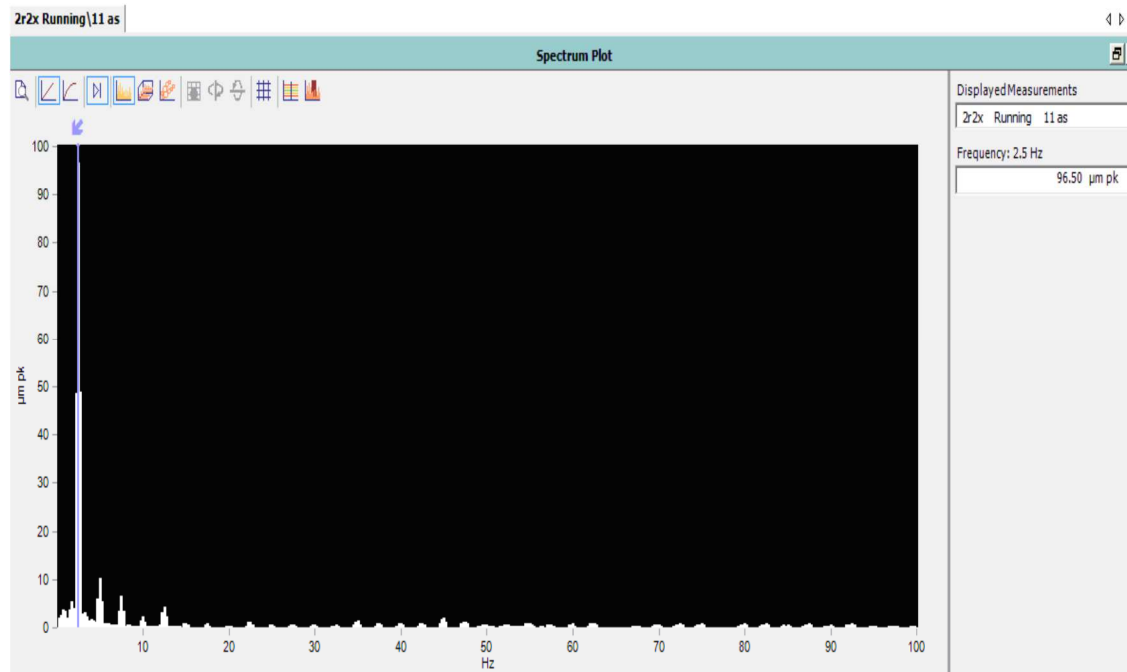
Na slici 6.71. prikazan je trend ukupnog nivoa Smax rotornih vibracija, gde se vidi da je nivo vibracija u skladu sa ISO standardima u klasi A.



Slika 6.72. Prikaz orbite rotornih vibracija sa L1

Slika 6.72. Orbita je ustvari dinamička putanja rukavca i ona ima normalan izgled.

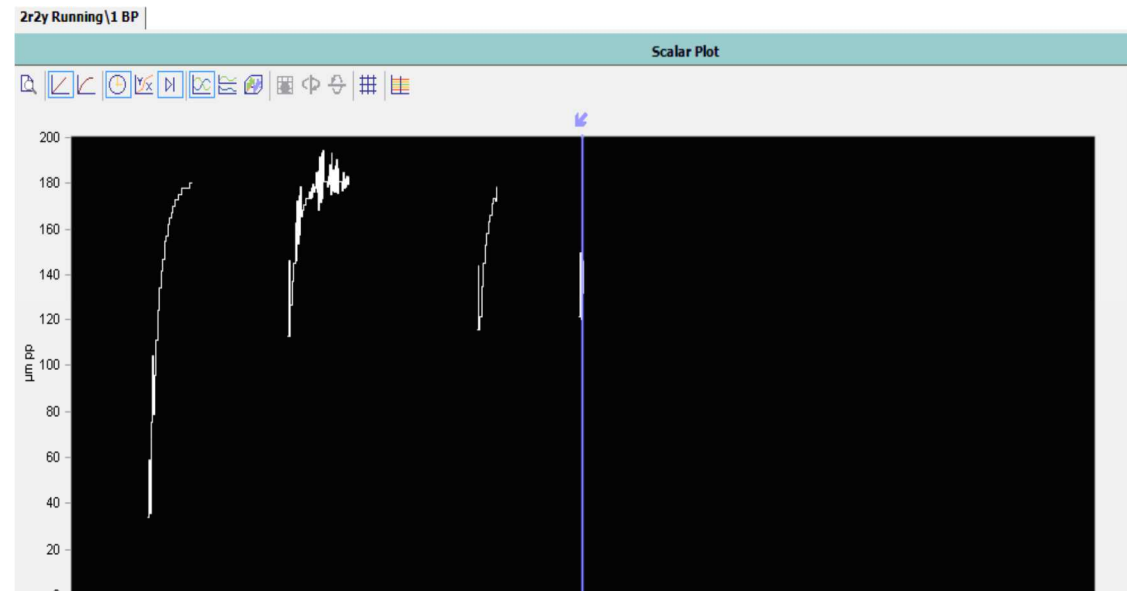
-pravac x



Slika 6.73. Spektralni prikaz rotornih vibracija sa L1 u x-pravcu

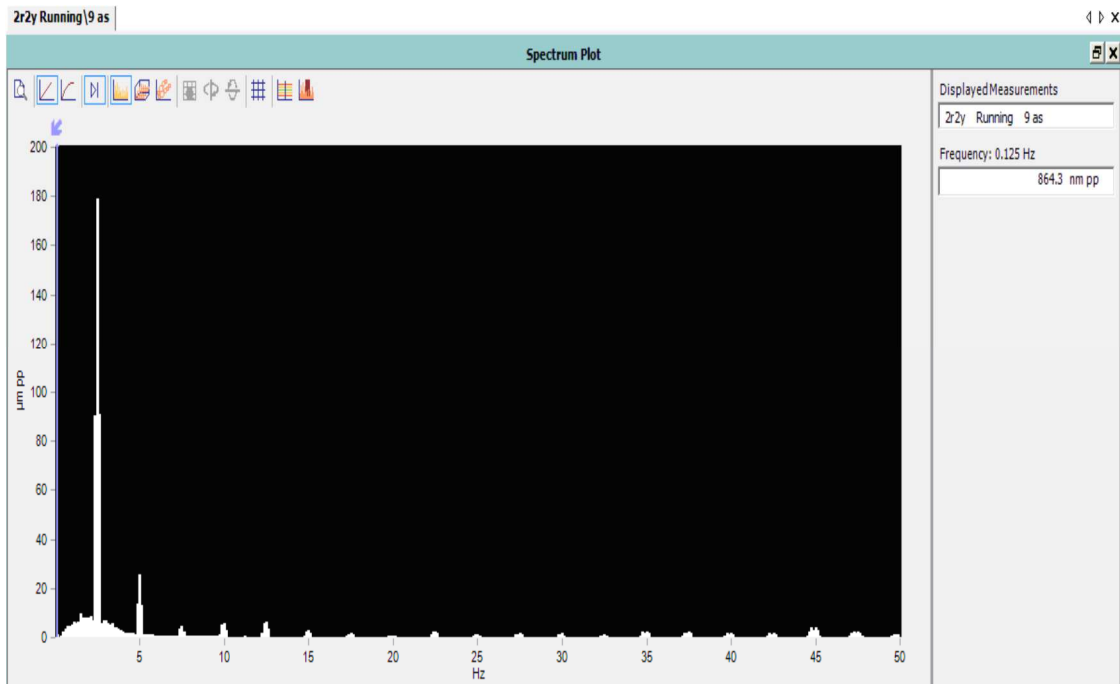
Slika 6.73. Iz spektra se vidi postojanje hidraulične komponente vibracija koje zadovoljavaju standard.

- pravac y



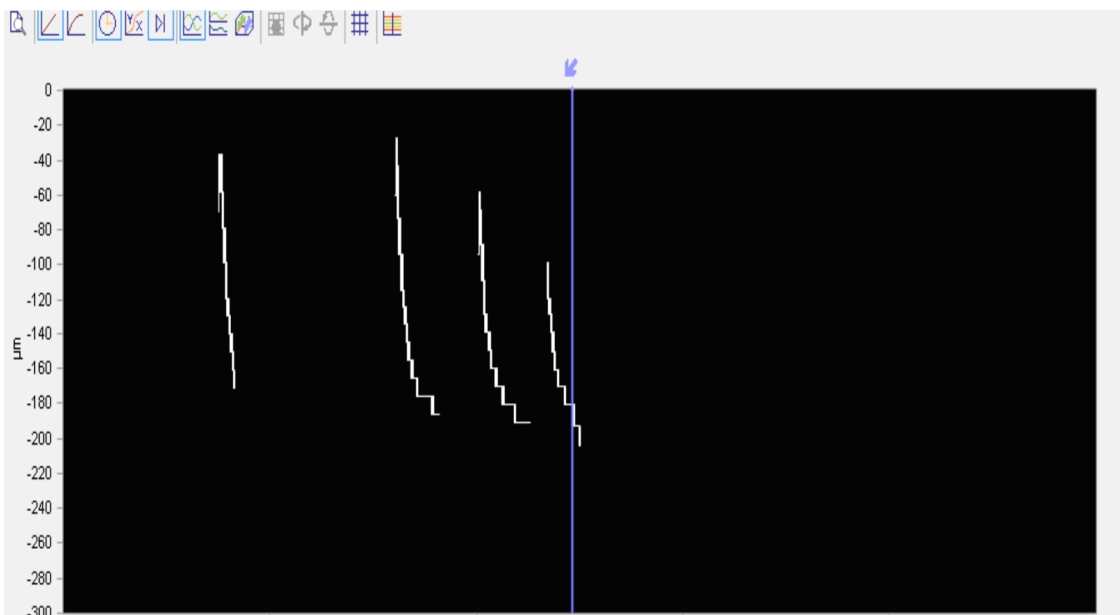
Slika 6.74. Trend ukupnog nivoa rotornih vibracija sa L1 u y-pravcu

Slika 6.74. Nepravilni ali zadovoljavajući nivo rotornih vibracija.



*Slika 6.75. Spektralni prikaz rotornih vibracija sa L1 meren po y-pravcu*

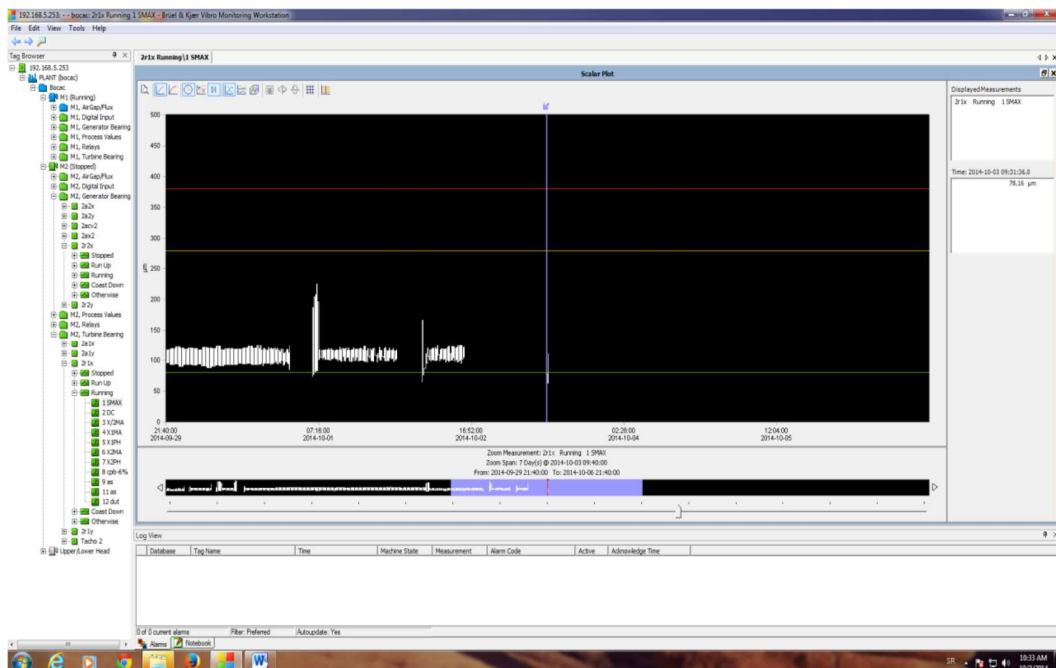
Slika 6.75. Iz spektra se vidi postojanje hidraulične komponente vibracija koje zadovoljavaju standard.



*Slika 6.76. Položaj rukavca rotora u L1, tokom startovanja i stabilnog rada hidroagregata meren u y-pravcu*

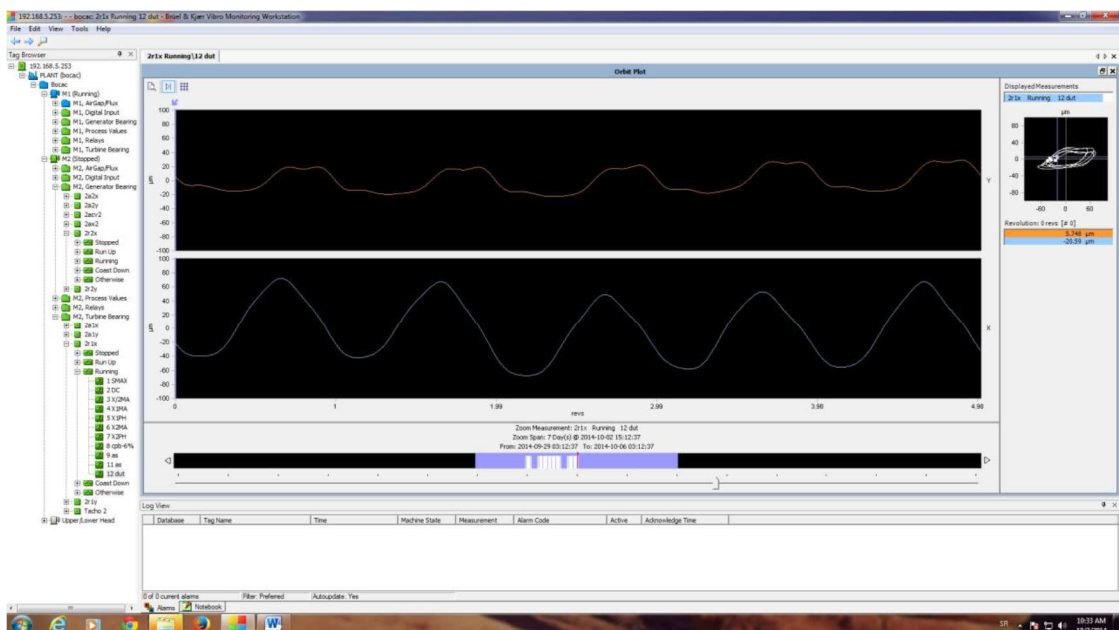
Na slici 6.76. se može pratiti položaj rukavca u ležaju L1 tokom startovanja mašine. Sa njih se očitava prisustvo jednosmernih sila. Sa slika se jasno vidi normalno ponašanje rukavca u ležaju bez prisustva značajnih sila (nema naglih skokova na slikama, rukavac radi normalno u svom fluidnom okruženju).

## Turbinski ležaj, ležaj L3



Slika 6.77. Trend vrednosti „Smax“ rotornih vibracija sa L3

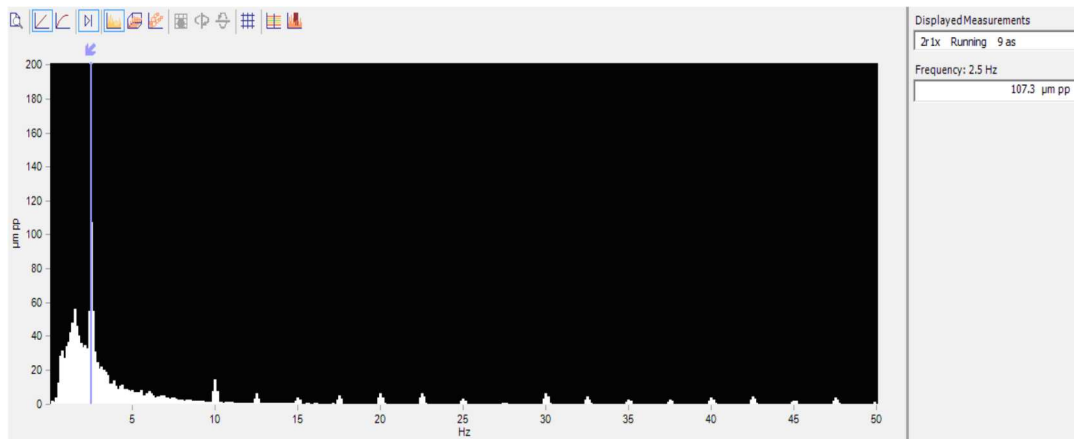
Na slici 6.77. je prikazan trend ukupnog nivoa  $S_{max}$  rotornih vibracija, gde se vidi da je nivo vibracija u skladu sa ISO standardom u klasi A.



Slika 6.78. Prikaz orbite rotornih vibracija sa L3

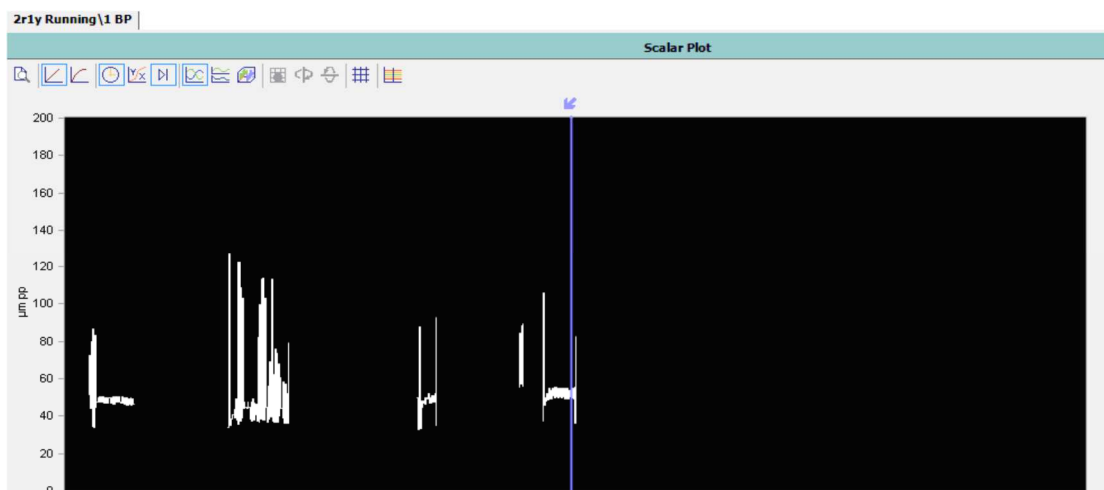
Slika 6.78. Orbita je ustvari dinamička putanja rukavca i ona ima normalan izgled.



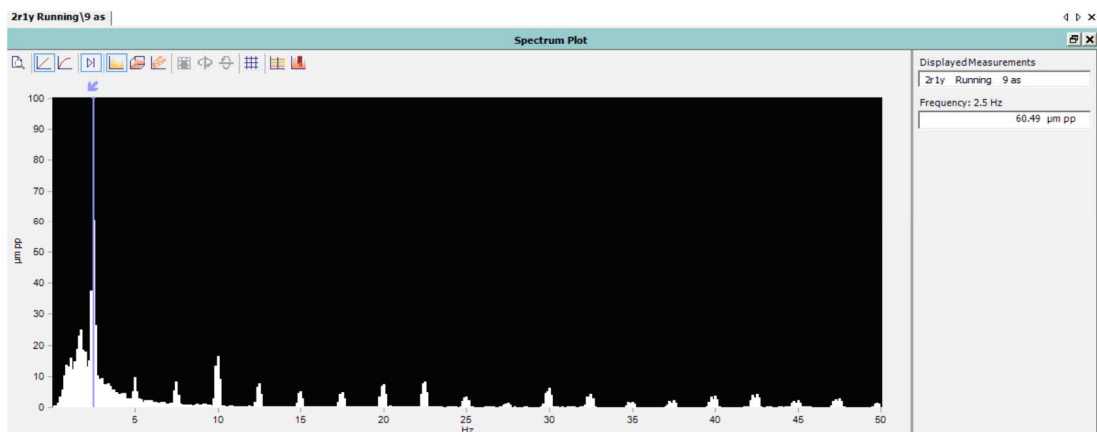


Slika 6.79. Spektralni prikaz rotornih vibracija sa L3 mereno u x-pravcu

Slika 6.79. Iz spektra vibracija se vidi da je osnovni izvor pobude neuravnoteženost sistema (izražen 1X harmonik).

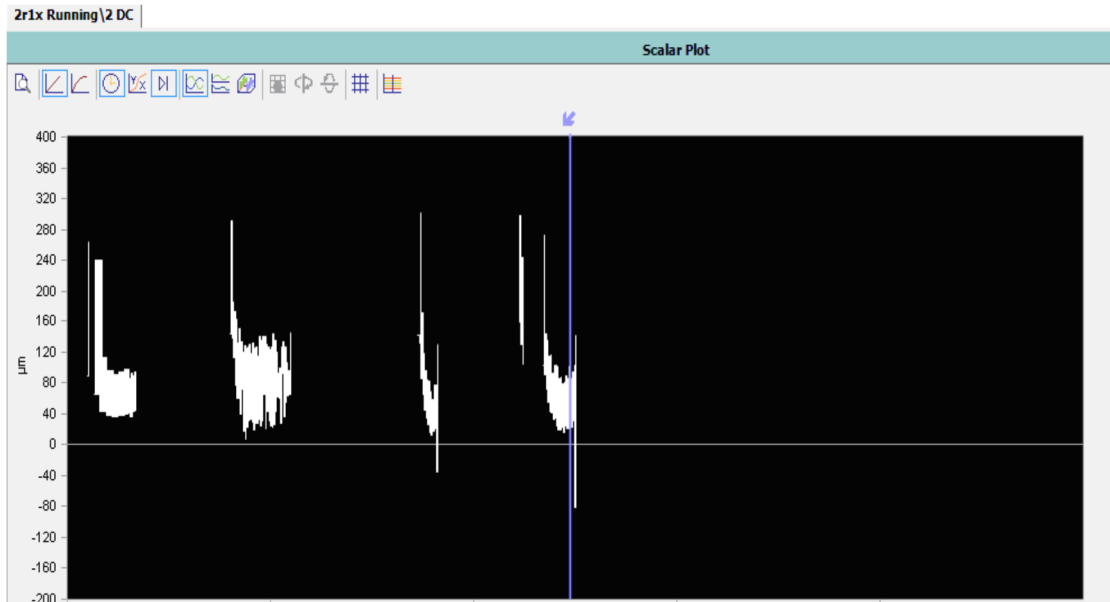


Slika 6.80. Trend ukupnog nivoa rotornih vibracija sa L3 mereno u y-pravcu



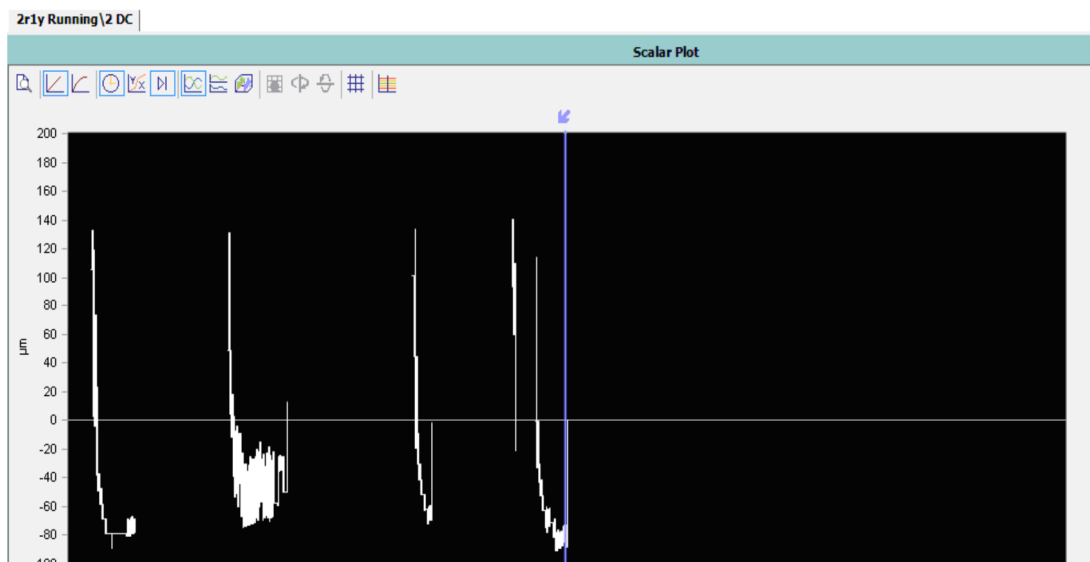
Slika 6.81. Spektralni prikaz rotornih vibracija sa L3 mereno u y-pravcu

Slika 6.81. Sa spektra se vidi postojanje hidraulične komponente vibracija.



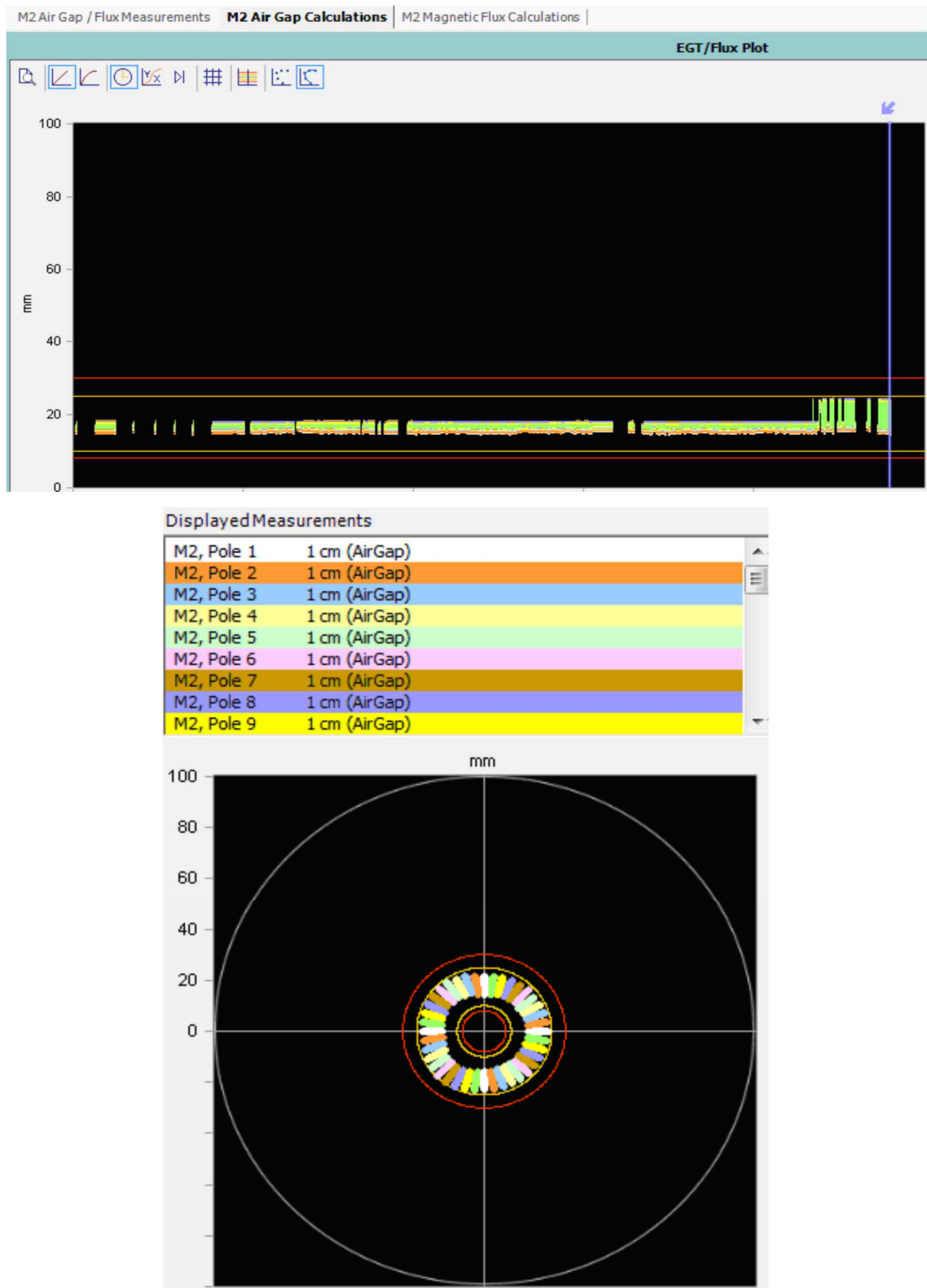
Slika 6.82. Položaj rukavca rotora u ležaju L3 mereno u x-pravcu

Na slici 6.82. se vidi položaj rukavca L3 u ležaju tokom startovanja mašine. Sa njih se očitava prisustvo jednosmernih sila.



Slika 6.83. Trend položaja rukavca u L3, u toku startovanja i stacionarnog rada hidroagregata, mereno u y-pravcu

Na slici 6.83. se jasno vidi normalno ponašanje rukavca u ležaju bez prisustva značajnih sila (nema naglih skokova, rukavac radi normalno u svom fluidnom okruženju).



Slika 6.84. Trend vazdušnog zazora preračunat merenjem magnetnog fluksa po polovima na generator hidroagregata br 2

Slika 6.84. prikazuje raspored magnetnog fluksa po analizi vazdušnog zazora, vidi se da je on ravnomerno raspoređen i ima malu asimetriju magnetnog polja.

Merenje odstupanja ose vratila u HE „Jajce I“

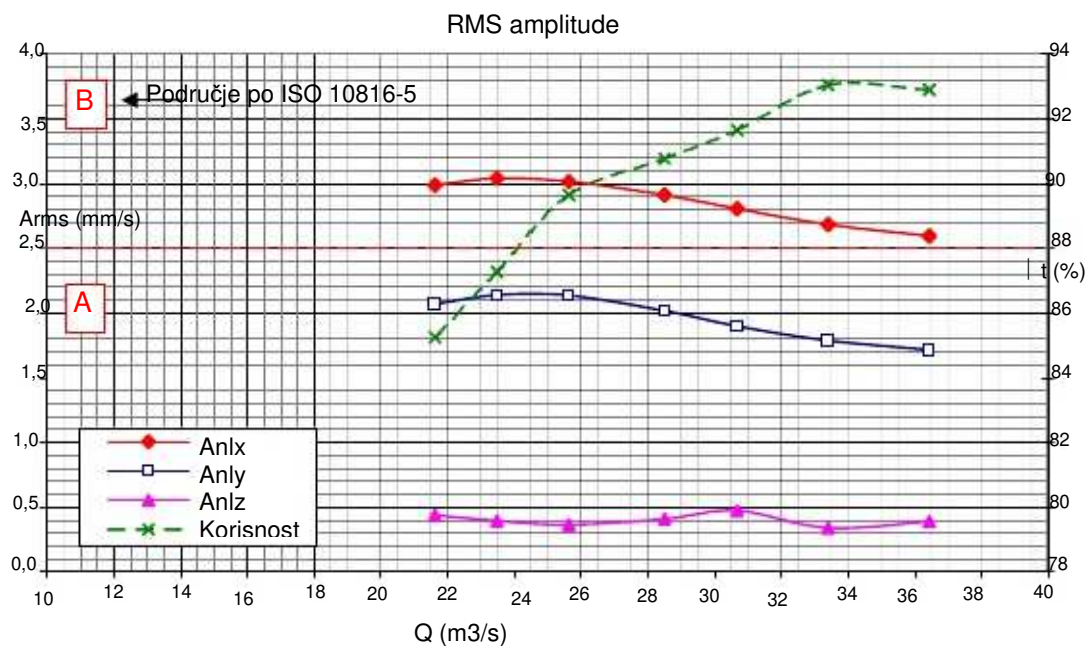
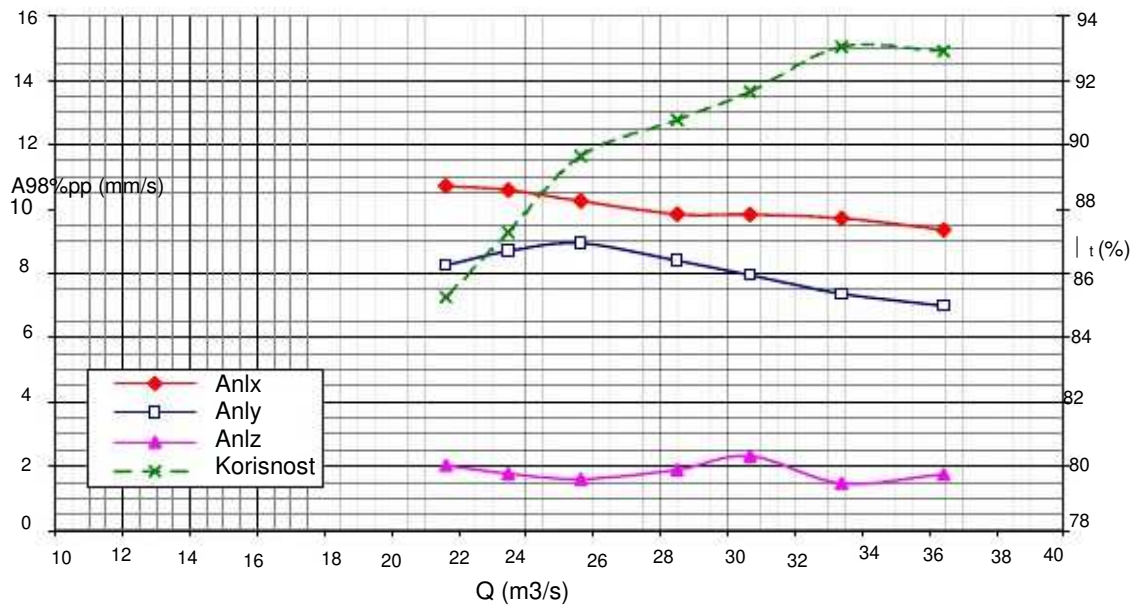
Radialne relativne vibracije vratila (odstupanja ose) su izmerene kod glavnog nosećeg ležaja.

Agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

Datum merenja: 21.05.2015.

