



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



**PRILOG IDENTIFIKACIJI OŠTEĆENJA
ZUPČASTIH PAROVA PRIMENOM TEHNIKA
ANALIZE SIGNALA MEHANIČKIH VIBRACIJA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

MENTOR: DOC. DR ZUBER NINOSLAV

KANDIDAT: MR BAJRIĆ RUSMIR

NOVI SAD, 2016. GODINA



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ **ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ
НАУКА** 21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска публикација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	мр Русмир Бајрић
Ментор, МН:	Доцент др Нинослав Зубер
Наслов рада, НР:	ПРИЛОГ ИДЕНТИФИКАЦИЈИ ОПШТЕЊЕЊА ЗУПЧАСТИХ ПАРОВА ПРИМЕНОМ ТЕХНИКА АНАЛИЗЕ СИГНАЛА МЕХАНИЧКИХ ВИБРАЦИЈА
Језик публикације, ЈП:	Српски
Језик извода, ЈИ:	Српски / Енглески
Земља публикавања, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УП:	Војводина
Година, ГО:	2016
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/цитата/табела/слика/графика/прилога)	11 / 187 / 154 / 57 / 85 / 4 / 0
Научна област, НО:	Машинско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Машинске конструкције, транспортни системи и логистика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Вибродиагностика, општењења зупчастих преносника, вештачка интелигенција, одржавање
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека факултета техничких наука у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	Дисертација обрађује проблематику проналажења поуздане технике анализе сигнала механичких вибрација с циљем идентификације анализираних типова општењења зупчастих парова. У дисертацији је предложен поступак редукције димензионалности обележја применом методе анализе главних компонената. Истраживање успешно демонстрира примену напредних техника процесирања сигнала вибрација и интелигентних метода у вибродиагностици зупчастих парова те омогућава особама које нису специјалисти из области дијагностике да процене стање зупчастог пара. Предложена су најуниверзалнија обележја у вибродиагностици зупчастих парова базираних на сигнаlima вибрација прикупљених на кућишту зупчастог преносника.
Датум прихватања теме, ДП:	25.11.2013.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник Проф. др Јован Владић
Члан:	Ванредни Проф. др Растислав Шостаков
Члан:	Проф. др Драган Цветковић
Члан:	Ванредни Проф. др Сабахудин Јашаревић
Члан, ментор:	Доцент др Нинослав Зубер



UNIVERSITY OF NOVI SAD FACULTY OF TECHNICAL
SCIENCES 21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	Ph.D. thesis
Author, AU :	Rusmir Bajrić M.Sc.
Mentor, MN :	Docent Ninoslav Zuber Ph.D.
Title, TI :	CONTRIBUTION TO GEAR PAIRS FAULTS IDENTIFICATION USING MECHANICAL VIBRATION SIGNAL ANALYSIS TECHNIQUES
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2016
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/ap pendixes)	11 / 187 / 154 / 57 / 85 / 4 / 0
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Machine Design, Transport Systems and Logistics
Subject/Key words, S/KW :	Vibration diagnostics, gearbox faults, artificial intelligence, maintenance
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	The dissertation deals with the issue of finding reliable signal analysis technique of mechanical vibrations to identify analyzed types of gear pair faults. The dissertation presents a method of reducing the dimensionality of features by using the method of principal components analysis. The study successfully demonstrates use of advanced signal processing techniques and artificial intelligent methods in diagnostics of gear pairs faults and allows engineers who are not specialists in the field to assess the condition of gear pair using vibration signals. The most universal features in diagnostics of gear pairs based on vibration signals collected on the gearbox housing are proposed.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	November 25, 2013.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Prof. Jovan Vladić Ph.D.
	Member: Associate Prof. Rastislav Šostakov Ph.D.
	Member: Prof. Dragan Cvetković Ph.D.
	Member: Associate Prof. Sabahudin Jašarević Ph.D.
	Member: Mentor Docent Ninoslav Zuber Ph.D.

Menthor's sign

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
SPISAK SKRAĆENICA I SIMBOLA	II
1 UVODNA RAZMATRANJA	1
1.1. POVOD	1
1.2. MOTIVACIJA.....	3
1.3. PREDMET, ZNAČAJ I CILJ ISTRAŽIVANJA	4
1.4. POLAZNE HIPOTEZE, METODE ISTRAŽIVANJA I OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOS ..	6
1.5. PREGLED RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA	7
1.6. STRUKTURA DISERTACIJE I PREGLED SADRŽAJA PO POGLAVLJIMA	16
1.7. PRIMENJENA METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I KORIŠTENI ALATI.....	17
1.8. TEHNIKE ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA PRIMENLJIVE NA OCENU STANJA ZUPČASTIH PRENOSNIKA	18
1.8.1.GEOMETRIJSKA KONTROLA.....	18
1.8.2.TERMOVIZIJA	20
1.8.3.ANALIZA STANJA ULJA	22
1.8.4.BROJAČI ČVRSTIH ČESTICA	23
1.8.5.OTKRIVANJE OŠTEĆENJA ZUPČASTIH PAROVA POMOĆU VIBRACIJA	28
2 OSNOVNE KOMPONENTE VIBRACIONOG SIGNALA ZUPČASTIH PAROVA	30
2.1. KOMPONENTE VIBRACIJA ZUPČANIKA	30
2.2. UTICAJ PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA	31
2.3. UTICAJ GREŠKE U PROIZVODNJI ZUPČASTOG PARA.....	32
2.4. UNIFORMNO HABANJE.....	32
2.5. EFEKTI HABANJA NA SIGNALE VIBRACIJA ZUPČANIKA	33
2.6. EFEKTI AMPLITUDNE MODULACIJE	34
2.7. EFEKTI FREKVENTNE MODULACIJE	35
2.8. OSTALE KOMPONENTE VIBRACIONOG SIGNALA ZUPČASTIH PRENOSNIKA.....	35
2.9. OŠTEĆENJA ZUPČASTIH PAROVA	36
3 VIBRODIJAGNOSTIČKA ANALIZA ZUPČASTIH PAROVA	43
3.1. ZUPČASTI PRENOSNICI	43
3.2. KARAKTERISTIČNE FREKVENCIJE ZUPČASTOG PRENOSNIKA	44
4 TEHNIKE PROCESIRANJA SIGNALA U VIBRODIJAGNOSTICI ZUPČASTIH PAROVA	51

4.1.	PRIKUPLJANJE PODATAKA	51
4.2.	OBRADA PODATAKA	52
	4.2.1. ANALIZA U VREMENSKOM DOMENU	52
	4.2.2. ANALIZA U FREKVENTNOM DOMENU	55
	4.2.3. CEPSTRUM ANALIZA	58
	4.2.4. ISTORIJA PRIMENE CEPSTRUMA NA MEHANIČKE PROBLEME	60
	4.2.5. ANALIZA U VREMENSKO-FREKVENTNOM DOMENU	62
4.3.	PREPOZNAVANJE OBLIKA GREŠKE	66
4.4.	NASTAJANJE VIBRACIJA ZUPČASTIH PAROVA	67
	4.4.1. GREŠKA PRENOSA	67
4.5.	MATEMATIČKI MODEL VIBRACIJA ZUPČASTOG PRENOSNIKA	67
	4.5.1. VIBRACIJE ZUPČANIKA	69
	4.5.2. VIBRACIJE ROTIRAJUĆIH MASA	70
5	IZAZOVI VIBRODIJAGNOSTIKE ZUPČASTIH PAROVA PRIMENOM VEŠTAČKE INTELIGENCIJE	72
5.1.	DIJAGNOSTIKA ANOMALIJA-GREŠAKA	72
5.2.	ŠTA JE TO ANOMALIJA	73
5.3.	IZAZOVI I OSNOVNI MOTIVI PRIMENE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U CM	73
5.4.	VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE U OCENI STANJA I DIJAGNOSTICI OŠTEĆENJA MAŠINA	74
	5.4.1. VEŠTAČKI NEURON	76
	5.4.2. ARHITEKTURA MREŽE	78
	5.4.3. AKTIVACIONA FUNKCIJA NEURONA	79
	5.4.4. ZAKON UČENJA	81
5.5.	KLASIFIKACIJA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA	83
5.6.	VIŠESLOJNA PERCEPTRON MREŽA	84
5.7.	TEHNIKE REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI	85
5.8.	SAMOORGANIZOVANE KOHONENOVE MAPE	89
6	EKSPERIMENTALNA ANALIZA	96
6.1.	CILJ EKSPERIMENTA	96
6.2.	POSTAVKA EKSPERIMENTA – OPIS PROBNOG STOLA	96
6.3.	POSTAVKA EKSPERIMENTA – OPIS MERNOG LANCA	102
6.4.	OPIS TESTOVA I MERNIH VELIČINA	102
6.5.	TEST 1 – DETEKCIJA OKRZNUTOG ZUBA ZUPČANIKA KROZ TRI KORAKA	106
	6.5.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	109
	6.5.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	110
	6.5.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA	112
	6.5.4. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	114
	6.5.5. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	117
6.6.	TEST 2 – DETEKCIJA PUKOTINE U KORENU ZUBA ZUPČANIKA KROZ ČETIRI KORAKA	118
	6.6.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	122
	6.6.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	123
	6.6.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA	124

6.6.4.	REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	126
6.6.5.	REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	129
6.7.	TEST 3 – DETEKCIJA POHABANIH BOKOVA ZUPČASTOG PARA KROZ TRI NIVOVA OŠTEĆENJA.....	129
6.7.1.	REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	132
6.7.2.	REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	133
6.7.3.	REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA	134
6.7.4.	REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	136
6.7.5.	REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	139
6.8.	TEST 4 – DETEKCIJA SVIH OŠTEĆENJA ZUPČASTOG PARA KORISTEĆI KOMPLETAN SET PODATAKA.....	140
6.8.1.	REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	140
6.8.2.	REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA	141
6.8.3.	REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA	143
6.8.4.	REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	145
6.8.5.	REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA	148
7	ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA.....	150
7.1.	EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA KVALITET SOM MREŽE IZRAŽEN KROZ GREŠKU KVANTIZACIJE.....	150
7.2.	EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST OBUČAVANJA VNM	151
7.3.	EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST PROVERE VNM	153
7.4.	EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST VALIDACIJE VNM	154
7.5.	ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 1	156
7.6.	ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 2	156
7.7.	ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 3	157
7.8.	ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 4	158
7.9.	ANALIZA OBELEŽJA ZA VIBRODIJAGNOSTIKU ZUPČASTIH PAROVA DOBIVENIH PREDLOŽENIM PRISTUPOM	159
8	ZAKLJUČAK.....	161
9	SPISAK SLIKA.....	165
10	SPISAK TABELA.....	169
11	REFERENCE.....	172

SPISAK SKRAĆENICA I SIMBOLA

1xEGMF	Energija sadržana oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja
1xGMF	Amplituda prvog harmonik frekvencije uzupčavanja
1xMF	Faktor modulacije oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja
2xEGMF	Energija sadržana oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
2xGMF	Amplituda drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
2xMF	Faktor modulacije oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
3xEGMF	Energija sadržana oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
3xGMF	Amplituda trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
3xMF	Faktor modulacije oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
4xEGMF	Energija sadržana oko četvrtog harmonika frekvencije uzupčavanja
4xGMF	Amplituda četvrtog harmonik frekvencije uzupčavanja
4xMF	Faktor modulacije oko četvrtog harmonika frekvencije uzupčavanja
AGMA	American Gear Manufacturers Association
AI	Veštačka inteligencija
ANSI	American National Standards Institute
B&K	Brüel & Kjær
BPF	Mreža bez povratne veze sa prostiranjem izlazne greške unazad
BPMLP	Višeslojna perceptronska mreža sa prostiranjem izlazne greške unazad
CBM	Odžavanje na bazi stanja
CF	Crest faktor
CF_SIR	Crest faktor (CF) sirovog vremenskog signala, parametar koji predstavlja relativni odnos Peak vrednosti i RMS vrednosti
CF_TSA	Crest faktor (CF) vremenski osrednjenog signala, parametar koji predstavlja relativni odnos Peak vrednosti i RMS vrednosti
CHI	Cepstrum health indicator
CHI	Cepstrum indicator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“.
CM	Monitoring stanja
CRT	Cathode ray tube
DIN	German Institute for Standardization
DR	Direct reading (DR) ferrography
E	Komponente diferencijalnog signala
\bar{E}	Srednja vrednost diferencijalnog signala