98% peak-to-peak amplitude

Tačke: 2-8

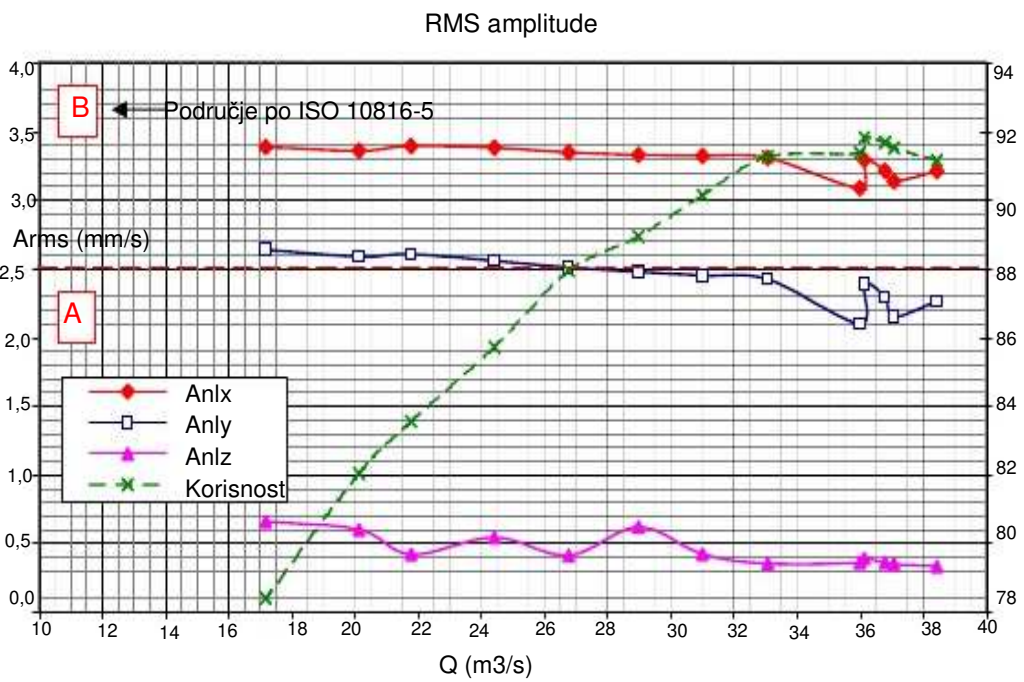
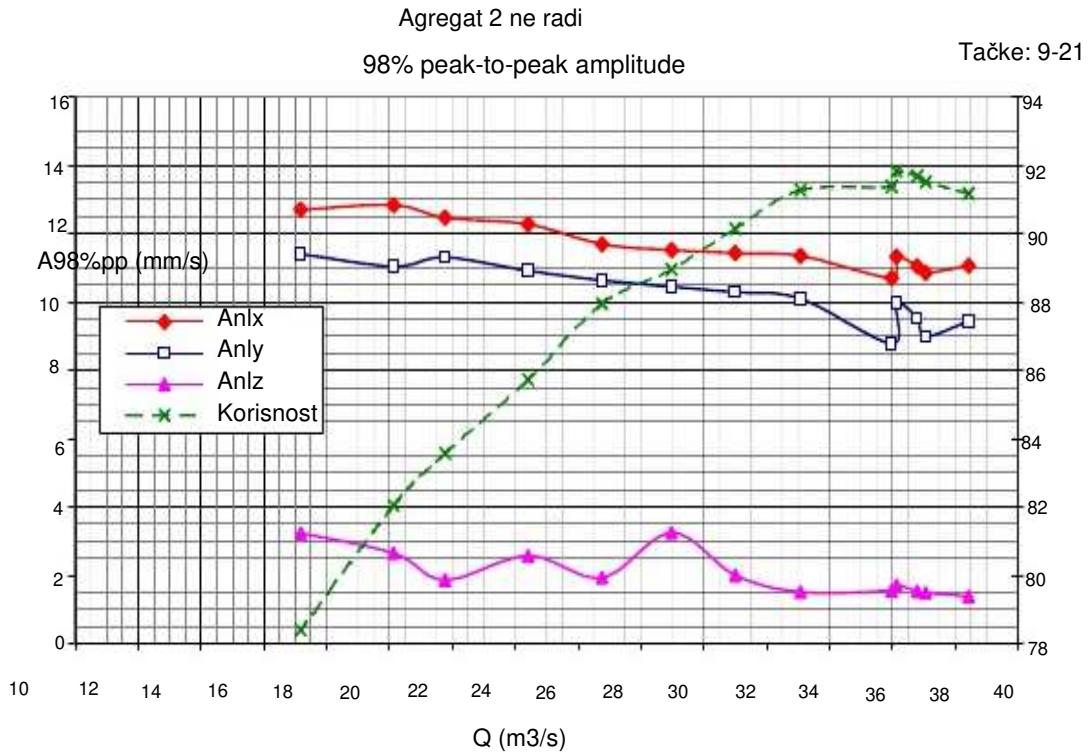


Anlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode

Anly ... vibracije u smeru y - horizontalno - pravougaono na tok vode

Anlz ... vibracije u smeru z - vertikalna

Slika 6.85. - Vibracije generatorskog nosećeg ležaja  
Agregat 1 - HE JAJCE I



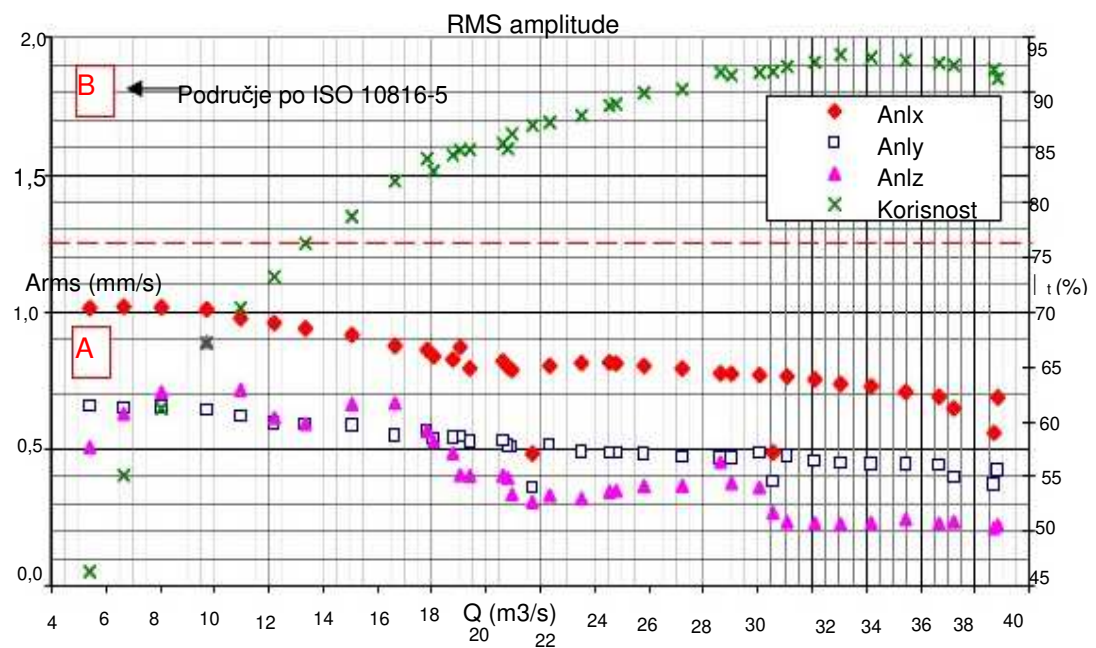
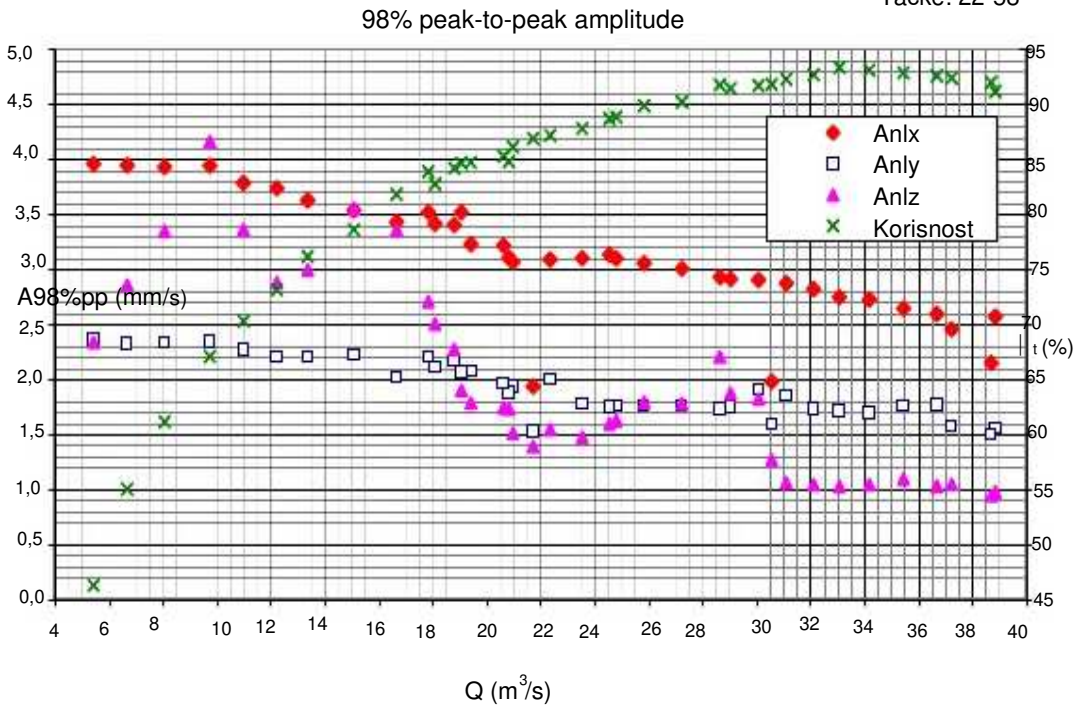
Anlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode  
 Anly ... vibracije u smeru y - horizontalno -pravougaono na tok vode  
 Anlz ... vibracije u smeru z - vertikalna

Slika 6.86. Vibracije generatorskog nosećeg ležaja  
 Agregat 1 - HE JAJCE I

Datum merenja: 22.05.2015.

Agregat ne radi 1

Tačke: 22-58

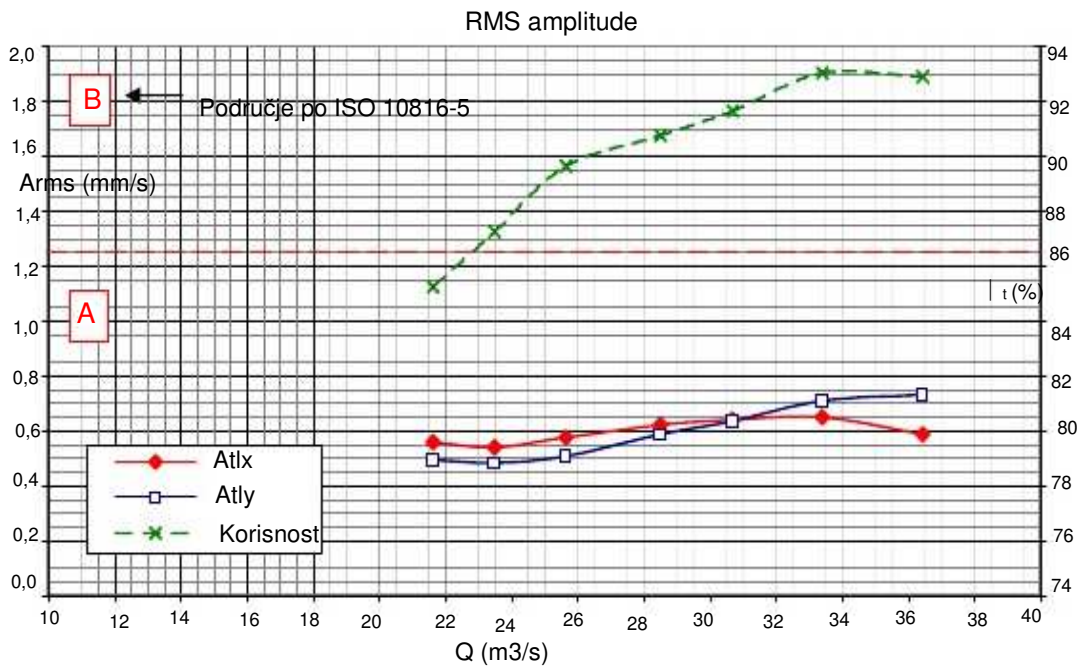
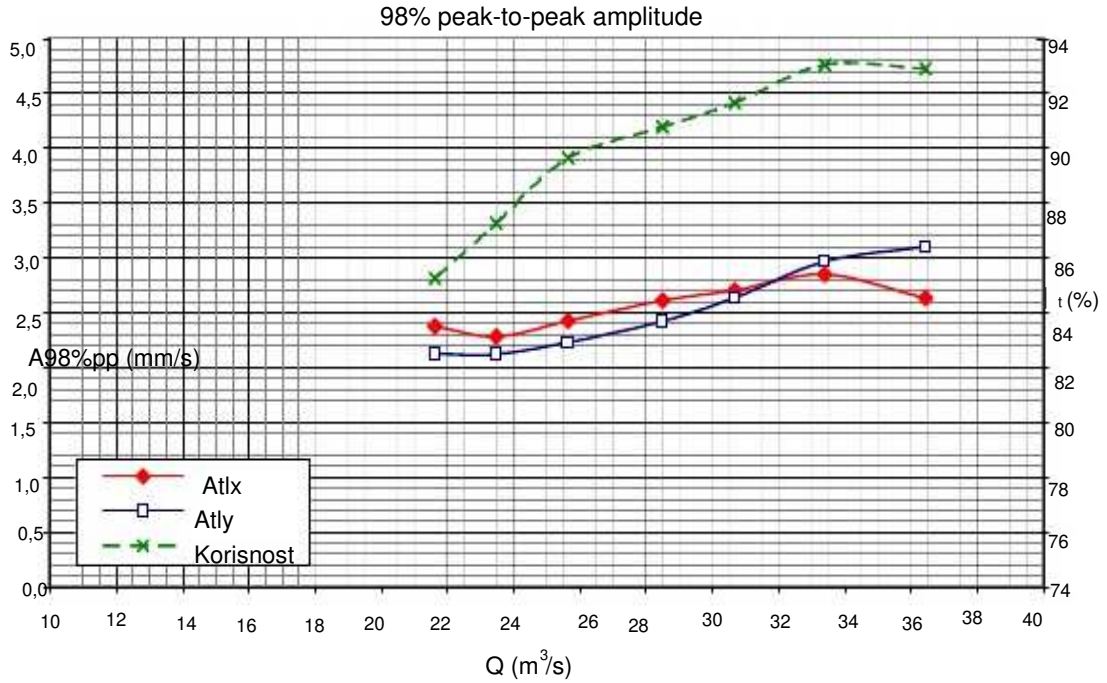


Anlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode  
 Anly ... vibracije u smeru y - horizontalno - pravougaonona tok vode  
 Anlz ... vibracije u smeru z - vertikalna

*Slika 6.87. Vibracije generatorskog nosećeg ležaja  
 Agregat 2 - HE JAJCE I*

Datum merenja: 21.05.2015. Agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

Tačke: 2-8



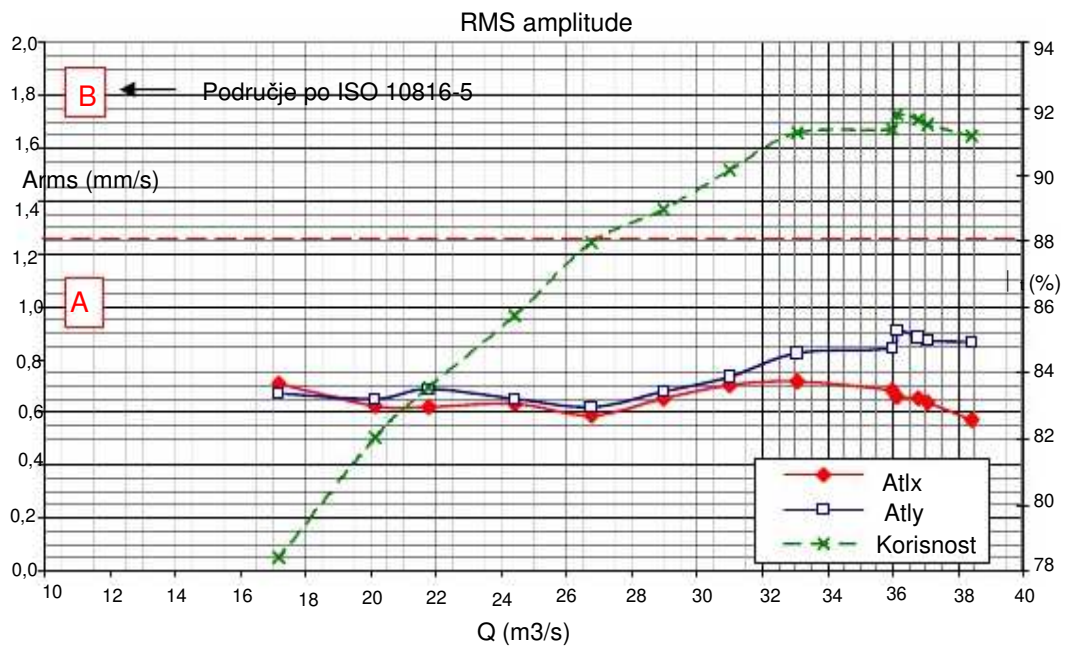
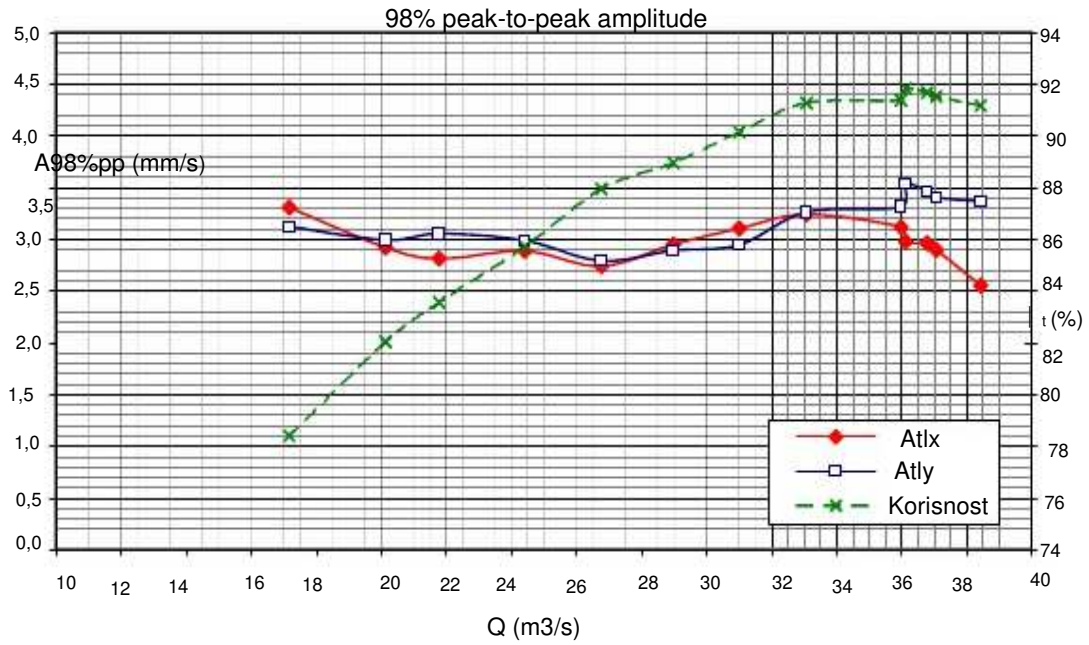
Atlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode  
Atly ... vibracije u smeru y - horizontalno - pravougaono na tok vode

*Slika 6.88. Vibracije turbinskog vodećeg ležaja  
Aragat 1 - HE JAJCE I*

Datum merenja: 21.05.2015.

Agregat 2 ne radi

Tačke: 9-21



Atlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode  
 Atly ... vibracije u smeru y - horizontalno - pravougaono na tok vode

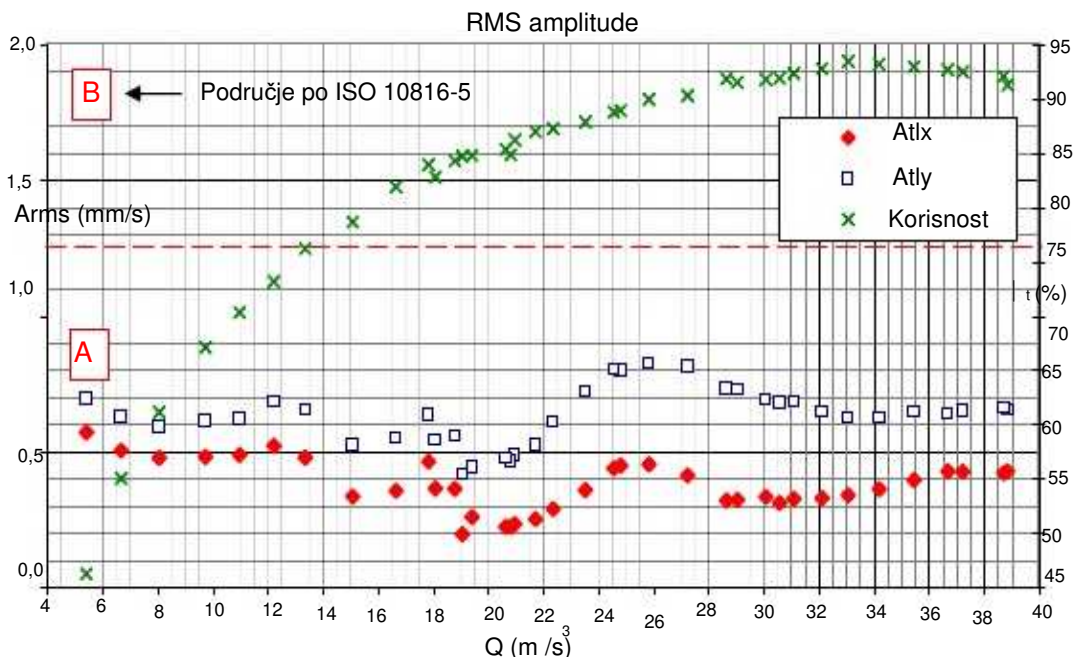
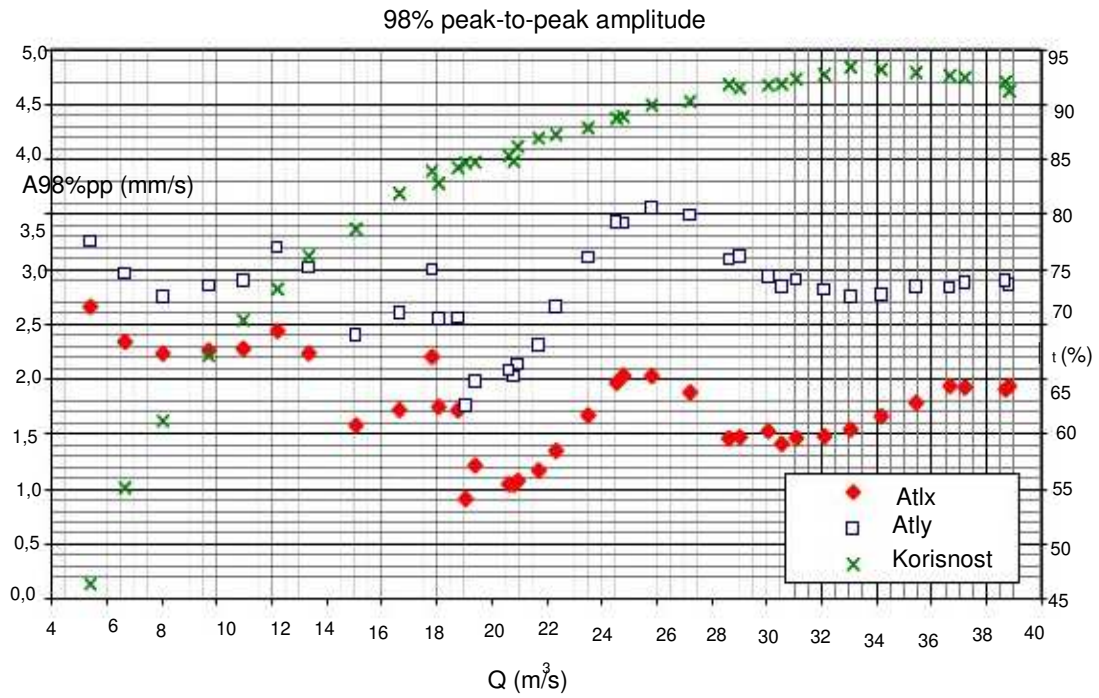
Slika 6.89. Vibracije turbinskog vodećeg ležaja  
 Agregat 1 - HE JAJCE I



Datum merenja: 22.05.2015.

Agregat ne radi 1

Tačke: 22-58



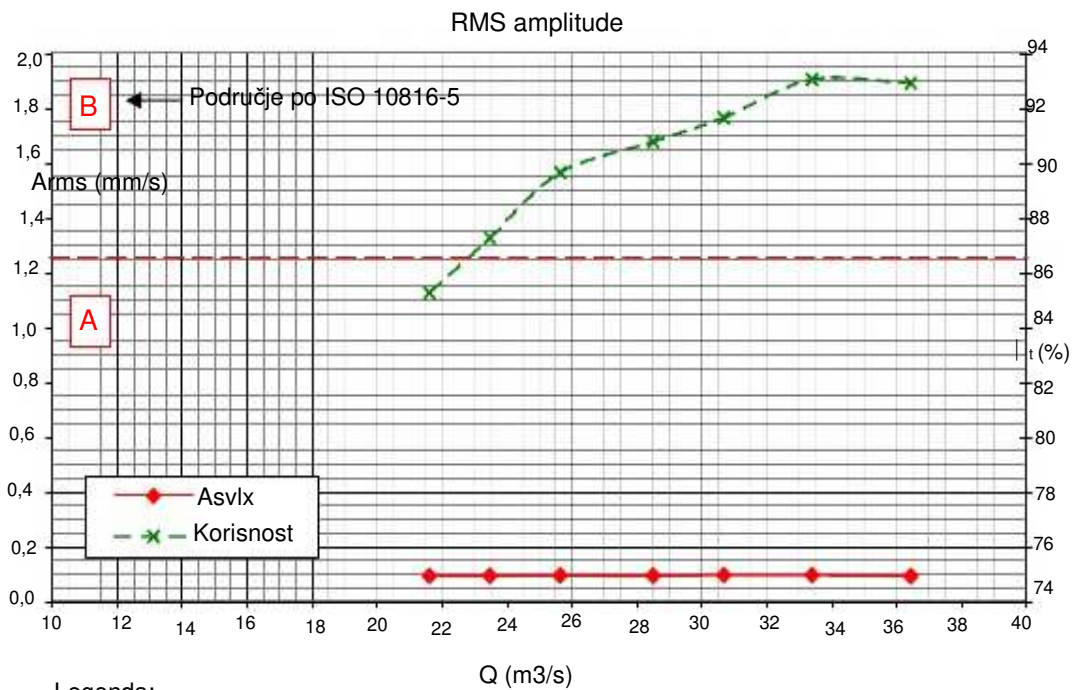
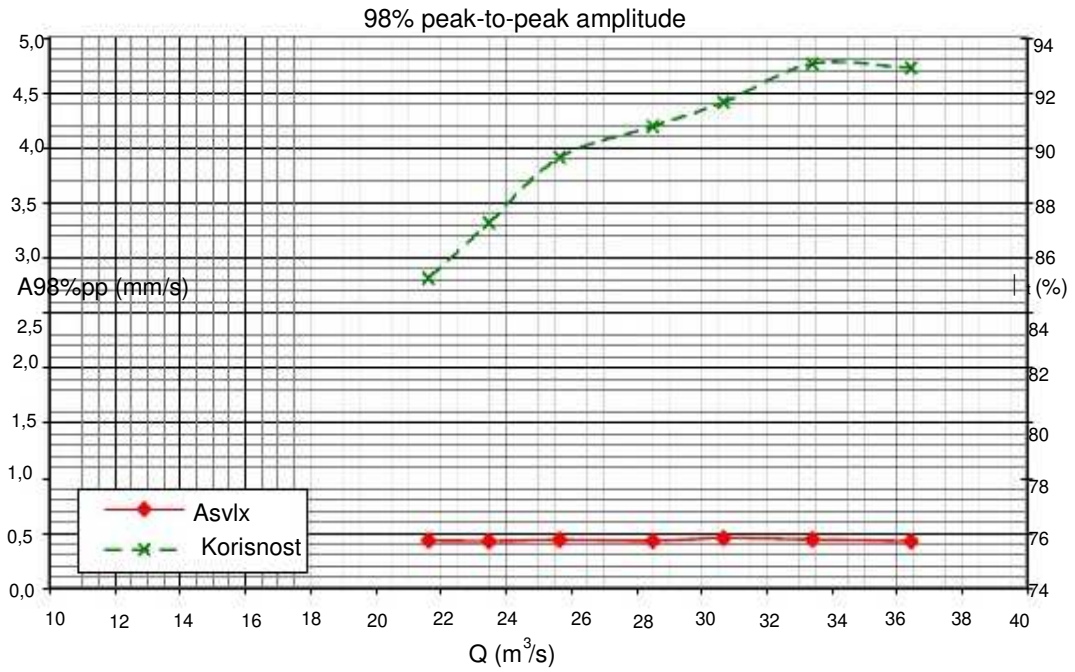
Atlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode  
 Atly ... vibracije u smeru y - horizontalno - pravougaono na tok

*Slika 6.90. Vibracije turbinskog vodećeg ležaja  
 Agregat 2 - HE JAJCE I*

Datum merenja: 21.05.2015.

Agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

Tačke: 2-8



Legenda:

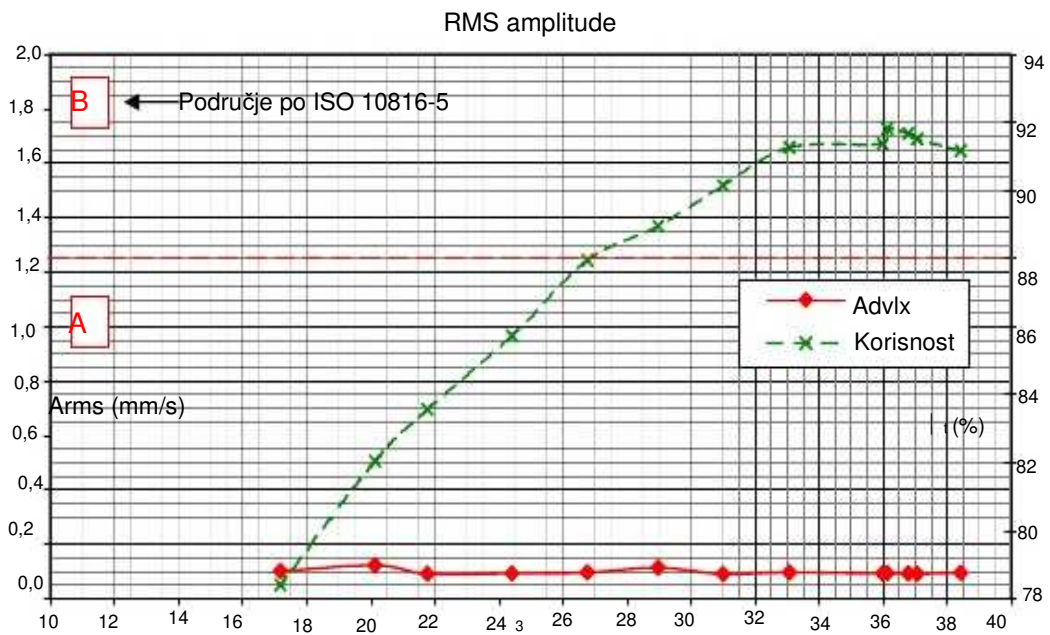
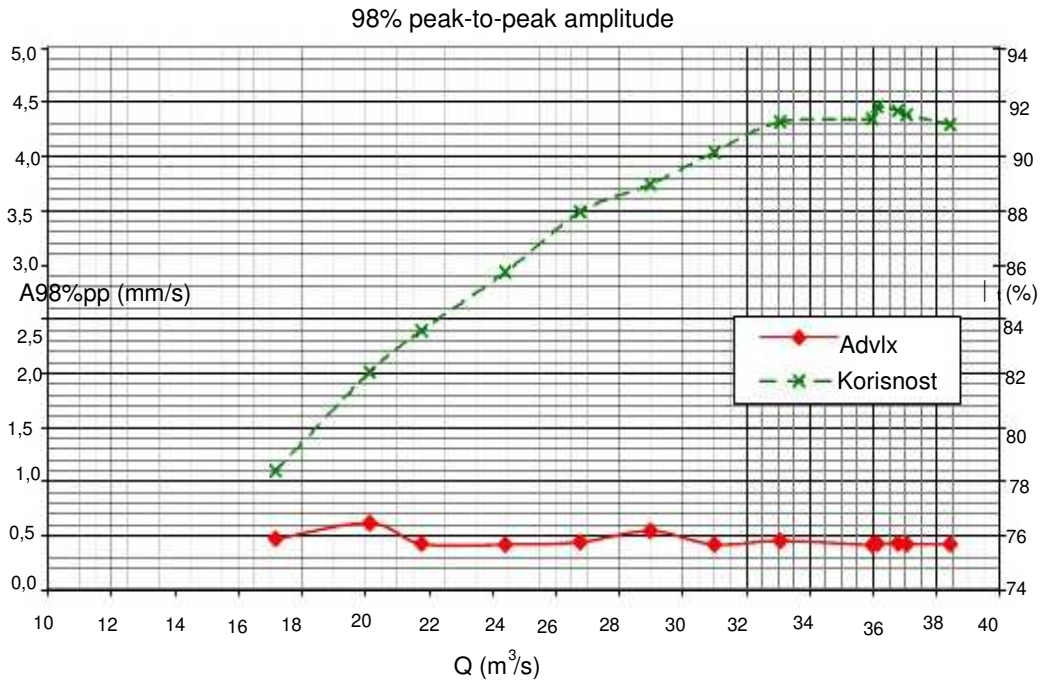
Asvlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode

*Slika 6.91. Vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja  
Agregat 1 - HE JAJCE I*

Datum merenja: 21.05.2015.

Agregat 2 ne radi

Tačke: 9-21



Legenda:

Q (m / s)

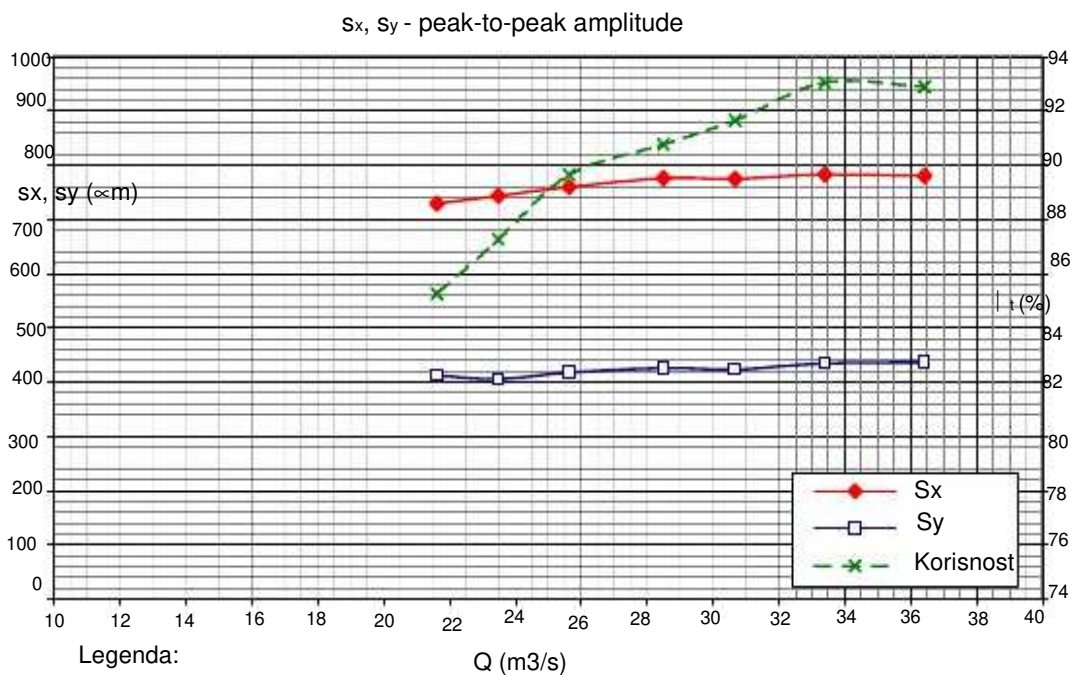
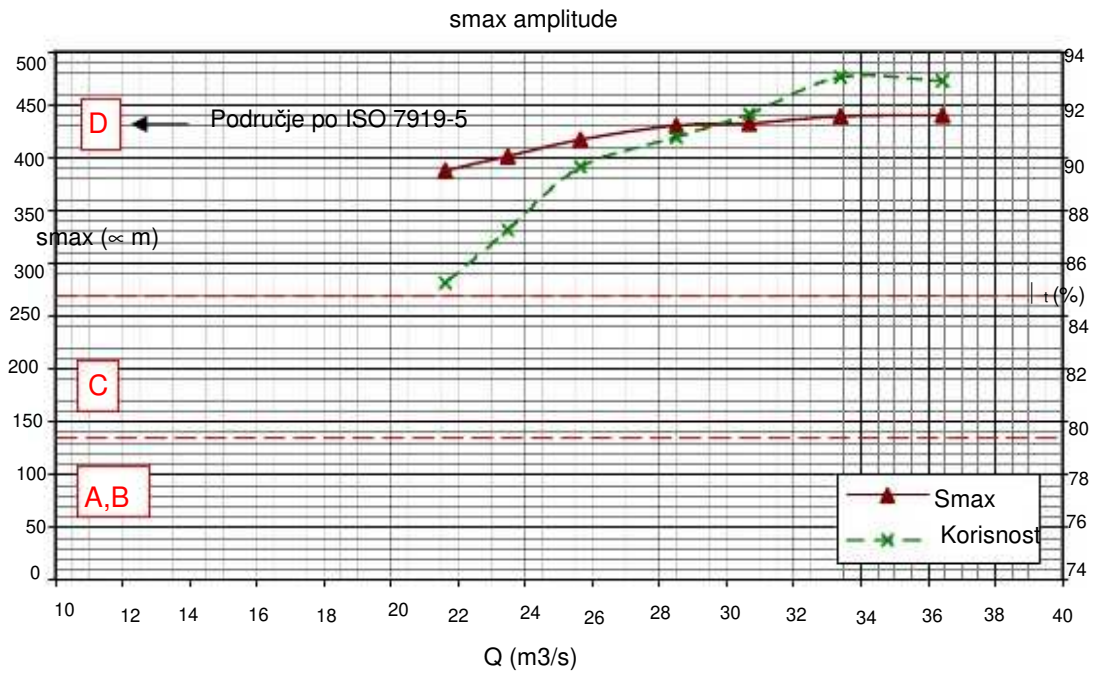
Atlx ... vibracije u smeru x - horizontalno - smer toka vode

*Slika 6.92. Vibracije generatorskog donjeg vodećeg ležaja  
Aragat 1 - HE JAJCE I*

Datum merenja: 21.05.2015.

Agregat 2 radi sa maksimalnom snagom

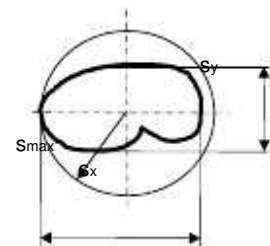
Tačke: 2-8



Legenda:

smax ... maksimalni radij odstupanje ose vratila  
 sx ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vratila u x smeru  
 sy ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vratila u y smeru

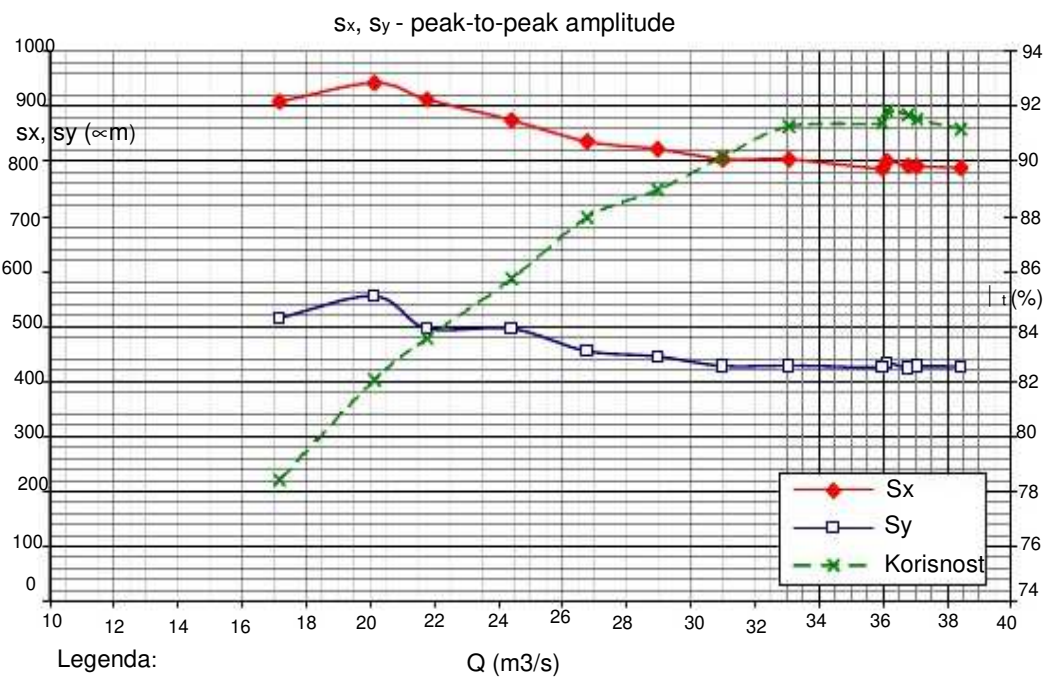
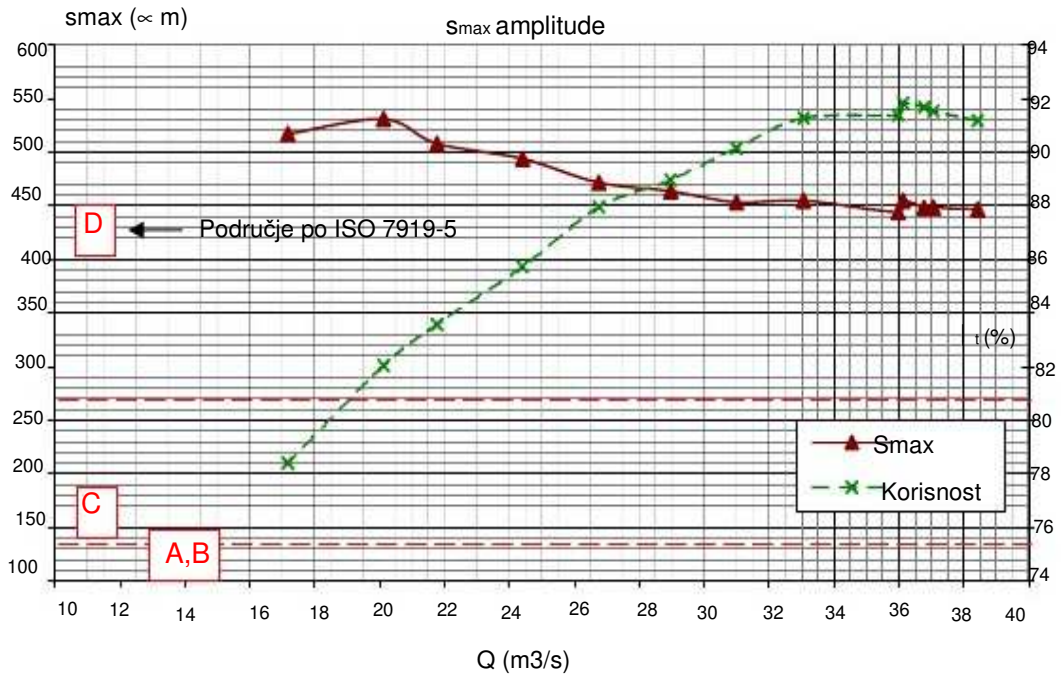
Slika 6.93. Odstupanje ose turbinskog vratila  
 Agregat 1 - HE JAJCE I



Datum merenja: 21.05.2015.

Agregat 2 ne radi

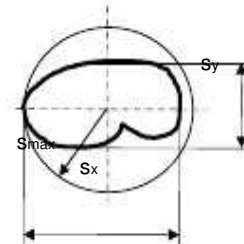
Tačke: 9-21



Legenda:

s<sub>x</sub> ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vrtila u x smeru  
 s<sub>y</sub> ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vrtila u y smeru

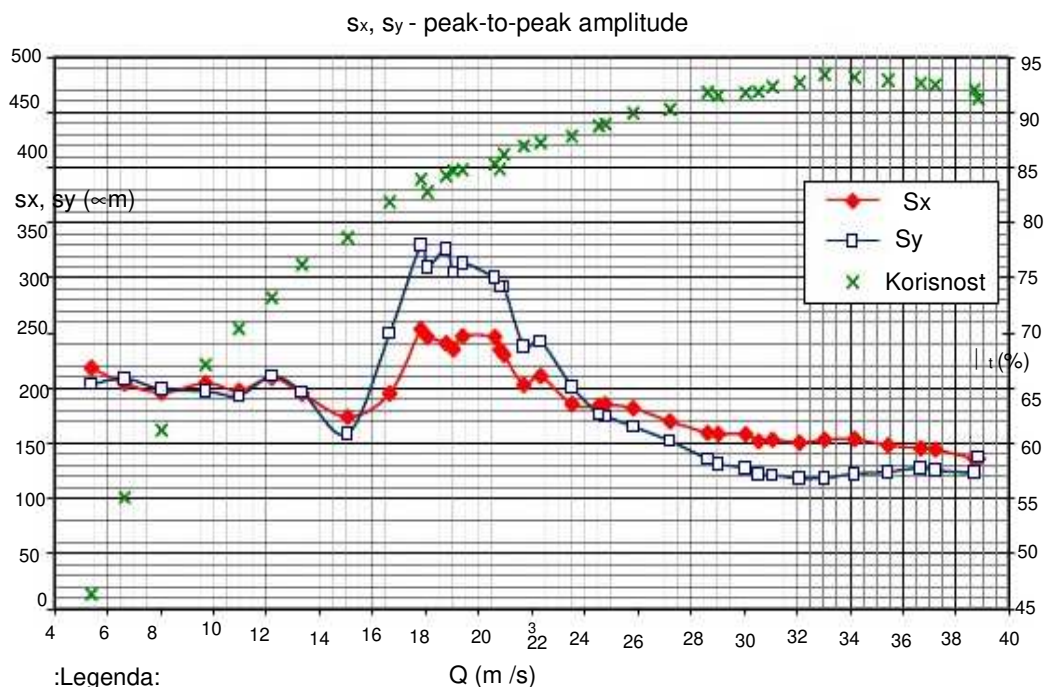
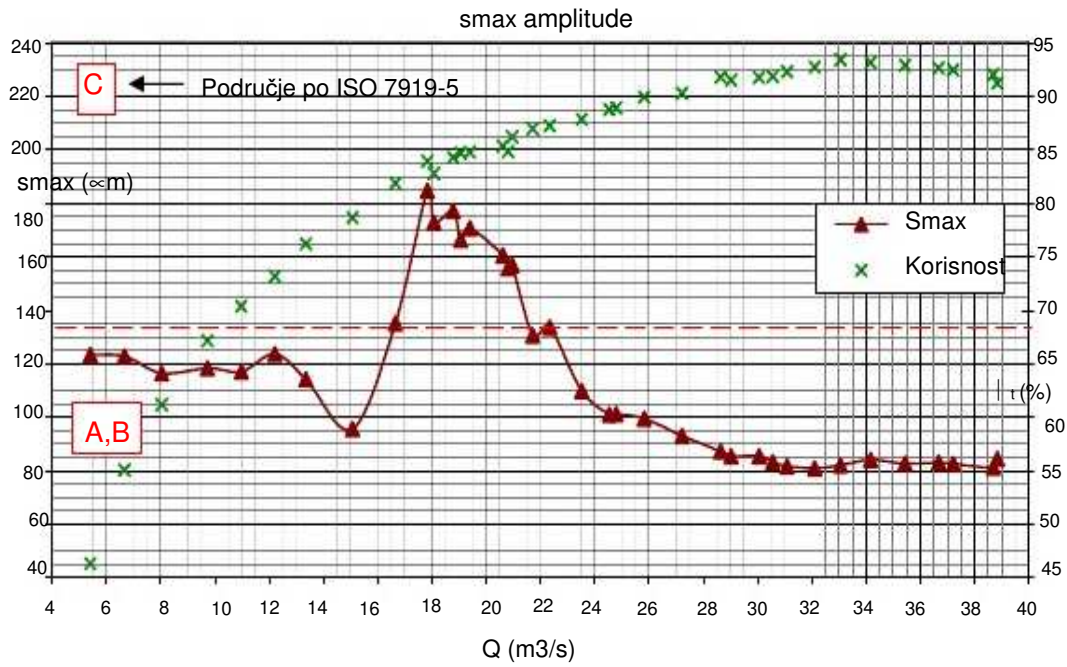
Slika 6.94. Odstupanje ose turbinskog vratila Agregat 1 - HE JAJCE I



Datum merenja: 22.05.2015.

Agregat 1 ne radi

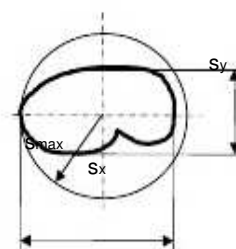
Tačke: 22-58

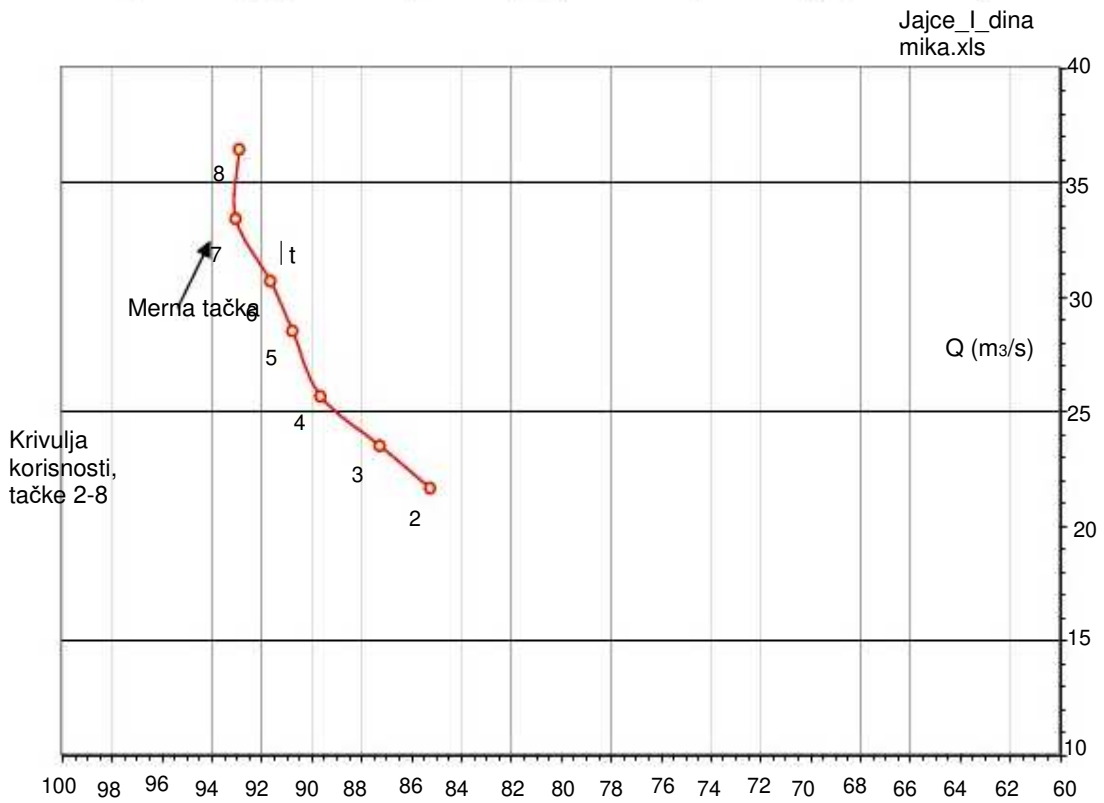
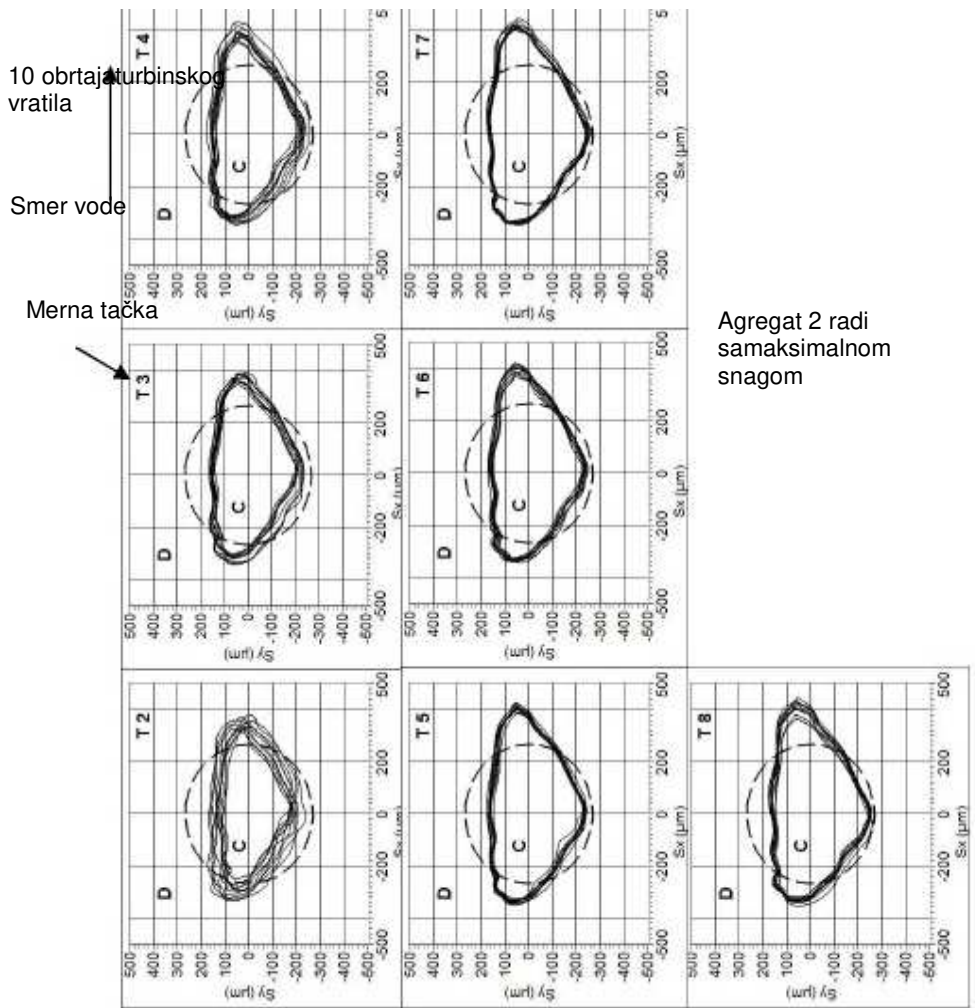


:Legenda:

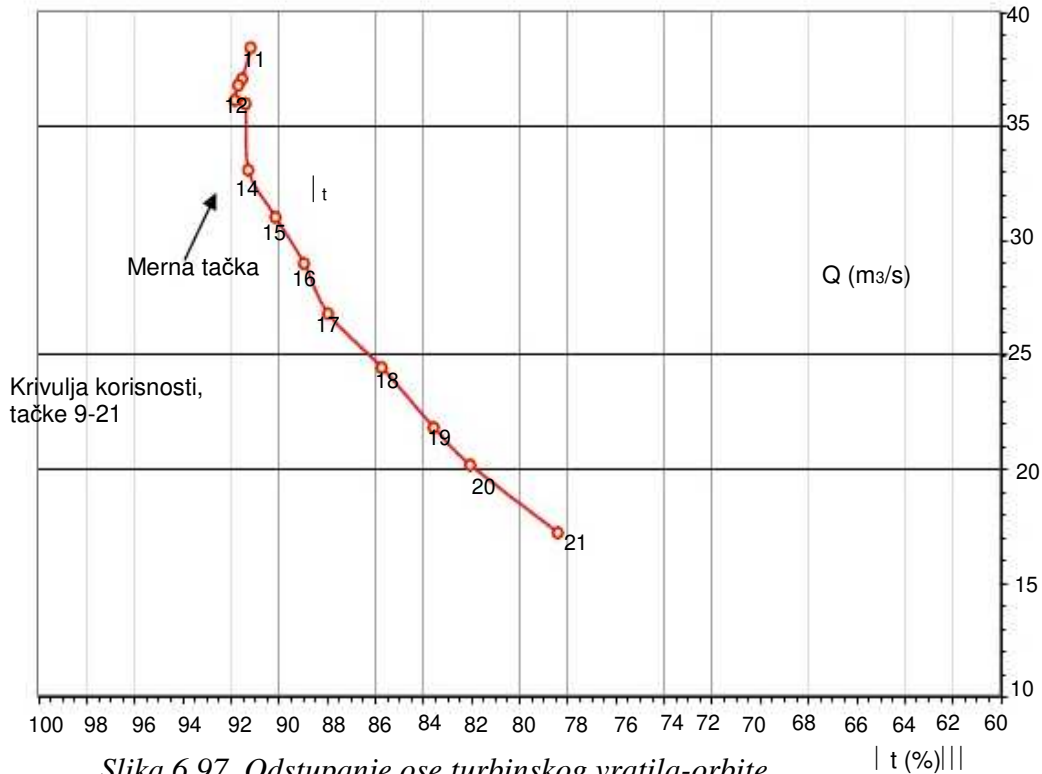
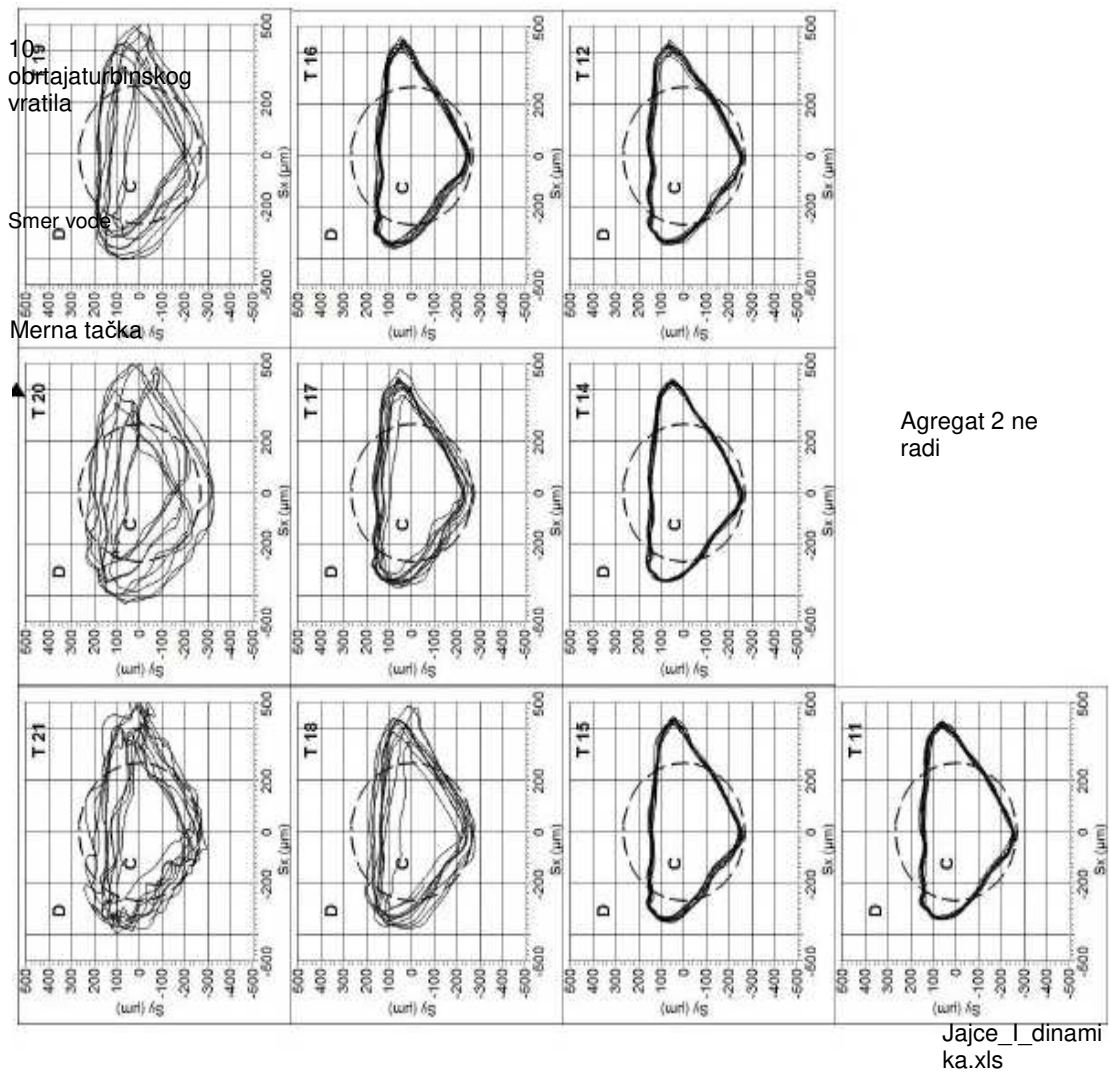
sx ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vratila u x smeru  
 sy ..... maksimalni peak-to-peak odstupanje ose vratila u y smeru

*Slika 6.95. Odstupanje ose turbinskog vratila Agregat 2 - HE JAJCE I*





Slika 6.96. Odstupanje ose turbinskog vratila-orbite | t (%)|||  
Agregat 1 - HE JAJCE I



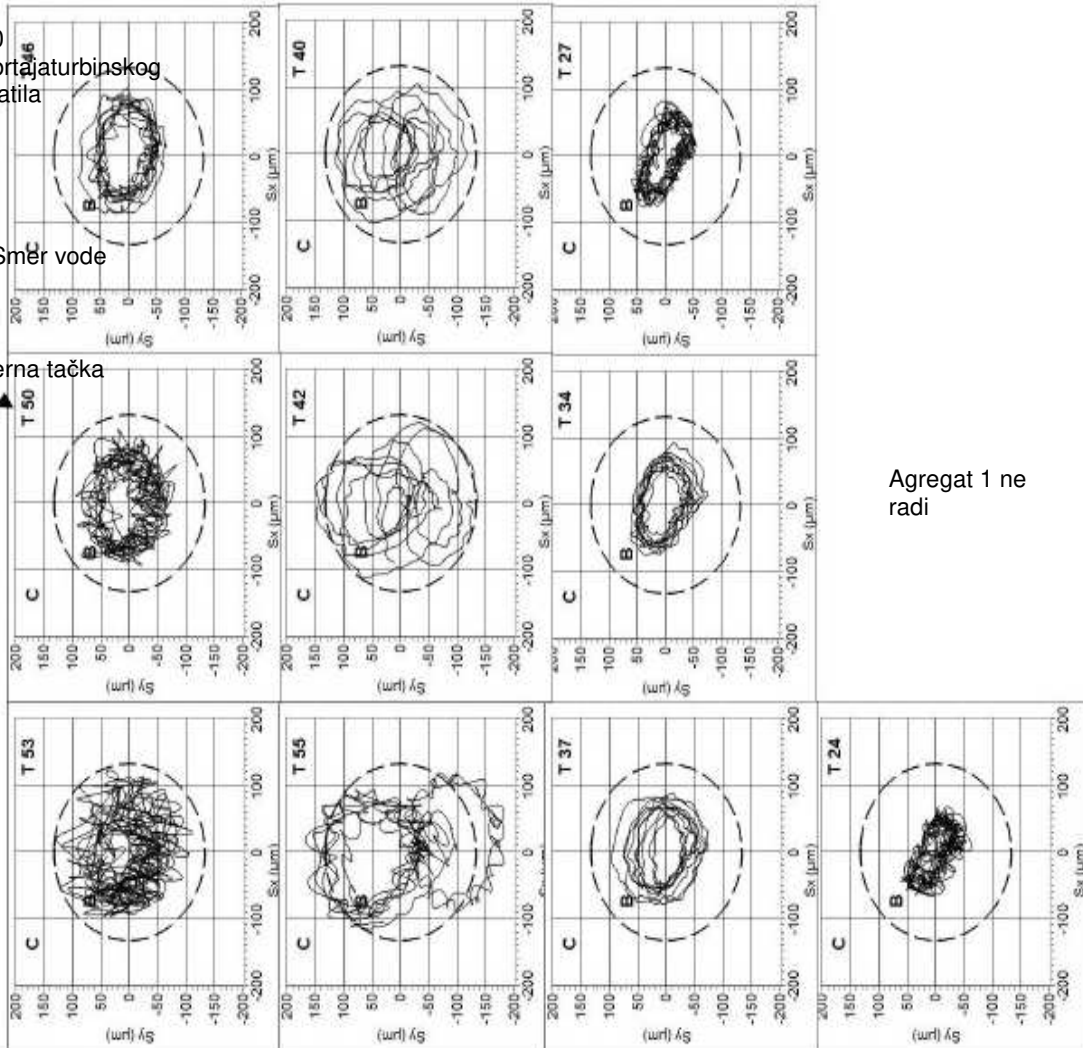
Slika 6.97. Odstupanje ose turbinskog vratila-orbite  
Agregat 1 - HE JAJCE I



10  
obrtaj  
turbinskog  
vratila

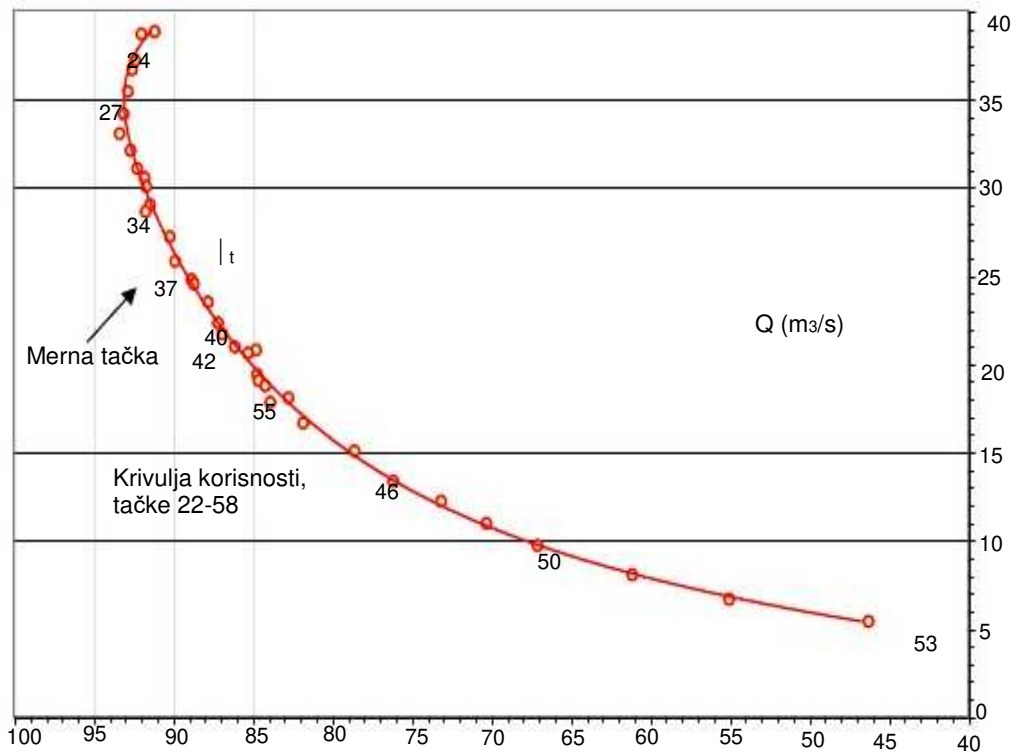
Směr vode

Merna tačka

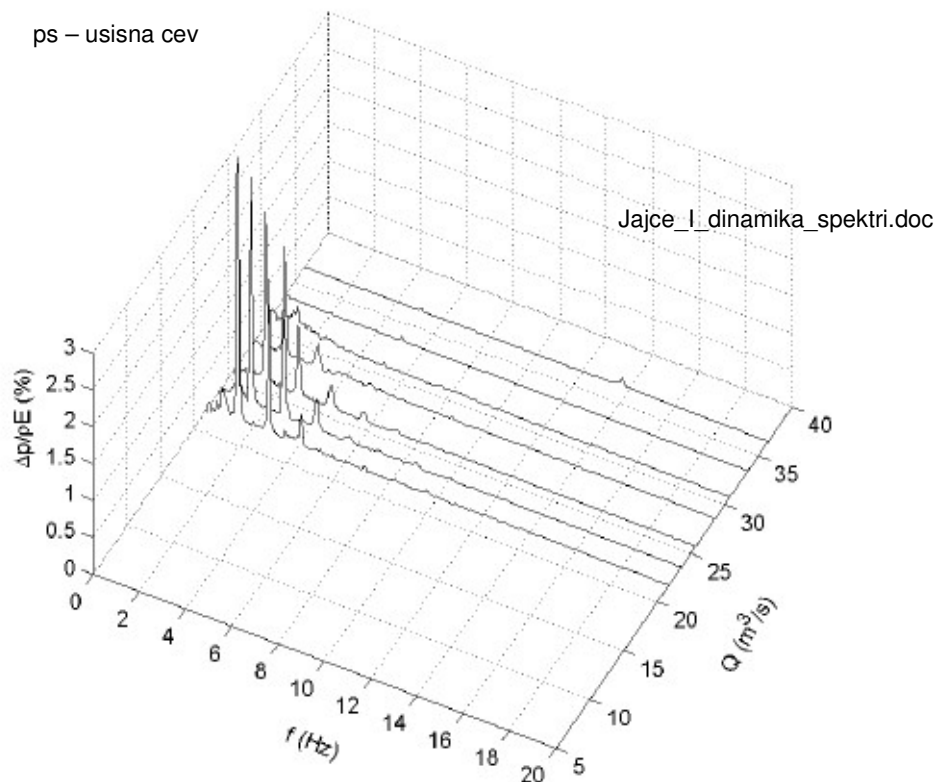
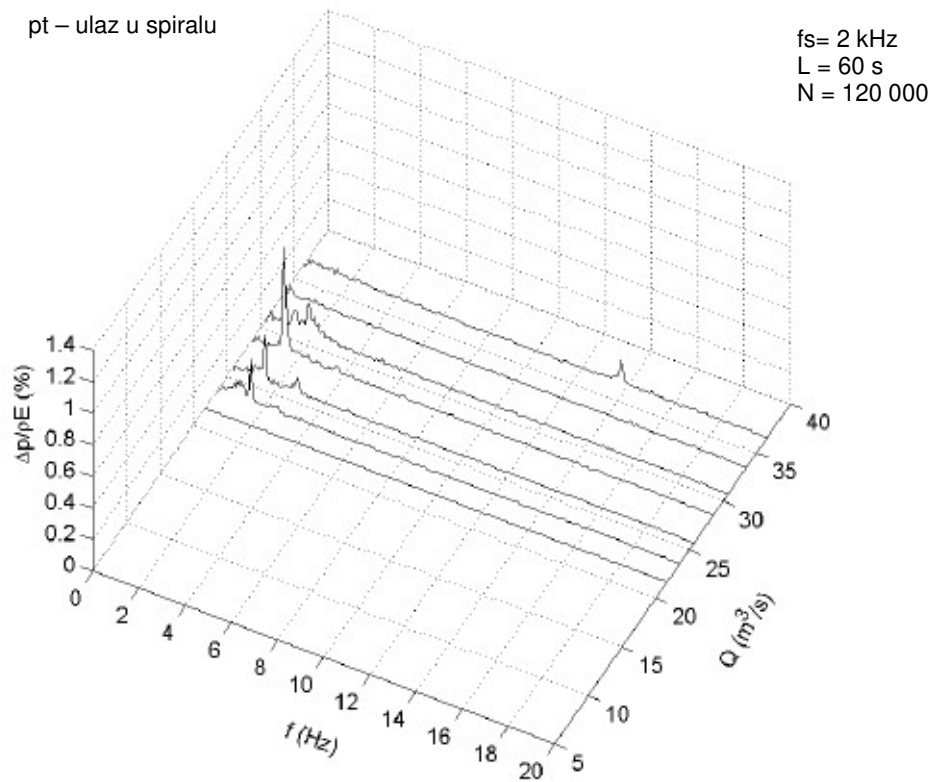


Agregat 1 ne radi

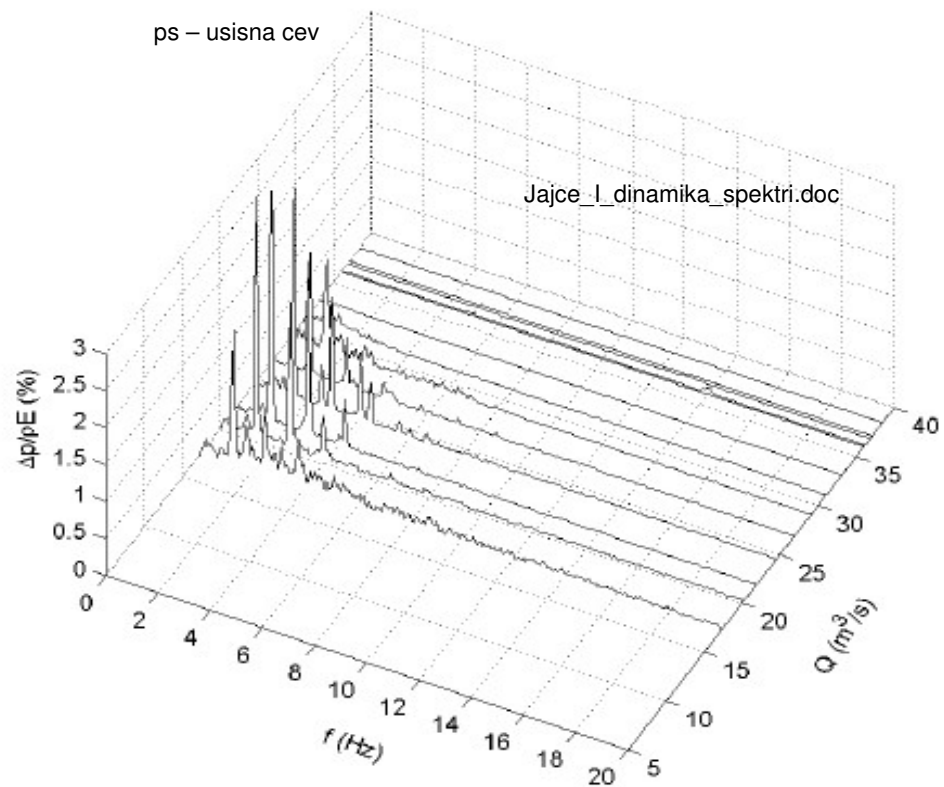
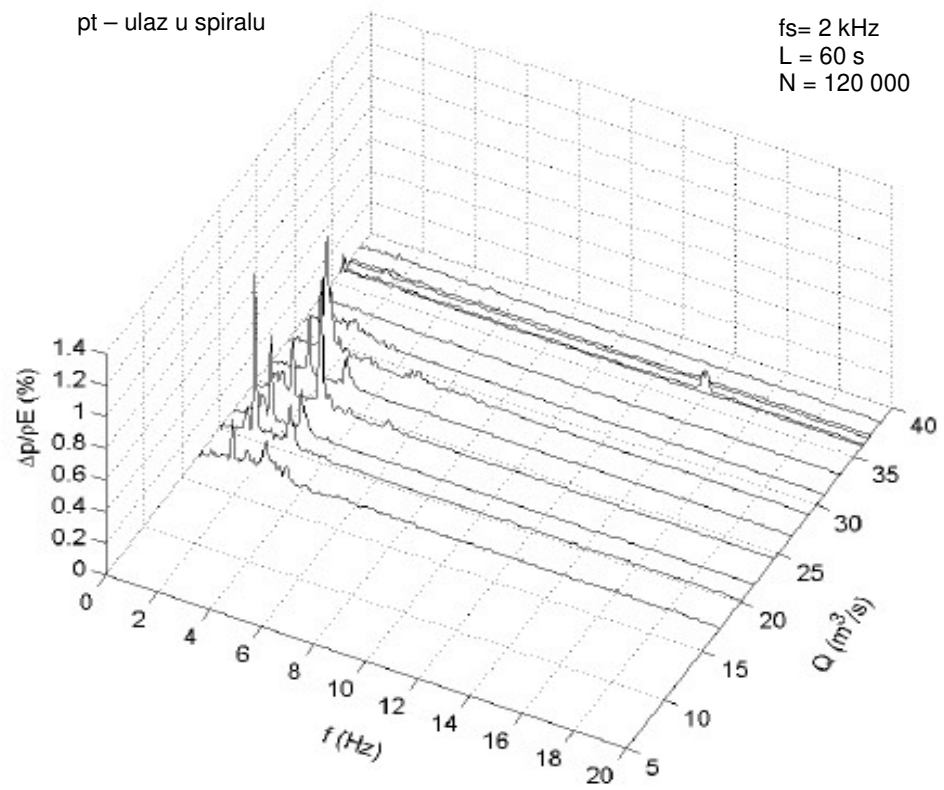
Jajce\_I\_dinamika.xls



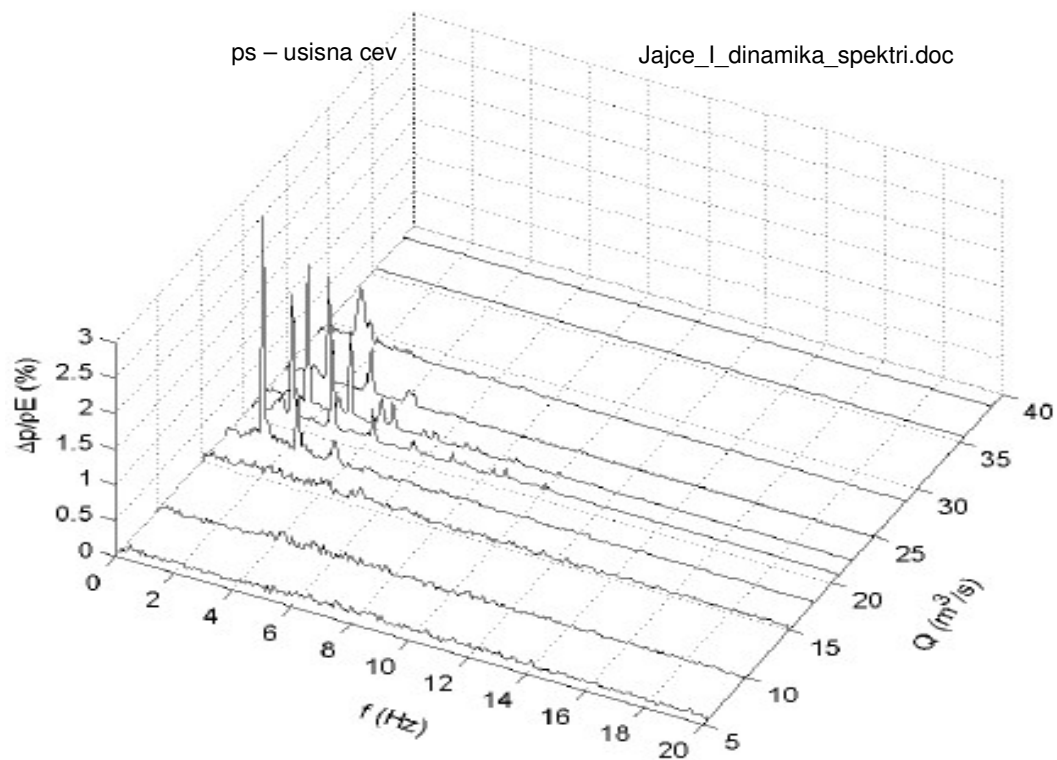
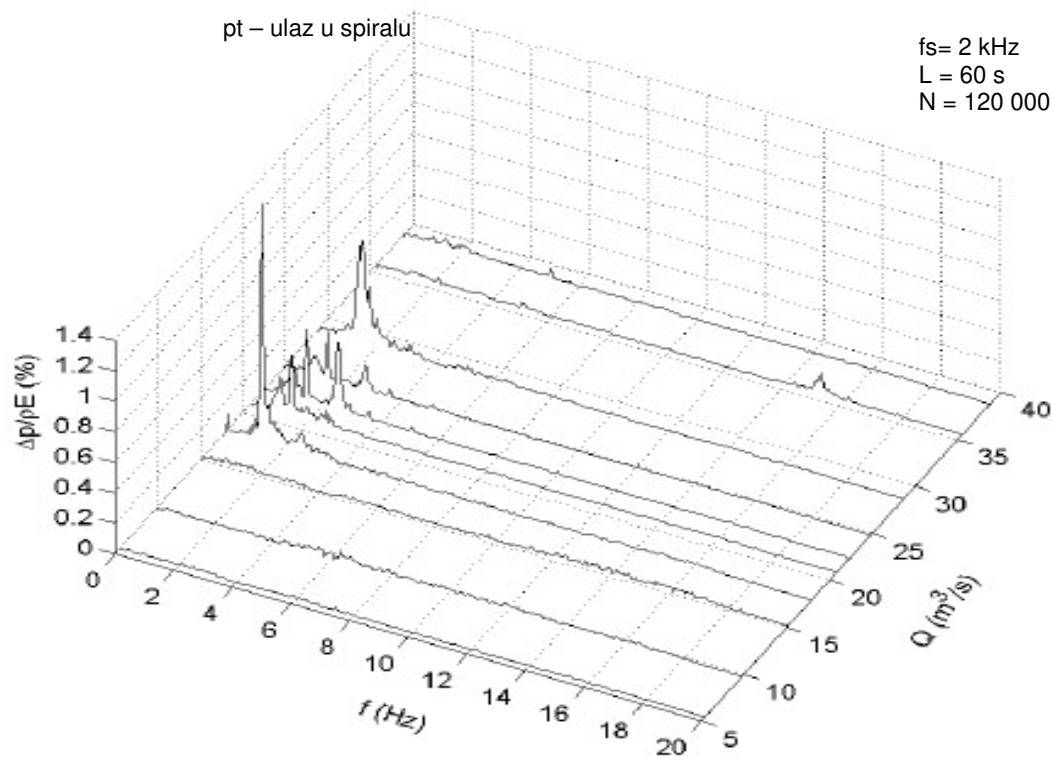
Slika 6.98. Odstupanje ose turbinskog vratila-orbite  
Agregat 2 - HE JAJCE I