EA	Ekstrakcija amplitude frekvencije uzupčavanja u frekventnom spektru
EDM	Empirical mode decomposition
EEMD	Ensemble empirical mode decomposition
EN	Energija opsega frekventnog spektra
FFT	Fast Fourier transform
fiz	Osnovna frekvencija izlaznog-gonjenog zupčanika
FM0	FM0 parametar
FM4	FM4 parametar
FT	Fourier-ova transformacija
ful	Osnovna frekvencija ulaznog-pogonskog zupčanika
GAPF	Montažna frekvencija uzupčavanja
GMF	Gear meashing frequency
HS	Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika
HSC	Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika
HSC_M_LSC	Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
HSC_P_LSC	Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
HTF	Frekvencija lutajućih zuba
IMF	Intrinsic mode functions
IPS	Momentni spektar energije
ISO	International Organization for Standardization
ISS	Trenutni oboj obrtaja vratila
KURT_AK	Kurtosis parametar izveden iz autokorelacijske funkcije sirovog vremenskog signala (AutoCorrelation)
KURT_SIR	Kurtosis parametar izveden iz sirovog vremenskog signala
KURT_TSA	Kurtosis parametar izveden iz vremenski osrednjenog signala (TSA)
LCD	Liquid-crystal display
LS	Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika
LS_M_HS	Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LS_P_HS	Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LSC	Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
M6A	M6A parametar
M8A	M8A parametar
MF	Faktor modulacije
MLP	Višeslojna perceptronska merža
NA4	NA4 parametar
NA4*	NA4* parametar
NAS	National Aerospace Standard
NB4	NB4 parametar
OLACC	Nivo sumarnog ubrzanja [g] u frekventnom opsegu 10 Hz – 20 kHz
OLRMS	Srednja kvadratna vrednost brzine vibracija signala u frekventnom opsegu 10Hz – 1 kHz
PCA	Analiza glavnih komponenata

PK_SIR	Peak parametar (vršna vrednost) sirovog vremenskog signala
PK_TSA	Peak parametar (vršna vrednost) vremenski osrednjenog signala
PNN	Neuronske mreže bazirane na analizi verovatnoće
PP_SIR	Peak to peak parametar sirovog vremenskog signala
PP_TSA	Peak to peak parametar vremenski osrednjenog signala
Pzpc	Proizvod zajedničkih prostih činilaca broja zubi zupčanika
RBF	Neuronska mreža sa radijalnim bazisnim funkcijama
RFS	Rotrode filter spectroscopy
RMS	Root mean square
RNN	Rekurentne neuronske mreže
SAE	Society of Automotive Engineers
SOM	Samoorganizovane-samoobučavane mape obeležja
STFT	Vremenski kratka Fourier-ova transformacija
TE	Transmission error
TSA	Sinhrono osrednjavanje u vremenskom domenu
VNM	Veštačka neuronska mreža
WT	Wavelet transform
Zg	Broj zuba izlaznog-gonjenog zupčanika
Zp	Broj zuba ulaznog-pogonskog zupčanika
a(x)	Aktivacijska funkcija neuronske mreže
Asg(Θ_s)	Amplituda modulacije usled promenljivog opterećenja
asgk, bsgk	Koeficijenti Fourier-ovog reda
Asgm	Amplituda vibracija usled deformacije zuba pod opterećenjem
Asgm(L)	Amplituda vibracija usled srednje vrednosti opterećenja
C(τ)	Cepstrum funkcija u domenu kvazivremena
Cc(τ)	Kompleksni cepstrum
Cp(τ)	Snaga cepstruma
Cr(τ)	Realni cepstrum
Esgm	Srednja vrednost
f(t)	Trenutna vrednost frekvencije
F(x(t))	Spektar snage vremenskog signala
Fsgm	Faza harmonika m
L	Srednja vrednost opterećenja
MDOF	Multidegree of Freedom Systems
Nsg	Broj zuba na zupčaniku
$\Theta(t)$	Trenutni ugaoni položaj vratila
$\Theta_s(t)$	Trenutni položaj vratila na kojem je montiran zupčanik
SDOF	Single Degree of Freedom Systems
vj	Težinska suma ulaza
Vs(t)	Vibracija rotirajuće mase
Vsg(t)	Vibracija nastala uzupčavanjem zupčanika
Wj	Težinski koeficijenti dendrita,
Xi	Ulazni podaci dendrita (ulazi veštačkog neurona),
yj	Akson i njegovi ogranci
$\alpha_{sg}(\Theta_s)$	Amplitudna modulacija usled promenljivog opterećenja
$\beta_{sg}(\Theta_s)$	Fazna modulacija usled varijacije obrtnog momenta
$\phi(v_j)$	Aktivaciona funkcija,

1 UVODNA RAZMATRANJA

1.1. POVOD

Zupčanici se naširoko koriste u industrijskim, automobilskim i svakodnevnim aplikacijama za prenos, kako kretanja tako i mehaničke snage. U odnosu na izvedbu zupčastog prenosnika, primena zupčastih parova pruža niz mogućnosti kao i prednosti; omogućavaju velike prenosne odnose, zatim mogućnost promene smera rotacije kao i mogućnost efikasnog prenosa velikih obrtnih momenata. Kvar na zupčaniku se može javiti zbog prevelikog opterećenja, nedovoljnog podmazivanja, grešaka u proizvodnji ili grešaka prilikom instalacije. Kvar na zupčaniku je nepoželjan događaj jer uključuje prestanak sposobnosti zupčanika da obavlja potrebnu funkciju i može da izazove ozbiljne i skupe posledice. Implementirajući odgovarajuću strategiju održavanja broj kvarova i neplaniranih zastoja se može smanjiti, dok se isto tako i posledice, koje izazivaju zastoje, mogu održati na minimumu. U skladu sa objašnjenjem po standardu BS-EN 13306:2010, cilj održavanja jeste da se zadrži sredstvo ili element (npr.zupčanik) u stanju u kojem može obavljati zahtevanu funkciju, ili da se vrati u takvo stanje.

Vlasnik imovine je odgovoran za donošenje odluka o načinu održavanja i biranju najpogodnije strategije održavanja u cilju optimizacije i raspoloživosti sredstava u odnosu na trošak, profit i rizik za celi životni ciklus imovine. Potrebe u procesu održavanja i odluke o održavanju se, stoga, procenjuju na osnovu posledice kvara [1]. Postoje različite strategije održavanja koje se mogu razmatrati kod donošenja odluka o održavanju. Najjednostavnija strategija je da se sistem koristi do pojave kvara i naknadno provede korektivno održavanje. Ova strategija je pogodna za implementaciju ako su posledice kvara minimalne. Ako je posledica kvara velika i ozbiljno utiče na trošak, profit i rizik, više je pogodna strategija preventivnog održavanja. Svrha preventivnog održavanja je da se smanji mogućnost nastanka kvara ili degradacija funkcionisanja elementa ili sistema, npr. zupčastog prenosnika. Prema terminologiji održavanja po standardu BS-EN 13306:2010, preventivno održavanje je podeljeno na dve strategije: takozvano „održavanje po planu“ i „održavanje na bazi stanja“ (CBM)¹. Održavanje po planu se sprovodi u skladu sa utvrđenim vremenskim

¹ Condition Based Maintenance - CBM

rasporedom, obično baziranim na istorijskim podacima kao što su srazmere kvarova elementa ili sredstva. Uprkos znanju baziranom na takvim podacima stvarno stanje elementa ili sredstva je još uvek nepoznato te i dalje postoji mogućnost kvara. Šta više, postoji mogućnost zamene predmeta prije kraja njegovog korisnog životnog veka što će rezultirati povećanim korišćenjem rezervnih delova i više sati rada na održavanju nego što je potrebno. Da bi se rešio ovaj problem, može se primeniti strategija održavanja na bazi stanja.

Cilj CBM-a je da započne radnje održavanja bazirane na analizi stvarnog stanja elementa ili sredstva. Stanje elementa se može utvrditi testiranjem, inspekcijom ili „monitoringom stanja“ CM², BS-EN 13306:2010. CBM strategija je uspešno implementirana i pokazala je ekonomske prednosti u mnogim industrijama. CBM može smanjiti ukupnu upotrebu rezervnih delova i takođe omogućiti smanjenje potrebnog rada na održavanju, s jedne strane, a s druge strane zahteva implementaciju isplativih i pouzdanih tehnika koje mogu definisati stanje elementa ili sredstva [2]. Monitoring stanja (CM) se definiše kao aktivnost koja se obavlja, ili ručno, ili automatski, namenjena za merenje po unapred predodređenim intervalima, ili trajno, karakteristika i parametara koji definišu stvarno stanje elementa ili sredstva, BS-EN 13306:2010. Cilj CM-a je rano otkrivanje oštećenja nadgledanjem određenih kritičnih parametara sistema koji definišu stanje elementa ili sistema [1].

Kod CM-a stanje elementa ili sistema se analizira u odnosu na vreme, nasuprot inspekciji kojom se samo ispituje usklađenost elemenata ili sistema. Ukratko, CBM proces se sastoji od sledeće tri glavne faze: akvizicija podataka, procesiranje podataka i donošenje odluka o održavanju. Dva glavna aspekta CBM procesa su [3]:

- dijagnosticiranje koje se bavi otkrivanjem kvarova, utvrđivanje da li nešto nije uredu u sistemu koji je nadgledan, izolacija kvara, lociranje elementa u kvaru, identifikacija kvara; utvrđivanje prirode kvara kada se isti otkrije,
- prognostika, koja se bavi predviđanjem kvarova prije nego se i pojave, prognostika je bazirana na proceni kolika je verovatnoća da će se greška pojaviti a koja će imati za posledicu dovođenje elementa ili sistema u neispravno stanje, odnosno stanje u otkazu, kao i koliko brzo će se takva greška desiti.

CM nam može obezbediti podatke o stanju nadgledane mašine i poboljšati mogućnost planiranja odgovarajućih radnji održavanja. CM omogućava postizanje uštede troškova kroz redukciju troškova za zamenu rezervnih delova, smanjenje poslova na održavanju i vremenu zastoja [4]. S druge strane, CM košta i troškovi primene CM bi trebalo izbalansirati u odnosu na uštede zahvaljujući primeni CM. Zbog toga, u nekim slučajevima, nije opravdano koristiti se nadgledanjem svih mašina radnog sistema jer samo kritične mašine mogu biti vredne nadgledanja. Staviše, CM može biti neprekidan ili periodičan. Uz periodično nadgledanje moguće je promašiti neke indikacije kvarova koji se mogu desiti između uzastopnih merenja. Međutim, cena periodičnog nadgledanja može biti manja i ako se koristimo dovoljno filtriranim podacima, mogu se obezbediti dovoljno tačne dijagnoze u usporedbi sa neprekidnim sistemom nadgledanja [3]. CM se može primeniti i kod zupčastih prenosnika u cilju prevencije nastanka havarijskog kvara na zupcima zupčanika ili ležajevima. Mogu se primeniti različite tehnike nadgledanja stanja, kao što je analiza

² Condition Monitoring“ - CM

vibracija, akustična emisija, analiza maziva, infracrvena termografija i merenje električne struje. Danas je analiza vibracija najprimenjenija tehnika za nadgledanje stanja mašina [2].

1.2. MOTIVACIJA

Istraživanja u ovoj disertaciji su sprovedena u oblasti analize vibracija zupčastih prenosnika sa kosim zubima, kao najčešćeg tipa zupčanika zupčastog prenosnika u industriji. Različite tehnike su predložene za identifikaciju oštećenja zupčanika. Nekima od njih nedostaje praktičnosti primene, neke nisu dovoljno pouzdane za širi spektar oštećenja. Stoga, postoji veliki prostor za istraživanja i poboljšanja u vezi sa problemom identifikacije stanja zupčastih parova kroz analizu vibracija. Ovaj rad predstavlja obradu signala vibracija nastalih uzupčavanjem zupčastog para uz ekstrakciju obilježja s ciljem poboljšanja mogućnosti identifikacije predloženih oštećenja zupčanika sa kosim zubima. Iako postoje različite tehnike procesiranja signala vibracija s ciljem identifikacije oštećenja zupčastih parova, identifikacija oštećenja je i dalje težak zadatak, posebno zbog velike pozadinske buke i velike različitosti u primeni zupčastih parova kao sastavnih elemenata zupčastih prenosnika. Cilj ovog rada je razvijanje nove tehnike u obradi signala vibracija prikupljenih na kućištu zupčastog prenosnika uz pouzdaniju identifikaciju oštećenja zupčastog para.