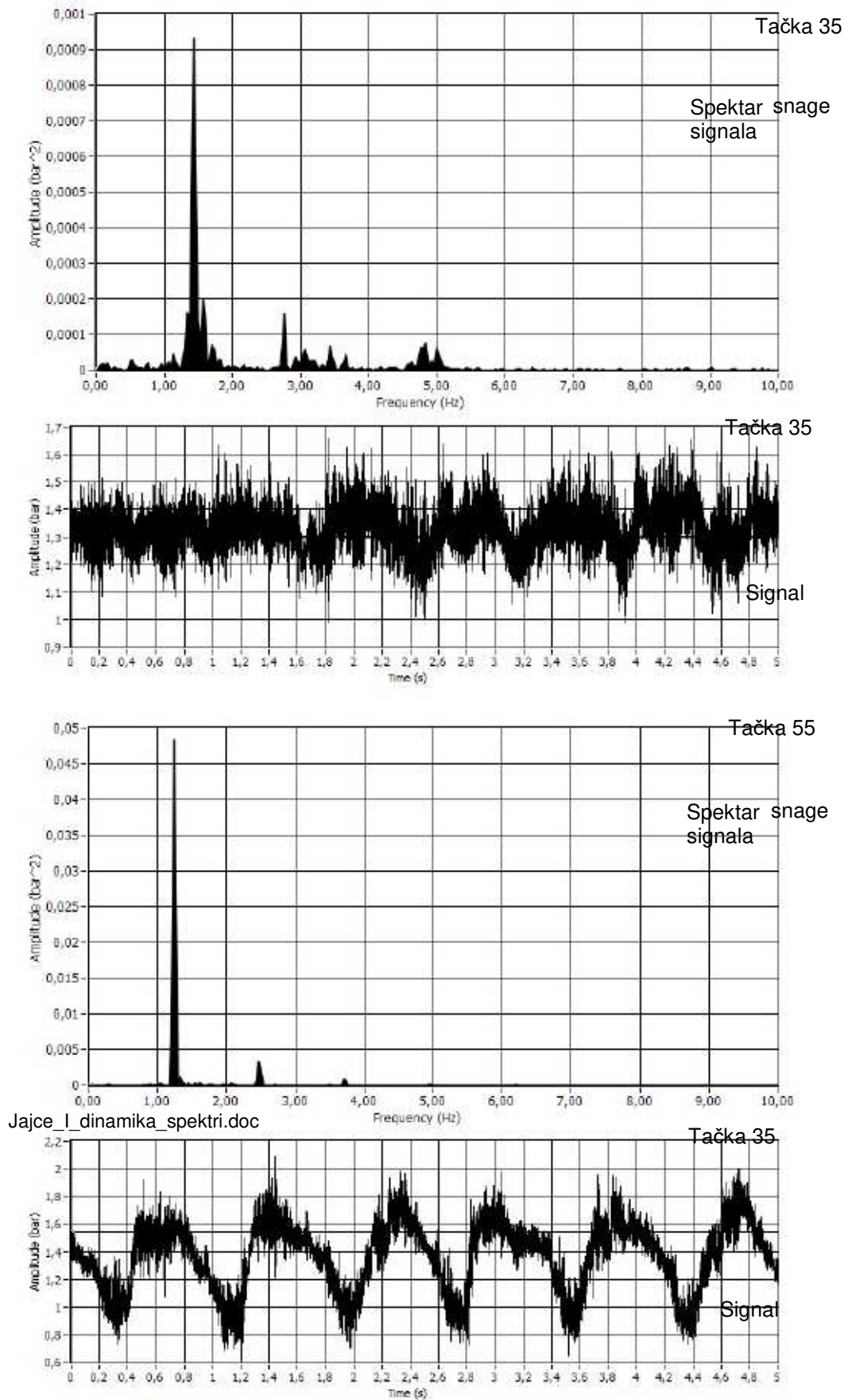
Slika 6.99. Pulzacije pritiska – frekvencijski spektri (0-20 Hz) HE JAJCE I Agregat 1, No. 2-8



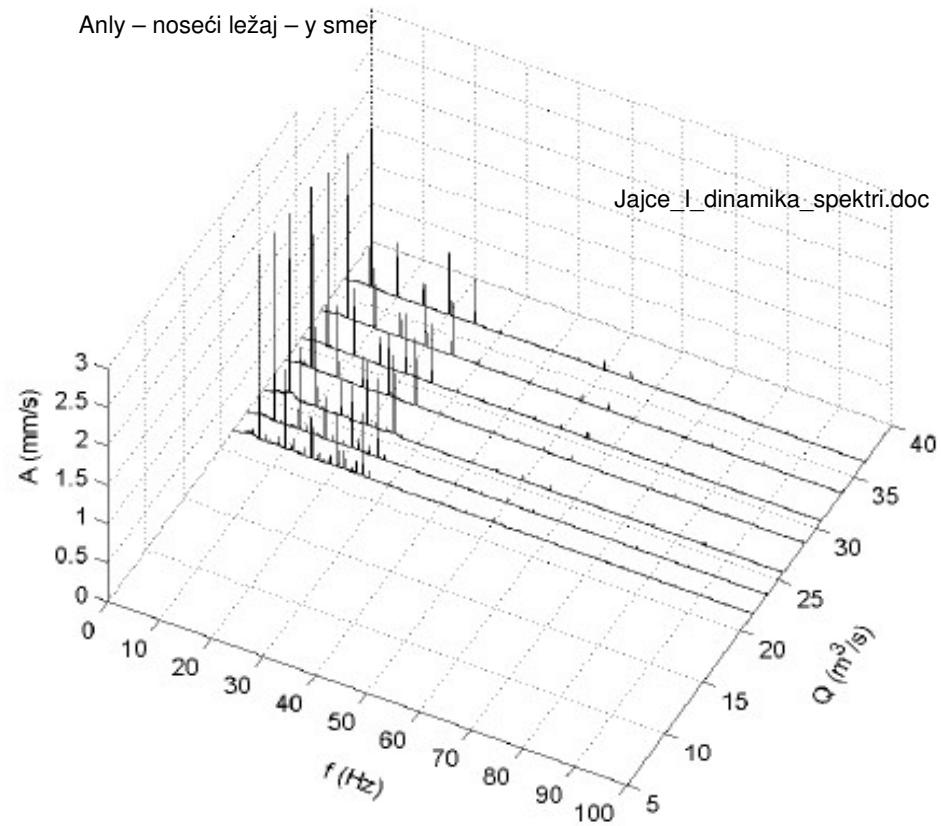
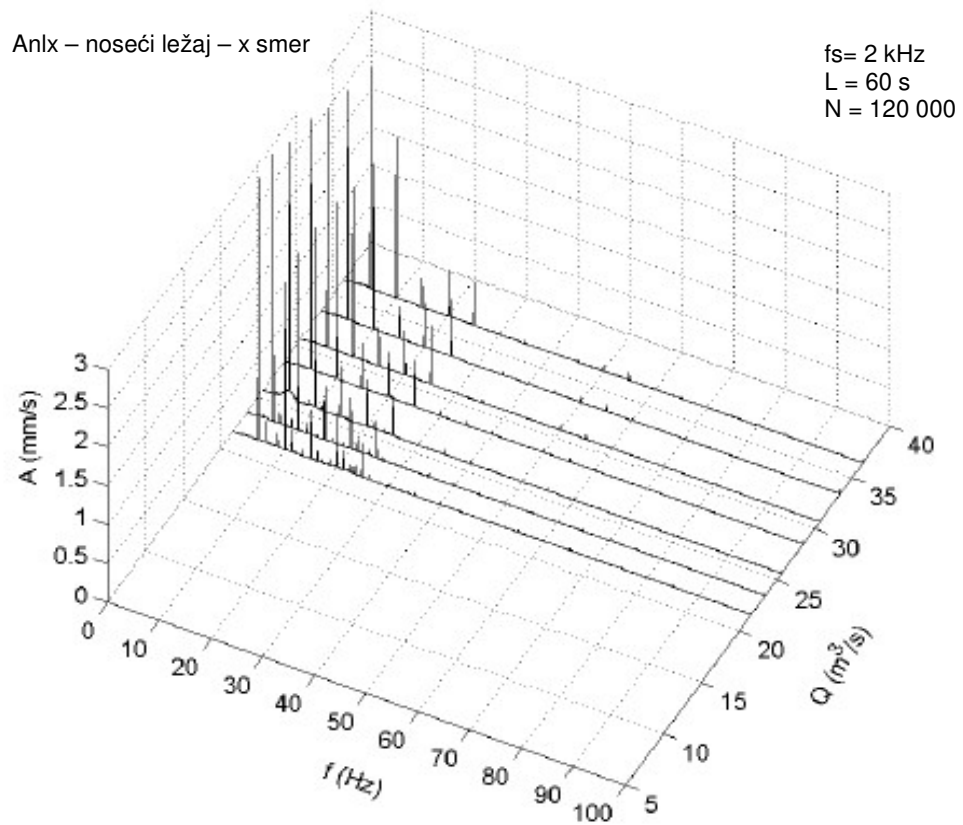
Slika 6.100. Pulzacije pritiska – frekvencijski spektri (0-20 Hz) Agregat 1, No. 9-21 HE JAJCE I



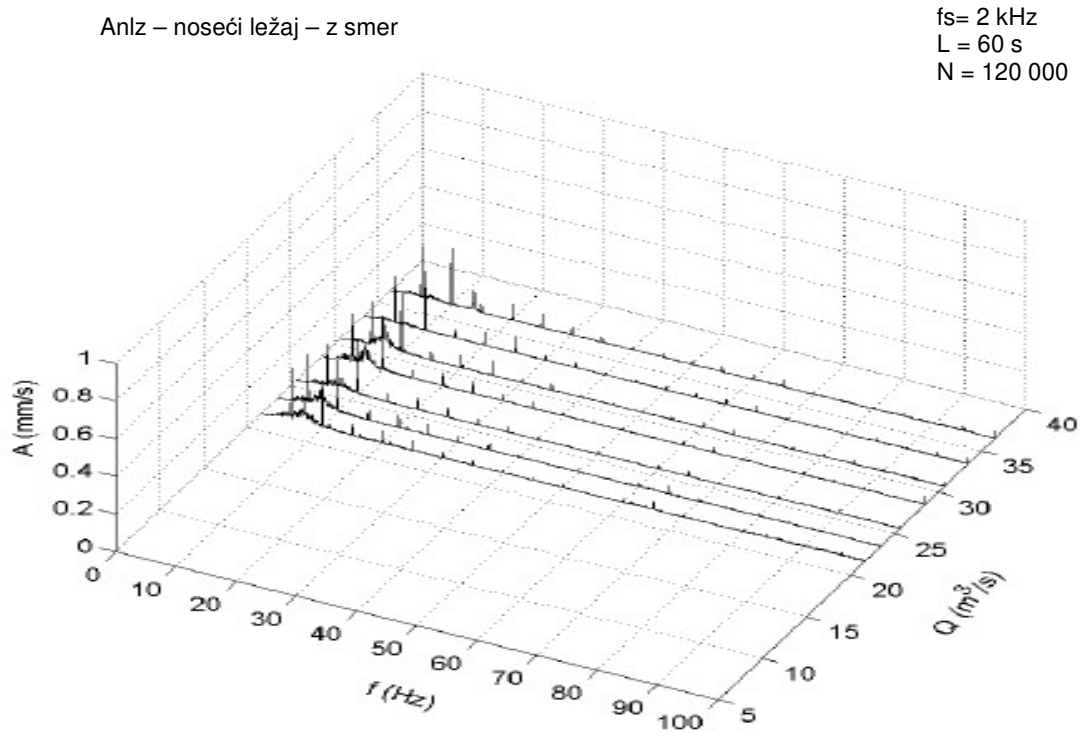
Slika 6.101. Pulzacije pritiska – frekvencijski spektri (0-20 Hz)  
Agregat 2, No. 22-58 HE JAJCE I



Slika 6.102. Pulzacije pritiska u spirali – primeri frekvencijskih spektara i signala  
Agregat 2, No. 35, 55 HE JAJCE I

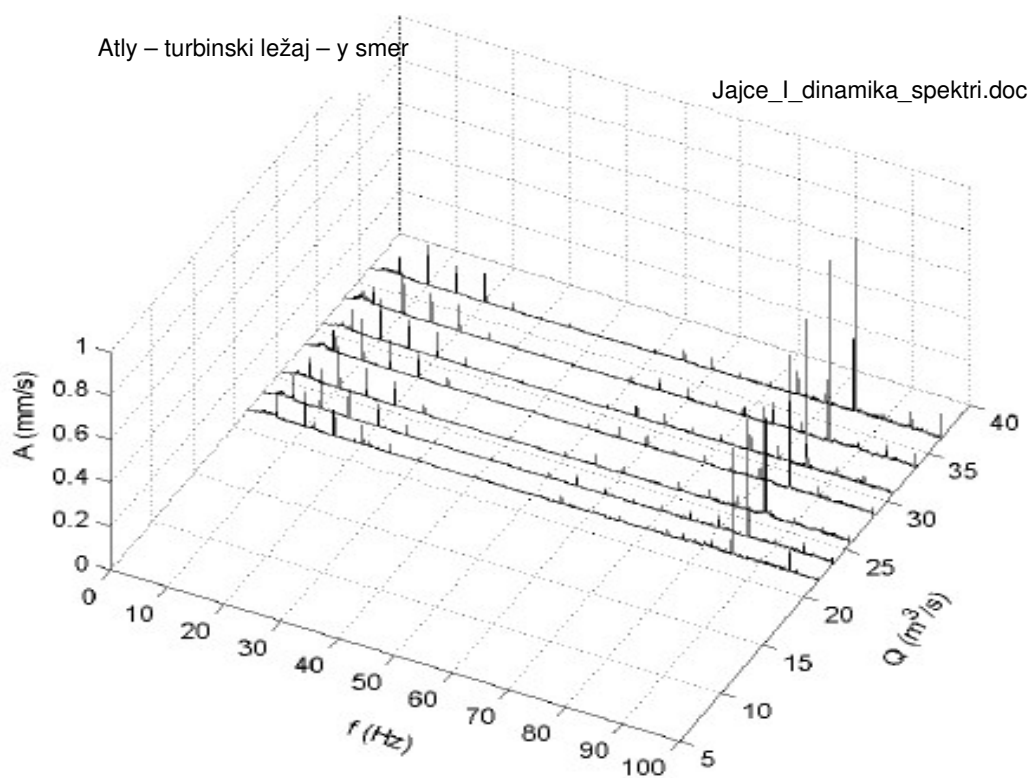
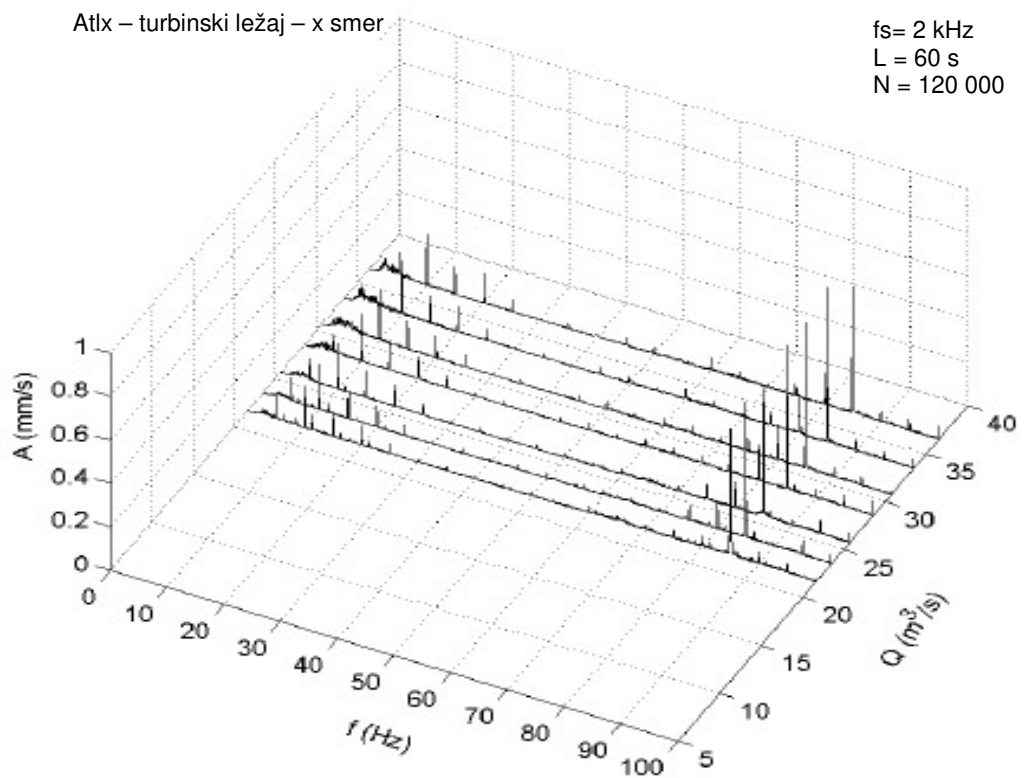


Slika 6.103. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 2-8 HE JAJCE I



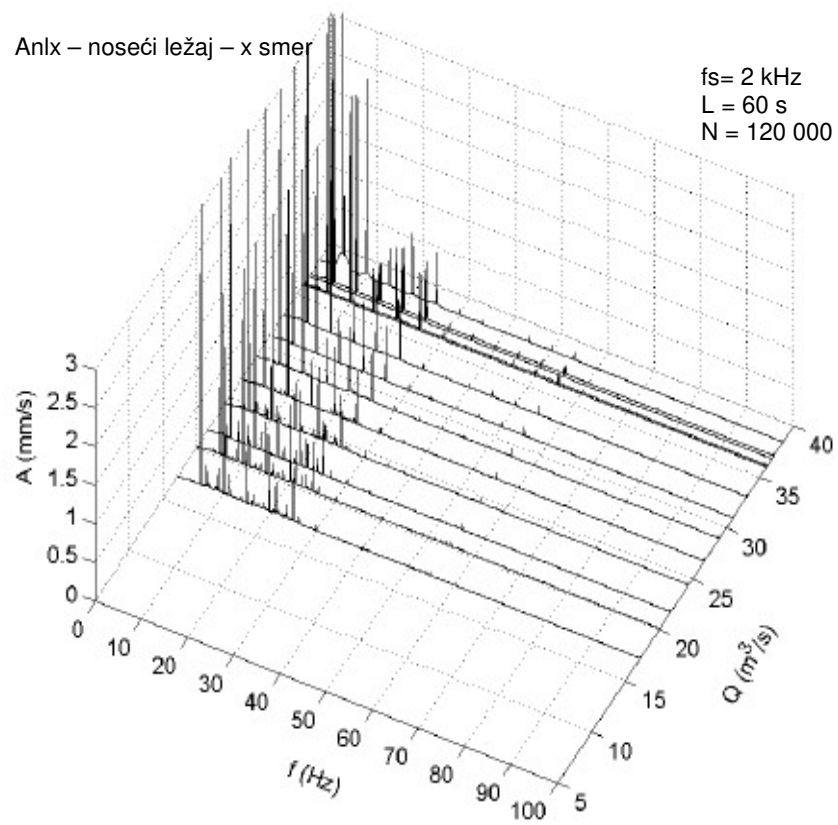
Jajce\_I\_dinamika\_spektri.doc

*Slika 6.104. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 2-8 HE JAJCE I*



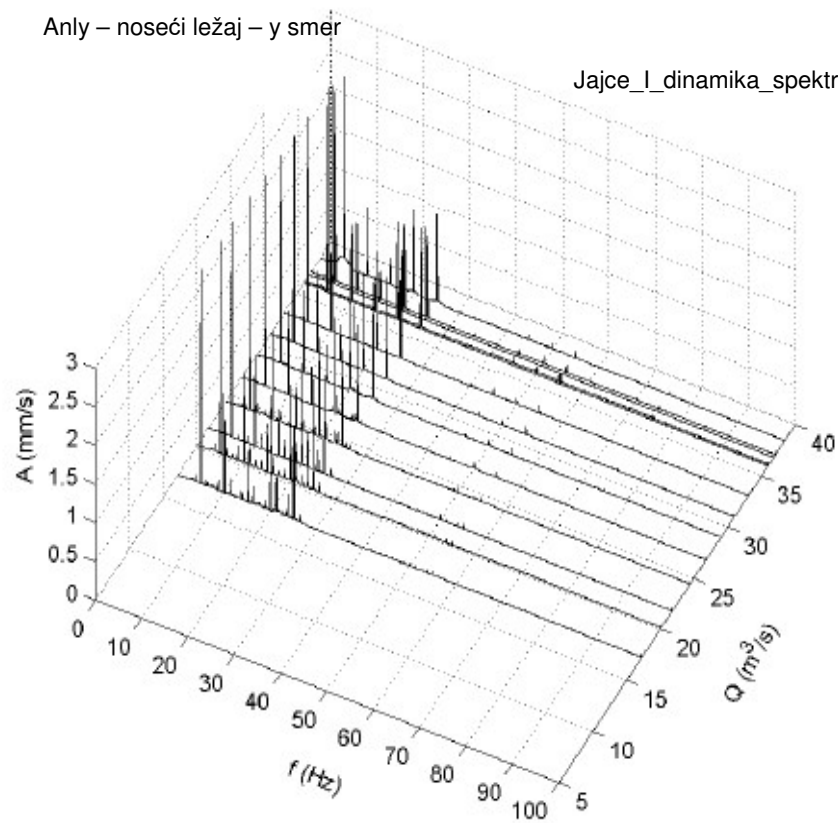
Slika 6.105. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 2-8 HE JAJCE I



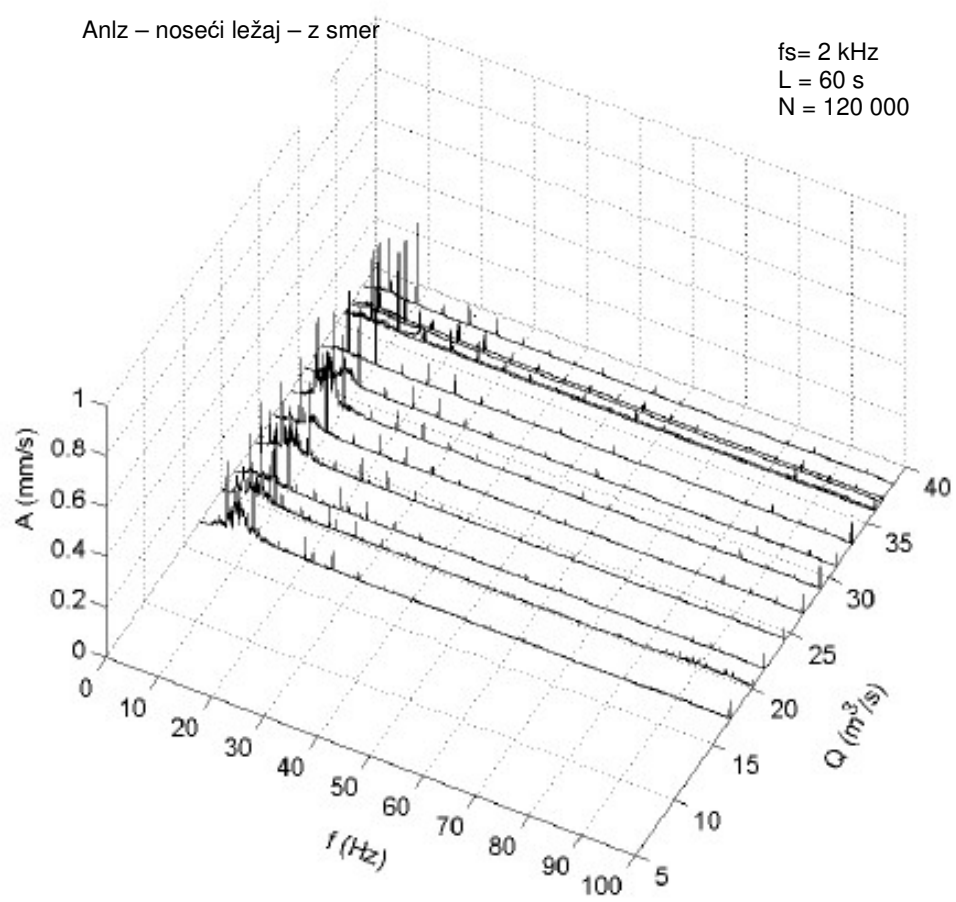


Anly – noseći ležaj – y smer

Jajce\_I\_dinamika\_spektri.doc

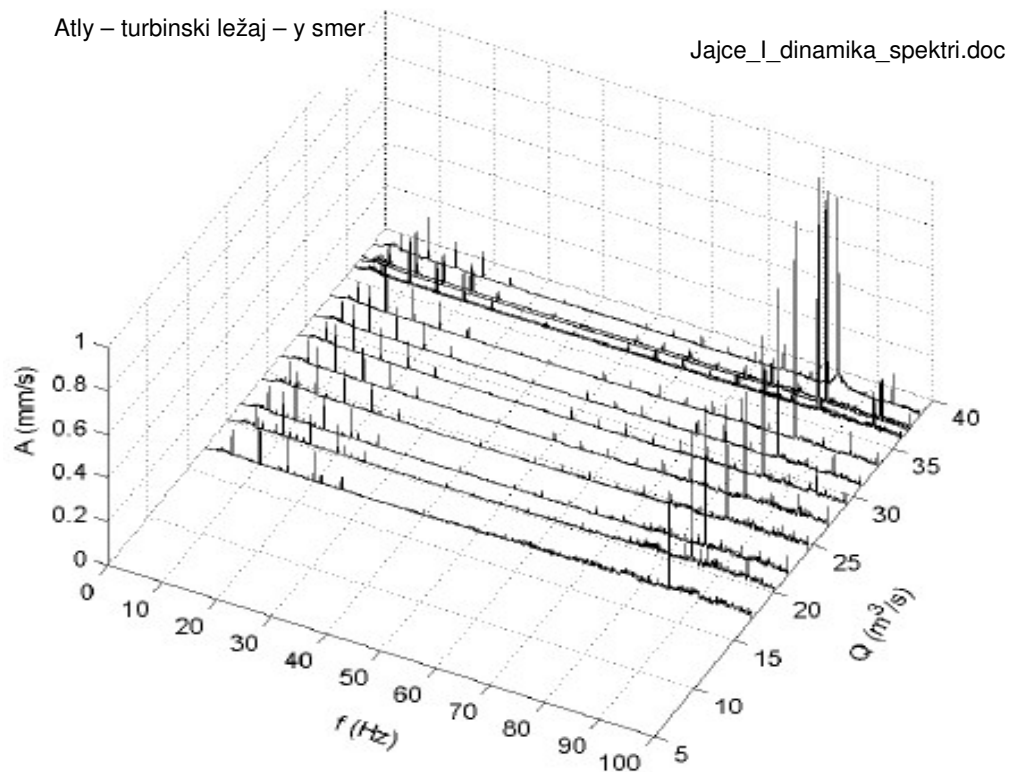
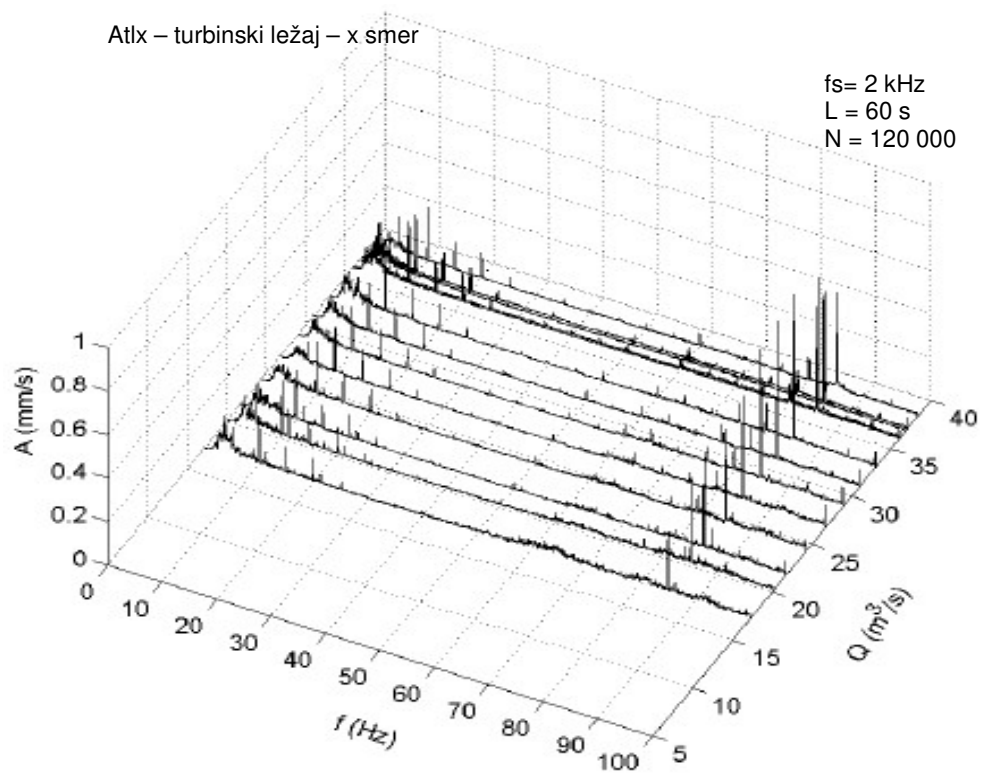


Slika 6.106. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 9-21 HE JAJCE I

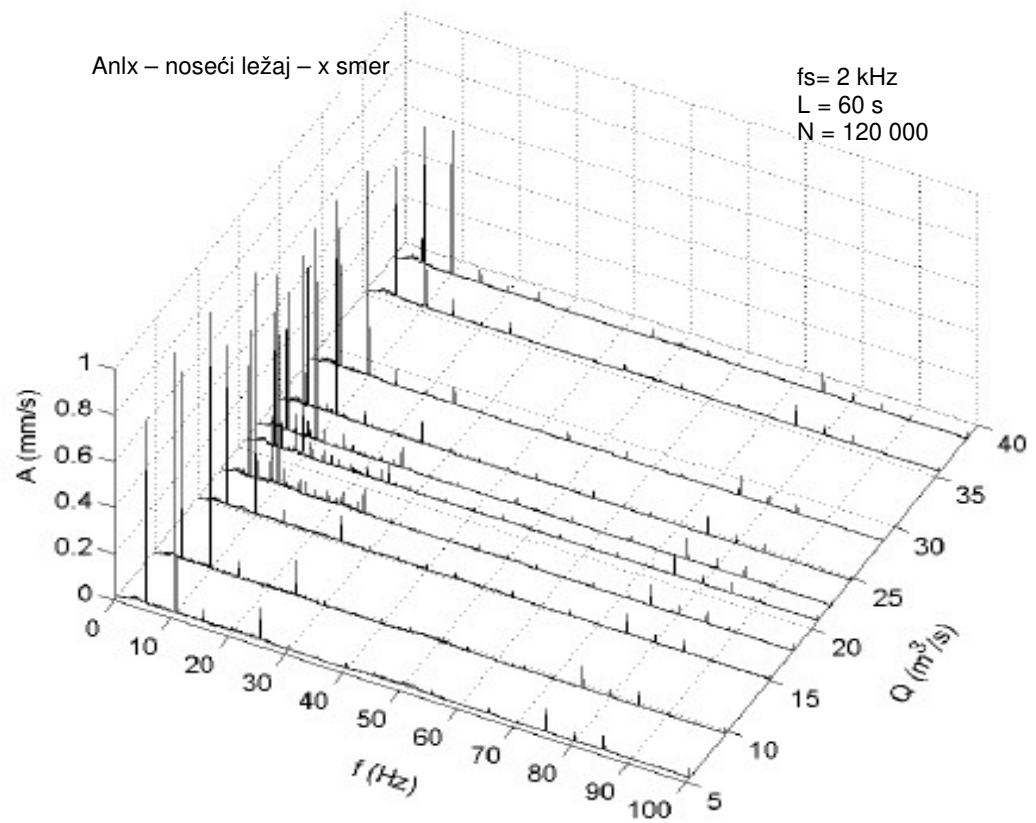


Jajce\_I\_dinamika\_spektri.doc

*Slika 6.107. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 9-21 HE JAJCE I*

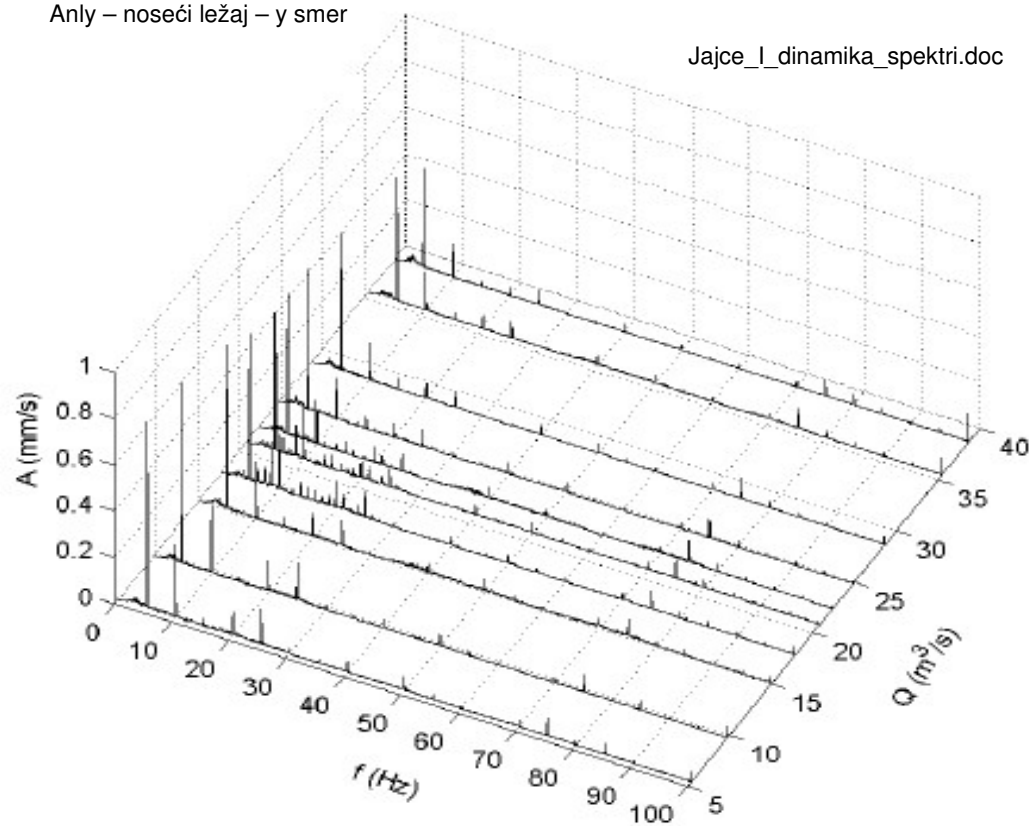


Slika 6.108. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 1, No. 9-21 HE JAJCE I



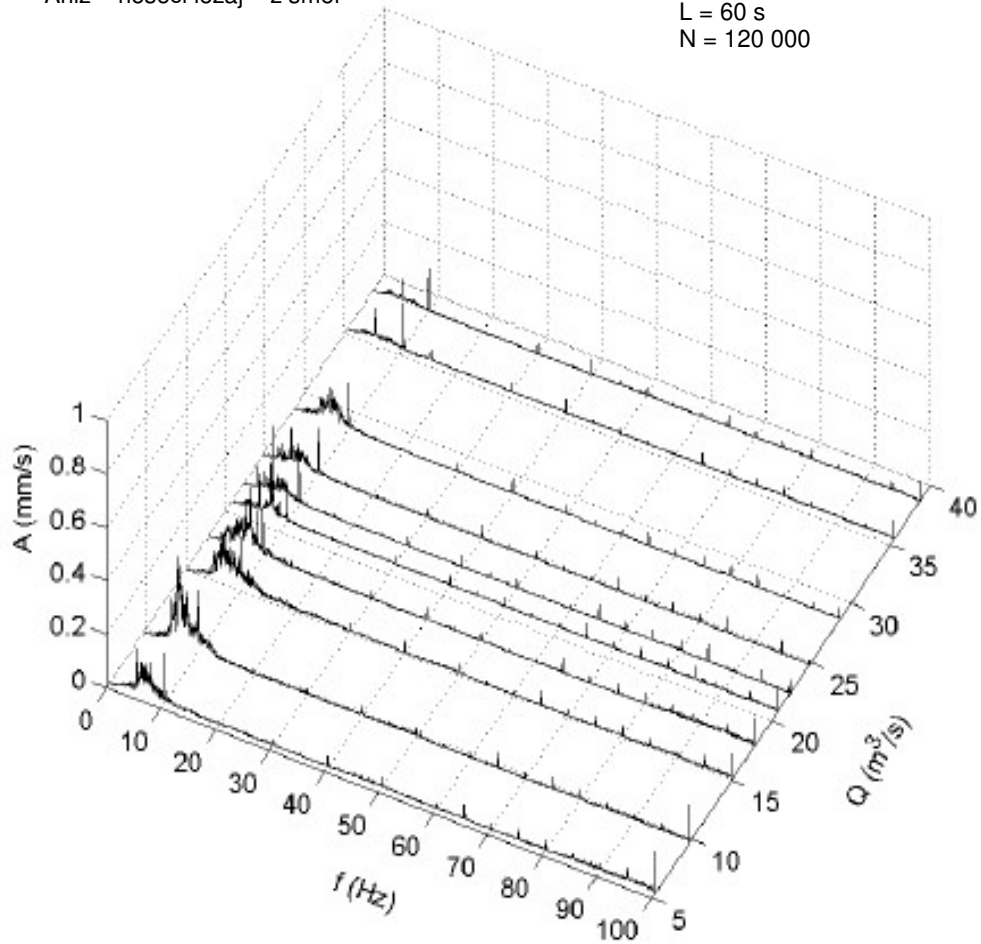
Anly – noseći ležaj – y smer

Jajce\_I\_dinamika\_spektri.doc



Slika 6.109. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 2, No. 22-58 HE JAJCE I

Anlz – noseći ležaj – z smer

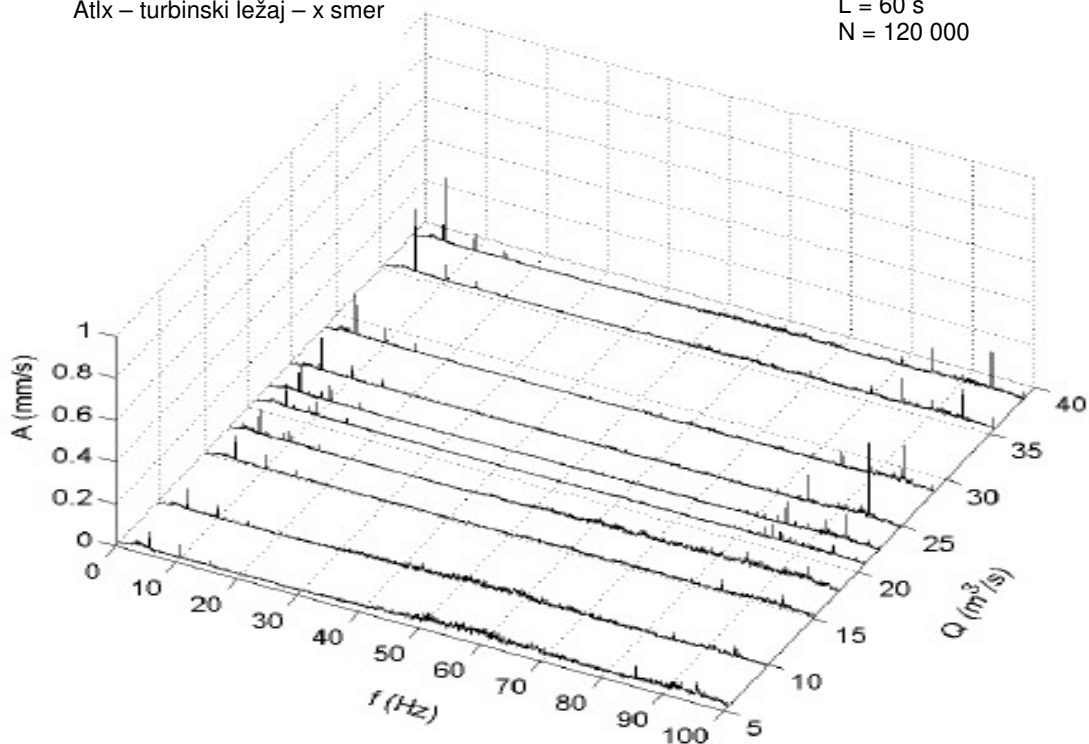
fs= 2 kHz  
L = 60 s  
N = 120 000

Jajce\_I\_dinamika\_spektri.doc

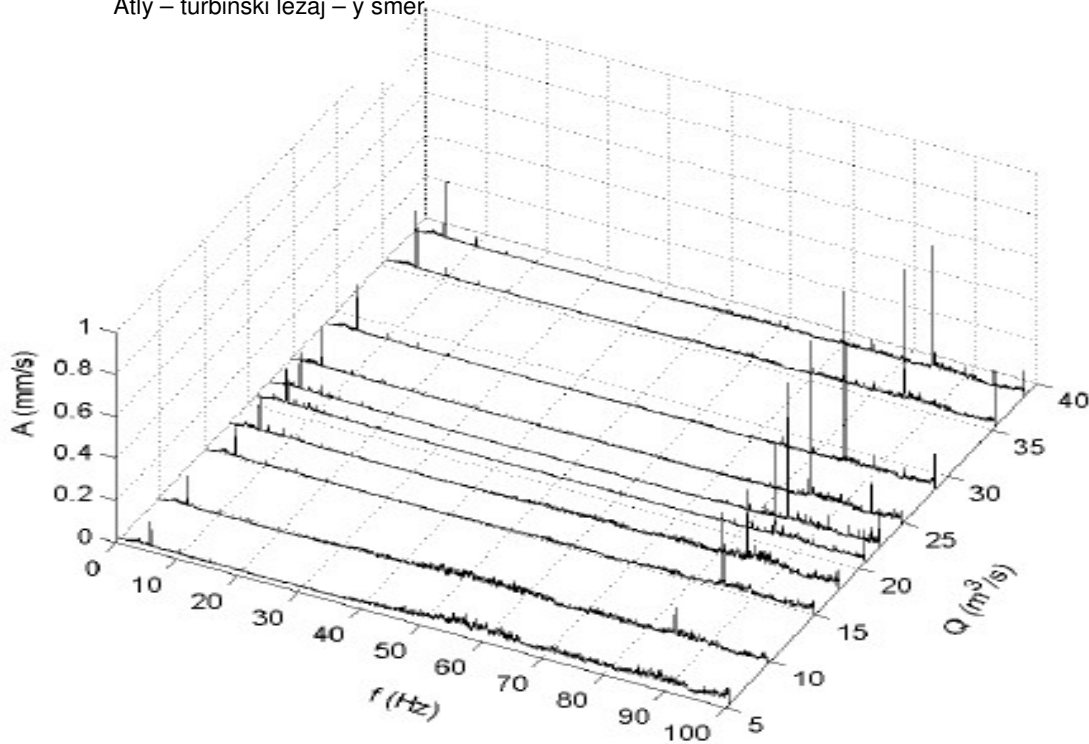
*Slika 6.110. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 2, No. 22-58 HE JAJCE I*

Atlx – turbinski ležaj – x smer

fs = 2 kHz  
L = 60 s  
N = 120 000



Atly – turbinski ležaj – y smer

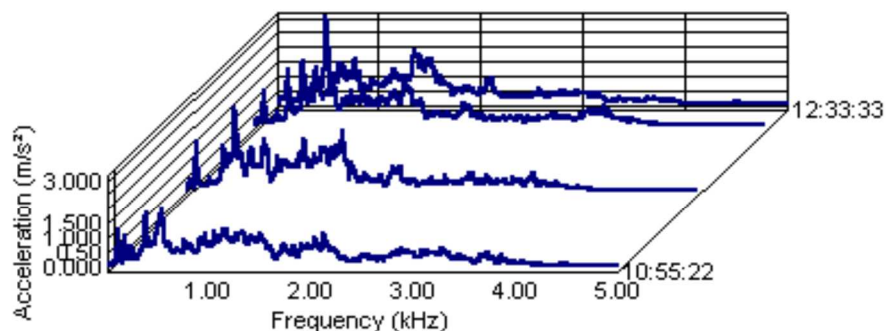


Slika 6.111. Vibracije ležajeva – frekvencijski spektri (0-100 Hz)  
Agregat 2, No. 22-58 HE JAJCE I

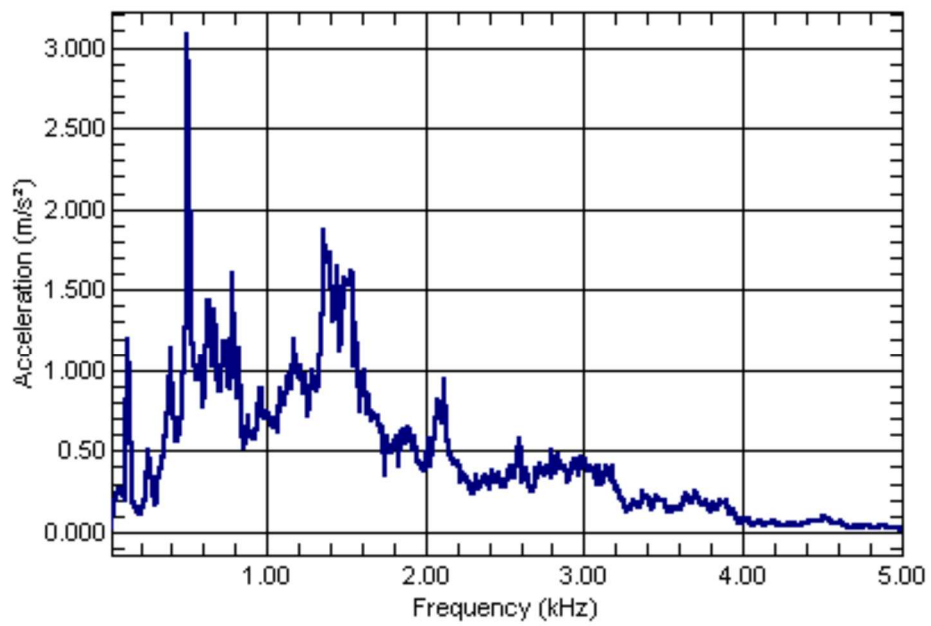
## Merenje vibracija na OE-predilica

Na izabranim kontrolnim mestima prikazane su u prostornom sistemu merenja vibracija, gde su na  $Ox$  - osi prikazane vrednosti funkcije amplitude od frekvencije ( $A(f)$ ), na  $Oy$  - osi vreme oscilovanja ( $t$ )ok su na  $Oz$  - osi prikazane vrednosti amplituda oscilovanja. Ove vrednosti u prostornom sistemu su prikazane za svaki signal na mernom mestu i to za redosled merenja. Prikaz za redosled merenja je najkorisniji jer on daje pravu sliku spektra nivoa oscilovanja te se na osnovu njihovih vrednosti određuju vrednosti pojasa oscilovanja zavisnosti amplitude od frekvence oscilovanja. Zavisnost amplitude je u funkciji vremena oscilovanja ( $t$ ) neperiodična veličina tj. ona je slučajna (stohastična) veličina, što se zaključuje iz prikazanih spektara oscilovanja, tada je neophodno za njihovu analizu izvršiti razlaganje ovakvog spektra (slučajnih funkcija  $A(t)$ ) na sumu harmoničnih komponentata, na osnovu čega se određuju frekventni spektri oscilovanja (prikazi na slikama 6.112. do 6.115.), koji su prikazali primer izvršenih merenja amplitudno – frekventne karakteristike na mernim mestima analiziranih sklopova. Za svaku sastavnu komponentu analiziranih sklopovana osnovu grafičkog prikaza (dijagrama) oscilovanja slučajnih (stohastičkih) funkcija, mogu se odrediti vrednosti nivoa oscilacija (amplituda i frekvencija).

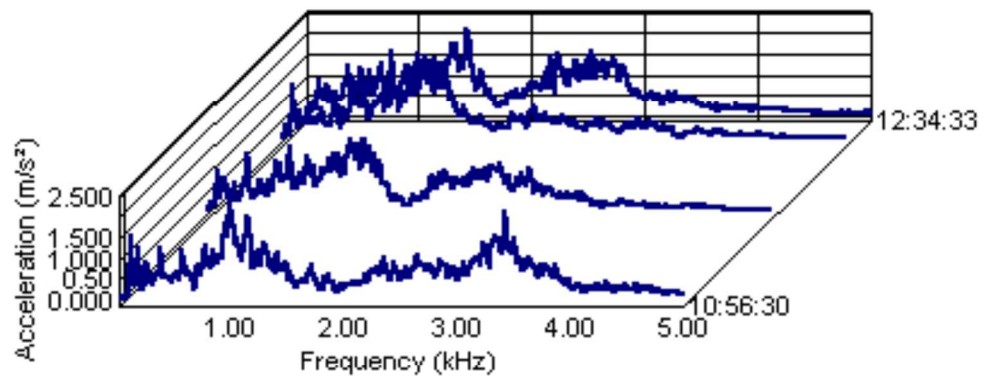
Obradom podataka iz dobijenih dijagrama koji su nastali iz merenja, određene su veličine ekstremnih vrednosti (max. i min.) amplituda i frekvencija. Prikazi su izvršeni dijagramima i to redosledno uz svaki dijagram oscilovanja. Eksperimentalno dobijene vrednosti, korišćiće se u analizi korelacija odnosno, povezivanju zavisnosti parametara pouzdanosti rada komponentata sklopa i uticaja mehaničkih oscilacija na njihov rad. Takođe, ove vrednosti će poslužiti i u određivanju stabilnosti (analize dozvoljenog rada sa rizikom) svakog mernog mesta tj. svake konstruktivne komponente analiziranih sklopova.



Slika 6.112. Prostorni prikaz vibracija za merno mesto 1

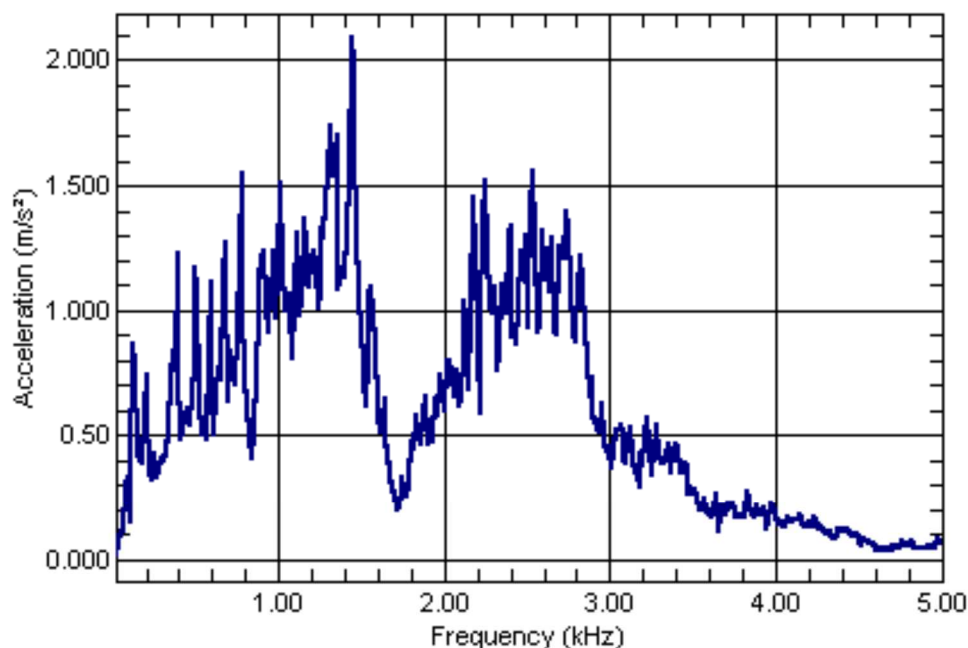


Slika 6.113. Ravanski prikaz vibracija za merno mesto 1



Slika 6.114. Prostorni prikaz vibracija za merno mesto 2





Slika 6.115. Ravanski prikaz vibracija za merno mesto 2

Putem softverskog paketa za obradu podataka SENTINEL počela je analiza u određivanju zavisnosti frekvenci oscilovanja u funkciji amplitude oscilovanja  $f_i=A_i(f_i)$ . Na odabranom referentnom primeru,<sup>54</sup> ovim programskim paketom dobijene su sve numeričke vrednosti svih tačaka izmerenih veličina prikazanih stohastičkih signala.

Tabela 6.20. Ekstremne vrednosti ( $A_i, f_i, \omega_i$ ) na analiziranom karakterističnom primeru

Oznaka mernog mesta	Ekstremne vrednosti amplitude oscilovanja $A_i \left[ \frac{m}{s^2} \right]$		Ekstremne vrednosti frekvencije oscilovanja $f_i [kHz]$		Sračunate ekstremne vrednosti kružnih frekvenci oscilovanja $\omega_i \left[ \frac{rad}{sek} \right]$	
	max	min	max	min	max	min
1.	2,05611	0,26841	1,4987	2,5162	9416,92	15810,06
2.	2,295117	0,354068	1,5812	0,26125	9935,28	1641,49
3.	2,561251	0,134138	0,8387	0,3162	5270,03	1987,06
4.	0,674949	0,08063	0,2337	1,7187	1468,69	10799,23
5.	0,239195	0,0015693	0,055	1,375	345,57	8639,4
6.	0,385777	0,0151895	1,0725	2,3788	6738,72	14946,14
7.	0,520754	0,0281130	1,237	0,1237	7775,44	777,55

<sup>54</sup> Jurić S., Radić R., Blaženović R. Value analysis of worker reliability of integral parts of a circuit for coil winding with finished yarn of oe-spinning machine from the aspect of technology of maintenance, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA)

## **6.5. MODELI RIZIKA, IZBOR OPTIMALNE STRATEGIJE ODRŽAVANJA MAŠINSKIH SISTEMA NA OSNOVU BRZINE VIBRACIJA**

### **6.5.1. DIJAGNOSTIKA I IZBOR OPTIMALNE STRATEGIJE**

Rezultati merenja dijagnostičkih parametara stanja (brzine vibracije) na laboratorijskim i eksploatacionim uzorcima ležišnih sklopova mašinskih tehničkih sistema, prikazani su u (tabeli 6.21.).

Vrednosti izmerenih dijagnostičkih parametara vibracija navedenih u (tabeli 6.21.), prikazane su u bojama u skladu sa preporukama standarda. Tamno zelena boja, označava – dobro stanje, svetlo zelena – zadovoljavajuće stanje, žuta – vibracije na ležišnim sklopovima sistema.

U tabeli (6.21.) oznake 1, 2, 3, 4 predstavljaju ispitivane merne tačke ležišnih sklopova mašinskih sistema, oznake *V*, *H* i *A* označavaju vertikalne, horizontalne i aksijalne vibracije na ležišnim sklopovima sistema<sup>55</sup>.

U prethodnim poglavljima je razvijen dijagnostički kriterijum osobina brzina vibracija izračunavanjem dobijen je optimalan način dijagnostike skalara-jedan dijagnostički kriterijum koji pruža uputstva o izboru najefikasnije strategije za održavanje.

Za praktičnu proveru radne sposobnosti, predložene metode u disertaciji je izvedeno predremontno vibraciono istraživanje pumpe, kompresora, (više od 30 ležajeva u tri preduzeća). U toku istraživanja vibracija i temperature izmerene su brzine vibracija u sva tri pravca delovanja. Nakon sprovedenih istraživanja vibracija, za vreme remonta je napravljena detekcija grešaka ležaja.

Tabela 6.21. prikazuje rezultate merenja vibracija na 33 ležaja raznih mašina na kraju sezone. Za svaki od 33 ležaja na osnovu rezultata istraživanja vibracije (tabela 6.21.) predstavljene su vrednosti četiri dijagnostička kriterijuma i sprovedene su greške na utvrđenim ležajevima.

U tabelama (6.21.) koriste se sledeće uslovne oznake:

Br. Obrtaja – [ $^{\circ}/min$ ]

*V* – vertikalne brzine vibracije [ $mm/s$ ]

*A* – horizontalna brzina vibracije [ $mm/s$ ]

*t* – temperatura [ $^{\circ}C$ ]

Normalno – ležaj se nalazi u dobrom stanju

Predotkazno – prisutan jedan defekt i

Otkaz (havarija) – postoje više defekata i značajno habanje

Na osnovu procene stanja po VDI, uočavamo da je nakon ispitivanja ležajeva 17 njih pokazivalo normalne vrednosti praćenih parametara, 9 ležajeva je upućivalo na predotkazno stanje, dok su parametri na 7 ležajeva upućivali da je otkaz jako blizu.

---

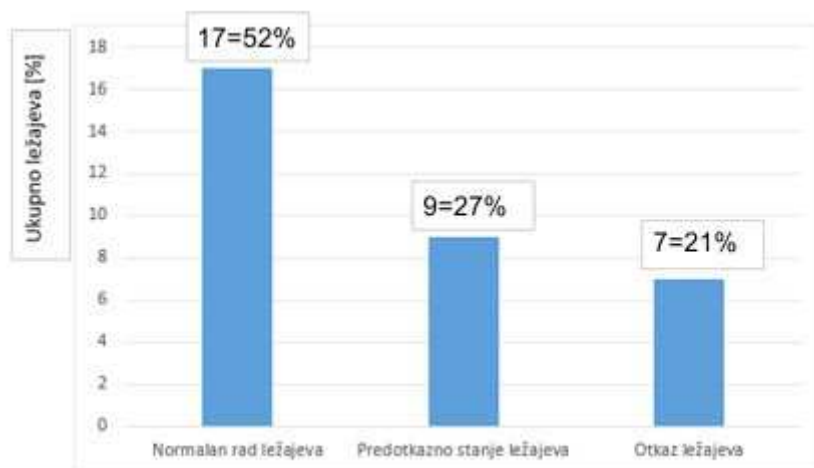
<sup>55</sup>Gertsbakh, I. B., *Model of preventive maintenance*, North-Holland

Tabela 6.21. Dijagnostički kriterijumi za procenu stanja ležajeva na osnovu VDI standarda

Redni broj	Mesto merenja				Dijagnostički kriterijum				Rezultati ocene stanja 1.
	Mašina	Merna tačka	Sati rada[h]	Br. obrta [°/min]	Vibracije V[mm/s]	Vibracije H[mm/s]	Vibracije A[mm/s]	Temperatura t[°C]	
1	Pumpa 1	1	13104	1479	0,56	0,65	0,81	41	Normalno
2		2		-	1,47	2,20	0,93	58	Normalno
3		3		-	<b>7,09</b>	<b>10,07</b>	<b>7,27</b>	<b>77</b>	Otkaz
4		4		-	5,73	7,83	6,25	71	Predotkaz
5	Pumpa 2	1	13140	1479	0,88	1,05	0,95	53	Normalno
6		2		-	1,75	2,09	2,51	62	Normalno
7		3		-	5,53	5,37	7,89	66	Predotkaz
8		4		-	<b>9,79</b>	<b>10,26</b>	<b>8,32</b>	<b>82</b>	Otkaz
9	Pumpa 3	1	bio rem	1479	0,75	0,67	1,00	42	Normalno
10		2		-	0,69	0,45	0,44	39	Normalno
11		3		-	5,06	7,21	5,02	65	Predotkaz
12		4		-	5,19	<b>8,00</b>	5,75	68	Predotkaz
13	Pumpa 4	1	13104	1479	0,60	0,67	0,57	41	Normalno
14		2		-	0,98	1,31	0,83	55	Normalno
15		3		-	<b>7,05</b>	<b>11,05</b>	<b>7,74</b>	<b>80</b>	Otkaz
16		4		-	5,53	<b>8,39</b>	6,90	72	Predotkaz
17	Pumpa 5	1	13104	1479	0,45	0,39	0,36	49	Normalno
18		2		-	0,85	1,52	0,73	52	Normalno
19		3		-	<b>7,93</b>	<b>11,59</b>	<b>7,15</b>	<b>75</b>	Otkaz
20		4		-	6,10	7,44	5,49	<b>70</b>	Predotkaz
21	Pumpa6	1	13104	1479	0,51	0,62	0,54	40	Normalno
22		2		-	0,89	0,80	0,82	50	Normalno
23		3		-	<b>7,17</b>	<b>8,83</b>	<b>10,77</b>	<b>73</b>	Otkaz
24		4		-	5,35	7,61	4,71	67	Predotkaz
25	Kompresor	1	16000	2900	0,99	1,09	1,46	56	Normalno
26		2		-	2,54	1,87	1,67	61	Normalno
27		3		-	<b>6,72</b>	<b>3,71</b>	<b>3,40</b>	<b>79</b>	Otkaz
28		4		-	1,99	3,20	<b>4,41</b>	65	Predotkaz
29	Robot	1	18665	2	0,14	0,11	0,17	35	Normalno
30		1		-	0,15	0,17	0,22	37	Normalno
31		1		-	0,18	0,36	0,49	48	Normalno
32		1		-	1,70	3,29	2,19	63	Predotkaz
33		1		-	<b>2,60</b>	<b>2,94</b>	<b>4,07</b>	<b>75</b>	Otkaz

Cilj istraživanja u ovom poglavlju je, pre svega, formiranje opšteg kriterijuma za utvrđivanje stanja ležajeva. Preciznije želimo da dijagnostički vektor, čije su koordinate parametri ispitivanja, zamenimo skalarnom vrednošću koja će nam sugerisati u kakvom je stanju posmatrani ležaj (slika 6.116.). Za ostvarivanje zacrtanih ciljeva koristićemo algoritam razvijen u poglavlju.

Slika 6.116. predstavlja procentualnu zastupljenost ležajeva u ukupnom uzorku; 17 ležajeva radi normalno od ukupno 33, to je procentualno 52%, 9 ležajeva su u predotkaznom stanju ili u procentima 27%, 7 ležajeva su u otkaznom stanju što predstavlja 21%.



Slika 6.116. Statistika ležajeva na osnovu VDI procene stanja

Formirane su dve grupe od po 4 ležaja: grupu ležajeva **A**-koji su nakon israživanja ostali u dobrom stanju i grupu ležajeva **B**-koji su nakon istraživanja u vema lošem-havarisanom stanju.

Tabela 6.22. Formirane grupe ležajeva

Grupa A-ležajevi u dobrom stanju				
Redni broj	Vibracije $V$ [mm/s]	Vibracije $H$ [mm/s]	Vibracije $A$ [mm/s]	Temperatura $t$ [°C]
1	0,56	0,65	0,81	41
10	0,69	0,45	0,44	39
13	0,60	0,67	0,57	41
21	0,51	0,62	0,54	40

Tabela 6.23. Formiranje grupe ležajeva

Grupa B- ležajevi u lošem stanju				
Redni broj	Vibracije $V$ [mm/s]	Vibracije $H$ [mm/s]	Vibracije $A$ [mm/s]	Treperatura $t$ [mm/s]
8	<b>9,79</b>	<b>10,26</b>	<b>8,32</b>	<b>82</b>
15	<b>7,05</b>	<b>11,05</b>	<b>7,74</b>	<b>80</b>
19	<b>7,73</b>	<b>11,59</b>	<b>7,15</b>	<b>75</b>
23	<b>7,17</b>	<b>8,83</b>	<b>10,77</b>	<b>73</b>

Prema tome, sopstveni vektori  $X_1^A, \dots, X_{N_A}^A$  i  $X_1^B, \dots, X_{N_B}^B$ , koji karakterišu stanja ležajeva u svakoj od grupa, gde je  $N_A$  broj ležajeva u grupi **A** i  $N_B$  broj ležajeva u grupi **B**, (uopšteno, za čitav uzorak,  $X_j^z, z = A, B, j = 1, \dots, N_z, X_j^z = (X_{j1}^z, \dots, X_{jn}^z)$ , gde je  $X_{ji}^z$  -  $i$ -ti dijagnostički kriterijum  $j$ -ležaja), dati su u sledećem obliku:

Za grupu **A** (tabela 6.22.):

$$\begin{aligned}
 X_j^A &= (X_{j1}^A, \dots, X_{jn}^A), N_A = 4 \\
 j=1 \quad X_1^A &= (X_{11}^A, \dots, X_{1n}^A) = (0,56, 0,65, 0,81, 41) \\
 j=2 \quad X_2^A &= (X_{21}^A, \dots, X_{2n}^A) = (0,69, 0,45, 0,44, 39) \\
 j=3 \quad X_3^A &= (X_{31}^A, \dots, X_{3n}^A) = (0,60, 0,67, 0,57, 41) \\
 j=4 \quad X_4^A &= (X_{41}^A, \dots, X_{4n}^A) = (0,51, 0,62, 0,54, 40).
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

Za grupu  $B$  (tabela 6.23):

$$\begin{aligned}
 X_{j1}^B &= (X_{j1}^B, \dots, X_{jn}^B), N_B = 4 \\
 j=1 \ X_1^B &= (X_{11}^B, \dots, X_{1n}^B) = (9,79, 10,26, 8,32, 82) \\
 j=2 \ X_2^B &= (X_{21}^B, \dots, X_{2n}^B) = (7,05, 11,05, 7,74, 80) \\
 j=3 \ X_3^B &= (X_{31}^B, \dots, X_{3n}^B) = (7,93, 11,59, 7,15, 75) \\
 j=4 \ X_4^B &= (X_{41}^B, \dots, X_{4n}^B) = (7,17, 8,83, 10,77, 73).
 \end{aligned} \tag{6.7.}$$

Vektore očekivanja (sopstvene vektore matematičkog očekivanja) u svakoj od datih grupa možemo odrediti iz:  $\hat{\mu}_A = (\hat{\mu}_A^{(1)}, \hat{\mu}_A^{(2)}, \hat{\mu}_A^{(3)}, \hat{\mu}_A^{(4)})$  i  $\hat{\mu}_B = (\hat{\mu}_B^{(1)}, \hat{\mu}_B^{(2)}, \hat{\mu}_B^{(3)}, \hat{\mu}_B^{(4)})$ , pri čemu je

$i = 1, \dots, 4$ , iz formule (7.3), tada je:

$$\hat{\mu}_A^{(i)} = \sum_{m=1}^{N_A} X_{mi}^A / N_A = (0,594, 0,6, 0,594, 36,22) \tag{6.8.}$$

$$\hat{\mu}_B^{(i)} = \sum_{m=i}^{N_B} X_{mi}^B / N_B = (7,99, 10,44, 8,5, 69,7) \tag{6.9.}$$

Kovarijacione matrice  $A$  i  $B$  date su formulom  $S_z = \|V_{ij}^z\|$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ ; gde je  $z = A, B$ , pri čemu je:  $V_{ij}^z = N_z^{-1} \cdot \sum_{m=1}^{N_z} (X_{mi}^z - \hat{\mu}_z^{(i)}) \cdot (X_{mj}^z - \hat{\mu}_z^{(j)})$ , po formuli (6.8.).

Realizacijom navedenih računskih operacija, dobijamo sledeće:

$$S_A = \begin{pmatrix} 0,0053 & -0,0051 & -0,0054 & -0,0325 \\ -0,0051 & 0,0090 & 0,0098 & 0,0750 \\ -0,0054 & 0,0098 & 0,0224 & 0,0975 \\ -0,0325 & 0,0750 & 0,0975 & 0,6875 \end{pmatrix} S_B = \begin{pmatrix} 1,5 & 0,1 & -0,4 & 2,7 \\ 0,1 & 1,3 & -1,7 & 1,4 \\ -0,4 & -1,7 & 2,3 & -2,6 \\ 2,7 & 1,4 & -2,6 & 13,3 \end{pmatrix} \tag{6.10.}$$

$$\text{inv}[S_A + S_B] = K$$

$$K = \begin{pmatrix} 1,3519 & 2,608 & 1,9325 & -0,1871 \\ 2,608 & 19,6761 & 14,8702 & 0,0882 \\ 1,9325 & 14,8702 & 11,773 & 0,1697 \\ -0,871 & 0,0882 & 0,1697 & 0,1282 \end{pmatrix} \tag{6.11.}$$

Optimalni vektor  $l_* = (l_1, \dots, l_n)$  može se dobiti koristeći se formulom (6.10.):

$$l_* = (S_A + S_B)^{-1} \cdot (\hat{\mu}_A - \hat{\mu}_B)^T. \tag{6.12.}$$

Zamenom vrednosti za  $\hat{\mu}_A$ ,  $\hat{\mu}_B$ ,  $S_A$ ,  $S_B$ , ili rešenjem matrice  $K$  dobijamo sledeće:

$$l_* = (-21,9054, -157,5030, -120,3028, -3,4).$$

Na osnovu dobijenog optimalnog vektora  $l_*$  za bilo koji vektor dijagnostičkih kriterijuma koji karakteriše stanje ležaja, može se izračunati jedan dijagnostički kriterijum. Proverom po jednodimenzionalnom uzorku  $y_j^A$  i  $y_j^B$  i odvojenih grupa ležaja  $A$  (normalna) i  $B$  (havarisana), i koristeći polu-empirijski kriterijum i literature, proveravamo odvojenost ovih grupa, za utvrđivanje visokog stepena razdvojenosti:

$$|\hat{y}^A - \hat{y}^B| > 2,5 \cdot (\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B) \text{ ili } \frac{|\hat{y}^A - \hat{y}^B|}{(\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B)} > 2,5, \quad (6.13.)$$

pri čemu je:

$$\hat{y}^A = \mathbf{1}_* \cdot \hat{\mu}_A \text{ i } \hat{y}^B = \mathbf{1}_* \cdot \hat{\mu}_B, \quad \hat{\sigma}_A^2 = \mathbf{1}_* \cdot \mathbf{S}_A \cdot \mathbf{1}^T, \quad \hat{\sigma}_B^2 = \mathbf{1}_* \cdot \mathbf{S}_B \cdot \mathbf{1}^T. \quad (6.14.)$$

Dakle sada je:

$$\begin{aligned} \hat{y}^A &= -1900,1709 \text{ i } \hat{y}^B = -3264,417, \quad \hat{\sigma}_A^2 = 1020,9229, \quad \hat{\sigma}_B^2 = 343,3233 \\ d &= \sqrt{\sigma_a} + \sqrt{\sigma_b} = \sqrt{1020,9229} + \sqrt{343,3233} = 50,4807 \\ \frac{|\hat{y}^A - \hat{y}^B|}{d} &= \frac{1364,2461}{50,4807} = 27,025 \end{aligned}$$

odnosno,

$$\frac{|\hat{y}^A - \hat{y}^B|}{(\hat{\sigma}_A + \hat{\sigma}_B)} = 27,025 > 2,5. \quad (6.15.)$$

Sprovedena analiza pokazala je izuzetno visoku razdvojenost uzoraka po grupama, odnosno „dobar“ stepen podele uzoraka.

Dijagnostiku ležajeva posmatramo postavljanjem granica za različite grupe ležajeva. Dijagnostički vektor za svaki ležaj sada možemo zameniti jednom procenjenom vrednošću koju dobijemo po formuli

$$y_j = \sum_{i=1}^n l_i \cdot X_{ji}. \quad (6.16.)$$

Test rezultata promenljive (s): procenjene vrednosti

Tabela 6.24. Statistika za određivanje merne skale  $y_i$

Oblast	Standardna greška <sup>a</sup>	Asimtotska sig. <sup>b</sup>	Asimtotski 95% Interval pouzdanosti	
			Donja granica	Gornja granica
<b>1,000</b>	0,000	<b>0,000</b>	1000	1000

Test rezultata promenljive (s): Procenjene vrednosti

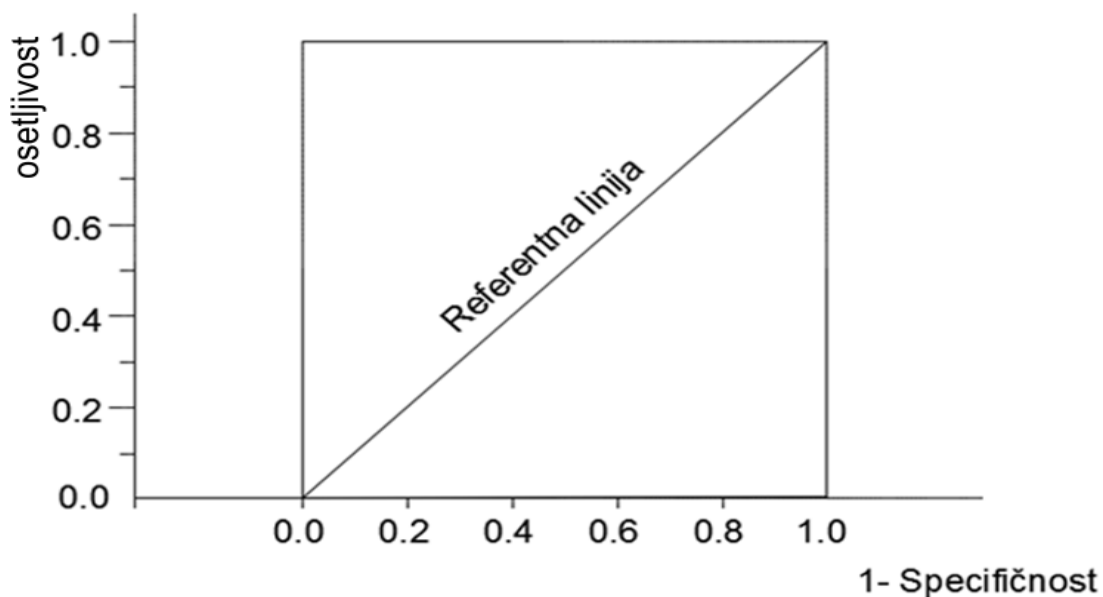
Mernu skalu za vrednost  $y_j$  definisaćemo pomoću statističke metode Roc krive (Roc curve). Najpre ispitujemo da li je pomenuta procenjena vrednost dobar pokazatelj koji razdvaja ležajeve koji rade normalno od onih kod kojih to nije slučaj.

Kako je karakterističnost značajan signifikantnost  $p < 0,0005$ , zaključujemo da je procenjena vrednost  $y_j$  dobar pokazatelj koji razdvaja ležajeve koji rade normalno i one za koje to ne važi. Cut-off je -1040,8717, što znači granica (zelena boja, tabela 6.25.): svaki ležaj čija procenjena vrednost  $y_j$  iznosi više od -1040,8717 možemo smatrati da radi normalno. Senzitivnost (verovatnoća tačnog detektovanja normalnog stanja) je 100%. Tabela 6.24. objašnjava da je svaki uređeni par (senzitivnost, 1-specifičnost) kordinata jedne tačke. Te tačke se ucrtavaju i dobija se grafik Roc krive.

Tabela 6.25. Koordinate krive

Pozitivna ako je veća ili jednaka na <sup>a</sup>	Osetljivost	1-Specifičnost
-3434,251528	1,000	1,000
-3429,358690	1,000	0,938
-3419,574068	1,000	0,875
-3411,586149	1,000	0,813
-3289,204880	1,000	0,750
-2970,331711	1,000	0,688
-2680,318332	1,000	0,625
-2557,711854	1,000	0,563
-2475,324625	1,000	0,500
-2389,292603	1,000	0,438
-2337,732992	1,000	0,375
-2299,895134	1,000	0,313
-1908,128199	1,000	0,250
<b>-1040,871675</b>	<b>1,000</b>	<b>0,000</b>
-888,452031	0,941	0,000
-782,441924	0,882	0,000
-673,542168	0,824	0,000
-582,700357	0,765	0,000
-557,575683	0,706	0,000
-533,089820	0,547	0,000
-478,004681	0,588	0,000
-428,304757	0,529	0,000
-395,258517	0,471	0,000
-362,823886	0,412	0,000
-339,872758	0,353	0,000
-314,545380	0,294	0,000
-296,868549	0,235	0,000
-291,968127	0,176	0,000

Na slici 6.117. data je Roc kriva (Roc curve), predstavljena je plavom bojom na grafiku. Cilj celog teksta je da se pronađe vrednost koja može uspešno da razdvoji ležajeve koji rade normalno i one koji ne rade kako treba. Upravo je to Cut-of, granična vrednost za parametar  $y_j$  na osnovu koje možemo zaključiti da li ležaj radi normalno.



Slika 6.117. Rok kriva

Slika 6.117. pokazuje da je 100% pouzdan rezultat, jer površina između grafika i rubova crteža jednaka 1. Utvrdili smo da je procenjena vrednost  $y_j$  dobar pokazatelj koji razdvaja grupu ležajeva koji prijavljuju otkaz i grupu ležajeva kod kojih to nije slučaj (tabela 6.26.)