Istraživanja u oblasti dijagnostike oštećenja rotacionih mašina baziranih na analizi signala mehaničkih vibracija mogu smanjiti troškove održavanja koji su u direktnoj vezi sa troškovima proizvodnje. Pravovremene informacije o stanju mašine mogu sprečiti nastajanje havarijskih stanja i nesreća, poboljšati efikasnost proizvodnog sistema i produžiti životni vek opreme. Uobičajeni postupci nadgledanja stanja i metode vibrodijagnostike oštećenja najčešće rade na principu ekstrakcije obeležja sadržanih u signalima mehaničkih vibracija prikupljenih sa mašina koje se nadgledaju ili ocenjuju. Provođe se različite metode analize signala vibracija baziranih na vremenskom, frekventnom ili vremensko-frekventnom domenu. U dijagnostici oštećenja rotacionih mašina ekspertska i profesionalno znanje vibrodijagnostičara ima veoma bitnu ulogu i veoma često može biti faktor koji je presudan za provođenje strategije održavanja po stanju. Za kvalitetnu procenu stanja opreme vibrodijagnostičar treba da ima visok nivo znanja i iskustva čije sticanje je dugotrajno i puno košta. Veštačka inteligencija i tehnologija veštačkih neuronskih mreža pruža efikasan način da se reši navedeni problem, naročito kod kompleksnih sistema (npr. zupčastih prenosnika) kod kojih je teško ili gotovo nemoguće uspostaviti kvalitetan matematski model, dok su veštačke mreže u ovakvim situacijama pronašle svoju jedinstvenu funkciju. Uopšteno, veštačke neuronske mreže se mogu uspešno koristiti u oblasti dijagnostike oštećenja, uglavnom zbog tri sledeća razloga [5]:

- obučena veštačka neuronska mreža može akumulirati znanje o procesu i naučiti o oštećenju iz informacija u prošlosti, mreža se može trenirati na osnovu odabrane grupe podataka iz informacija iz prošlosti te se prikupljeno znanje može uporediti sa trenutnim informacijama kako bi se donio zaključak o trenutnom stanju,
- veštačka neuronska mreža ima mogućnost filtriranja šuma u podacima i donošenja kvalitetnih informacija u okruženju zagađenom šumom, veštačka neuronska mreža se može obučiti u prepoznavanju informacija povezanih sa oštećenjima u uslovima zagađenih šumom, što čini veštačke neuronske mreže pogodnim za on-line detekciju i dijagnostiku oštećenja.
- veštačke neuronske mreže poseduju mogućnost raspoznavanja uzroka i tipova oštećenja.

Kako bi se u potpunosti pratilo stanje rotacione opreme sistemi za monitoring stanja s mašina prikupljaju podatke u realnom vremenu te zbog toga se u toku vremena nadgledanja prikupi veoma velika količina podataka. Gotovo uvek prikupljanje podataka se obavlja brže nego što su inženjeri dijagnostičari u stanju analizirati te se nameće potreba za metodama dijagnostike koje mogu efikasno analizirati veliku količinu podataka i omogućiti automatsku i tačniju dijagnostiku. Uopšteno se ove metode nazivaju inteligentne metode dijagnostike oštećenja, gdje se veštačkom inteligencijom, kao što su veštačke neuronske mreže, lakše raspoznaje stanje rotirajuće opreme [6]. Autori u [7] navode da su kroz istraživanje literature primetili da su veštačke neuronske mreže najčešće korišteni klasifikatori kada su u pitanju inteligentne metode dijagnostike oštećenja, a koje se sastoje od dva koraka: ekstrakcija obeležja oštećenja koristeći tehnike procesiranja signala i klasifikaciju oštećenja koristeći klasifikatore bazirane na veštačkim neuronskim mrežama.

Vreme potrebno za treniranje neuronske mreže kao i tačnost klasifikacije je u direktnoj vezi sa brojem odabranih obeležja koji će se koristiti kao ulazni parametri dijagnostike oštećenja zupčastih prenosnika baziranih na signalu mehaničkih vibracija. U odabranom skupu obeležja mogu postojati obeležja koja su nevažna i suvišna [8]. Zbog navedenog razloga selekcija osetljivih obeležja iz originalnog skupa obeležja predstavlja izazov u efikasnoj dijagnostici stanja zupčastog prenosnika. Nakon ekstrakcije obeležja, veoma je teško proceniti koja obeležja su više osetljiva za pojedinu vrstu oštećenja, razvoj oštećenja zupčanika i njegovo širenje, izbor raznih faktora koji utiču na efektivnost oštećenja, npr. lokacije senzora, odnosa signala i buke, sistema za prikupljanje podataka itd. Dodatno, većina obeležja u vremenskom, frekventnom i vremensko-frekventnom domenu imaju veliku dimenzionalnost koju je potrebno smanjiti kroz smanjenje nevažnih i suvišnih obeležja. Jedna od najpopularnijih linearnih statističkih metoda često korištena u selekciji dominantnih obeležja iz višedimenzionalnog skupa podataka je analiza glavnih komponenta (PCA³) [9]. Korištenje metoda veštačke inteligencije kroz korištenje veštačkih neuronskih mreža kao i metoda redukovanja dimenzionalnosti obeležja za identifikaciju i klasifikaciju prisutnih oštećenja zupčastog prenosnika ima veliki potencijal za rešavanje iznešenih problema.

1.3. PREDMET, ZNAČAJ I CILJ ISTRAŽIVANJA

Sistemi za praćenje stanja i identifikaciju oštećenja elemenata reduktora su dobili značajnu pažnju u poslednjih nekoliko godina prvenstveno sa instaliranjem velikog broja vetroturbina u čijem sastavu se nalazi gotovo uvek i zupčasti prenosnik. Pored vetroturbina poznato je da se zupčasti prenosnici u velikom obimu koriste u raznim granama industrije (energetski sektor, rudarska industrija, petrohemijska industrija, automobilska industrija itd.), kao element visokog značaja odgovoran za nesmetan rad mnogih proizvodnih sistema. Pored toga, gotovo uvek raspoloživost celog sistema zavisi od upotrebljivosti zupčastog prenosnika. Zupčasti prenosnici su jako često kompleksni i nerazdvojni sklopovi rotirajućih mašina. Oni se koriste za smanjenje ili povećanje brzine u odnosu na ulaznu brzinu vratila i za, naravno, prenos snage. Bilo bi poželjno efikasno pratiti nastanak i razvoj oštećenja i time izbeći havarije što za posledicu dovodi do visokih troškova i povećanih rizika. Oštećenje elemenata zupčastog prenosnika je moguće

³ Principal component analysis

identifikovati dok je neispravna (oštećena) komponenta još uvek u funkciji te je moguće planirati popravke kako bi se smanjili zastoji, povećala pouzdanost, maksimizirala dostupnost sa krajnjim ciljem poboljšanja profitabilnosti. Praćenje stanja mašina često se odnosi na dijagnostiku mašina koja se u suštini bavi ocenom stanja funkcionalnosti mašine, detekcijom ili identifikacijom oštećenja koristeći vanjske indikatore. U praćenju stanja koriste se različiti „indikatori stanja“ u zavisnosti od tipa oštećenja koje je prisutno na mašini. Na primer, već je poznato da vibracije emitovane od strane mašine sadrže detaljne informacije o njenom stanju. Razlog je jednostavan, vibracije nastaju od sila koje generišu same komponente mašine. Prisustvo oštećenja proizvodi promene u normalnom delovanju navedenih sila, a što se odražava u promeni i samih vibracija. Praćenje stanja kroz analizu vibracija je dobro poznat i dokumentovan pristup za različite vrste mašina ili mašinskih delova, kao što su ležajevi i zupčnici zupčastih prenosnika. Istarajivanja u navedenoj oblasti se konstantno provode što je dovelo do razvoja nekoliko tehnika danas uspostavljenih za detekciju ili identifikaciju različitih tipova oštećenja. Sve ovo je dovelo do uspešne primene dijagnostike na širokom spektru mašina. Međutim, postoje tipovi oštećenja zupčastih parova u kojima primena analize signala vibracija nije dala dobre rezultate, odnosno analizom signala vibracija je nemoguće identificirati određene tipove oštećenja, pogotovu u njihovoj ranoj fazi nastanka. Razlozi za ove nemogućnosti identifikacije oštećenja, koristeći analizu signala vibracija, mogu biti: male radne brzine, velike radne brzine, promenljivost opterećenja, nepovoljni uslovi za prenos vibracija od izvora do senzora, visoka složenost kinematike komponenata, itd.

Postoji potreba da se uporede različite tehnike za određena oštećenja kako bi se utvrdila najpogodnija tehnika za identifikaciju određenog oštećenja. Osnovni cilj disertacije je naučno-stručni doprinos u pronalaženju pogodne, dovoljno tačne i pouzdane tehnike analize signala mehaničkih vibracija prilikom identifikacije oštećenja zupčastih parova te razvoj novih i modifikacija postojećih tehnika u cilju dobijanja pouzdanih rezultata. Isto tako istraživanje će omogućiti da se:

- jasnije sagleda fizički model nastanka vibracija kako neoštećenih tako i oštećenih zupčastih parova te razlozi i uslovi nastanka njihovih oštećenja,
- prilagode i iskoriste različite tehnike analize signala vibracija prilikom identifikacije oštećenja i procene stanja zupčastih parova,
- detaljnije sagledaju mogućnosti aktuelnih metoda i tehnika za identifikaciju i procenu nivoa oštećenja zupčastih parova baziranih na analizi signala mehaničkih vibracija,
- ocene mogućnosti primene veštačkih neuronskih mreža i
- utvrdi efekat primene metoda redukovanja dimenzionalnosti obeležja u cilju pouzdanije klasifikacije oštećenja primenom veštačkih neuronskih mreža.

Naučne metode primenjene u okviru ove teze su metode analize i sinteze. Za obradu signala vibracija prikupljenih na posebno dizajniranom i izrađenom probnom stolu zupčastog prenosnika korišten je softverski paket OneProd XPR⁴, Matlab⁵ i Statistica⁶.

⁴ ACOEM GROUP, France

⁵ MathWorks, USA

⁶ Dell, USA

1.4. POLAZNE HIPOTEZE, METODE ISTRAŽIVANJA I OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOS

Na bazi navedenog, osnovnu naučnu hipotezu koju je ovaj rad trebao da potvrdi, odnosno opovrgne, glasi:

„Primenom metoda veštačke inteligencije, posebno metoda nadgledanih i nenadgledanih neuronskih mreža kao i metoda redukcije dimenzionalnosti skupa obeležja, moguće je pouzdano identifikovati tip oštećenja zupčastog para kao i njegov nivo.“

Ostale hipoteze su:

- korišćenjem mehaničkih vibracija, kao ulaznog parametra u cilju identifikacije oštećenja zupčastih parova, može se razviti tehnika sa visokim stepenom pouzdanosti prilikom identifikacije oštećenja zupčastih parova kao i kvantifikacija njihovog stepena oštećenosti,
- istraživanje se može proširiti i na druga područja, kao što su identifikacija oštećenja zupčastih parova teških mašina, razvijeni model identifikacije oštećenja zupčastih parova će se primenjivati u stvarnim situacijama te će dopretni značajnim uštedama,
- razvoj pouzdanog i ekonomičnog modela identifikacije oštećenja zupčastih parova s automatskim otkrivanjem oštećenja i njihovom klasifikacijom igra ključnu ulogu u uspostavljanju kvalitetne strategije održavanja, posebno za udaljene sisteme nadzora na teško pristupačnim mestima,
- razvijeni model se može koristiti za identifikaciju različitih tipova oštećenja zupčastih parova unutar zupčastih prenosnika, kako bi se obezbedila rana upozorenja i preciznije locirala oštećenja.