### Površina ispod krive

Test rezultata promenljive (s): Procenjene vrednosti

Tabela 6.26. Razdvojenost ležajeva

Oblast	Standardna greška <sup>a</sup>	Asimptotska sig. <sup>b</sup>	Asimptotski 95% Interval pouzdanosti	
			Donja granica	Gornja granica
<b>0,918</b>	0,057	<b>0,001</b>	0,805	1,000

Test rezultata promenljive (s): Procenjene vrednosti

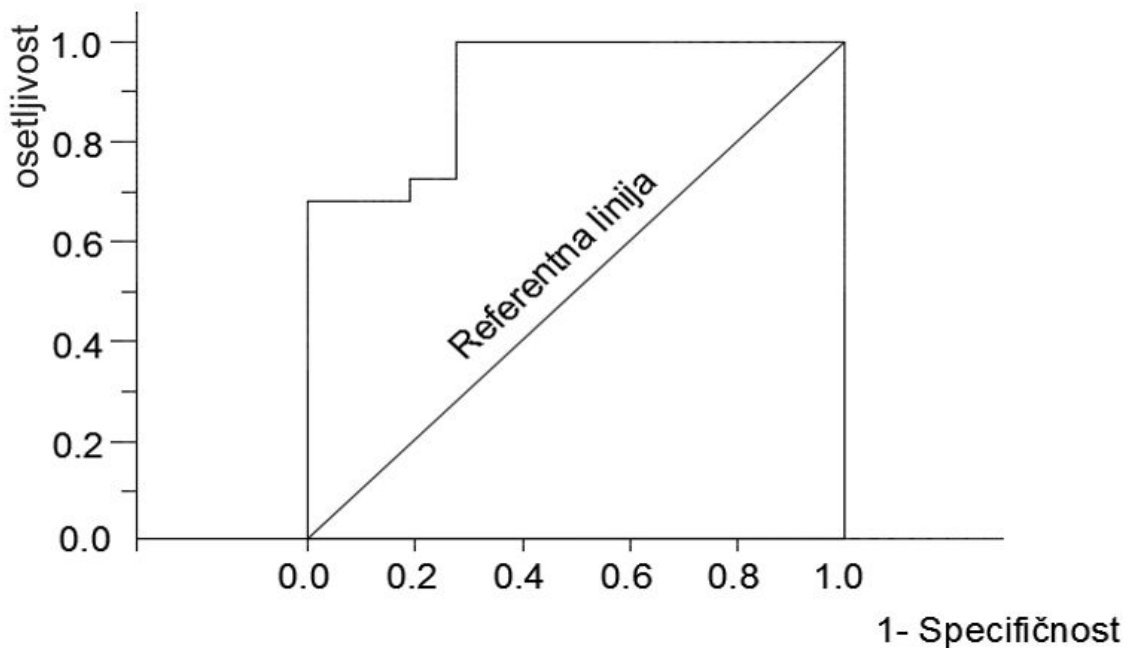
Tabela 6.27. Koordinate krive

Pozitivan ako je veći ili jednak do <sup>a</sup>	Osjetljivost	1-Specifičnost
-3434,251528	1,000	1,000
-3429,358690	1,000	0,857
-3419,574068	1,000	0,714
-3411,586149	1,000	0,571
-3289,204880	1,000	0,429
-2970,331711	1,000	0,286
-2680,318332	0,962	0,286
-2557,711854	0,923	0,286
-2475,324625	0,885	0,286
-2389,292603	0,846	0,286
-2337,732992	0,808	0,286
<b>-2299,895134</b>	<b>0,769</b>	<b>0,286</b>
-1399,670258	0,692	0,143
-1251957059	0,692	0,000
-1040,871675	0,654	0,000
-888,452031	0,615	0,000
-782,441924	0,577	0,000
-673,542168	0,538	0,000
-582,700357	0,500	0,000
-557,575683	0,462	0,000
-533,089820	0,423	0,000
-478,004681	0,385	0,000
-428,304757	0,346	0,000
-395,258517	0,308	0,000
-362,823886	0,269	0,000
-339,872758	0,231	0,000
-314,545380	0,192	0,000
-296,868549	0,154	0,000
-291,968127	0,115	0,000
-239,133624	0,077	0,000



Najmanja odsečena vrednost je minimalni posmatrani test vrednosti minus 1, a najveća granična vrednost je maksimalni posmatrani test vrednosti plus 1. Sve ostale granične vrednosti su prosečna dva uzastopna određena posmatrana testa vrednosti.

Kako je značajnost-signifikantnost  $p = 0,001 < 0,05$ , zaključujemo da je procenjena vrednost  $y_j$  dobar pokazatelj koji razdvaja ležajeve koji prijavljuju otkaz i one kod kojih to nije slučaj. **Cut-off** je -2299,8951 (tamno narandžasta boja-granična vrijednost, tabela 6.26.), što znači: svaki ležaj čija procenjena vrednost  $y_j$  iznosi manje od -2299,8951 možemo smatrati ležajem koji otkazuje. Osetljivost (verovatnoća tačnog detektovanja otkaza) je 76,9%, (slika 6.118.).



Slika 6.118. Procenjena vrednost ležaja

Na slici 6.118. data je Roc kriva, predstavljena je plavom bojom na grafiku. Što je površina ograničena rubovima grafika, to je bliža 1. Cilj testiranja je da se pronade vrednost koja može uspešno da razdvoji ležajeve koji otkazuju i one koji uvek rade. Upravo je to Cut-of, granična vrednost za parametar  $y_j$  na osnovu koje možemo zaključiti da li ležaj radi normalno.

Dobijenu mernu skalu procene možemo preformulisati pomoću slike (6.119.) na sledeći način:

- ako je  $|y_j| < 1040,871$  – smatramo da ležaj radi normalno
- ako je  $1040,871 \leq |y_j| \leq 2299,8951$  – ležaj je u predotkaznom stanju
- ako je  $|y_j| > 2299,8951$  – ležaj je u havarisanom stanju (otkaz ležaja)

Interval	Početak	Sredina	Kraj	Početak	Sredina	Kraj	Početak	Sredina	Kraj
Oznaka	E <sub>1</sub>			E <sub>2</sub>			E <sub>3</sub>		
	$ y_j  < 1040,871$ $1040,8717 \leq  y_j  \leq 2299,8951$ $ y_j  > 2299,8951$								

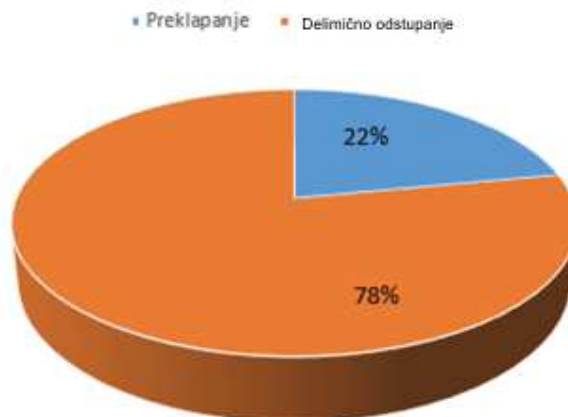
Stanje sistema                      Dobro                      Još uvek dozvoljeno                      Havarija - otkaz

*Slika 6.119. Merna skala procene*

U tabeli 6.27. prikazane su vrednosti dobijene za jedan dijagnostički kriterijum. Preračunavanjem jednog dijagnostičkog kriterijuma, evaluacija ležajeva na osnovu analize i stvarnog otkrivanja greške ležaja.

Ovakav prediktivni postupak pokazao se vrlo uspešnim. Na 33 ležaja imamo 25 ležajeva prediktivne metode koja dovodi do potpunog poklapanja predviđenog stanja i stvarnog stanja ležaja. Kod 8 ležajeva javlja se delimično odudaranje, u smislu da su neka predotkazna stanja predviđena kao otkazi i obrnuto. Dakle, postoji podudarnost od 75,76%.

Grafik na slici 6.120. predstavlja procentualni prikaz poklapanja procene stanja ležaja pomoću apsolutnog  $|y_j|$  i stvarnog stanja ležaja. Odnosno, u 78% slučajeva procena stanja ležaja se poklapa sa njegovim realnim stanjem.



*Slika 6.120. Rezultati dijagnostike*

Komparativna analiza pokazala je skoro potpuno slaganje sa rezultatima dijagnostičkih podataka vizuelnih rešavanja problema elemenata ležaja. Od 33 posmatranih (snimljenih) ležajeva 22 je ukupne slučajnosti i 9 predstavljaju delimične rezultate dijagnostike. Suprotno zaključivanje nedostaje. Identifikovano neprecizno sagledavanje može se objasniti nemogućnošću adekvatne vizuelne procene stanja ležajeva: normalno, preventivno, upozorenje i havarija.

Analiza broja otkaza nastalih usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija na sastavnim komponentama analiziranog sklopa OE – predilice u posmatranom vremenu eksploatacije je pokazala da su se prvi otkazi pojavili iza 12 000 (h) njihovog rada i to na sastavnim

komponentama na kojima nisu sprovedeni postupci tehnologije preventivnog održavanja i blizu 14 000 (h) rada na onima na kojima su ovi postupci sprovedeni. Na sastavnoj komponenti zatezač/podizač kalema (F3) nije dolazilo do njihovog otkaza u radu ni posle 18 000 (h) pa su ove sastavne komponente pokazale maksimalnu pouzdanost  $R_{F3} = 1,0$  (100%).

Rangiranje prema vrednostima ukupnih otkaza usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija je prikazano u tabeli 6.26.

Iz table 6.26. proizilazi da postoje tri grupe rizika otkaza koje su svrstane na sledeći način:

I GRUPA – Grupa visokog rizika otkaza u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: držač kalemova (F2).

II GRUPA – Grupa srednjeg rizika otkaza u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: vodič niti (F1).

III GRUPA – Grupa niskog rizika otkaza u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: kočnica kalemova (F4).

*Tabela 6.28. Broj ukupnih otkaza na sastavnim komponentama analiziranog sklopa na kojima nisu sprovedeni postupci tehnologije preventivnog održavanja i na onima na kojima su sprovedeni intervali remonta*

R.B.	Naziv sastavne komponente sklopa	Broj otkaza sastavnih komponenti na kojima nisu sprovedeni postupci tehnologije preventivnog održavanja	Broj otkaza sastavnih komponenti na kojima su sprovedeni postupci tehnologije preventivnog održavanja
1.	Vodič niti (F1)	21	20
2.	Držač kalema (F2)	114	92
3.	Kočnica kalema (F4)	2	2

Na ovaj način moguće je sprovesti tehnologiju preventivnog održavanja na sastavnim komponentima sklopa kao i njihov pravilan remont.

Na osnovu rangiranja prema vrednostima otkaza sastavnih komponenti analiziranog sklopa, dobijene su grupe rizika. U njima su svrstane komponente prema broju nastalih otkaza čime u analizi sigurnosti funkcionisanja treba vršiti češća merenja na mernim mestima koja obuhvataju rad navedenih komponenti.

## 6.5.2. PREDVIĐANJE POUZDANOSTI LEŽAJA NA MAŠINSKIM SISTEMIMA

Pomoću binarne logističke regresije ispitali smo da li procenjena vrednost  $y_j$ , odnosno njena apsolutna vrednost  $|y_j|$ , zaista utiče na pojavu otkaza na ležajevima. Rezultati su izneti u nastavku teksta.

U tabeli 6.29. vrednost  $r$  predstavlja koeficijent korelacije (meru povezanosti) između parametra  $|y_j|$  i pojave otkaza. Vrednost Sig je oznaka za signifikantnost, i ona predstavlja rezultat testa o postojanju korelacije (povezanosti). Te vrednosti računa program SPSS v.17.0 (Statistical Package for Sciences).

### Korelacija

Tabela 6.29. Korelacija apsolutne procenjene vrednosti  $|y_j|$  i pojave otkaza

		Apsolutne - procenjene _vrednosti	Otkaz
Apsolutne – procenjene vrednosti Sig. (2-sledi)	Pirsonova korelacija	1	,627**
	N	33	33
Otkaz Sig. (2-sledi)	Pirsonova korelacija	,627**	1
	N	33	33

\*\*Korelacija je značajna na nivou od 0,01 (2-sledi).

Postoji jaka pozitivna korelacija između  $|y_j|$  i pojave otkaza na ležajevima ( $r = 0,627$  i  $\text{Sig} < 0,05$ ). Uslov za korišćenje binarne logističke regresije je zadovoljen. Ovim smo dokazali da ne postoji multikolinearnost, jer u izvesnoj meri kada je nezavisna promenljiva linearne funkcije druge nezavisne promenljive, multikolinearnost će se desiti po logističkoj regresiji kao što se dešava u linearnoj regresiji.

### Klasifikacija tabele <sup>ab</sup>

Tabela 6.30. Klasifikacija otkaza

Posmatran			Predviđanja		
			Otkaz		Tačan procenat
			Radno stanje	Stanje otkaza	
Korak 0	Otkaz	Radno stanje	26	0	100,0
		Stanje otkaza	7	0	,0
Opšti procenat					78,8

a. Konstanta je uključena u model.

b. Vrednost proseka je 500

Korak	-2 Log Verovatnoća	Koks i Snel R kvadrat	Nagelkerke: R kvadrat
1	20,139 <sup>a</sup>	,345	,536

a. Procena prestaje da važi na iteraciji broja 6 jer parametar procene je promenjen za manje od 001.

### Promenjive u jednačini

Tabela 6.31. Rezultat logističke regresije

	B	S.E.	Važeći	df	Sig.	Exp(B)	95% C.I. za EXP(B)	
							Donji	Gornji
Korak 1 <sup>a</sup>								
Apsolutne procenjene vrednosti	<b>0,02</b>	,001	7,162	1	,007	<b>1,002</b>	<b>1,000</b>	<b>1,003</b>
Konstanta	<b>-4,852</b>	1,706	8,094	1	,004	,008		

a. Promenljiva (s) stupa na korak 1: Apsolutne procenjene vrednosti.

Kao što je prikazano u datoj tabeli, procenjene vrednosti daju jedinstven statistički značajan doprinos modelu (**Sig. = 0,007 < 0,05**). Model u celini objašnjava između 34,5% ( $r^2$  *Cox-a Snell-a*) i 53,6% ( $r^2$  *Nagelkerke-a*) varijanse u statusu ležajeva.

Kako je **Exp (B) = (1,002 (1,000-1,003))** znači da sa povećanjem vrednosti  $|y_j|$  za 1 šansa da dođe do otkaza povećava se za 1,002 puta, odnosno čitava 2 promila.

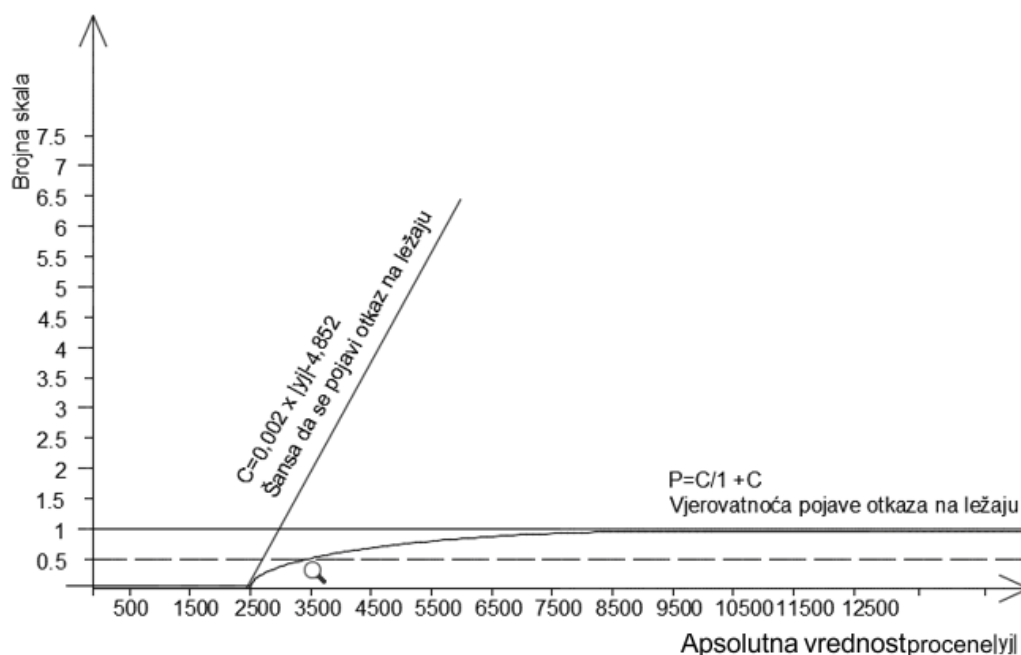
Vrednosti iz tabele 6.30. u koloni B (za promenljivu  $|y_j|$  i konstantu) koriste se za određivanje šanse da se pri datoj vrednosti za  $|y_j|$  dogodi otkaz (šansa događaja je odnos verovatnoće između dešavanja i nedešavanja događaja).

Prema ovom predviđanju-predikaciji, pouzdane pretpostavke o mogućim događajima, šansa da se pojavi otkaz na ležaju za  $|y_j| < 2450$  gotovo da ne postoje (zato što je tada  $C$  manje od nule, što je po definiciji nemoguće). Sve dok je  $|y_j| < 2950$ , šansa da dođe do otkaza na ležaju je manja od 1, što implicira da je verovatnoća otkaza manja od 50%. Kada  $|y_j|$  prelazi vrednost 2950, šansa da dođe do otkaza iznosi približno 2, što znači da je verovatnoća otkaza postala 2 puta veća od verovatnoće da se otkaz neće desiti, tj. oko 67%.

Za  $|y_j| = 4000$  verovatnoća pojave otkaza na ležaju raste do približno 76%, dok za apsolutne vrednosti parametra  $|y_j| = 6000$ , računamo šansu za pojavu otkaza po formuli  $C = 0,002 \cdot |y_j| - 4,852$ . Za  $|y_j| = 6000$ , šansa je  $C = 0,002 \cdot 6000 - 4,852 = 7,148$ . Sada je verovatnoća pojave otkaza na ležištu  $P_{(0)} = C / (1 + C) = 7,148 / (1 + 7,148) = 0,877$ , ili 87,7%. Vidimo da se verovatnoća pojave otkaza povećava na čak 87,7%.

U prethodnom delu teksta pokazano je da stanje ležaja možemo pratiti samo pomoću parametra  $|y_j|$ . Dalje smo pomoću binarne logističke regresije ispitali kako  $|y_j|$  utiče na pojavu otkaza ležaja. Exp(B) pokazuje koliko puta se povećava šansa (ne verovatnoća) za pojavu otkaza, ako se  $|y_j|$  poveća za 1. Kako je Exp(B) = 1,002, znači da se šansa za otkaz povećava 1,002 puta, ili 2 promila, kada se  $|y_j|$  poveća za jedan.

Grafički prikaz na slici 6.121. predstavlja kretanje šanse za otkaz i verovatnoće otkaza ležaja u zavisnosti od vrednosti parametra  $|y_j|$ . Verovatnoća otkaza je bitniji podatak od šanse, pa su u tekstu date neke ocene verovatnoće otkaza za specijalne vrednosti parametra  $|y_j|$ . Verovatnoća je računata preko datih formula. Na  $x$ -osi je apsolutna vrednost procene  $|y_j|$ , a na osi  $y$ -osi je brojna skala. Vrednost šanse se dobija iz formule  $C = 0,002 \cdot |y_j| - 4,852$ , a verovatnoću otkaza se dobija iz odnosa  $P_{(0)} = C / (1 + C)$ .



Slika 6.121. Grafički prikaz šanse za otkaz i verovatnoća otkaza ležaja

Određivanje korekcionih vrednosti pouzdanosti rada sastavnih komponenta analiziranog sklopa OE-predilice na osnovu eksploatacionih podataka

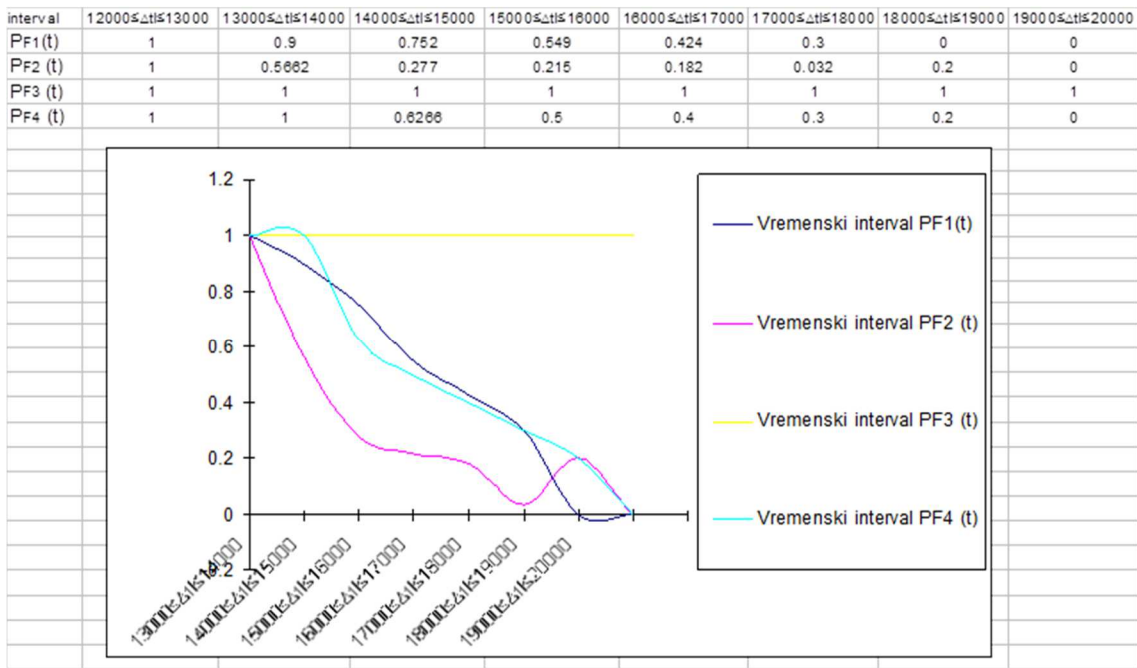
Određene eksploatacione vrednosti pouzdanosti koje izražavaju okvirne vrednosti pouzdanosti rada sastavnih komponenta analiziranog sklopa sa maksimalnom sigurnošću a za preciznije njegovo određivanje iskorišteno je određivanje njegovih korekcionih vrednosti. Ovo je imalo za cilj da se za određivanje ukupne prenosne funkcije pouzdanosti rada komponenta analiziranog sklopa dobiju što preciznije vrednosti pouzdanosti.

Korekzione vrednosti pouzdanosti iz eksploatacionih podataka prikazane su na slici 6.122., a njihove tabelarne vrednosti u sklopu prikazane slike.

Količnik empirijske funkcije gustine raspodele iz empirijskih vrednosti ( $f_e(t)$ ) i funkcije intenziteta otkaza ( $\lambda_e(t)$ ) za vremenski interval eksploatacionog rada komponenta sklopa dobije sekorekzione vrednosti pouzdanosti koje je obuhvatilo eksploataciono vreme rada sastavnih komponenti sklopa u trajanju  $12000 \leq \Delta t_i \leq 18000$  (časova) i određuje se izrazom

$$P_i(t) = \frac{f_e(t)}{\lambda_e(t)}. \quad (6.17.)$$

Korekzione vrednosti koje se dobiju daljeće poslužiti u formiranju tabela vrednosti prenosne funkcije sklopa za namotavanje kalemova gotovom pređom  $G_{NK}(t)$ , na osnovu kojih se određuju oblici krive  $f(G_{NK}(t), t)$  koja određuje oblik statističke raspodele pouzdanosti tj. od oblika krive usvaja se raspodela pouzdanosti koja najviše odgovara njenom obliku.



Slika 6.122. Dijagrami korekcionih vrednosti pouzdanosti rada komponenti analiziranog sklopa na osnovu empirijskih podataka bez primene postupaka tehnologije održavanja.

Da bismo dobili što preciznije rezultate za određivanje pouzdanosti sigurnog rada komponenti analiziranog sklopa OE – predilice, uzimaćemo korekzione vrednosti pouzdanosti. Na osnovu statističke raspodele pouzdanosti.

Na prikazanom grafiku prenosne funkcije  $G_{NK}(t)_p$  određena je statistička raspodela pouzdanosti na osnovu nje će se sprovesti dalje korekcije pouzdanosti rada sastavnih komponenti analiziranog sklopa i dobiće se vrednosti merodavne pouzdanosti.

Korekzione vrednosti pouzdanosti dobijaju se pomoću izabrane statističke raspodele pouzdanosti u obliku:

$$R_i(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2} dt. \quad (6.18.)$$

Uvođenjem smene:  $z = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{\ln t - \mu}{\sigma}$  i diferenciranjem po  $t$ ,

$$z' = \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)' = \frac{(\ln t - \mu)' \cdot \sigma - (\ln t - \mu) \cdot \sigma'}{\sigma^2} \Rightarrow$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\frac{1}{t} \cdot \sigma}{\sigma^2} = \frac{1}{t \cdot \sigma} \Rightarrow z = \frac{dt}{t \cdot \sigma}. \quad (6.19.)$$

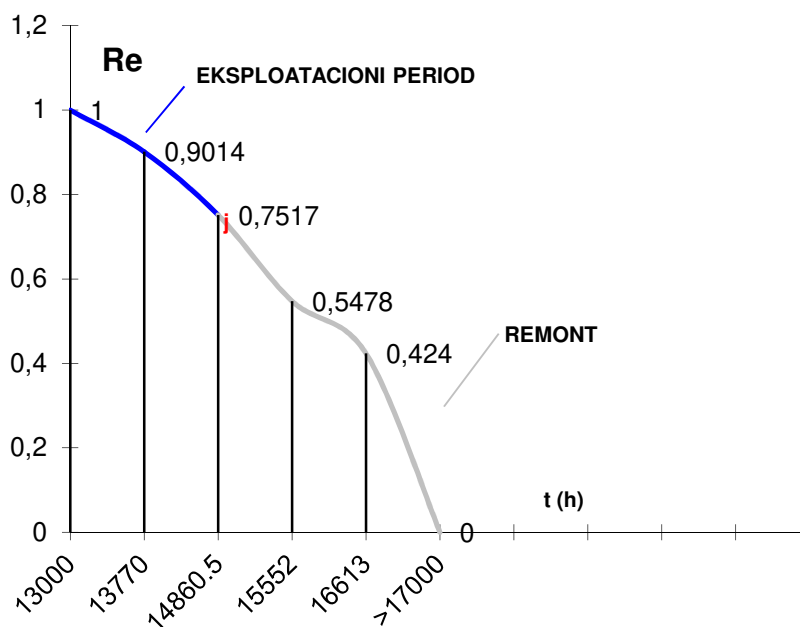
Kako je  $R_i(t) = 1 - \int_{-\infty}^z \varphi(z) dz$ , i  $\varphi(z) = t \cdot \sigma \cdot f(t)$ ; onda je konačni izraz za izračunavanje pouzdanosti rada komponenti analiziranog sklopa:

$$R_i(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = \frac{\varphi(z)}{\lambda(t) \cdot t \cdot \sigma}. \quad (6.20.)$$

Treba istaći da je  $\sigma$  standardna devijacija prirodnog logaritma, i njene vrednosti se očitavaju iz tabela za normalnu statističku raspodelu.

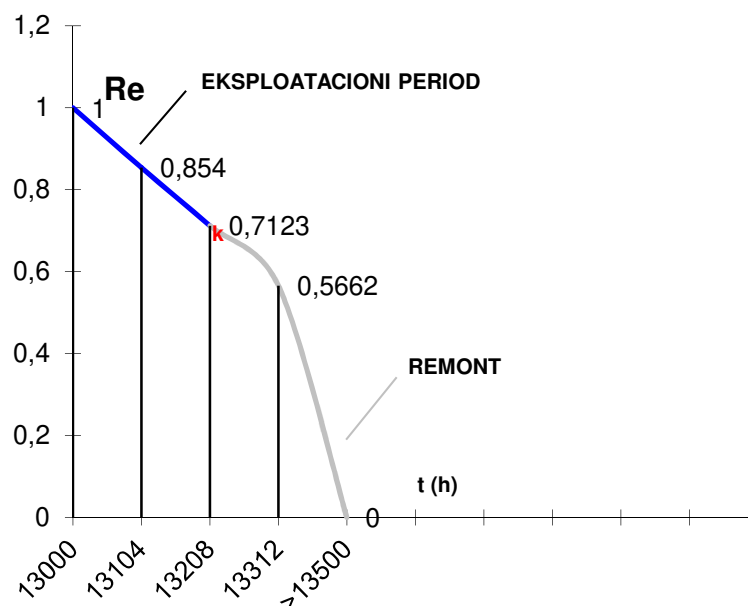
Na osnovu dobijenih rezultata pouzdanosti, konstruisaće se grafici u zavisnosti njihove pouzdanosti od vremena rada komponenti sklopa  $f(R_i(t), t)$ . Na osnovu dobijenih rezultata oblasti sigurnosti funkcionisanja, mogu se predvideti oblasti vremena sigurnog rada, vremena rada sa dozvoljenim rizikom i oblasti rada koji ukazuju na neophodnost izvođenja remonta komponenti i celog sklopa.

Dijagrami prikazanih pouzdanosti daju tačno određivanje zavisnosti ispravnog rada svake sastavne komponente kao i prevojne tačke prelaza pouzdanosti u stanje remonta (prikazi na slikama 6.123 – 6.124.).



Slika 6.123. Dijagram pouzdanosti za komponentu vodič niti – F1





Slika 6.124. Dijagram pouzdanosti za komponentu držač kalema – F2

### 6.5.3. ODRŽAVANJE MAŠINSKIH TEHNIČKIH SISTEMA

Za rešavanje problema određivanja optimalne strategije održavanja ležajeva pomoću Markova lanca, je u prethodnim poglavljima dat detaljan teorijski osvrt na problem reaktivnog (zamena po otkazu), proaktivnog (zamena i podmazivanje u određenom periodu) i prediktivnog (zamena i podmazivanje po potrebi) održavanja i gde je rešenje podržano odgovarajućim graficima<sup>56</sup>. Istraživanjem, u okviru ove disertacije, čitava grupa posmatranih ležajeva podeljena je u 3 grupe, i na svaku grupu je primenjena jedna strategija održavanja (tabele 6.32, 6.33, 6.34.).

Tabela 6.32. Ležajevi koji su održavani reaktivno

Grupa ležajeva koji su održavani reaktivno				
Redni broj	Vibracije $V$ [mm/s]	Vibracije $H$ [mm/s]	Vibracije $A$ [mm/s]	Teperatura $t$ [°C]
1	0,56	0,65	0,81	41
2	1,47	2,20	0,93	58
3	<b>7,09</b>	<b>10,07</b>	<b>7,27</b>	<b>77</b>
4	5,73	7,83	6,25	71
15	<b>7,05</b>	<b>11,05</b>	<b>7,74</b>	<b>80</b>
16	5,53	<b>8,39</b>	6,90	72
19	<b>7,93</b>	<b>11,59</b>	<b>7,15</b>	<b>75</b>
23	<b>7,17</b>	<b>8,83</b>	<b>10,77</b>	<b>73</b>

<sup>56</sup>Prvulović S., Tolmač, D. : Održavanje u modernoj industriji i zadaci menadžmenta održavanja

Tabela 6.33. Ležajevi koji su održavani proaktivno

Grupa ležajeva koji su održavani proaktivno				
Redni broj	Vibracije $V$ [mm/s]	Vibracije $H$ [mm/s]	Vibracije $A$ [mm/s]	Teperatura $t$ [°C]
5	0,88	1,05	0,95	53
6	1,75	2,09	2,51	62
7	5,53	5,37	7,89	66
8	<b>9,79</b>	<b>10,26</b>	<b>8,32</b>	<b>82</b>
17	0,45	0,39	0,36	49
18	0,85	1,52	0,73	52
22	0,89	0,80	0,82	50
24	5,35	7,61	4,71	67
29	0,14	0,11	0,17	35
30	0,15	0,17	0,22	37
31	0,18	0,36	0,49	48
32	1,70	3,29	2,19	63
33	<b>2,60</b>	<b>2,94</b>	<b>4,07</b>	<b>75</b>

Tabela 6.34. Ležajevi koji su održavani prediktivno

Grupa ležajeva koji su održavani prediktivno				
Redni broj	Vibracije $V$ [mm/s]	Vibracije $H$ [mm/s]	Vibracije $A$ [mm/s]	Teperatura $t$ [°C]
9	0,75	0,67	1,00	42
10	0,69	0,45	0,44	39
11	5,06	7,21	5,02	65
12	5,19	<b>8,00</b>	5,75	68
13	0,60	0,67	0,57	41
14	0,98	1,31	0,83	55
20	6,10	7,44	5,49	<b>70</b>
21	0,51	0,62	0,54	40
25	0,99	1,09	1,46	56
26	2,54	1,87	1,67	61
27	<b>6,72</b>	<b>3,71</b>	<b>3,40</b>	<b>79</b>
28	1,99	3,20	<b>4,41</b>	65

Matrice verovatnoće prelaska (metoda iteracije o strategijama) za svaku od strategija određujemo za  $P^1$  – reaktivno,  $P^2$  – za proaktivno,  $P^3$  – za prediktivno održavanje. Rezultati su dobijeni na osnovu navedenih istraživanja.

$$P^1 = \begin{pmatrix} 0,25 & 0,75 & 0 \\ 0 & 0,33 & 0,67 \\ 0,5 & 0 & 0,5 \end{pmatrix} P^2 = \begin{pmatrix} 0,38 & 0,62 & 0 \\ 0,375 & 0,375 & 0,25 \\ 0,5 & 0 & 0,5 \end{pmatrix} P^3 = \begin{pmatrix} 0,33 & 0,67 & 0 \\ 0,375 & 0,25 & 0,375 \\ 0,33 & 0,67 & 0 \end{pmatrix}$$

Za određivanje optimalne strategije održavanja dijagnostikovanih ležajeva, potrebno je oceniti i troškove koje svaka od strategija iziskuje. Nažalost, rešenje ovog problema je nemoguće bez analize finansijskih podataka. U sadašnjem vremenu u većini preduzeća, pristup tim podacima se ograničava. Cene i troškovi se razlikuju od firme do firme i jako

je teško naći neke uopštene vrednosti. U ovoj doktorskoj disertaciji će biti korištene cene do kojih je autor došao u organizacijama u kojima je istraživao problem naznačen u ovoj doktorskoj disertaciji. Slični podaci navedeni su u literaturnim izvorima.

Troškovi održavanja (podmazivanja i sl.) – 4 evra po komadu na godišnjem nivou.

Troškovi redovne zamene – 11 evra po komadu na godišnjem nivou.

Troškovi vanredne zamene – 16 evra po komadu na godišnjem nivou.

Na osnovu navedenih podataka, dobijamo matricu troškova (metoda iteracije o strategijama) za svaku od navedenih strategija:  $R^1$  – za reaktivno,  $R^2$  – proaktivno,  $R^3$  za prediktivno tehničko održavanje.

$$R^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 16 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad R^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 4 & 4 & 4 \\ 11 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

Formalizujući moguće stacionarne strategije održavanja, u tabeli 6.35. su prikazane strategije. U tabeli TO se predstavlja (tehničko održavanje).

Tabela 6.35. Stacionarne strategije održavanja

Strategija, S	Vid TO	Dejstva
1	Reaktivno	Eksploatacija do otkaza bez TO
2	Proaktivno	Planska eksploatacija bez TO
3	Prediktivno	Eksploatacija korištenjem TO

Vođen koracima algoritma optimalne strategije, u disertaciji su date izračunate vrednosti za tražene parametre, za svaku od strategija očekivani prihod  $v_i^S$  i ograničavanje verovatnoće prelaza  $\pi_i^S$ , pomoću kojih su tražene vrednosti dobijene. Rezultati izračunavanja su prikazani u tabeli 6.36. pri čemu indeksi S = 1,2,3 označavaju – broj strategije održavanja, i = 1,2,3 – broj stanja.

Tabela 6.36. Rezultati strategije

Strategija S	Očekivani troškovi			Stacionarne verovatnoće		
	$v_1^S$	$v_2^S$	$v_3^S$	$\pi_1^S$	$\pi_2^S$	$\pi_3^S$
1	0	0	6	0,27	0,31	0,42
2	0	4,125	5,5	0,403	0,398	0,199
3	0	4	6,31	0,36	0,46	0,18

Parametri  $v_i^S$  u tabeli dobijeni su pomoću formule  $v_i^S = \sum_{j=1}^m p_{ij}^S r_{ij}^S$ , dok su parametri  $\pi_i^S$  dobijeni iz sistema matričnih jednačina:

$$\begin{cases} \pi^S P^S = \pi^S \\ \pi_1^S + \pi_2^S + \dots + \pi_m^S = 1 \end{cases} \quad (6.21.)$$

Za svaku od strategija izračunati su očekivani troškovi  $E^1, E^2, E^3$

Sada, pomoću formule matematičkog razbijanja  $E^S = \sum_{i=1}^m \pi_i^S v_i^S$  dobijamo očekivani rashod za svaku strategiju pojedinačno ( u evrima po ležaju), tj.  $E^1 = 3,36 \text{ €}$ ;  $E^2 = 2,74 \text{ €}$ ;  $E^3 = 2,97 \text{ €}$ .

Najbolja strategija navedene matrice prelaska biće ona koja minimizira troškove održavanja. U ovom slučaju, to je druga strategija proaktivnog održavanja. Ekonomska opravdanost izbora sistema pri ovim cenama je najbolja i iznosi 2,74€.

Veliki broj radova posvećenih pitanjima utvrđivanja ekonomske efikasnosti sprovođenja i korištenje metoda vibracione dijagnostike, predstavljaju najbolji dokaz. Prema tome, komparativna analiza različitih metoda održavanja rotirajuće opreme, prema podacima Udruženja otvorenog sistema informacija o Sistemu stanja mašina „MIMOSA“, pokazala su, da su specifični troškovi na tehničko održavanje u energetsom sektoru SAD napravljeni u 1988. godini po jedinici energije kapaciteta (KS – konjska snaga), odnosno:

- \$ 18 po *KS* – pri radu opreme do izlaska iz stroja
- \$ 13 po *KS* – pri održavanju po propisima
- \$ 9 po *KS* – pri održavanju po tehničkom stanju i
- \$ 6 po *KS* – pri proaktivnom održavanju

Dakle, pravilna primena metoda i sredstava vibracione dijagnostike omogućava prelazak iz održavanja u skladu sa propisima (plansko) da bismo proaktivno smanjili troškove na tehničko održavanje više od 2 puta.

## 7.0. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

### 7.1. PRIKAZ NORMATIVA ZA REZULTATE ISTRAŽIVANJA

Međunarodni standard ISO 10816-5 i normativima VDI 2056 – Grupa G se odnose na ocenu stanja na bazi ukupnog nivoa apsolutnih vibracija sa ležajeva hidroagregata<sup>57, 58, 59, 60, 61, 62</sup>.

Kriterij (ISO 10816-5)

Magnituda vibracija je određena brzinom promene amplitude. Prema standardu ISO 10816-5, postoje dva osnovna kriterija: Kriterijum I: magnituda vibracija mora da ostane ispod određenog limita, Kriterijum II: iznenadne promene magnitude vibracija, čak i kad specificiranog limita nisu prekoračene, a mogu ukazati na neku štetu ili nepravilnost.

Kriterijum I: Magnitude vibracija kod nominalne brzine obrtaja u stacionarnom načinu rada su normalne u području četiri zone prikazane u tabeli ispod:

*Tabela 7.1. Četiri zone rada - ISO 10816.*

Zona A	Vibracije nove ili obnovljene turbine moraju normalno biti u ovom području.
Zona B	Smatra se prihvatljivim za bezuslovan dugotrajni rad.
Zona C	Smatra se nezadovoljavajućim za dugotrajni neprekidni rad. Stroj može da radi neki ograničeni period u ovom stanju, dok se neukaže primerna prilika za popravku.
Zona D	Smatra se dovoljno velike jačine da može prouzrokovati oštećenje stroja

*Tabela 7.2. Mašine grupe 3: Velike vertikalne mašine rotacione brzine od 60 – 1800 [ob/min] kod kojih se opterećenje sa gornjeg ležaja ne prenosi na kućište*

Granica zona	Za sve ležajeve	
	A <sub>(p-p)</sub> , [μm]	Vrms, [mm/s]
A/B	301.6	1.6
B/C	502.5	2.5
C/D	804.0	4.0

<sup>57</sup>International Standard of Organization ISO 1940-1:1986, *Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 1: Determination of permissible residual unbalance, ISO Standard 1986.*

<sup>58</sup>International Standard of Organization ISO 1940-2:1986, *Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 2: Balance errors, ISO Standard, 1986.*

<sup>59</sup>International Standard of Organization ISO 7919-1:1996, *Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation criteria — Part 1: General guidelines, ISO Standard 1996*

<sup>60</sup>International Standard of Organization ISO 11342:1994, *Mechanical vibration — Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors, ISO Standard, 1994.*

<sup>61</sup>International Standard of Organization ISO 7919-2, *Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shaft — Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min, ISO Standard, 2001*

<sup>62</sup>American Petroleum Institute, “*Special-Purpose Steam Turbines for Refinery Services*”, API Standard 612, Third Edition, 1987.

Tabela 7.3. Mašina grupe 4: Granične vrednosti za zone rada kod svih glavnih ležajeva

Granica Zone	Za noseći ležaj Vrms brzina (mm/s)	Za ostale ležajeve Vrms brzina (mm/s)
A/B	2.5	1.6
B/C	4.0	2.5
C/D	6.4	4.0

Tabela 7.4. Mašine grupe 4: Vertikalne mašine sa kojih se opterećenje sa gornjeg ležaja prenosi na kućište, brzina obrtanja 60-1000[ob/min].

Granica zona	Gornji generatorski ležaj	Svi ostali ležajevi
	A <sub>(p-p)</sub> , [μm]	A <sub>(p-p)</sub> , [μm]
A/B	652,5	301,6
B/C	1004,0	502,5
C/D	1606,4	804,0

A-Vibracije novo-vedenih mašina

B-Vibracije u ovoj zoni smatraju se prihvatljivim za neprekidan duži rad

C-Vibracije u ovoj zoni smatraju se neprihvatljivim za dugotrajni rad

D-Vibracije u ovoj zoni su nedopuštene za rad

Kriterij (ISO 7919-5)

Merenje odstupanja ose vratila u HE „Jajce I“

Radialne relativne vibracije vratila (odstupanje ose) su izmerene kod glavnog nosećeg ležaja.

Putanja rotacije vratila je prikazana u mernoj ravni pomoću kombinovanog signala dva različita davača, pomerenih za 90°. Maksimum peak-to-peak, s(p-p)max i trenutni Smax odstupanja ose vratila se mogu na osnovu vremenskog semplovanja preračunati. Obe vrednosti mogu biti iskorištene za izračun. U slučaju HE „Jajce I“ Smax i s(p-p)max se koriste za procenu relativnih vibracija vratila.

Maksimalne vrednosti preko 10 uzastopnih obrtanja vratila turbine su osrednjene u toku jedne minute kako bi se dobile odgovarajuće veličine. Izračun vrednosti izbačaja vratila je sličan izračunu vibracija ležajeva, tj. podeljen je na četiri radne zone A, B, C i D. Te zone su prikazane u dijagramu i tabeli ispod.

Područja A-B i C-D su prema standardu ISO 7919-5 podeljena u dve grupe:

Tabela 7.5. Dva glavna područja – ISO

ZonaA-B	Mašine sa magnitudama vibracija u okviru ovoga područja se smatraju prihvatljivim za neograničeno dugotrajno delovanje
ZonaB-C	Mašine u ovom području imaju povećane magnitude vibracija. Nepohodno je proveriti da li su izmerene vrednosti dopustive za dugotrajno neprekidno delovanje s obzirom na konstrukciju stroja i radni režim.

Tabela 7.6. Granične vrednosti radnih zona za  $S_{max}$  i  $s(p-p)_{max}$  na HE „Jajce I“  
( $n = 300 \text{ min}^{-1}$ )

Granicazone	$S_{max}$ pomak ( $\mu\text{m}$ )	$s(p-p)_{max}$ pomak ( $\mu\text{m}$ )
A/B	80	146
B/C	133	243
C/D	268	488

## 7.2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

### *Ocena stanja hidroagregata - Hidroagregat br.1 „Bočac“*

Nivo Apsolutnih vibracija izmeren na HA br.1

Iz tabele 6.3. i 6.4. se vidi najviša vrednost apsolutnih vibracija je  $L1 = 1.17 \text{ mm/s}$  pod opterećenjem 55MW i  $L2 = .1.68 \text{ mm/s}$  prazan hod, prelazi zonu A ali je u početku zone B (po standardu ISO 10816-5 zona A je 1,6 po VDI 1,8 a zona B je 2.5), stanje mašine se deklariše kao dobro.

### *Nivo Rotorne vibracije izmerene na HA br.1.*

Na bazi ocene rotornih vibracija iz tabele 6.5., se vidi da je nivo  $S_{max}$  izmeren na  $L1 = 178,2 \mu\text{m}$  da u odnosu na standard (ISO 7919, dio 5) granica A je  $85 \mu\text{m}$  a granica B je  $220 \mu\text{m}$  prelazi granicu A, a ne prelazi granicu B, znači pripada području B.

Stanje hidroagregata 1 se deklariše kao: DOBRO odnosno **prihvatljivo za neprekidni duži rad**. Na osnovu standarda ISO 7919 koji ocenjuje stanje mašine na osnovu rotornih vibracija, stanje hidroagregata je u klasi B i ocenjuje se kao **prihvatljivo za nesmetani dugotrajni rad**.

### *Hidroagregat br.2*

Iz tabele 6.7. najviša vrednost apsolutnih vibracija je  $L1 = 1.35 \text{ mm/s}$  pod opterećenjem 55 MW, ne prelazi zonu A (po standardu ISO 10816-5 zona A je 1,6 poVDI 1,8) stanje mašine se deklariše kao dobro.

Nivo Rotorne vibracije izmerene na HA br.2.

Na bazi ocene rotornih vibracija iz tabele 6.8.vidi se da je nivo  $S_{max}$  izmeren na  $L1 = 97,20\mu\text{m}$  da u odnosu na standard (ISO 7919, deo 5) granica A je  $85 \mu\text{m}$  a granica B je  $220 \mu\text{m}$  prelazi granicu A, a ne prelazi granicu B, znači pripada području B.

Stanje hidroagregata 2 se deklariše kao: DOBRO odnosno **prihvatljivo za neprekidni duži rad**. Na osnovu standarda ISO 7919 koji ocenjuje stanje mašine na osnovu rotornih vibracija stanje hidroagregata je u klasi A i ocenjuje se kao **prihvatljivo za nesmetani dugotrajni rad**.

### ***Ocena stanja hidroagregata - Hidroagregat br.1 Jajce I***

Iz tabele 6.10. vibracije generatorskog nosećeg ležaja Arms (mm/s) (agregat 2 ne radi)  $Anlx = 3.40$  (mm/s), (po standardu ISO 10816-5 zona B/C je 2.5 do 4.0) stanje mašine se deklariše kao dobro.

#### ***Nivo Rotorne vibracije izmerene na HA br.1.***

Na bazi ocene odstupanja ose turbinskog vratila (agregat 2 ne radi) tabele 6.19. vidi se da je nivo  $S_{max}$  izmeren  $553 \mu m$  odnosu na standard (ISO 7919, deo 5) granica C je  $310 \mu m$  za broj obrtaja 300, znači pripada području D. Stanje hidroagregata 1 se deklariše kao: DOBRO odnosno **prihvatljivo za neprekidni rad**. Na osnovu standarda ISO 7919 koji ocenjuje stanje mašine na osnovu rotornih vibracija stanje hidroagregata je u klasi D i ocenjuje se kao **nije prihvatljivo za nesmetani dugotrajni rad**.

### ***Ocena stanja hidroagregata - Hidroagregat br.2 Jajce I***

Iz tabele 6.16. vibracije generatorskog nosećeg ležaja (agregat 1 ne radi) Arms (mm/s)  $Anlx = 1.02$  (mm/s), (po standardu ISO 10816-5 zona A/B je do 1.6) stanje mašine se deklariše kao dobro.

Nivo Rotorne vibracije izmerene na HA br.1

Na bazi ocene odstupanja ose turbinskog vratila (agregat 1 ne radi) tabele 6.18. vidi se da je nivo  $S_{max}$  izmeren  $185 \mu m$  odnosu na standard (ISO 7919, deo 5) granica B je  $190 \mu m$  za broj obrtaja 300, znači pripada području B. Stanje hidroagregata 2 se deklariše kao: DOBRO odnosno **prihvatljivo za neprekidni duži rad**. Na osnovu standarda ISO 7919 koji ocenjuje stanje mašine na osnovu rotornih vibracija stanje hidroagregata je u klasi B i ocenjuje se kao **prihvatljivo za nesmetani dugotrajni rad**.

### ***Rezultati ispitivanja kod OE- predilice***

Određena su područja eksploatacionog rada i intervali remonta na osnovu konstruisanih dijagrama zavisnosti pouzdanosti od eksploatacionog vremena rada svake sastavne komponente analiziranog sklopa u slučaju odabrane statističke raspodele. Ovo je učinjeno na osnovu određivanja prvih prevojnih tačaka prelaska pouzdanosti iz linearnog oblika u zakrivljeni (parabolični) oblik. Vidljive su tačke prelaska i na osnovu njih je formirana tabela zavisnosti graničnih intervala do koje se analizira pouzdanost svake sastavne komponente (tabela 7.7.). Takođe u ovim intervalima se prati i vrednost amplituda oscilovanja na izabranim mernim mestima. Na osnovu ovih intervala u njegovim granicama, dolazimo do oblasti praćenja rada svake sastavne komponente. Dalja analiza sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti analiziranih sklopova je opredeljena u granicama ovih intervala tj. granicama praćenja njihovog rada do remonta.



*Tabela 7.7. Zavisnosti graničnih intervala do koje se analizira pouzdanost svake sastavne komponente analiziranih sklopova na kojima nisu primenjivani postupci tehnologije preventivnog održavanja*

Oznaka komponente sklopa	Oznaka prevojne tačke na dijagramu pouzdanosti $P_{t_i}$	Granična vrednost eksploatacionog vremena rada sastavne komponente $\Delta t_{g_i}$	Granična vrednost pouzdanosti za eksploataciono vreme rada sastavne komponente $\Delta p_{g_i}$
<b>SKLOP ZA NAMOTAVANJE KALEMOVA GOTOVOM PREDOM</b>			
<b>F1</b>	<b>j</b>	<b>13561</b>	<b>0,7317</b>
<b>F2</b>	<b>k</b>	<b>12208</b>	<b>0,6923</b>
<b>F3</b>		<b>&gt;18000</b>	<b>1,0</b>
<b>F4</b>	<b>l</b>	<b>13159</b>	<b>0,6919</b>

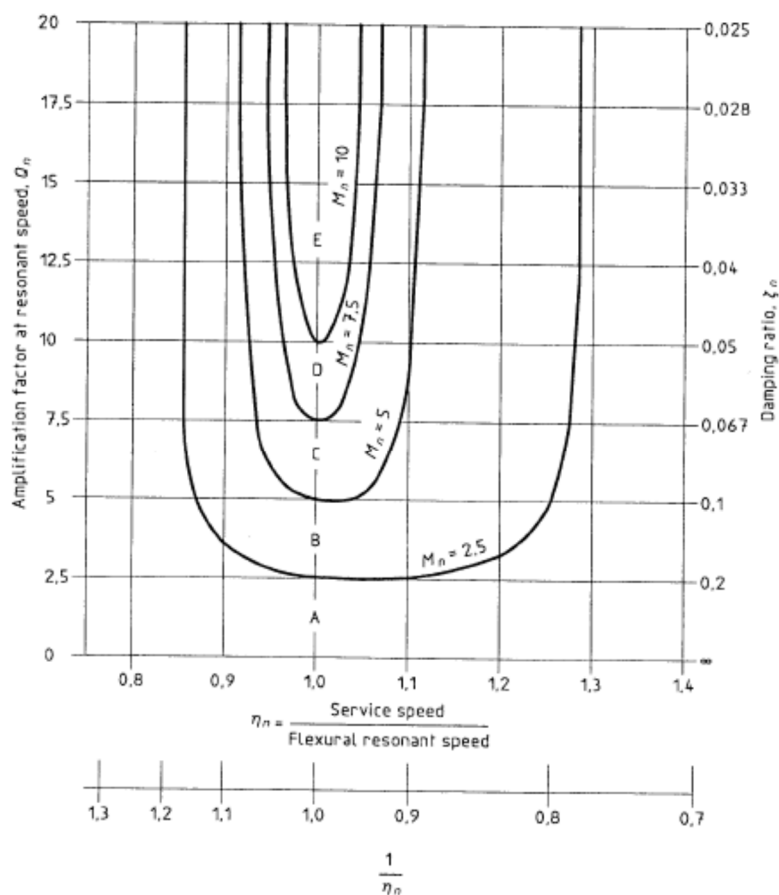
Na osnovu dobijenih dijagrama, izvršen je tabelarni prikaz (tabela 7.8.) graničnih vrednosti eksploatacionih stanja rada sastavnih komponenti analiziranog sklopa kod kojih su primenjeni postupci tehnologije preventivnog održavanja.

Na osnovu prikazanih vrednosti u tabeli 7.8., jasno su određene granične vrednosti pouzdanosti u zavisnosti od eksploatacionog rada svake sastavne komponente analiziranog sklopa. Ove vrednosti su merodavne i na osnovu njih određuje se korelacija zavisnosti pouzdanosti rada analiziranog sistema.

*Tabela 7.8. Zavisnosti graničnih intervala do kojih se analizira pouzdanost svake sastavne komponente analiziranih sklopova na kojima su primenjeni postupci tehnologije preventivnog održavanja*

Oznaka komponente sklopa	Oznaka prevojne tačke na dijagramu pouzdanosti $P_{t_i}$	Granična vrednost eksploatacionog vremena rada sastavne komponente $\Delta t_{g_i}$	Granična vrednost pouzdanosti za eksploataciono vreme rada sastavne komponente $\Delta p_{g_i}$
<b>SKLOP ZA NAMOTAVANJE KALEMOVA GOTOVOM PREDOM</b>			
<b>F1</b>	<b>J</b>	<b>13860</b>	<b>0,7486</b>
<b>F2</b>	<b>K</b>	<b>12358</b>	<b>0,7123</b>
<b>F3</b>		<b>&gt;18000</b>	<b>1,0</b>
<b>F4</b>	<b>L</b>	<b>13512</b>	<b>0,7019</b>

Istraživanje je imalo za cilj da se izvrši: procena dinamičkog stanja, osetljivosti i sklonosti rotirajućih elemenata HE, ka debalansu, kao i procenu sigurnosti funkcionisanja vratila i rotora turbinskog dela uređaja HE, sa aspekta minimalnog rizika od pojave zastoja, prema ISO 10814:1996, slika 7.1.



Slika 7.1. Grafikon za identifikaciju područja – rang (A, B, C, D, E) sklonosti/osetljivosti ka debalansu saglasno ISO 10814 : 1996

Na osnovu rezultata istraživanja, izvedena je ocena stanja dinamičkih parametara rotora, kao što je dinamičko stanje u toku starta i osetljivost i sklonost rotora ka debalansu. Na osnovu rezultata istraživanja dinamičkog stanja rotora, polazeći od zahteva kvaliteta datih u standardu ISO, identifikovano je područje A, B, C, sklonosti rotora ka debalansu. Maksimalno dozvoljene vibracije rotora HE, dvojne amplitude prilikom podizanja broja obrtaja (kritični brojevi obrtaja) hidro agregata – HA, treba težiti da što je moguće pre, preći ove obrtaje otvaranjem regulacionih ventila turbine HE.

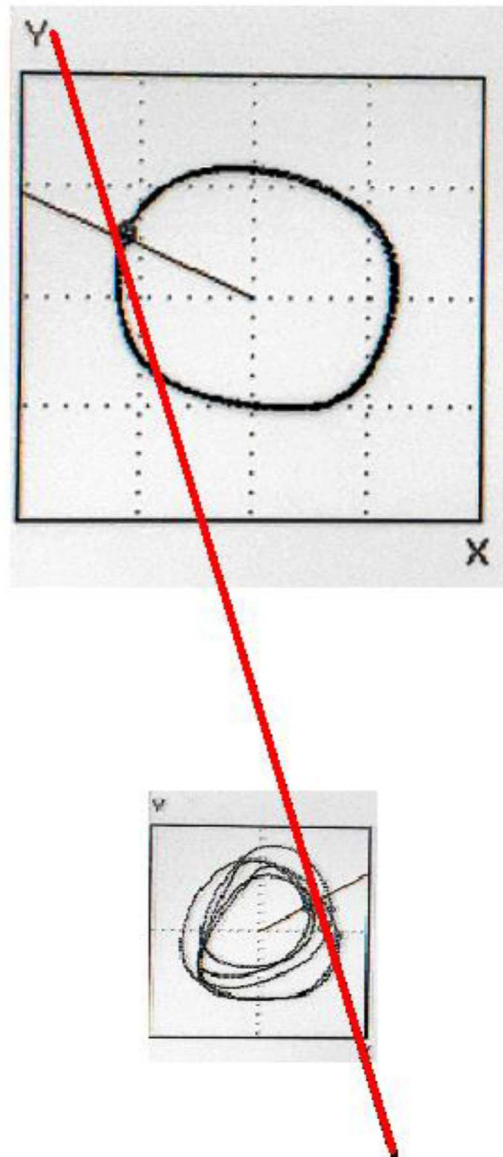
### 7.3. DISKUSIJA O REZULTATIMA ISTRAŽIVANJA

Dijagnostički nalaz sa predlogom korektivnih mera **Hidroagregat br.1 „Bočac“**

Vibraciono stanje hidroagregata br.1 nije se bitnije promenilo u odnosu na njegovo stanje od prethodnog remonta. Sistem radi dinamički stabilno i nisu uočljive neispravnosti koje bitnije utiču na ukupno eksploataciono stanje. U sistemu je uočena turbulencija proticanja, a u prelaznim režimima rada primetna je kratkotrajna uljna nestabilnost na ležajevima

hidroagregata<sup>63</sup>. Ove pojave se u principu javljaju u prelaznim režimima rada hidroagregata, tako da su kratkotrajnog karaktera. Međutim, osnovni izvor pobude u sistemu je neuravnoteženost samog rotora, uočeno analizom orbitalnih i spektralnih prikaza. Naime, dolazi do izmeštenosti geometrijske i inercijalne ose agregata i kao posledica toga uočava se prisustvo neuravnoteženosti samog rotora. Na slici 7.2. je prikazan položaj ose rotora gde je prikazana navedena izmeštenost ose. Izmeštenost ose potiče delom od jednosmernih hidrauličnih sila na turbinskom delu, a delom od male nesaosnosti u sistemu. Takođe je prisutan i mali debalans na generatorskom delu.

U principu, trebalo bi proveriti centriranost sistema i zazor na generatorskom ležaju. Ostali problemi koji mogu uticati na dinamičko stanje nisu uočeni.

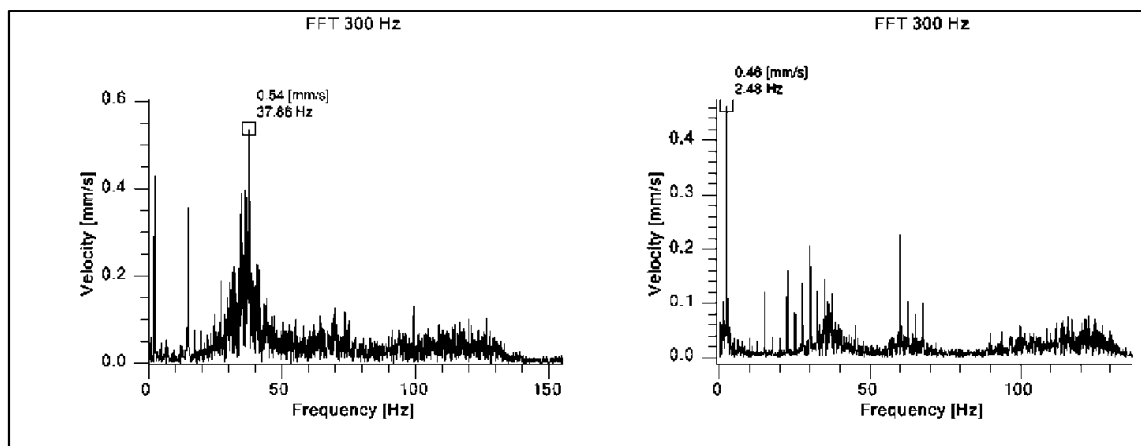


Slika 7.2. Položaj ose rotora hidroagregata br.1

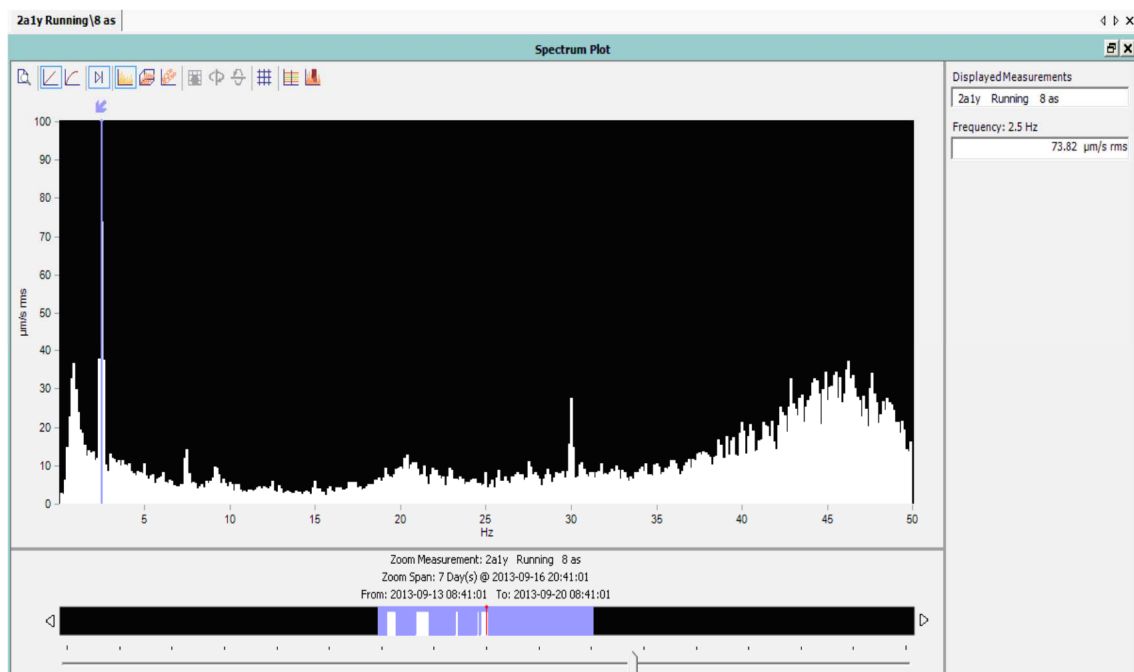
<sup>63</sup>Muszynska, A. : *One Lateral Mode Isotropic Rotor Response to Nonsynchronous Excitation: Proceedings of the Course on Rotor Dynamics and Vibration in Turbomachinery*, Karmon Institute for Fluid Dynamics, Belgium, 1992.

## Hidroagregat br.2

Posmatrajući trenutno stanje, hidroagregat se može prihvatiti za neprekidni duži rad. Nisu prisutna destruktivna dinamička stanja i njegovo vibraciono stanje se bitnije nije menjalo od predhodnog remonta. Međutim, kao i na hidrogargatu br. 1, ali ovde dosta izraženije, javljaju se hidraulični problemi izraženi kao kavitacija na turbinskom delu<sup>64</sup>. Ovi problemi su najoučljiviji u samom startu mašine. Na sledećoj slici je prikazan spektar vibracija (u praznom hodu mašine i pri opterećenju) gde se uočavaju ovi problemi.



Slika 7.3. Spektar vibracija na praznom hodu (levo) i na punom opterećenju (desno)

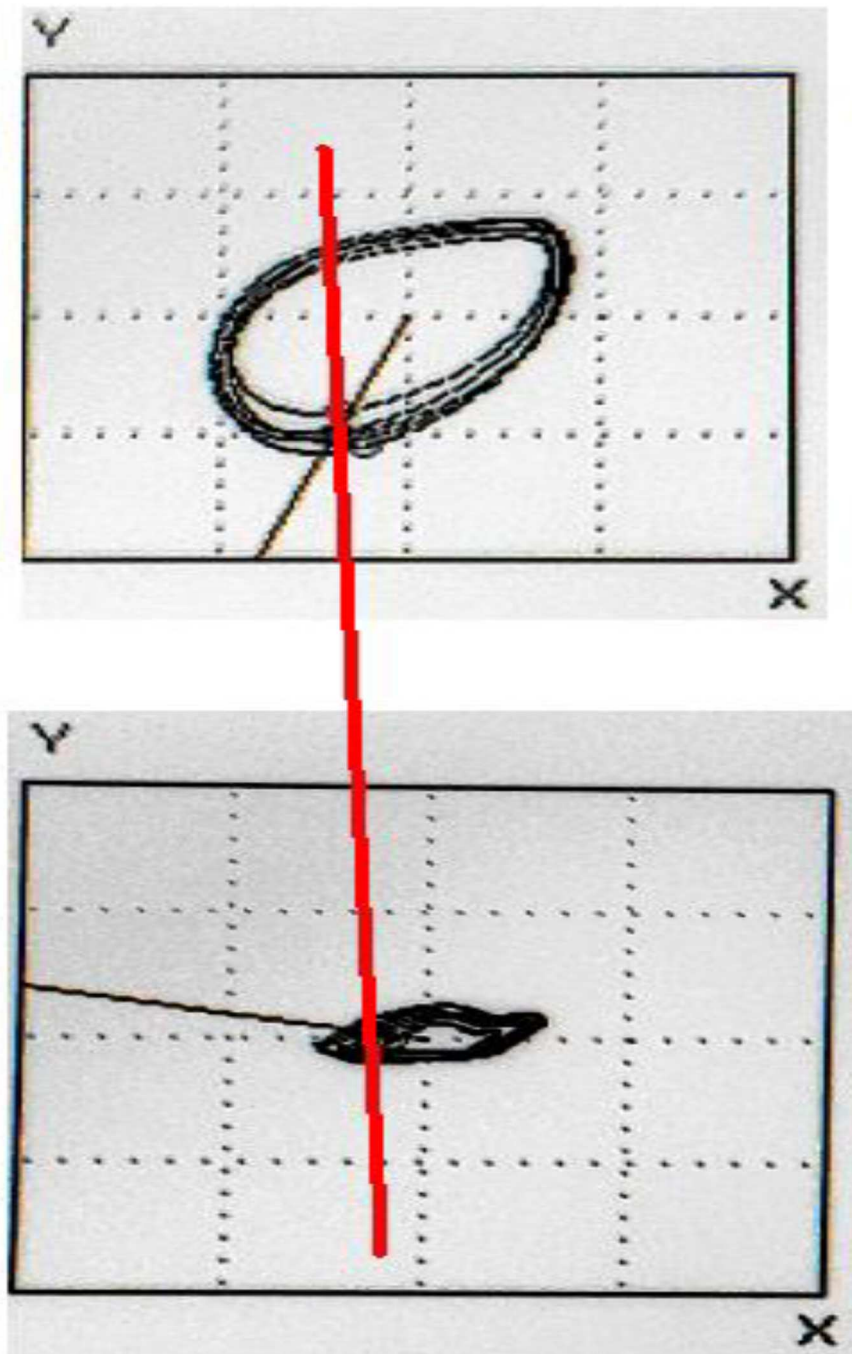


Slika 7.4. Spektralni prikaz apsolutnih vibracija sa turbinskog ležaja

<sup>64</sup>Radić R., Jurić S., *Izrada segmenata cijevne instalacije u hidrocentralama*, Društvo za energetska efikasnost Bosne i Hercegovine (RS), Časopis „Tehnička dijagnostika“,

Takođe je prisutna i mala uljna nestabilnost na turbinskom ležaju kao posledica činjenice da ukupna nosiva sila uljnog klina nije dovoljna da savlada postojanje jednosmernih sila što za posledicu ima kratkotrajni povećan nivo vibracija uglavnom u prelaznim režimima rada hidroagregata.

Tokom ispitivanja sistema uočava se malo prisustvo nesaosnosti u sistemu. Na sledećoj slici 7.5. je prikazan položaj ose rotora gde se vidi ta izmeštenost, ali ona je znatno manja nego kod hidroagregata br 1.



*Slika 7.5. Položaj ose rotora hidroagregata br.2*

## Analiza rezultata ispitivanja dinamičkih karakteristika HE“ Jajce I“ Vibracije nosećih i vodećih ležajeva

Dijagrami izmerenih amplitudnih vrednosti za sve merene ležajeve nalaze se na slikama 6.85. do 6.92.. Rezultati potvrđuju ono što je bilo ustanovljeno tokom samih merenja, a to je da je agregat 1 bio u pogoršanom mehaničkom stanju što se tiče nivoa vibracija u poređenju sa agregatom 2. Posebno se to vidi na primeru vibracija nosećeg ležaja, gde su vibracije na agregatu 1 više puta (3-4) jače nego na agregatu 2 kod istih radnih režima. Maksimalne RMS amplitude mogu na ovome agregatu dostignuti 3,40 mm/s, a na agregatu 2 do 1,02 mm/s. Ocena svih amplituda napravljena je prema standardu ISO 10816-5, sa ucrtanim granicama radnih zona na dijagramima. Granično područje nesmetanog trajnog rada (zona B) prema standardu za noseći ležaj i ovu grupu stroja iznosi 4 mm/s. Na turbinskom vodećem ležaju su razlike između agregata bitno manje, što ukazuje da izvor povećanih vibracija dolazi iz smera generatora. Nivoi svih vibracija na „boljem“ agregatu 2 su u zoni A prema standardu ISO, što važi za dobre ležajeve. Agregat 1 ima vibracije ležajeva koji su uzoni B što je prema standardu ISO još upotrebljivo za trajni rad.

Trend vibracija inače prati radni režim mašine tj. njenu snagu i na pritisak fluktuacije, zato su trendovi na dijagramima ponegde slični onima za pulzacije pritiska.

Za agregat 1 je specifično da su vibracije malo manje kada agregat 2 radi paralelno. Vibracije donjeg vodećeg ležaja su izmerene samo na agregatu 1. Čak i ovde je njihov intenzitet veoma mali tako da na agregatu 2, koji je bio mnogo mirniji nisu merene.

Spektri frekvencija u signalima vibracija u rasponu od 0 do 100 Hz su ucrtani na slikama 6.103. do 6.111.. Bazična frekvencija pobude je 5 Hz što je nominalna frekvencija obrtanja, sa višim harmonicima (10, 15,...). Ove frekvencije su izrazitije sa snažnijim amplitudama kod agregata 1. Na turbinsko vodećem ležaju takođe se vidi jaka amplituda kod frekvencija 85 Hz što se poklapa sa frekvencijom broja lopatica rotora kod rotacije:  $17 \cdot 5 \text{ Hz} = 85 \text{ Hz}$ .

### Odstupanje ose turbinskog vratila

Dijagrami izmerenih  $S_{max}$  i  $S_{p-p}$  vrednosti za sve merne tačke nalaze se na slikama 6.93 do 6.95.. Orbite putovanja za 10 obrtaja turbinskog vratila za izabrane specifične radne režime ucrtane su na slikama 6.96. do 6.98.

Vrednosti  $S_{max}$  na turbini 1 su veoma povećane i mogu da dostignu čak više od 500  $\mu\text{m}$ . To znači da su već u području D prema standardu ISO 7919-5, gde mašina ne sme da radi. Ovakve povećane vibracije su vidne kroz celi raspon merenih protoka. Agregat 2 poseduje mnogo manje relativne vibracije turbinskog vratila, većina  $S_{max}$  vrednosti je u zonama A i B primernih za nesmetan dugotrajan rad. Povećane su putanje vratila u području protoka između 16,5 i 22  $\text{m}^3/\text{s}$  (snage između 13 i 18 MW) zbog uticaja vrtloga u usisnoj cevi. U tom području su amplitude u zoni C prema ISO standardu, što znači da agregat u ovome području može da radi samo privremeno.

Bazična frekvencija putanja je 5 Hz, sa dodatno niskofrekventnom komponentom kod parcijalnih protoka sa frekvencijom vrtloga (1,2 – 1,4 Hz).

### Analiza rezultata ispitivanja kod OE- predilice<sup>65</sup>

Za svaku sastavnu komponentu analiziranih sklopova na osnovu grafičkog prikaza (dijagrama) oscilovanja slučajnih (stohastičkih) funkcija, mogu se odrediti vrednosti nivoa oscilacija (amplituda i frekvencija). Iz dobijenih dijagrama koji su nastali obradom podataka iz merenja, određene su veličine ekstremnih vrednosti (max. i min.) amplituda i frekvencija. Prikazi su izvršeni dijagramima i to redosledno uz svaki dijagram oscilovanja. Eksperimentalno dobijene vrednosti, korišćiće se u analizi korelacija odnosno, povezivanju zavisnosti parametara pouzdanosti rada komponenata sklopa i uticaja mehaničkih oscilacija na njihov rad. Takođe, ove vrednosti će poslužiti i u određivanju stabilnosti (analize dozvoljenog rada sa rizikom) svakog mernog mesta tj. svake konstruktivne komponente analiziranih sklopova.

### Analiza rezultata kod pumpi i turboduvaljki u livnici čelika

Za praktičnu proveru radne sposobnosti predložene metode u disertaciji je izvedeno predremontno vibraciono istraživanje pumpe, kompresora, (više od 30 ležajeva u tri preduzeća). U toku istraživanja vibracija i temperature izmerene su brzine vibracija u sva tri pravca delovanja. Nakon sprovedenih istraživanja vibracija, za vreme remonta je napravljena detekcija grešaka ležaja.

Tabela 6.21. prikazuje rezultate merenja vibracija na 33 ležaja raznih mašina na kraju sezone. Za svaki od 33 ležaja na osnovu rezultata istraživanja vibracije (tabela 6.21.) predstavljene su vrednosti četiri dijagnostička kriterijuma i sprovedene su greške na utvrđenim ležajevima.

## **7.4. VREDNOVANJE REZULTATA ZA NAUKU I TEHNOLOŠKU PRIMENU**

Sprovedena istraživanja se mogu primeniti na svim drugim tehničkim sistemima ili elementima kod kojih postoji izraženost vibracija usled obrtnog kretanja nekog mašinskog elementa.

Rezultati su pokazali da je pojava vibracija veoma štetna za tehnički sistem, što ukazuje na potrebu konstrukcijskog poboljšanja tehničkih sistema u početnoj fazi životnog ciklusa i preventivno otklanjanje uzročnika vibracija. Navedenim primerima teško se mogu iscrpeti sve raznovrsnosti brzinskih, režimskih i konturnih karakteristika. Predložene metode detektovanja uzročnika vibracija takođe nisu iscrpljene. Dalja teorijska razrada identifikovanja uzročnika vibracija će se menjati i usavršavati.

Na bazi datih vrednosti svih parametara kao bitnih elemenata u procesu formiranja modela rizika i vibracija sastavnih komponenata posmatranih sklopova tehničkih sistema prema izabranim mernim mestima izvršena je analiza modela sigurnosnog funkcionisanja rada istih.

Definisanjem, a ujedno i primenom modela na izabrana merna mesta za određivanje temperature i pohabanosti ležajeva, izvršeno je povezivanje modela u strukturni blok

---

<sup>65</sup> Jurić S., Radić R., Blaženović R. Value analysis of workereliability of integral parts of a circuit forcoil winding with finished yarn of oe –spinning machine from the aspect of technology of maintenance, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA)

dijagram. Analitičkim pristupom određeni su matematički izrazi koji obuhvataju lokaciju mernih mesta kao i njihovo međusobno povezivanje na osnovu strukturnih šema.

Proučavanjem modela rizika i vibracija možemo uočiti do kojih graničnih vrednosti komponente sklopova u procesima eksploatacije mogu imati ispravan i siguran rad. Konstruisane granične krive određuju zavisnost frekventne sigurnosti u funkciji eksploatacionog rada komponenti sa dozvoljenim rizikom – optimalni rad analiziranih sklopova<sup>66</sup>.

Osnovu svoje opravdanosti ovo istražavanje ima u analizi koja obuhvata povećanje optimalne vrednosti rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane za približno 15% u odnosu na prvobitno postojeće stanje rada istih.

Glavni naučni doprinos ovog istraživanja ogleda se u izvršenoj analizi parametara koji se koriste u modelu rizika i vibracija prilikom određivanja stanja sastavnih komponenta sklopova kao i u uticaju mnogobrojnih faktora koji se koriste u konačnom definisanju modela. Društvena opravdanost predstavlja razvoj modela iz najboljeg parametra, a njegova primena u teoriji i organizaciji izvodi se praktično sa primenom tehnike preventivnog održavanja. Tako se, kao krajnji rezultat, javljaju znatne uštede na komponentama sklopova nad kojima ja vršeno ispitivanje i na osnovu svega dobijena optimalna vrednost stanja istih.

Rezultati istraživanja pokazuju da sistemi, koji su bili predmet istraživanja, sa aspekta analize rizika i vibracija tehničkih sistema, održavanje ide u korak sa novim tehnološkim promenama zbog čega je stepen otkazivanja rada mašina relativno mali. To, naravno, pozitivno utiče na stepen produktivnosti rada celog proizvodnog sistema.

Takođe, u tehničkim sistemima koji su bili predmet istraživanja nije, nažalost primetan trend održavanja tehničkih sistema na principima reinženjeringa, odnosno ovaj trend nije primetan u izraženom obimu i intezitetu. Sa druge strane, tehnički sistemi koje svoj sistem održavanja inoviraju u smislu primene principa reinženjeringa i konstantnog merenja indikatora performansi u celini pa tako i sistem održavanja izmeren je značajno veći obim i intezitet rada i pouzdanosti.

U narednom periodu hidroagregati „Bočac“ ne zahtevaju neke intervencije, stanja su dinamički stabilna i ne mogu se očekivati neki neželjeni efekti. Očigledno je da se na oba hidroagregata u kratkim vremenskim intervalima javljaju hidraulični problemi povezani sa turbulencijom proticanja i uljnom nestabilnošću. Ovo je posledica turbulentnog kretanja vode na lopaticama turbine i postojanje jednosmernih sila koje pomeraju osu rukavca u ležaju u njen nestabilan položaj.