Značaj istraživanja i dobijenih rezultata je usko vezano za industriju održavanje i zahteve tržišta za pouzdanijom proizvodnom opremom kao i pravovremenim planiranjem nabavke rezervnih delova. Proizvodni procesi se moraju pratiti preko pouzdanih tehnologija za praćenje stanja u cilju smanjenja troškova kako proizvodnje tako i održavanja, a istovremeno izbegli katastrofalni otkazi koji mogu dovesti do oštećenja imovine, nesreća i gubitaka ljudskih života.

Originalni doprinos ovog istraživačkog rada je poboljšanje postojećih tehnika procesiranja signala mehaničkih vibracija izmerenih na kućištu zupčastog prenosnika u svrhu identifikacije oštećenja zupčanika. Poboljšanje se zasniva na primeni naprednih tehnika obrade signala mehaničkih vibracija, metoda veštačkih neuronskih mreža kao i metoda redukovanja broja obeležja u cilju pouzdanije klasifikacije i kvalitetnije klasterizacije oštećenja.

Glavni izvorni doprinos predloženog istraživanja je u oceni različitih tehnika baziranih na obradi signala mehaničkih vibracija u svrhu dijagnostike i praćenja stanja zupčastih parova. Identificirani su efikasni algoritmi i predložene tehnike za praćenje i klasifikaciju oštećenja zupčastih prenosnika. Osim toga, dat je pregled nedavno razvijenih metoda i tehnika za dijagnostiku i praćenje stanja zupčastih parova, iste su testirane i potvrđene u kontrolisanim laboratorijskim uslovima.

Ova doktorska disertacija je usko vezana za identifikaciju oštećenja zupčastih parova sa fiksnim osama rotacije, zasnovana na procesiranju signala mehaničkih vibracija, a doprinosi istraživanja su sledeći:

- pregled literature ukazuje da je mnogo studija provedeno s ciljem identifikacije oštećenja samo jednog tipa oštećenja i da su prikazani rezultati primene razvijene metode na konkretan tip oštećenja. Ovim istraživanjem planira se razviti metodologija za identifikaciju oštećenja zupčastih parova primenom Cepstrum analize, analize u vremenskom i frekventnom domenu kao najčešće korištenih metoda obrade signala vibracija u cilju dijagnostike oštećenja,
- rezultati istraživanja će biti primenljivi u industriji, kao što su identifikacija oštećenja zupčastih parova u automobilske industriji i industriji teške mehanizacije, razvijeni modeli identifikacije se mogu primenjivati u realnim situacijama i isti će doprineti značajnim uštedama prilikom donošenja odluka u održavanju industrijske opreme.

Na bazi rezultata višegodišnjeg rada na ovoj disertaciji objavljeno je više naučnih i stručnih radova:

M23, rad u međunarodnom časopisu (ISI lista).

Rusmir Bajric, Ninoslav Zuber, Georgios Alexandros Skrimpas, and Nenad Mijatovic, "Feature Extraction Using Discrete Wavelet Transform for Gear Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox," *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 6748469, 10 pages, 2016. <http://dx.doi:10.1155/2016/6748469>

Zuber N., Bajrić R., Šostakov R. Gearbox faults identification using vibration signal analysis and artificial intelligence methods. *Eksploatacija i Niezawodność*. 2014;16(1):61-65.

M33, saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini.

Ninoslav ZF, Rusmir B, Cvetkovic D. Vibration feature extraction methods for gear faults diagnosis-A review. *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection*. 2015 Nov 9;12(1):63-72.

Bajrić R, Zuber N, Isić S. Recent advances in vibration signal processing techniques for gear fault detection-A review. *Applied Mechanics and Materials* 2013 Dec 12 (Vol. 430, pp. 78-83).

1.5. PREGLED RELEVANTNIH ISTRAŽIVANJA

Zbog velike važnosti utvrđivanja stanja zupčastih parova unutar zupčastog prenosnika od suštinskog značaja je efikasna procena njihovog stanja. Postoji stalni pritisak i potreba da se poboljšaju merne tehnike i alati u cilju što je moguće ranijeg otkrivanja i utvrđivanja oštećenja elemenata zupčastog prenosnika. Sami zupčanici su najvažniji elementi u zupčastom prenosniku, dok visok stepen habanja i zamor kojima su izloženi čak i pod normalnim radnim uslovima znači da su isti često predmet prevremenog otkaza. Zupčasti prenosnici se sastoje od tri osnovne komponente zupčanika, ležajeva i vratila, a isto tako se smatraju kao jedan od bitnih sklopova industrijske pogonske tehnike sa velikom

rasprostranjenosti u raznim industrijama, industriji automobila, procesnoj industriji, rudarskoj mehanizaciji, industriji vetroelektrana kao i drugim industrijama. Iz razloga što više od polovine otkaza zupčastih prenosnika nastaje zbog oštećenja zupčanika [10], istraživanja u smeru identifikacija oštećenja zupčanika je uzeta kao studija slučaja za doktorsku disertaciju. S druge strane, veliki obim tehnika u identifikaciji oštećenja zupčastih parova je pouzdan u kasnim fazama oštećenja, dok u ranim fazama oštećenja postoji veoma mali broj pouzdanih tehnika.

Težnja za što je moguće nižim proizvodnim troškovima i troškovima održavanja dovela je do toga da su istraživanja u oblasti utvrđivanja stanja zupčastih prenosnika, odnosno zupčastih parova, postala veoma važna. Izloženi teškim uslovima rada u odnosu na ostale komponente mašine, dolazi se do zaključka da zupčanici mogu brzo da izgube svoju funkciju i otkazu a što se pogotovu odnosi na zube zupčanika [11]. Fakhfakh i saradnici su definisali tri opšte vrste oštećenja zupčanika koje uzrokuju grešku prenosa snage i u krajnjoj fazi otkaz zupčastog prenosnika, a to su: greške proizvodnje (npr. greška profila zuba), greške instalacije (npr. poravnanje zupčanika) i nedostaci koji se javljaju tokom procesa rada (npr. pucanje zuba)[11]. Iznenadno opterećenje zuba zupčanika u toku rada je glavni faktor izazivanja i nastanka zamornih naprslina koje se pojavljuju u korenu zuba i slabe integritet strukture zuba. Lin i Zuo su naglasili da je lom zuba najozbiljniji problem zupčanika iz razloga što to može dovesti do potpunog uništenja zupčastog prenosnika [12]. U početku zamorna naprslina na dnu zuba neće se smatrati ozbiljnim problemom, ali kako se naprslina širi, oštećenje će se povećati što može dovesti do katastrofalnog loma zuba. Ako se naprslina može detektovati i pratiti njen razvoj moguće je pravovremeno zameniti zupčanik, prije nego nastupi lom zuba. Veoma mnogo truda je uloženo u razvoj pouzdane tehnike za identifikaciju oštećenja zupčastog prenosnika. Dokazane tehnike uključuju, analizu ulja za podmazivanje zupčanika [13], distribuciju temperature unutar zupčastog prenosnika, buke nastale u radu zupčastog prenosnika, analizu struje motora [14] kao i analiza vibracija kao najpopularnije i jako dobro prihvaćene tehnike u industriji [15]. Nažalost, nije pronađena tehnika koja je u stanju da detektuje sve tipove oštećenja zupčastog prenosnika. Merenje i analiza vibracija, kao najrasprostranjenija tehnika u industriji zbog dokazane sposobnosti da otkrije rano prisustvo oštećenja, može identifikovati samo 60 % do 70 % oštećenja na rotirajućoj mašini [16]. Aktualna situacija je da se analiza vibracija u velikom obimu obavlja preko interneta uz pomoć posebno razvijenog kompjuterskog sistema za nadzor i ne zahteva zaustavljanje mašine. Kako se zupčanici uzupčavaju u toku rotacije nastaje periodična promena momenta i sile tako da će primarne vibracije biti frekvencije uzupčavanja. Međutim, zbog frikcionih sila usled trenja bokova zubi u sprezi takođe će nastati značajne slučajne komponente kao sastavni deo signala vibracija [16]. Kako se zubi zupčanika uzupčavaju i time generišu vibracije, iste će putovati preko zupčanika na pripadajuće vratilo zupčanika, zatim na ležajevе te na kućište zupčastog prenosnika gde će se i detektovati, obično koristeći akcelometar. Kako vibracija putuje od tačke nastanka do senzora koji se najčešće nalazi na kućištu zupčastog prenosnika ista će biti oslabljena i „zagađena“ mnoštvom vibracija koje generišu drugi izvori. Tako detektovan signal vibracija će se obično morati dodatno obraditi i eventualno filtrirati. Analiza vibracija je veoma pogodna za praćenje stanja zupčastih prenosnika iz razloga što svaka promena u vibracijama prikupljenih sa zupčastog prenosnika je najverovatnije rezultat zbog promene stanja reduktora. To je zato što će oštećenje na zupčaniku izmeniti kako amplitudu tako i fazu modulacije vibracija zupčanika. Stoga, sve

promene u signalu vibracija se mogu analizirati i na taj način omogućiti otkrivanje oštećenja na istim [17].

Većina prirodnih fenomena su nelinearni i većina nastalih signala u toku rada zupčastog prenosnika imaju promenljive sadržaje frekvencija. Vibracije višestepenih zupčastih prenosnika sadrže nestacionarne tranzijente, odnosno prolazne komponente, npr. kratke impulsne periodične komponente nastale sudarima komponenti. Najčešće signali vibracija nastali u zupčastom prenosniku će sadržati tri glavne komponente: (1) periodične komponente kao što su one nastale interakcijom između zupčanika u toku uzupčavanja, (2) prolazne komponente izazvane događajima kratkog trajanja kao što su ponavljajući udari zbog polomljenog zuba i (3) širokopojasna buka u pozadini. U ranim fazama oštećenja i inicijacije greške dobijeni signal vibracija će biti niske amplitude maskiran od strane drugih izvora vibracija koji su prisutni u zupčastom prenosniku i kao takav se ne može koristiti direktno za detekciju oštećenja.

Međutim, upravo u ovoj fazi otkrivanje i identifikacija oštećenja zupčastih parova je veoma važno. Iz ovog razloga, potrebne su više efikasne metode procesiranja signala s ciljem kvalitnije analize izmerenih vibracija uz veću pouzdanost utvrđivanja stanja i identifikacije oštećenja. Stevens i saradnici tvrde da su navedeni statistički parametri pogodni za detekciju i dijagnozu u slučajevima kada mehanička oštećenja formiraju oblik impulsa i koji izazivaju periodične impulse kratkog vremenskog trajanja (širokog frekventnog pojasa) osnovnog signala vibracija. Međutim, najčešći metod koji se koristi za detekciju i dijagnozu oštećenja zupčanika je spektralna analiza signala vibracija u frekventnom domenu. To je zato što su najvažniji elementi za detekciju i dijagnozu zupčanika u spektru vibracija nastalih od zupčanika i to: frekvencija uzupčavanja, harmonici frekvencije uzupčavanja i njihovi bočni pojasevi (zbog pojave modulacije) koji mogu biti s obe strane spektra vibracija oko frekvencije uzupčavanja. Bočni pojasevi su razdvojeni celobrojnim umnoškom frekvencije rotacije zupčanika. Ponašanje ovih bočnih pojaseva može biti veoma indikativno za potvrdu prisustva oštećenja, npr. kroz povećanje broja bočnih pojaseva i njihovih relativnih amplituda. Randall je utvrdio da prva tri harmonika frekvencije uzupčavanja i njihovi bočni pojasevi pružaju dovoljno informacija za identifikaciju oštećenja zupčanika [18].

Praćenjem promena amplitude pojedinih bočnih pojaseva u frekventnom spektru može se obezbediti kvalitetna promenljiva za utvrđivanje stanja zupčanika. U praksi, često je teško ekstrahovati (izdvojiti) značajne, odnosno kvalitetne informacije iz spektra vibracija na osnovu jednostavne Fourier Transformacije (FT) prelazeći iz vremenskog domena u frekventni. U ranim fazama razvoja oštećenja, važne frekvencije koje definišu oštećenje imaju nisku amplitudu i iste mogu biti maskirane vibracijama drugih izvora vibracija ili prekriveni okolnom bukom [19].

Ovo je posebno važno iz razloga što pojedini impulsi vibracija nastali zbog oštećenja zupčanika obično imaju tendenciju da kratko traju izazivajući da odgovarajući frekventni puls bude razasut na širokom frekventnom pojasu niskih amplituda [18].

U današnje vreme, u dijagnostici oštećenja zupčanika sve više se koristi kombinacija vremenske i frekventne analize, odnosno vremensko-frekventna analiza i ista postepeno zamenjuje individualnu vremensku, odnosno frekventnu analizu. Predstavljajući signal istovremeno u vremenskom i frekventnom domenu dobija se snažan alat pri ispitivanju

nestacionarnih signala vibracija uz jasnije tumačenje rezultata. Wang i McFadden tvrde da je relativno lako okarakterisati lokalne osobine signala i sve prepoznatljive komponente u frekventnom opsegu od interesa, njihove sekvence uzročnosti, dok isto tako promene u vremenu je moguće prikazati na jednom dijagramu, koristeći vremensko-frekventna analize [20].

Pretpostavka da se sadržaj i nivo vibracija menja, zavisno od operativnog stanja zupčanika u sprezi, je veoma česta. Ova tvrdnja je utemeljena i dokazana kod jednostavnih sistema dok kod kompleksnih sistema, kao što su višestepeni zupčasti prenosnici sa promenljivim opterećenjem ili brojem obrtaja, veza između sadržaja i nivoa vibracionog signala može biti veoma kompleksna i nelinearna te iz navedenog razloga gotovo uvek se zahteva primena najnaprednijih tehnika analize signala vibracija. Ova tvrdnja je jasno prikazana istraživanjima McFaddena [21, 22]. Unazad tri decenije analiza signala u frekventnom domenu je jedna od najpopularnijih i najčešće korištenih tehnika za detekciju oštećenja zupčastih parova [23]. Stewart je u [24] prezentovao nekoliko tehnika procesiranja signala specifično za detekciju oštećenja na zupčastim parovima. Ove su tehnike razvijene sa ciljem naglašavanja promena signala koje potiču od oštećenja zupčanika, preventivno u vremenskom domenu. Stewartove metode se zasnivaju na pojasnom filtriranju signala. U jednoj od ovih tehnika se vrši pojasno filtriranje nad frekvencijom uzupčavanja i njenim harmonicima te kasnijom rekonstrukcijom vremenskog signala koji se naziva „rezidualnim“. Autor je kroz primer pokazao da su promene izraženije nad rezidualnim signalom u poređenju sa osrednjenim vremenskim signalom analizirajući slučaj oštećenja na zupčastim parovima.

Stewart je u radu [21] prvi put primenio koncept sinhronizovanog osrednjavanja u vremenskom domenu (TSA⁷) početak merenja svakog bloka vremenskog signala definisan brojem obrtaja zupčanika koji se analizira. Naknadno linearno osrednjavanje ovako dobijenih signala dovodi do eliminacije svih komponenti koje nisu sinhrono sa korištenim brojem obrtaja. Na taj način se izuzetno kompleksan sistem može svesti na jednostavniji, što ujedno omogućava i naknadnu primenu jednostavnijih tehnika procesiranja signala. Ova metoda je veoma efikasna za uklanjanje vibracija koje ne potiču od zupčastih parova.

S ciljem razvoja pouzdanijih dijagnostičkih metoda za kotrljajne ležajeve i zupčaste prenosnike White je u [19] primenio tehnike demodulacije signala. Wang i McFadden su u [20] i [25] primenili tehnike analize spektrograma. Spektrogram daje prikaz frekvencijskog sadržaja vibracionog signala u vremenu tj. njegovu frekventno-vremensku distribuciju. Zaključak navedenih autora je bio da spektrogramski prikaz može izdvojiti relativno rane otkaze zupčanika. U svojim kasnijim radovima [26] isti su autori primenili ortogonalnu talasnu analizu za ranu detekciju oštećenja zupčanika. Baydar i Ball su u [27] razvili novu formu vremensko-frekventne distribucije signala pod nazivom momentalni spektar snage (IPS⁸) i isti su primenili za potrebe detekcije oštećenja u zupčanicima. Po tvrdnji autora IPS je relativno neosetljiv na promenu broja obrtaja i opterećenja čime se dobija na univerzalnosti metode. U svojoj kasnijoj studiji [28] Baydar i Ball su primenili Wagner-Ville distribuciju nad signalima dobijenim merenjem vibracija i nivoa zvučnog pritiska. Baydar i

⁷ Time Synchronous Averaging

⁸ IPS – Instantaneous power spectrum

Ball su zaključili da su akustični signali veoma osetljivi na rana oštećenja zupčanika. Stander i Hayns su u [29] izvršili veoma detaljnu analizu uticaja promene opterećenja na nivo i sadržaj vibracionog signala na bazi kog će se vršiti praćenje stanja zupčastih prenosnika. U radu su zaključili da se uticaj opterećenja u vibracionom signalu ubrzanja manifestuje kao niskofrekventna komponenta modulacije [30]. U drugom pak radu [31] su autori analizirali trenutni broj obrtaja vratila ISS⁹ i njegovu primenu kao operativnog parametra za praćenje stanja zupčastih prenosnika. Oni su pretpostavili da se ISS može koristiti kao klasifikacioni parametar za ocenu stanja zupčastog para pri pretpostavci da je prethodno isti sniman za različite nivoe varijabilnog opterećenja. Decker u radu [32] daje detaljan prikaz postojećih sistema za monitoring prenosnika u helikopterima gde na kraju zaključuje da su postojeće metode nedovoljno tačne i nepouzdanе. U drugom radu pak [33] predlaže sinhronu akviziciju u domenu vremena, odnosno tehniku za ocenu i praćenje stanja zupčastog prenosnika.

Randall-u čitajući rad [34] je postala jasna mogućnost korišćenja Cepstrum analize u detekciji i kvantifikaciji familija periodično razdvojenih spektralnih komponenti i tada je shvatio da ne samo pored detekcije familije harmonika nego i mogućnost kvalitetnog razdvajanja moduliranih bočnih pojaseva. Lokalna oštećenja kod zupčastih parova generišu modulaciju signala oko frekvencije uzupčavanja što rezultira velikom broju bočnih pojaseva razdvojenih za frekvenciju obrtaja zupčanika na kojem se nalazi lokalno oštećenje [35]. Većina radova koji koriste Cepstrum analizu u cilju dijagnostike oštećenja zupčastih parova koriste navedenu osobinu Cepstrum funkcije. Randall je od 1975. do 1980. uradio nekoliko dodatnih modifikacija i aplikacija Cepstrum analize u dijagnostici zupčastih parova od kojih su najpoznatije [36, 37]. Od 1999. do 2004. Mohamed El Badaoui sa saradnicima je prikazao nekoliko novih aspekata korišćenja Cepstrum analize za dijagnostiku zupčastih parova.

Jedan od tih aspekata je prikazan u [38] i široko proširen u [39], koji se bazira na, kako autori navode, činjenici da u uslovima neoštećenog zupčatog para postoji tendencija zadržavanja konstantne sume amplituda prvih harmonika oba zupčanika koji se uzupčavaju, drugim rečima ukoliko se amplituda prvog harmonika jednog zupčanika povećava zbog oštećenja, amplituda prvog harmonika drugog zupčanika se smanjuje. Autori su u [39] navedenu pojavu definisali kao dijagnostički indikator „d“, koji predstavlja odnos posebno normalizovane verzije amplituda prvih harmonika oba zupčanika a koji su neosetljivi na odnos signala i šuma, iako ovo menja apsolutnu magnitudu brojnika i nazivnika. Vrednost dijagnostičkog indikatora „d“ blizu (-1) podrazumeva problem na gonjenom zupčaniku, dok vrednost blizu (1) indicira problem na pogonskom zupčaniku [39].

U radu [40] je provedena eksperimentalna analiza automobilskog zupčastog prenosnika u kome je analizirana kernel metoda analize glavnih komponentata (KPCA¹⁰) selekcije obeležja i koja je pokazala bolje rezultate u konkretnom slučaju u odnosu na metodu analize glavnih komponentata (PCA¹¹). Malhi i Gao [41] su proveli analizu primene PCA

⁹ ISS – Instantaneous shaft speed

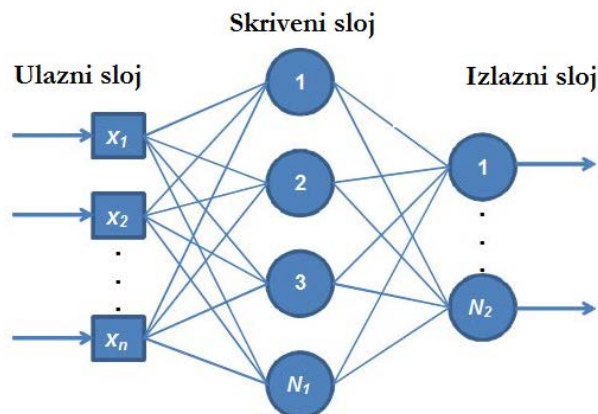
¹⁰ Kernel principal component analysis

¹¹ Principal component analysis

metode u selekciji obeležja na primeru ležaja koristeći nadgledanu i nenadgledanu metodu klasifikacije oštećenja. Sakhivel i ostali [42] u detaljno eksperimentalnom istraživanju oštećenja ležajeva centrifugalne pumpe navode da analizirane nelinearne metode reduciranja i selekcije obeležja nisu u stanju omogućiti kvalitetnije rezultate u odnosu na linearnu metodu PCA. PCA bazirana selekcija obeležja je odabrana u radu [41] u kome su odabrana reprezentativna višedomenska obeležja za detekciju, klasifikaciju i nadgledanje ležajeva. Zuber u svom doktorskom radu [23] je naglasio da se primenom metoda veštačke inteligencije u postupcima identifikacije otkaza rotirajućih mašina postižu dva osnovna cilja:

- smanjenje posledice donošenja i primene pogrešnih vibrodijagnostičkih zaključaka nastalih usled loše interpretacije sadržaja vibracionog signala od strane nedovoljno kompetentnih vibrodijagnostičara, s jedne strane zbog činjenice da čak iiskusni i obučeni vibrodijagnostičari zbog nedostatka vremena pogreše i samim tim donose nedovoljno tačne zaključke o stanju mašine,
- povećava se opšti nivo pouzdanosti zaključaka o identifikovanom tipu oštećenja na način eliminisanja ljudskog (subjektivnog) faktora iz procesa odlučivanja.

Kao što je već rečeno, veštačke neuronske mreže najčešće su korišteni klasifikatori kada su u pitanju inteligentne metode dijagnostike oštećenja. Nakon obučavanja i verifikacije za identifikaciju pojedinih tipova oštećenja kvalifikovana neuronska mreža može prihvatiti novu klasu oštećenja te iste i identifikovati kada se u budućnosti pojave. Bez ove sposobnost učenja, odnosno adaptiranja, sistem za detekciju oštećenja može novu klasu oštećenja svrstati u postojeće te na taj način dovesti do pogrešnih vibrodijagnostičkih zaključaka. Simon je u [43] opisao arhitekturu neuronskih mreža (slika 1-1) koje su, tipično, organizovane kroz slojeve (eng. layers).



SLIKA 1-1. Arhitektura neuronske mreže

Slojevi su sačinjeni od odgovarajućeg broja međusobno povezanih čvorova koji sadrže svoje aktivacione funkcije. Modeli (patterns) su uvedeni u neuronsku mrežu kroz tzv. ulazni sloj (input layer) koji komunicira sa jednim ili više skrivenih slojeva (hidden layer) u okviru kojih se procesiranje obavlja kroz sistem skaliranih veza. Skriveni slojevi su pak povezani sa izlaznim slojem (output layer) u okviru kojeg se obezbeđuje dijagnostički zaključak[43]. Pristup dijagnostike oštećenja korišćenjem neuronskih mreža se posmatra kao problem prepoznavanja oblika (pattern recognition). Koriste se standardne tehnike kako bi se ekstrahovala obeležja a koja se kasnije koriste za treniranje neuronske mreže sa obeležjima koja odgovaraju određenom stanju zupčastog para (normalno stanje, okrnut zub, pohaban

zupčanik, naprslina u korenu zuba i td.). Metoda ekstrakcije mora biti takva koja će omogućiti da dobivena obeležja za različite klase oštećenja formiraju jasno razdvojene klustere u prostoru obeležja. Postignuti rezultat pristupa dijagnostike oštećenja korišćenjem neuronskih mreža od odabira metode ekstrakcije obeležja neuronskih mreža su uspešno primenjene u identifikaciji otkaza rotirajućih mašina i to [43, 44]:

- BPF¹², mreža bez povratne veze sa prostiranjem izlazne greške unazad,
- MLP¹³, višeslojna perceptronska mreža,
- BPMLP¹⁴, višeslojna perceptronska mreža sa prostiranjem izlazne greške unazad,
- RBF¹⁵, neuronska mreža sa radijalnim bazisnim funkcijama,
- SOFM¹⁶, samoorganizovane (samoobučavane) mape obeležja.