Ova nestabilnost još uvek ne izaziva neka veća destruktivna stanja i potrebe za intervencijom. Kod oba hidroagregata, postoji izmeštenost geometrijske ose i za posledicu ima neuravnoteženost izraženiju na hidroagregatu br.1. U nekom od kraćih zastoja, trebalo bi proveriti zračnost ležaja L1 i saosnost sistema. Tokom pregleda COMPASS dijagnostičkog sistema, bili su prisutni alarmi upozorenja: sa merenja

---

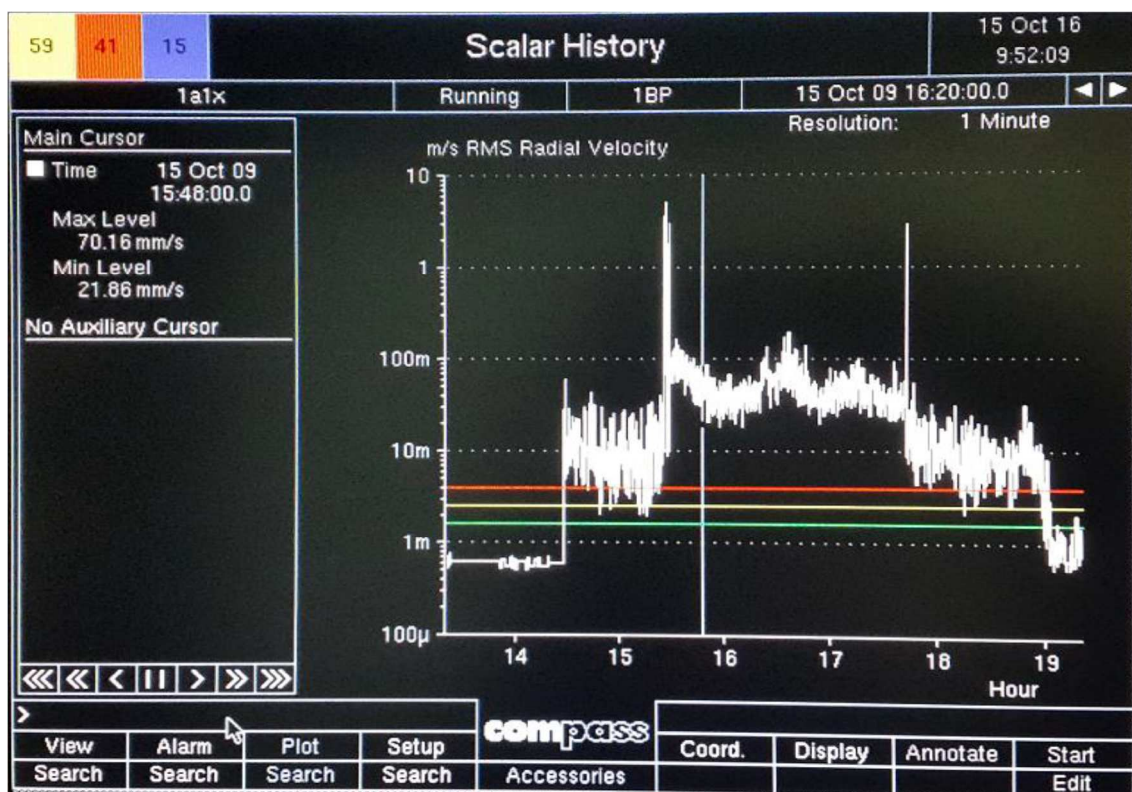
<sup>66</sup>Jurić S., Radić R., Adamović Ž., Kenjić Z., Troškovi održavanja postrojenja u elektroprivredi, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 3-4 od 2014.



apsolutnih vibracija 2a2x i alarm isključenja sa merenja 1a1x, što je prikazano na sledećim slikama.

Analizom merenja jasno se uočava da je alarm sa merenja 2a2x trajao svega nekoliko sekundi i da na ostalim sensorima nisu bile uočljive promene u tom periodu, što navodi na zaključak da je to posledica trenutne strujne pobude samog senzora, a ne posledica postojanja neispravnosti u radu hidroagregata. Alarm 1a1x je trajao 4 sata a takođe se ponavljao i u predhodnom praćenju stanja sistema. U tom periodu ostali senzori nisu zabilježili nikakvu promenu stanja što navodi na neispravnost merenja tog senzora u tom periodu. U ovom slučaju, najverovatnije, radi se o neadekvatnom postavljanju samog senzora, tako da postoji nepouzdanost ovog merenja. Svakako da sistem treba i dalje kontinuirano nadzirati. Ukoliko se pojavi neka veća promena dinamičkog ponašanja, veća od 25%, trebalo bi uraditi dublju dijagnostičku analizu.

Ovakvu sveobuhvatnu analizu vibracionog stanja neophodno bi bilo uraditi pre remonta naredne godine.



Slika 7.6. Prikaz merenje nivoa vibracija sa turbinskog ležaja na hidroagregatu br.1

### Stanje hidroagregata „Jajce I“

Dinamičke karakteristike agregata 1 su bitno pogoršane, posebno odstupanje ose turbinskog vratila. Rezultati potvrđuju da su vibracije u poređenju sa agregatom 2 nekoliko puta veće, a posebno zabrinjavajuće što se nalaze u području D. Ustanovljeno je da je agregat 1 u pogoršanom mehaničkom stanju zbog kvara nosećeg ležaja. Ocena svih amplituda napravljena je prema standardu ISO 10816-5, sa ucrtanim granicama radnih zona na dijagramima.

Za agregat 1 je specifično da su vibracije malo manje kada agregat 2 radi paralelno.

Odmah posle konstantnog ispitivanja isključen je agregat 1 iz rada. Posle konstantnog ispitivanja, vršeno je dodatno ispitivanje od strane Turbo instituta, gde su rezultati potvrđeni. Odmah iza 22.05. 2015. počeo je vanredni remont agregata 1, zamena nosećeg ležaja i provere ostalih elemenata u sklopu agregata 1. Po završetku vanrednog remonta na agregatu 1, došlo se do novog dinamičkog stanja koje je u području A.

Dinamičko stanje agregata 2 je normalno.

Agregat može da radi trajno i neprekidno. Jedina primedba je da je dobro izbegavati dugotrajni rad u području delimičnih protoka između 16,5 i 22 m<sup>3</sup>/s (snage između 13 i 18 MW) zbog povećanih relativnih vibracija turbinskog vratila (odstupanje ose) koji su posledica hidrauličkih nestabilnosti, odnosno oscilacija pritiska (vrtloženja) u usisnoj cevi.

### **Stanje rada OE predilice**

Na osnovu rezultata iz oblasti sigurnosti funkcionisanja sistema, mogu se predvideti oblasti vremena sigurnog rada, vremena rada sa dozvoljenim rizikom i oblasti rada koja ukazuju na neophodno izvođenje remonta komponenti ili celog sklopa.

Broja otkaza nastalih usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija na sastavnim komponentama analiziranog sklopa OE – predilice u posmatranom vremenu eksploatacije je pokazala da su se prvi otkazi pojavili oko 12 000 (h) njihovog rada i to na sastavnim komponentama na kojima nisu sprovedeni postupci tehnologije preventivnog održavanja i blizu 14 000 (h) rada na onima na kojima su ovi postupci sprovedeni. Na sastavnoj komponenti zatezač/podizač kalema (F3) nije dolazilo do njihovog otkaza u radu ni posle 18 000 (h) pa su ove sastavne komponente pokazale maksimalnu pouzdanost.

### **Stanje rada pumpi-kompresora u livnici**

Stanje ležajeva može se pratiti pomoću binarne logističke regresije koja pokazuje koliko utiče procenjena vrednost  $y_j$  na pojavu otkaza. Svaki ležaj čija procenjena vrednost  $y_j$  iznosi veće od 2 299,8951 može se smatrati ležajem koji otkazuje, a vrednost  $y_j$  manja od 1 040,871 smatra se da ležaj radi normalno. Povećanje  $y_j$  za 1 povećava se šansa za otkaz za 2 promila. Ovo je pokazalo da od 33 ispitivana ležaja imamo 17 koji rade normalno, 9 u predotkaznom stanju i 7 ležajeva koji su u stanju otkaza.

## 8.0. ZAKLJUČAK

U disertaciji su izvršena teorijska i eksperimentalna istraživanja tehničkih sistema Hidroelektrane „Bočac“ i „Jajce I“, kao i drugih tehničkih sistema. U teorijskim istraživanjima proučavane su savremene metode koje se bave prepoznavanjem tipa funkcije pouzdanosti, a mogu se efikasno primeniti u oblasti pouzdanosti i upravljanju tehničkim sistemima.

U eksperimentalnom istraživanju korištene su metoda paralelnih grupa, praćenje signala i izvršne funkcije na vertikalnoj Francisovoj turbini, a prema dnevniku i izloženim algoritmima. Na osnovu dobijenih rezultata izvedeni su parcijalni i globalni zaključci, a upoređivanje vršeno na više tehničkih sistema: Hidroelektrana „BOČAC“ i „JAJCE I“, rotaciona predilica u tekstilnoj industriji, te pumpe i turboduvaljke u livnici čelika.

Blagovremena saznanja o oštećenju mašinskih delova (noseći ležaj na agregatu 1 „Jajce I“) omogućavaju korisniku da zameni te delove ili sklopove u toku vanrednog remonta, čim se mogu izbeći neplanirani i često veoma skupi zastoji usled iznenadnih otkaza ili u najgorem slučaju havarije. Identifikacijom uzročnika vibracija hidrogeneratora ispunjeni su osnovni zahtevi koji su bili postavljeni predmetnim istraživanjem:

- Ocena vibracionog stanja hidrogeneratora na osnovu modela rizika
- Određivanje kritičnih sastavnih delova postrojenja sa aspekta nivoa vibracija
- Određivanje potrebnih metoda i postupaka za povišenje nivoa pouzdanosti energetskih postrojenja
- Kvalitetno ukupno planiranje vremena „u radu“
- Otklanjanje povišenog nivoa vibracija hidrogeneratora

Samo prikupljanje podataka je kompleksan proces. Potrebno je više instrumenata koji su povezani u jednu celinu, kao što su: dinamički analizator signala, vibrometar, vibroport, beskontaktni senzor, indikator broja obrtaja, 16 kanalni rekorder itd. kao i softverski paket koji obrađuje i prikazuje obrađene podatke. Najbitnije je obučen kadar. Mora se voditi računa o pravilnoj akviziciji signala, što podrazumeva: pravilno postavljanje senzora, obezbeđivanje pravilnog napajanja i kalibriranja; odabir akvizicionog uređaja koji simultano prikuplja signale, ograničava frekventni opseg i obezbeđuje odgovarajuću brzinu uzrokovanja i rezoluciju, te računar sa softverskim paketom.

Novi industrijski reinženjering se zasniva na intezivnoj primeni IT i redizajniranju već primenjenih poslova u procesu održavanja tehničkih sistema. Treba ga shvatiti kao novi pristup u održavanju tehničkih sistema, zasnovan na naučnim metodama i tehnikama. On usavršavanjem postojećih metoda i primenjenih metoda održavanja zahteva analize i nove pristupe u procesu stalnog usavršavanja. Održavanje tehničkih sredstava na principima reinženjeringa ne rešava tekuće probleme, nego se vrše sveobuhvatne analize u cilju usavršavanja postojećih metoda održavanja. Sve to uz primenu aktuelnih naučnih i stručnih spoznaja iz domena razvoja tehnike uopšte, a uz aktivnu primenu informatičkih tehnologija, čime se zapravo stvaraju uslovi za efikasnije poslovanje tehničkih sistema kao celine.

Razmatranja u ovoj disertaciji su osnovnu pažnju posvetila primeni vibrodijagnostike prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti koja se može okarakterisati ili kao klasifikacija nekih signala ili kao klasifikacija geometrijskih oblika. Taj se problem svodi na

prepoznavanje signala u smislu da li pripada klasi signala snimljenih na ispravnom ili neispravnom sistemu. Upravljanje održavanjem na bazi rizika usmerava se pre svega na preventivno održavanje prema stanju, i to posebno na obavljanje tehničkih pregleda konkretnih sredstava, odnosno na donošenje odluka šta, gde, kada i kako treba vršiti održavanje.

Upravljanje procesima promene stanja i održavanja energetskih postrojenja na bazi rizika svodi se na optimizaciju dinamike (učestalosti) i obima sprovođenja postupaka održavanja, prema nekom od kriterijuma. Najčešće je to kriterijum minimalnih troškova i maksimalne gotovosti, kao i kriterijum "minimalnog rizika". To se postiže stalnim praćenjem stanja postrojenja i izvođenjem procesa održavanja u svim fazama životnog ciklusa. Metode održavanja na bazi rizika nisu zamena za "tradicionalne" metode održavanja, već suštinski predstavljaju njihovu važnu i korisnu dopunu.

Glavna hipoteza istraživanja da je formirani model rizika i dijagnostike stanja tehničkog sistema stvorio potencijalne mogućnosti povećanja pouzdanosti sistema i raspoloživosti u radu, je dokazana.

Istraživanje koje je sprovedeno na primerima HE „Bočac“ i HE „Jajce I“, i drugim tehničkim sistemima, potvrdilo je hipotezu o korisnoj primeni stohastičkih modela u procesu donošenja odluka u prepoznavanju oblika pouzdanosti i smanjuju rizika od zastoja tehničkog sistema na najmanju moguću meru. Buduća istraživanja problematike pouzdanosti tehničkih sistema postrojenja treba usmeriti u pravcu novih naučnih i tehničkih dostignuća primenom osnovnih ideja modelovanja neuronskih mreža, sa pregledom najznačajnijih alata modela.

SCADA (engl. Supervisory Control And Data Acquisition) je programski sistem prikupljanja podataka za upravljanje tehnološkim procesom. Odabrani SCADA sistem ABB Network Manager (ranije poznat pod nazivom ABB Spider), namenjen je za velike nadzorno upravljačke centre i predstavlja okosnicu svih aplikacija novog dispečerskog centra. SCADA modul se koristi za izvršavanje svih operacija na mreži, nezavisno da li se izvode automatski u Centru upravljanja ili na udaljenim lokacijama, odnosno putem daljinskih stanica ili ručno, od strane posade ili servisne ekipe.

Napredna svojstva dostupna su na više različitih područja delovanja uključujući: rad sa sistemom i beleženje sistemskih događaja; obrada događaja i alarma; praćenje trendova; komunikacija i rad s daljinskim stanicama; ICCP protokol za komunikaciju između centara upravljanja; obrada istorijskih podataka, uključujući mogućnost njihovog prikazivanja na on-line prikazima; tabelarni prikazi i izveštaji upotrebom „MS Excel“ ili drugih alata upotrebom podržanih aplikacijskih interfejsa.

Otkrivanje neželjenih pojava u sistemu je vrlo sofisticirani programski algoritam kojim se na osnovu matematičke obrade svih raspoloživih podataka o tehnološkom procesu određuje činjenica nekontrolisanog stanja u sistemu. Jedna od bitnih funkcija (posebno za realizaciju look-ahead i prediktivne simulacije) je prognoziranje kretanja u kratkoročnom (narednih 24 sata) i srednjoročnom periodu (narednih 7 dana).

## LITERATURA

1. Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013 (ISBN 978-86-89087-06-2)
2. Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012 (ISBN 978-86-89087-04-8)
3. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998 (ISBN 978-86-17-06434-x)
4. Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Smederevo, 2014 (ISBN 978-86-83701-33-9)
5. Adamović, Ž., Ilić, B., Jurić, S., Vulović, M., Meza, S., Obnovljivi izvori energije, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013 (ISBN 978-86-89087-08-6)
6. Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Vulović, M., Meza, S., Energetska efikasnost, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013 (ISBN 978-86-89087-09-3)
7. Adamović, Ž., i dr., Upravljanje rizikom, Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin, 2008.
8. Adamović, Ž., Voskresenski, V., Tul, R., Održavanje na bazi rizika, Društvo za tehničku dijagnostiku, Beograd, 2007.
9. Adamović, Ž., Jurić, S., Poslovna inteligencija u kompanijama, „Društvo za energetska efikasnost BiH“, Banja Luka, 2012.
10. Adamović, Ž., Jurić, S., Radić, R., Blaženović, R., Transformacija složenih preduzeća u elektroprivredi, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 3-4 od 2014. (ISSN 1452-9688)
11. Andrijančić, I., Klasić, K., Tehnika osiguranja i reosiguranja, Zagreb, 2002.
12. Arthur Williams Jr., C., Michel, E., Peter, C., Risk Management and Insurance, IrWin/Mc-Graw-Hill, International Editions, 1998.
13. Balabukh, L. I., Alfutov, N.A., Usyukin, V.I., Structural Mechanics of Rockets, Vysshaya Shkola, Moscow, 1984.
14. Baldin, A. Furlanetto, L.: Održavanje po stanju, OMO, Beograd, 1999.
15. Baldin, A. Furlanetto, L.: Roversi, A. i dr.: Priručnik za održavanje industrijskih postrojenja, OMO, Beograd, 1998.
16. Bahadury, B., Basu, S., Modelling total life cycle cost, Proc. Imeshe, Vol. 200, No. A1, 1986.
17. Barlow, R., Proschan, F.: Mathematical theory of reliability, New York, 1966.
18. Barlow, R.: Hunter, L.: Optimum preventive maintenance policies, Operation Res, 1990.
19. Барзилович, Е.И., Модели технического обслуживания сложных систем, „Высшая школа“, Москва, 1998.
20. Barret. L.E., Gunter, E.J., and Allaire, P.E. 1978 Optimum Bearing Support Damping for Unbalance Response and Stability of Rotating Machinery, *Journal of Engineering for Power*, 100, 89-94.
21. Bellman, R., Adaptive Control Processes; Guided Tour, Princeton University Press, Princeton, 1961.
22. Bendat, J., Peerson, A.: Random Data Analysis and Measurement Procedures, John Wiley and Sons, New-York, 1989.
23. Biderman, V.L.: Theory of Mechanical Vibrations, Vysshaya SHKOLA, Moscow, 1980.
24. Birger, I.A.: Technical Diagnostics, Mashinostroenie, Moscow, 1978.

25. Bisplinghoff, R.L., Ashley, E., Halftman, R.L.,: Aeroelasticity, Addison Wesley Publishing Cotrariy Inc, Cambridge, 1955.
26. Биргер, И.А., Техническая и ремонта автомобилей, „Бысшая школа“, Москва, 1978.
27. Blanchard, B., Design and Manage to Life CycleCost, M/A Press, Portland, 1978.
28. Blanchard, B., Logistica Engineering and mangement, Prentice Hall, Inc.,New Jesey,1986.
29. Blanchard, B. Maintainability principles and practices, Me Graw-Hill Book Compani, New York, 1969.
30. Bolotin, V.,V.,:Dynamic Stability of ElasticSSystems. Holden Day, San Francisco,1956.
31. Bolotin, V. V.,:Nonconservative Prohlems in The Theory of Elastic Stability, Pergamon Press, London, 1963.
32. Bolotin, V. V.,:Application of Methods of the Theory of Probability and Theory of Reliability in Structural Design, Stroyizdat, Moscow, 1971.
33. Bolotin, V. V.,: Prediction of Machines and Structures Life, Mashinostroenie, Moscow, 1984.
34. Bolotin, V.V.,: Random Vibrations of Elastic Systems, Nauka, Moscow, 1979.
35. Born, M.,: Phisics in Life of my Generation, Inostrannaya literatura, Moscow, 1963.
36. Vujović, R., Jovanović, S., Todorović, J., Unapređenje metoda upravljanja rizikom u industrijskim postrojenjima, Tokovi osiguranja, br,1-2, novembar 2003.
37. Vujović, R., Rizik i pojmovi povezani sa rizikom, Časopis „DDOR Novi Sad“, Novi Sad, 2007.
38. Vujović, R., Todorović, J., Stanković, M., Upravljanje rizikom i osiguranje u idustriji, transportu i skladištenju, Zbornik radova , str.7-15, Dunav Preving, Beograd, 2001.
39. Vujanović, N., Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Vojno izdavački novinski centar, Beograd, 1990.
40. Vukadinović, S., Teodorović, D., Elementi teorije pouzdanosti i teorije obnavljanja tehničkih sistema, Privredni pregled, Beograd, 1979.
41. Vukadinović, S., Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.
42. Gaylo, B., A perctical reliability and availability program for power plants, Combustion, september.19809.
43. George, E.Rejda., Principles of Risk Management and Insurance, Ninth Edition, Addisom Wesley, Boston, 2005.
44. Gertsbakh, I. B., Model of preventive maintenance, North-Holland, New York, 1987.
45. Gertsbakh, I.B.,: Modelsofpreventive maintenance, North-Holland publishing company, Amsterdam, New York-Oxford, 1997.
46. Gnielka, P., 1983 Modal balancing of flexible rotors without test runs: an experimental investigation, *Journal of Sound and Vibration* 90, 157-172.
47. Говорушенко, Н.Я., Техническаяэксплуатацияавтомобилей, „Бысшая школа“, Харьков, 1994.
48. Говорушенко, Н.Я., Варфоломеев В. Н., Экономическая кибернетика транспорта, Харьков: ХГАДТУ, 218с.2001.
49. Groenhijsen, F.J.,: Railbouwtechniek, TU Delft, 1997.
50. Grupa autora DB,: „Die Eisenbahnschiene“, Verlag von Ernst Shon, Graz, 1987.
51. Grothus, H.,: Pronalaženje i otklanjanje u slabim tačkama sredstava za rad, Institut za tehniku postrojenja, Dorsten, 1955.

52. Grinstead.C.M., and Snell, J.L.: Introduction to Probability, American Mathematical Society, Providence, 1991.
53. Gustavson, T., Risk Management and Insurance, 10<sup>th</sup> Edition, South-Western College Publication, International Thompson Publishing, USA, 1998.
54. Donald, E., Bently 1990 *Fudamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, Edited bay Bob Grissom.
55. Dorfman, M S., Risk Management and Insurance, 6th edition, 1998.
56. Žarković, N., Reosiguranje sa osiguranjem, Univerzitet Singidunim, Beograd, 2006.
57. Johson, T., Serviceability-A Desing Discipline, SAE Poper 780279, 1978.
58. Jorgenson, W., Mccall, J., and Radner., Opimal replacement policy, Horth-holand, Amsterdam, 1967.
59. Jurić, S., Radić, R., Blaženović, R. Value analysis of workereliability of integral parts of a circuit forcoil winding with finished yarn of oe –spinning machine from the aspect of technology of maintenance, Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA), Vol. 22, (2016)(ISSN 1310-4772)
60. Jurić, S., Adamović, Ž. Dijagnostika zupčastih prenosnika ., Društvo za energetske efikasnost BiH, Banja Luka 2012.
61. Jurić, S., Adamović, Ž. Tehnika mjerenja u oblasti održavanja mašina, Društvo za energetske efikasnost BiH, Banja Luka, 2013.
62. Jurić S., Ekepertni sistemi u dijagnostici i upravljanju, Društvo za energetske efikasnost Bosne i Hercegovine (RS), Časopis „Tehnička dijagnostika“, Banja Luka, broj 5-6, od 2013. (ISSN 1840-4898)
63. Jurić, S., Žikić, D., Uticaj radnog fluida na pouzdanost rada hidrauličnog sistema, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 5-6 od 2012. (ISSN 1452-9688)
64. Jurić, S., Radić, R., Izrada segmenata cijevne instalacije u hidrocentralama, Društvo za energetske efikasnost Bosne i Hercegovine (RS), Časopis „Tehnička dijagnostika“, broj 5-6, Banja Luka, 2013. (ISSN 1840-4898)
65. Jurić, S., Bursać, Ž., Optimizacija troškova pouzdanosti motornih gaskompresora, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 5-6 od 2012. (ISSN 1452-9688)
66. Jurić, S., Radić, R., Klizni ležajevi, vrsta, podmazivanje, i način podmazivanja, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Menadžment znanja“ broj 5-6, od 2013. (ISSN 1452-9661)
67. Jurić, S., Radić, R., Osiguranje kao pristup upravljanja rizikom, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Menadžment znanja“ broj 5-6, od 2013. (ISSN 1452-9661)
68. Jurić, S., Radić, R., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Troškovi održavanja postrojenja u elektroprivredi, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Časopis „Održavanje mašina“ broj 3-4 od 2014. (ISSN 1452-9688)
69. Kapur, K., Lamberson, K., Reliability Engineering Desing John Wiley Sons, 1977.
70. Kellenburger , W., 1972 Should a flexible rotor be balanced in N or N+2 planes, Journal of Engineering for Industry.
71. Klas, S., Falirue Analsy in Maintenance, Presented at 2 ad European Maintenance Congress, Paris, 1974.
72. Knežević, J., Prilog formiranju modela preventivnog održavanja mašinskih tehničkih sistema prema tehničkom stanju, OMO,5, Beograd, 1983.
73. Koks, R., Smit, L., Teorija vostanovljenija, Sovetskoe radio, 1967.

74. Krodkiewski, J.M., J. Ding and N. Zhang 1984 Identification of unbalance change using a non-linear mathematical for rotor bearing systems, *Journal of Sound and Vibration* 169, 685-698.
75. Kuburović, M., Petrov, A., *Zaštita životne sredine*, SMET i Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
76. Kuzmin, I., *Ocena efikasnosti i optimizacije ASKU*, Izd. „Sov.radio“ Moskva, 1971.
77. *Military Standardization Handbook 217 C Readability Prediction of Electronic Equipment*, 1976.
78. *Military Standard 785 A, Reliability Program for System and Equipment Development and Production*, 1969.
79. Milačić V., Majstorović, V. *Prilog razvoju koncepta logistike za proizvodni sistem*, VII Jupiter konferencija, Opatija, 1981.
80. Mitochell, R., and Baurgese J., *Justifying a Computer for Maintenance Management*, *Plant Engineering*, August 7, New York, 1980.
81. Muszynska, A., : *One Lateral Mode Isotropic Rotor Response to Nonsynchronous Excitation: Proceedings of the Course on Rotor Dynamics and Vibration in Turbomachinery*, Karmon Institute for Fluid Dynamics, Belgium, 1992.
82. N. S. Feng and E. J. Hahn 1995 Including foundation effects on the vibration behaviour of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing* 9, 243-256.
83. Nikčević, M., *Prognoza pogodnosti za održavanje sa uključenim uticajem koncepcije održavanja*, SYM-OP-IS“86. Herceg Novi, 1986.
84. Plahtin, V., *Nadežnost, remont i montaža metalurgičkih masin*, Metalurgija, Moskva, 1983.
85. Prvulović, S., Tolmač, D., Dimitrijević, D., Tolmač, J., *Research of sensibility and tendency rotors to unbalance*, *Journal of the Balkan Tribological Association (JBTA)*, Vol. 18, No 3, 365–380 (2012)(ISSN 1310-4772)
86. Prvulovic, S., Josimovic, Lj., Savic, N., *The Implementation of Remote Maintenance of Bucket Wheel Excavator (Article)*, *Metalurgija international*, (2013), vol. 18 br. 1, str. 59-62 ISSN 1310-4772)
87. Prvulovic, S., Josimovic, Lj., Matic, M., *Automatic Control of Transport Systems in the Warehouse Fine-Grained Material*, *Metalurgija international*, vol. 17 br. 8, 52-56, (2012). (ISSN 1582-2214)
88. Prvulović, S., Tolmač, D., Radovanović, Lj.: *Researching results energetics characteristics convection drying*, *Strojnicki vestnik (Journal of mechanical engineering)*, 54 (2008) 9, pp. 639-644. (ISSN 0039-2480).
89. Prvulović, S., Tolmač, D., Radovanović, Lj.: *Application of Promethee-Gaia Methodology in Choice of Systems for Drying Paltry-Seeds and Powder Materials*, *Strojnicki Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 57 (2011) 10, 778-784. ISSN 0039-2480.
90. Prvulovic, S., Tolmač, D., Lambic, M., Dimitrijević, D., Tolmač, J., *Experimental and theoretical investigation of drying technology and heat transfer on the contact cylindrical dryer*, *Materiali in tehnologije*, 46 (Mar-Apr 2012), 2, p115-121. (ISSN 1580-2949).
91. Prvulović, S., Tolmač, D., Nikolic, Dj., Matić, M., *Possibilities of application of multicriteria decision making for the selection of irrigation systems*, *Metalurgia International* 17 (4), pp. 151-156, 2012. (ISSN 1582-2214)
92. Prvulovic, S., Tolmac, D., Brkic, M., Radovanovic, L., *The analysis of energetic and economic parameters during the utilization of corn grain as a fuel for cereal dryers*,



- (2013), *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy* 8 (4) , pp. 412-419 ) ISSN 1556-7257.
93. Prvulović, S., Tolmač, D., Josimović, Lj. : Application promethee-gaia methods when selecting new product, *Technics Technologies Education Management*, Vol.6, No.3, pp.742-747, 2011. (ISSN 1840-1503).
  94. Prvulovic, S., Tolmac, D., Matic, M., Radovanovic, Lj., & Lambic, M.,: SomeAspects of The Use of Solar Energy in Serbia,: *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, ISSN 1556-7257. ( prihvaćeno za štampu n 2012 ISSN ( 1556-7249) (M23). DOI:10.1080/15567249.2012.714842 Manuscript ID: 714842 James.Sp840@gmail.com,
  95. Prvulović S., Josimović Lj, Matić M., Tolmač D., Radovanović Lj., : Resource potential and scope of the use of renewable energy sources in Serbia, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, (2016), vol. 11 br. 10, str. 901-910
  96. Prvulovic Slavica S Lambic Miroslav R Matic Marija G Tolmac Dragisa M Radovanovic Ljiljana Z Josimovic Ljubisa :Solar energy in Vojvodina (Serbia): Potential, scope of use, and development perspective (Article), *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, (2016), vol. 11 br. 12, str. 1111-1117.
  97. Prvulović, S., Josimović, Lj., Tolmač, D., Razvoj daljinskog nadzora i održavanja sistema alatnih mašina, *IMK – 14 – Istraživanje i razvoj*, vol. 17 br. 4, str. 33-38, 2011 ( ISSN 0354-6829).
  98. Prvulović, S., Tolmač, D., Uloga održavanja u upravljanju životnim ciklusom proizvoda, *Tehnika-mašinstvo* 59 (2012) 4, str. 578-585, SMEITS, Beograd, (YU ISSN 0040-2176), (YU ISSN 0461-2531) UDC:62.(062.2)(497.1).
  99. Prvulović, S., Tolmač, D., Josimović, Lj., Inteligentni alati za prognostiku i daljinsko održavanje, *Tehnika-Mašinstvo*, vol. 68, (2013) br. 3, str. 466-470, , SMEITS, Beograd, (YU ISSN 0040-2176), (YU ISSN 0461-2531) UDC:62.(062.2)(497.1).
  100. Prvulović, S., Tolmač D, Josimović Lj, Inteligentni alati za prognostiku i daljinsko održavanje, *Tehnika-Mašinstvo*, vol. 68, (2013) br. 3, str. 466-470 , Smeits, Beograd, (YU ISSN 0040-2176), (YU ISSN 0461-2531) UDC:62(062.2)(497.1).
  101. Prvulović, S., Tolmač, D., Živković, Ž.: Menadžment održavanja u modernoj tehnologiji, časopis Održavanje mašina, br.7-8, str.(61-64), (ISSN 1452-9688), TEHDIS – Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Smederevo, 2007.
  102. Prvulović, S., Tolmač, D., Petrović, Lj.: Funkcija održavanja na površinskim kopovima uglja, časopis „OMO“ – Održavanje Mašina i Opreme, br. (1-2) / 2001, str.(17-21), UDK: 658.58, DP „OMO“, Beograd, 2001. (ISSN 0350-1647).
  103. Prvulović, S., Tolmač D.,: Metode provere ispravnosti tehničkih sistema na PK „Kostolac“ postupcima tehničke dijagnostike, (UDK 621.18.620.1:669.15-194), časopis: Tehnička Dijagnostika, br.(3 i 4), str.(54-58), Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije „TEHDIS“, 2005. (ISSN 1451-1972).
  104. Prvulović, S., Tolmač, D.,: Održavanje i menadžment pouzdanosti sistema, časopis Održavanje Mašina, br.6, str.(14-17), „TEHDIS“, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, 2006. (ISSN 1452-9688).
  105. Prvulović, S., Tolmač, D., Matic, M.: Development of methods remote maintenance system for machine tools, I International Conference – ProcessTechnology And Environmental Protection (PTEP 2011), Proceedings, pp.160-166,(ISBN: 978-86-7672-152-8), Technical faculty „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin, 7th December 2011.
  106. Prvulović, S., Tolmač, D., Matic, M., Remote control and maintenance in heating plant with use of scada system, 9 internacionalni kongres Machines technologies materials 2012, pp.41-45, (ISSN 1310-3945), Varna, Bulgaria, 19-21 septembar

2012. Proceeding (MTM\_No46), Scientific-technical union of mechanical engineering 108 Rakovski str., 1000 Sofia.
107. Prvulović, S., Kalitchin, Z. The Validation of characteristics of rotational excavator effectiveness, Proceedings, pp.152-156, II Int. Conf. Industrial Engineering and Environmental Protection, 2012.October 31<sup>st</sup>. Zrenjanin, Srbija. ISBN: 978-86-7672-184-9.
  108. Prvulović, S., Tolmač, D.: Održavanje u modernoj industriji i zadaci menadžmenta održavanja, XXIX Majski skup održavalaca, E-Zbornik radova, str.(5-9), Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, „TEHDIS“, Vrnjačka Banja, 2006.
  109. Prvulović, S., Josimović, Lj., Tolmač, D. : Role of maintenance in product of lifecycle management, Proceedings, pp.361-365, II Int.Conf. Industrial Engineering and Environmental Protection, 2012. October 31<sup>st</sup>. Zrenjanin, Serbia. ISBN: 978-86-7672-184-9.
  110. Runov, B.T., Investigation of vibration steam turboaggregate, Energoizdat, Moscow 1982.
  111. Shiraki, K. and Kanki, H., A new vibration criteria for high speed/large capacity turbomachinery, Proceedings of Eighth Turbomachinery Symposium, 1979.
  112. Stamenović, D., Vasić, L., Grbović, M., Risk menadžment i osiguranje, Preventivno Inženjerswto, broj 2/2001, Beograd.
  113. Tolmač, D., Prvulović, S., Lambić, M., Pavlović, M., Dimitrijević, D., Experimental and Theoretical Study of Energy Characteristics of a Rotating Cylinder , Strojarsvo: Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering, Vol.53 No.6, 477-484, (2011). (ISSN 0562-1887).
  114. Tolmač, D., Prvulovic, S., Dimitrijevic, D., Tolmač, J.: A Comparative analysis of theoretical models and experimental research for spray drying, Materials and technology, 45 (2011) 2, pp.131-138. (ISSN 1580-2949).
  115. Tolmač, D., Prvulovic, S., Dimitrijevic, D., Tolmač, J., Mati', M.: Results Of Automatic Air Quality Monitoring in Smederevo (Serbia) and Specific Assessment of The Situation Source: Journal of environmental protection and ecology, Volume: 14 Issue: 2 Pages: 414-421. Published: 2013.
  116. Tolmač, D., Prvulović, S. : The mathematical model of the velocity field of the rotating cylinder, časopis Tehnika-mašinstvo 57 (2008) 3, pp.7-10, SMEITS, Beograd, (YU ISSN 0040-2176), (YU ISSN 0461-2531).
  117. Tolmač, D., Prvulović, S., Blagojević, Z., Balancing of turbine and maintenance, časopis Tehnička dijagnostika, br.1-2, p. 35-39, 2009. Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije "TEHDIS" (ISSN 1840-4898).
  118. Tolmač, D., Prvulović, S. : Preventivno ispitivanje sigurnosti centrifuge za šećer, časopis Održavanje mašina, br.1, str.(34-36), Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije "TEHDIS", 2004. (ISSN 1452-9688).
  119. Tolmač, D., Prvulović, S., Blagojević, Z. : Projektovanje i održavanje glavnih mernoregulacionih stanica za gas, časopis Održavanje mašina, br.5, str.(41-45), Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije "TEHDIS", 2005. (ISSN 1452-9688).
  120. Tolmač D., Prvulović S., Blagojević, Z., Balancing of turbine and maintenance, časopis Tehnička dijagnostika, br.1-2, p. 35-39, 2009. Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, 2006. (ISSN 1452-9688).
  121. Tolmač, D., Prvulović, S.: Maintenance management and system reliability, 9th International conference, Dependability and Quality Management DQM 2006, Zbornik radova, str. (619-625), UDK 658.56, ISBN 1451-4966, Beograd, 14. - 15. 06.2006.

122. Tolmač, D., Prvulović S., Blagojević, Z.: Balancing of Turbine and Maintenance, XXXII Majski skup održavalaca Srbije, E Zbornik radova, s.1-10, ISBN 978-86-83701-22-3, Vrnjačka Banja, 27. I 28. 05. 2009.
123. Frigeri, C., G.A. Zaneta and A. Vallini 1988 Institution of Mechanical Engineers Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Paper C302/88, 395-404, Edinburgh, UK. Some in-field experiences of non-repeatable behavior in the dynamics of rotating machinery.
124. Fusek, G., Upravljanje rizikom u osiguranju, Svijet osiguranja, broj 4/2005.
125. Haimes, Y., Risk modeling, assessment and management, John Wiley and Sons, New York, 1998.
126. Coker, A. O., Smith, J. A., Higgins, S., Cameron, D. C., Computer-based Failure Mode and Effects Analysis for Quality Management – A Case Study, 1989.
127. Williams, C., Heins, R., Risk Management and Insurance, Mc Graw-Hill, New York, 1976.
128. Yosaky, El., Fragments of Computer History, Datamation, 1976, p.131.
129. Risk in an Industrial Society – Theory and Practice, October 2002. www.bbc.co.uk
130. Ministry of Technology Study of Engineering Maintenance in industry, London, 1976.
131. Reliability Engineering for electronic systems, Edited by Myers, Wong Gordy, John Wiley Sons, 1967.
132. American Petroleum Institute, “Special-Purpose Steam Turbines for Refinery Services”, API Standard 612, Third Edition, 1987.
133. International Standard of Organisation ISO 1940-1:1986, Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 1: Determination of permissible residual unbalance, *ISO Standard 1986*.
134. International Standard of Organisation ISO 1940-2:1986, Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors — Part 2: Balance errors, *ISO Standard, 1986*.
135. International Standard of Organisation ISO 11342:1994, Mechanical vibration — Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors, *ISO Standard, 1994*.
136. 1. International Standard of Organisation ISO 10816-1:1995, Mechanical vibration — Evaluation of machine vibrations by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines, *ISO Standard 1995*.
137. International Standard of Organisation ISO 10814:1996, Mechanical vibration – Susceptibility and sensitivity of machines to unbalance, *ISO Standard, 1996*.
138. International Standard of Organisation ISO 7919-1:1996, Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation criteria — Part 1: General guidelines, *ISO Standard, 1996*.
139. International Standard of Organisation ISO 10817-1:1998, Measuring instruments and test equipment, *ISO Standard, 1998*.
140. International Standard of Organisation ISO 7919-2, Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shaft – Part 2: Land-based steam turbines and generators in excess of 50 MW with normal operating speeds 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min and 3600 r/min, *ISO Standard, 2001*.