Jedan od najčešćih zadataka *feedforward* neuronske mreže (prostiranje signala u jednom smeru) je pronalaženje mapiranja koje najbolje interpolira multivarijabilnu nelinearnu funkciju na bazi vektora ulaznih promenljivih i poznatih izlaznih vrednosti. Najčešće se koriste dve vrste neuronskih mreža i to MLP i RBF kako bi se postigao ovaj cilj.

Najčešće primenjuje algoritam u obuci neuronskih mreža jeste *Back propagation* algoritam, odnosno postupak propagacije izlazne greške unazad. Metode bazirane na ovom algoritmu koriste lančana pravila za parcijalne izvode koji predstavljaju osetljivost aktivacionih funkcija neurona u odnosu na trenutno stanje i težinskih koeficijenata neurona neuronske mreže, odnosno prostiranja greške unazad označava povratak informacije o grešci unazad prethodnom neuronu koja tada služi za adaptaciju faktora pojačanja tog neurona. Rekurentne neuronske mreže (RNN) imaju istu karakteristiku kao i *feed forward* mreže osim što kod njih postoje povratne veze. Usled postojanja ovih povratnih veza obučavanje ovih mreža se izvodi u ciklusima tako da najčešće obučavanje ovog tipa mreža traje duže u poređenju sa *feed forward* mrežama.

Samoorganizovane mape obeležja (SOM) [44] pripadaju grupi nenadgledanih neuronskih mreža koje se baziraju na topografskom mapiranju. Neurobiološke studije ukazuju da su senzorni ulazi mapirani na određene delove cerebralnog korteksa na uređen način. Ovakve mape zovu se topografske mape. U svakom stanju reprezentacije ili procesiranja svaki deo ulazne informacije čuva se u svom odgovarajućem susedstvu. Neuroni koji procesiraju bliske delove informacije su bliski tako da mogu da reaguju preko kratkih sinaptičkih veza. Prostorna lokacija izlaznih neurona u topografskoj mapi odgovara određenom domenu ili karakteristici izvedenoj iz prostora ulaza.

Sick je u preglednom radu [45] veoma detaljno prikazao pregled do tada primenjenih tipova neuronskih mreža, algoritama za obučavanje kao i parametara čijom se primenom postiže zadovoljavajuća tačnost automatizovanih sistema za detekciju otkaza. Iz podataka datih radom uočava se trend primene MLP tipova neuronskih mreža sa *back propagation* algoritmom obučavanja, pri čemu kao parametar najčešće varira broj neurona u skrivenim

¹² Back propagation feed forward mreža

¹³ Multiple layer perceptron

¹⁴ Višeslojna perceptronska mreža sa prostiranjem izlazne greške unazad

¹⁵ Neuronska mreža sa radijalnim bazisnim funkcijama

¹⁶ Samoorganizovane (samoobučavane) mape obeležja

slojevima. Zuber je u svom doktorskom radu istražio najčešće tipove neuronske mreže u odnosu na tip rotirajuće mašine odnosno komponente i zaključio da se kod zupčastih prenosnika najčešće koriste BPF i MPL neuronske mreže [23].

Baillie i Mathew su u svom [46] ranom istraživanju primene neuronskih mreža u dijagnostici oštećenja kotrljajnih ležajeva primenili MLP i RBF neuronske mreže. Veoma bitan zaljučak njihovog istraživanja je potreba za dovoljno dugim vektorom ulaznih varijabli. Tek kad je dužina vektora ulaznih varijabli sadržavala 500 i više zapisa, dobijena je 100% tačnost predviđanja neuronske mreže.

Meesad i Yen su u [47] kao klasifikatore za oštećenja u zupčastim parovima, ležajevima i vratilima primenili MLP neuronske mreže kao i metode vektorske kvantizacije. Primenjene neuronske mreže su dale prihvatljive rezultate i za slučaj iterativnog i tzv. offline predstavljanja vektora ulaznih varijabli. Međutim, razvijene mreže su se pokazale suviše glomaznim i sporim u situacijama kad je potreban momentalan (realtime) *pattern recognition* algoritam sa mogućnošću brze prilagodbe na novopristigle podatke.

Liao i ostali su u [48] analizirali jedanaest obeležja i uspešno primenili SOM-e za identifikaciju tri stanja zupčastog para (normalno stanje, naprsnut zub, nedostajući zub). Bartelmus i Zimroz su u [49] koristili SOM za identifikaciju četiri vrste oštećenja zupčastog prenosnika pri čemu su podaci za analizu dobiveni primenom matematičkog modela koji omogućava simulaciju različitih tipova oštećenja zupčastog para (zazori, naprslina u korenu zuba, slomljen zub itd.). Isti autori su u [50] primenom MLP neuronskih mreža razvili automatizovani dijagnostički sistem za detekciju oštećenja nad reduktorom za pogon utovarne trake bagera za površinsko iskopavanje uglja. Kao ulaz u neuronsku mrežu korištena su obeležja signala a korišteni su sledeći parametri: prva tri harmonika osnovne frekvencije, prvih pet harmonika frekvencije uzupčavanja kao i ekstrakcije komponenti Cepstrum funkcije. Czech je u [51] u svrhu klasifikacije naprsline zuba zupčanika koristio *feedforward* neuronsku mrežu baziranu na analizi vjerovatnoće (PNN¹⁷) i metodu redukcije dimenzionalnosti (PCA) pri čemu su podaci za analizu dobiveni primenom matematskog modela. Rezultati su pokazali da je nemoguće koristiti samo jedan oblik spektra niti jedan oblik filtracije prilikom ekstrakcije obeležja.

Rafieea i ostali su u [52] analizirajući signal vibracija oštećenih zupčanika u obliku nedostajućeg zuba i pohabanost kao i oštećenja kotrljajnih ležajeva uspostavili novu proceduru prepoznavanja oštećenja zupčanika i ležajeva koristeći MLP neuronsku mrežu i time definisali proceduru detekcije i identifikacije oštećenja zupčastog prenosnika. Ulazni vektor obeležja je u ovom radu baziran na standardnoj devijaciji koeficijenata paketnih talasića¹⁸. Czech je u [53] pokazao da neuronske mreže omogućavaju visoku tačnost klasifikacije koristeći podatke dobivene na osnovu matematskog modela zupčastog prenosnika kao i realnog zupčastog prenosnika. U konkretnom slučaju istraživanje je fokusirano na identifikaciju oštećenja zuba kao i praćenje nastanka oštećenja. Czech isto tako zaključuje da se klasifikacija bazirana na neuronskim mrežama uspešno može iskoristiti za ranu detekciju oštećenja zupčanika [54].

¹⁷ Probabilistic neural network

¹⁸ Wavelet packet coefficients

Cheng i drugi su nedavno u svom radu [55] predložili novu metodu identifikacije baziranu na Hilbert–Huang transformaciji i SOM neuronskoj mreži. Prvo su familije frekvencija, koje su povezane sa zupčastim parom, efikasno razdvojene koristeći EMD¹⁹ metodu. Zatim je dobiven Hilbertov spektrom i Hilbertov granični spektrom koristeći IMF²⁰ Hilbertov-e transformacije. Nakon Hilbert–Huang transformacije za klasifikaciju oštećenja je odabran procenat energije prvih šest IMF kao ulazni vektor SOM neuronske mreže. Na osnovu rezultata isti autori zaključuju da se obeležja oštećenja mogu precizno izdvojiti i razlikovati na osnovu predloženog pristupa.

Yang i ostali su u radu [56] procenivali efikasnost u dijagnosticiranju dotrajalosti zupčanika (pohaban zupčanik, okrznut zub zupčanika, zupčanik sa debalansom mase) kroz ekstrakciju obeležja kao i kroz pristup njihove dimenzionalne redukcije. Obeležja bazirana na signalima vibracija koja su direktno u korelaciji sa oštećenjima zupčanika su ekstraktovana koristeći EEMD²¹ metod i analizu graničnog Hilbert spektruma. Obeležja iz kako vremenskog tako i frekventnog domena su ekstraktovana i njihova dimenzija je reducirana koristeći metodu glavnih komponentata (PCA). Obeležja visokog prioriteta predstavljaju glavna obeležja (karakteristike) dinamičkog odziva sistema na oštećenja zupčastog para. Zatim je primenjena (BPMLP) višeslojna perceptronska mreža sa prostiranjem izlazne greške unazad s ciljem klasifikacije odabranih glavnih komponentata obeležja nakon PCA algoritma u svrhu dijagnostike dotrajalosti zupčanika. Dijagnostički rezultati dobijeni nakon klasifikacije neuronskom mrežom su pokazali efikasnost predloženog pristupa u dijagnosticiranju oštećenja zupčanika. Isto tako je uočeno da proces redukcije dimenzionalnosti primenom PCA omogućava poboljšanje tačnosti dijagnostike oštećenja uz smanjenje vremena potrebnog za proračun. Bitno je napomenuti da autori prilikom analize u konkretnom slučaju su zaključke donosili na osnovu podataka zupčastog para koji nije opterećen, nego se slobodno okreće samo uz pomoć pogonskog motora. Chan je u [57] uočio da je SOFM nedovoljno tačna u situacijama kada ulazni podaci sadrže greške koje potiču od velikih promena u stanju sistema (npr. velika zavisnost nivoa vibracija od radnog režima), neispravnih senzora, odnosno neispravne montaže senzora.

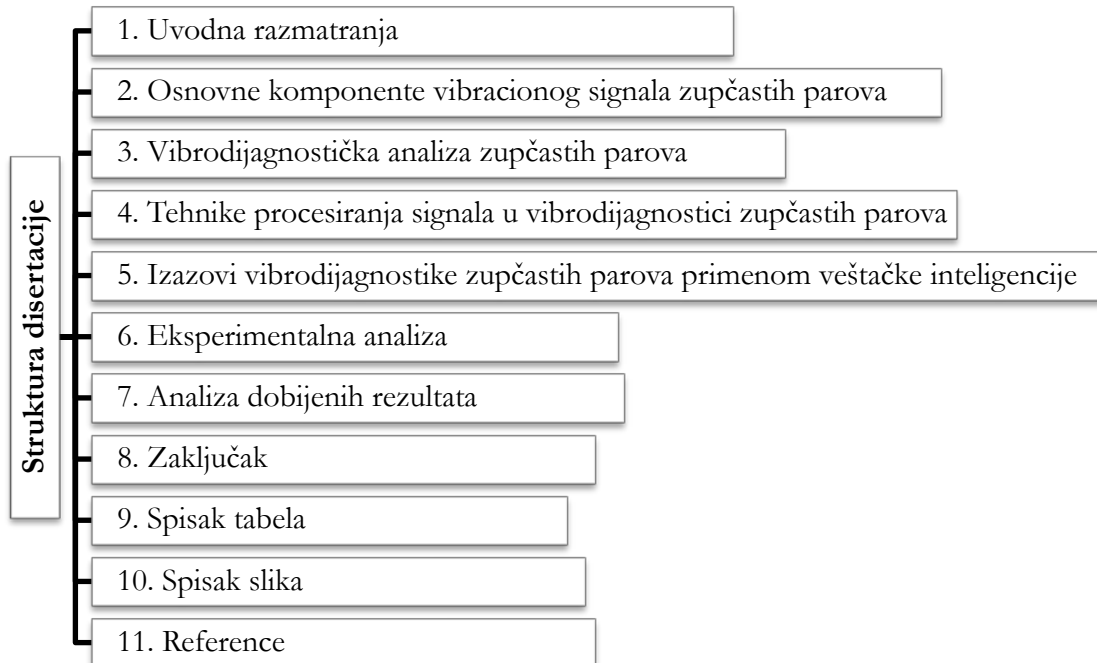
Jack i Nandi su u [58] kombinovali neuronske mreže i genetske algoritme. Autori su u pomenutom radu uočili da u prisustvu velikog broja potencijalnih ulaznih parametara neuronske mreže postoji velika zavisnost između performansi mreže i odabira ulaznih pokazatelja. Iz tog su razloga primenjeni genetski algoritmi čiji je zadatak bio odabir najznačajnijih ulaznih obeležja koji su dovoljni kao ulazni parametri neuronske mreže tako da ista da zadovoljavajuću tačnost prepoznavanja izlaznih parametara uz minimum potrebnih računarskih kapaciteta za njeno obučavanje. Iz ukupnog seta od 66 promenljivih primena genetskih algoritama je dovela do korišćenja svega 6 promenljive pri čemu je tačnost klasifikacije neuronske mreže iznosila 99.8%, uz napomenu da je korišćenje svih 66 ulaznih parametara rezultirala u tačnosti od 87.2%. Isto tako u drugom primeru, iz većeg seta sastavljenog od 156 ulaznih promenljivih, primena genetskih algoritama je isfiltrirala 6 promenljivih. Tačnost neuronske mreže sa tih 6 promenljivih je iznosila 100%.

¹⁹ Empirical mode decomposition

²⁰ Intrinsic mode functions

²¹ Ensemble empirical mode decomposition method

1.6. STRUKTURA DISERTACIJE I PREGLED SADRŽAJA PO POGLAVLJIMA



Poglavlje 1. Uvodnim poglavljem su predstavljene tehnike za ispitivanje bez razaranja primenljive za ocenu stanja zupčastih prenosnika, iznesena je motivacija za istraživanje sprovedeno u okviru ove disertacije, utvrđeni su predmet, značaj i cilj istraživanja, date su polazne hipoteze te je dat prikaz osnovnih alata korištenih u radu kao i pregled literature kroz prikaz najznačajnijih radova objavljenih u okviru detekcije oštećenja zupčastih parova baziranih na analizi signala mehaničkih vibracija i veštačkoj inteligenciji.

Poglavnje 2. Drugo poglavlje se bavi prikazom i objašnjenjima nastanka komponenta vibracionog signala zupčastih parova i objašnjava razloge i uslove nastanka vibracija u toku rada zupčastih parova. U istom poglavlju je obrađen uticaj opterećenja na sadržaj vibracionog signala, uticaj greške u proizvodnji, efekti habanja, efekti amplitudne i frekventne modulacije kao i ostalih komponenta vibracionog signala zupčastog prenosnika. Uopšteno su objašnjena najčešća oštećenja zupčanika zupčastih parova.

Poglavlje 3. Treće poglavlje obrađuje kalkulacije očekivanih frekvencija kod analize i vibrodijagnostike zupčastih parova.

Poglavlje 4. Četvrto poglavlje obrađuje sveukupni proces dijagnostike oštećenja koji se bazira na prikupljanju podataka, pred procesiranjem, ekstrakciji obeležja i dijagnostici/prognostici. Isto tako, ovo poglavlje daje prikaz osnovnih tehnika procesiranja signala u vremenskom, frekventnom i vremensko-frekventnom domenu posebno osvrćući se na metode koje su se pokazale primenljivim kod dijagnosticiranja oštećenja zupčastih parova. Ovo poglavlje obrađuje i nastajanje vibracija zupčastih parova i u istom razvijen je i matematski model rotirajuće mašine sa oštećenjima zupčastog para.

Poglavlje 5. U ovom poglavlju naglašeni su izazovi primene veštačke inteligencije u vibrodijagnostici nadgledanju stanja, vibrodijagnostici i klasifikaciji oštećenja zupčastih parova. Detaljnije je objašnjen pojam veštačke neuronske mreže kroz istoriju njenog razvoja kao i način rada i primena u CM i vibrodijagnostici. Opisana je biološka inspiracija za razvoj veštačkih neuronskih mreža, arhitektura neuronskih mreža kao i prikaz osnovnih algoritama za obučavanje neuronskih mreža i procenu izlazne greške. Posebna pažnja je posvećena nenadgledanim samoorganizovanim Kohonenovim mapama obeležja kao i višeslojnim perceptronskim neuronskim mrežama koje su korištene u okviru ovog rada. U istom poglavlju su detaljnije obrađene tehnike za redukciju dimenzionalnosti obeležja prilikom treniranja neuronske mreže.

Poglavlje 6. Šesto poglavlje daje prikaz eksperimentalne verifikacije postavljene hipoteze i to nad modelom rotirajuće mašine u obliku jednostepenog zupčastog prenosnika (probni sto). Od mogućih otkaza rotirajuće mašine kao poznata oštećenja su uvedeni različiti nivoi okrnutog zuba zupčanika, okrnut jedan zubac zupčanika, oštećenje naprslina u korenu zuba kroz četiri koraka i pohabanost zupčanika kroz tri nivoa. Isto poglavlje obuhvata opis i prikaz rezultata serije testova izvedenih nad modelom zupčastog prenosnika (probni sto) na kome su, kao poznata oštećenja, uvedeni razni tipovi oštećenja zupčastog para.

Poglavlje 7. Sedmim poglavljem je obuhvaćena i prikazana analiza dobijenih rezultata sa osvrtnom na efekte redukcije dimenzionalnosti obeležja prilikom vibrodijagnostičke analize zupčastih prenosnika. Detaljnije su data pojašnjenja najuticajnijih obeležja s ciljem izbora optimalnog seta obeležja u kako nadgledanju stanja tako i vibrodijagnostici zupčastih parova.

Poglavlje 8. Ovim poglavljem je obuhvaćena i prikazana analiza dobijenih rezultata te prezentovane zaključne napomene.

Poglavlje 9 i 10. Deveto i deseto poglavlje daju spisak svih slika, odnosno tabela u okviru ovog rada.

Poglavlje 11. Ovo poglavlje daje spisak korištenih referenci.

1.7. PRIMENJENA METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I KORIŠTENI ALATI

Prikupljanje podataka i njihovo tumačenje predstavljaju dva osnovna aspekta u vibrodijagnostici. Većina energije prilikom prikupljanja podataka sa rotirajućih mašina se fokusira na prikupljanje relevantnih podataka. Međutim, mogućnosti da se prikupljeni podaci protumače u cilju utvrđivanja stanja sistema koji se nadgleda je daleko iznad mogućnosti prikupljenih podataka i predstavlja osnovni razlog zbog čega je ova oblast postala znatno interesantnija kako inženjerima u industriji tako i istraživačima. Rad sa podacima složene strukture, koji su često i vrlo obimni, nameće potrebu brze ili automatske obrade podataka što u krajnjem slučaju čini ovu tematiku interesantnijom i izazovnijom. Iskustva u toku nadgledanja podataka prikupljenih sa mašina ukazuju da mašine ne otkazuju bez oređenog predupozorenja. Gotovo uvek se u toku razvoja oštećenja menja i struktura vibracionog signala nadgledane mašine. Ova usporedba „strukture“ signala vibracija za „normalno“ stanje se koristi kao indikator postojanja ili razvoja oštećenja. Prikupljeni signal vibracije u cilju nadgledanja stanja ili dijagnostike veoma često je teško

analizirati u „sirovom“ obliku. Osnovni razlog ovome je što signal vibracija gotovo uvek je sastavljen i od signala vibracija koje generišu i druge komponente u neposrednoj blizini, ili je promena signala toliko mala da ju je nemoguće otkriti. U ovakvim slučajevima moraju se koristiti napredne tehnike procesiranja i analize signala vibracija kako bi se naglasile promene i izdvojilo više informacija u cilju pouzdanije ocene stanja mašine, odnosno pouzdanije dijagnostike ili detekcije.

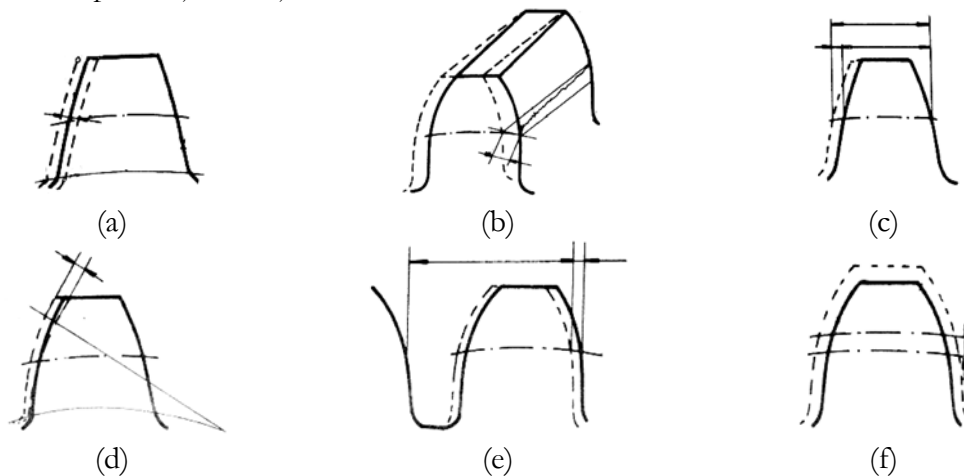
Tehnike procesiranja signala korištene u ovom radu su: analiza u vremenskom domenu, analiza u frekventnom domenu, analiza u vremensko-frekventnom domenu uz izdvajanje posebnih skalarnih obeležja iz istih kao i metode za smanjenje broja obeležja a sve u cilju pouzdanije klasifikacije oštećenja zupčastih parova kao i njihovog nivoa oštećenosti. Tip karakterističnih obeležja koji su korišteni zavisi od tipa oštećenja koje je potrebno identifikovati. U cilju eksperimentalne verifikacije prethodno prikazanih teorijskih postavki izvedena su četiri testa, odnosno analizirane su četiri tipa oštećenja zupčanika sa kosim zubima na probnom stolu zupčastog prenosnika na kojem su kao oštećenja uvedena različita oštećenja zupčastog para.

1.8. TEHNIKE ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA PRIMENLJIVE NA OCENU STANJA ZUPČASTIH PRENOSNIKA

1.8.1. GEOMETRIJSKA KONTROLA

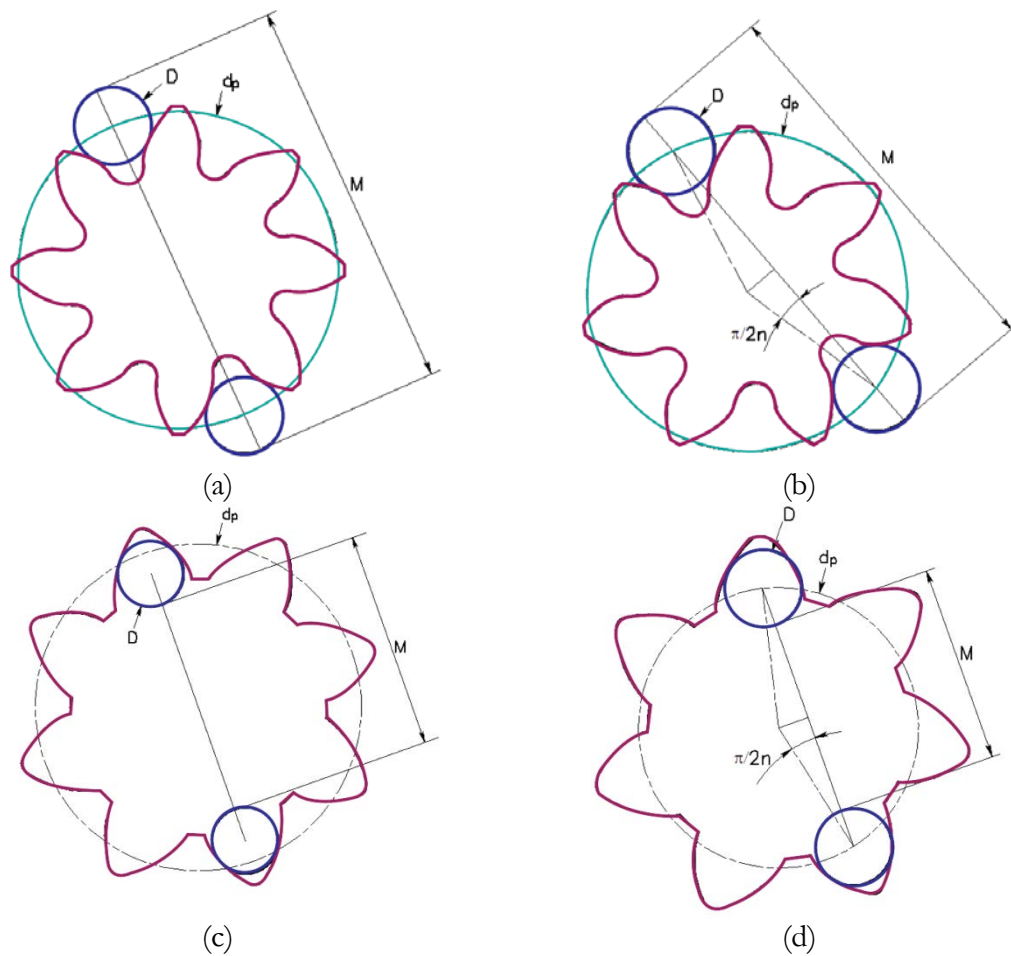
Zupčasti parovi, a samim tim i zupčanici, su složeni mašinski elementi koji prije nego se počnu koristiti zahtevaju visok nivo kvaliteta kako obrade tako i kontrole. Zupčanici se mogu izraditi raznim postupcima, ali se najčešće izrađuju metodom obrade struganjem. Greške koje se pojave u toku obrade mogu uticati na otpornost zupčanika, na opterećenje, habanje, nastajanje buke, kvaliteta prenosa snage kao i na nastajanje vibracija. Greške mogu nastati kako zbog netačnosti alata i pribora prilikom izrade, odnosno proizvodnje, ali isto tako i zbog neadekvatnog montiranja, odnosno postavljanja, u pogledu montaže na mašinu za obradu. Gotovo uvek se u toku projektovanja utvrdi koja mera netačnosti je dozvoljena kako bi se postigle dovoljno dobre osobine zupčanika u toku korišćenja. Vrste grešaka i dozvoljena odstupanja su propisane i sistematizovane standardima iz oblasti izrade i kontrole zupčanika. Postoje dva oblika kontrole zupčanika: funkcionalna (kompleksna) i pojedinačna (diferencijalna). Najčešće funkcionalna kontrola obuhvata kontrolu međusobnog rada zupčastog para u toku sprežavanja, provere traga nošenja i generisane buke. Pojedinačna kontrola može se sprovoditi kao kontrola evolvente profila zuba (a), bočne linije zuba, odnosno nagiba zavojne linije (b), debljine zuba i mjere preko više zuba (c), osnovnog, odnosno tangentnog koraka (d,c), centričnosti, odnosno radijalnog i aksijalnog bacanja (e) kao i međusobnog položaja osa zupčanika (f), slika 1-2. Izradom zupčanika kao i njihovom montažom mogu nastati greške koje se mogu klasifikovati kao greške odstupanja nazivnih vrednosti, greške odstupanja od idealnog profila te greške odstupanja od položaja. Definisanjem dozvoljenih odstupanja od nazivnih mera za svaki razred kvaliteta koji je definisan gotovo uvek DIN ili AGMA standardima zadovoljavaju se osnovne funkcije za kvalitetan i dugotrajan rad zupčastog prenosnika. Funkcije koje zavise od tačnosti izrade zupčanika su mirnoća rada, buka, jednolik prenos kretanja, mogućnost podmazivanja i opteretivost kao i mogućnost zamene. Izdavanjem standarda DIN 3961 kojem je prethodilo dugotrajno testiranje postavljene su osnove određivanja kvalitete

zupčanika. Kvalitet zupčanika se najčešće određuje u odnosu na namenu zupčanika, modul zupčanika kao i razredu prečnika podeonih kružnica. Savremena kontrola daje prednost kontroli sprežanjem (koja je zbog potrebnih uslova često i skuplja) u odnosu na pojedinačnu. Pojedinačna kontrola ne daje uvek željene i dovoljno tačne rezultate iz razloga što se pojedinačne greške u radu zupčanika mogu međusobno kompenzirati. Može se desiti da zupčanik koji u pojedinačnoj kontroli bude odstranjen kao neupotrebljiv, dok se u radu može upotrebiti i staviti u funkciju. Kompletna kontrola odstupanja zupčanika vrši se samo kod preciznih zupčanika, kod prvog komada u seriji kao i metodom uzorka u proveru u toku tehnološkog procesa. Slično, kontrola se sprovodi u slučajevima istraživačkih radova u zavisnosti od postavljenih ciljeva.



SLIKA 1-2. Pojedinačna kontrola - kao kontrola profila zuba zupčanika

Kontrola profila obuhvata kontrolu profila evolvente, a može se sprovoditi na uređajima koji se mogu grupisati u dve grupe i to: na uređaje sa stalnim i uređaje sa promenljivim osnovnim krugom. Sama kontrola se bazira na upoređivanju teorijske evolvente koju simulira uređaj sa stvarnim profilom boka zuba zupčanika. Kontrola debljine zuba se sprovodi kako u pojedinačnoj tako i u serijskoj proizvodnji. U pojedinačnoj proizvodnji se najčešće koriste višestruka merila dok se u serijskoj proizvodnji koriste tolerancijska merila. Najjednostavnije merilo za kontrolu debljine zuba predstavlja kombinaciju kljunastog merila i dubinmera sa preciznom nonijunskom milimetarskom skalom. Mera preko više zuba je kontrolna metoda koja se najčešće primenjuje u praksi. Kontrolna metoda koja se često koristi je i kontrola širine međuzublja. Širina međuzublja, najčešće u oznaci M, se može meriti na način da se postave kalibrisani valjčići u međuzublja te se proverava komparaterom tačnost mere u odnosu na propisanu. Na ovaj način se može indirektno utvrditi debljina zuba a time i granice odstupanja. Pomoćna sredstva mogu biti kalibrisane kugle, valjčići ili prizme.



SLIKA 1-3. Merenje širine međuzublja koristeći kuglice ili valjčice: d_p – referentni prečnik, D – prečnik kuglice ili valjčica, (a) - merenje u slučaju vanjskog ozubljenja i parnog broja zuba, (b) - merenje u slučaju vanjskog ozubljenja i neparnog broja zuba, (c) - merenje u slučaju unutrašnjeg ozubljenja i parnog broja zuba, (d) - merenje u slučaju unutrašnjeg ozubljenja i neparnog broja zuba

Ukoliko se želi izbeći uticaj greške vanjskog prečnika zupčanika tada se koristi mera preko više zuba najčešće u oznaci W i ista se meri indirektno. Za slučaj cilindričnih zupčanika sa kosim zubima merenje se vrši u ravni normalnoj na pravac zuba tako da u formuli figurišu normalni modul zupčanika kao i normalni zahvatni ugao, odnosno ugao dodirnice. Na opisani način moguće je kontrolisati tačnost izrade zupčanika kako sa parnim tako i sa neparnim brojem zuba kao i zupčanike sa vanjskim i unutrašnjim ozubljenjem. Kontrola zupčanika se vrši i merenjem koraka, ali ova metoda se ne koristi često u praksi prvenstveno zbog ne tako jednostavnih merila. Korak zubi zupčanika je jako bitan iz razloga što nejednak korak dovodi do neravnomernog sprezanja zupčanika, što ima za posledicu nastajanje buke u radu i brzo trošenje zuba zupčanika.

1.8.2. TERMOVIZIJA

Bilo koji objekt sa temperaturom iznad apsolutne nule emituje energiju. Kako temperatura raste, raste i emisija energije. Termovizija često puta nazivana i infracrvena termografija je tehnika koja proizvodi vidljiv grafikon ili termografsku sliku termalne energije koju isijavaju

objekti. Termovizija koristi deo infracrvenog pojasa elektromagnetskog spektruma između približno 1 i 14 mikrona. Ova propusnost je obično povezana sa infracrvenom radijacijskom energijom proizvedenom iz temperature objekata od 20°C i više. Električni instrumenti korišteni u infracrvenoj termografiji koriste sistem leća za fokusiranje na nevidljivu energiju koju isijava površina objekta na detektore osjetljive na infracrvene zrake. Različiti nivoi energije se mere detektorom(ima) i onda se transformiraju u vidljive slike na kojima je svaki nivo energije predstavljen različitom bojom ili nivoom sive skale. Slika se može pohraniti u digitalnom ili video obliku za kasnije posmatranje, analizu i izveštavanje. Svi infracrveni sistemi (od jednostavnih do kompleksnih) su osjetljivi samo na infracrvenu radijacijsku energiju. Oni ustvari ne mere temperaturu, oni su korisni u primenama gde varijacija u temperaturi, refleksija, stanje površine ili materijala mogu uzrokovati razliku u nivou radijacijske energije koja se može otkriti infracrvenom kamerom. Pojava zagrijavanja u mnogim slučajevima ukazuje na postojanje greške odnosno kvara. Termovizijskim se uređajima mogu vrlo dobro pratiti stanja elemenata za prenos električne energije, rashladnih postrojenja, transformatorskih stanica kao i same proizvodnje električne energije. Jednako tako može se pratiti stanje izolacije, mreže cevovoda u procesnoj industriji, vrelovoda, kvalitete obloga peći za topljenje, rotacionih peći u cementnoj industriji, stanje ležajeva na mašinama. Termovizija kao dijagnostička metoda za preventivnu i proaktivnu dijagnostiku industrijskih postrojenja je jedna od najsavremenijih metoda i zauzima sve veći značaj u održavanju tehničkih sistema. Ona predstavlja najsavremeniju beskontaktnu metodu za merenje temperature i koristi se pri merenju u temperaturnom rasponu od -30°C pa sve do 2000°C sa osetljivošću i do 0,05°C. Glavna prednost termovizijskog merenja, u odnosu na ostale metode merenja temperature, jeste dobijanje vizuelne slike temperaturnog polja na kojoj se lako mogu uočiti tačke sa maksimalnim ili minimalnim vrednostima temperature kao i njihov raspored i međusobna zavisnost. Ubrzan razvoj i smanjenje cene instrumenata za sprovođenje termovizijskih merenja uz pomoć termovizijskih kamera omogućava sve širu i intenzivniju primenu ove dijagnostičke metode. Razvoj praktičnih i širem krugu korisnika dostupnih prenosnih termovizijskih kamera i sve prednosti koje nosi sa sobom ova dijagnostička metoda učinila je da ona postane (uz vibrodijagnostiku) jedna od pouzdanih metoda za dijagnostiku stanja tehničkih sistema u okviru koncepta preventivnog održavanja prema stanju. Termovizija je korisna prediktivna tehnika održavanja u sledećim slučajevima:

- nema potrebe za kontaktom sa površinom
- tehnika ne uključuje nikakve opasne radnje,
- može se koristiti u opasnim zonama,
- na nju ne utiču elektromagnetni talasi,
- može se koristiti dok sistemi rade,
- pruža trenutne informacije,
- podaci se mogu sakupiti i pohraniti u digitalnom formatu.

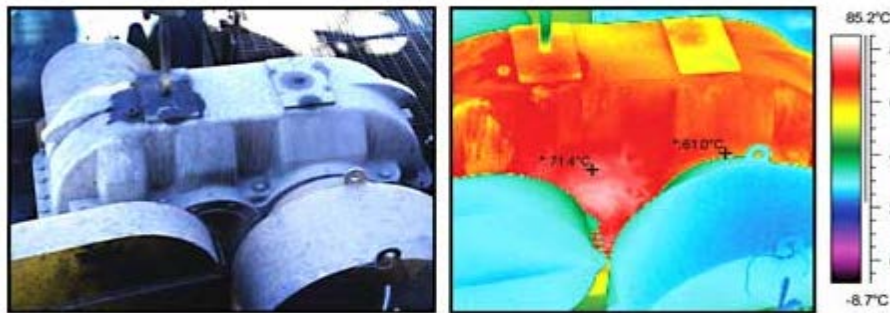
Međutim, termovizija ima i neke mane, kao što su :

- cena opreme može biti prilično visoka,
- neki sistemi imaju programska ograničenja,
- emisivost objekta se mora izračunati ili treba biti poznata,
- ambijent treba biti homogen u odnosu na termalnu energiju; bilo koji izvor u blizini područja koje se posmatra može uticati na termalno skeniranje.

- udaljenost, atmosferski uslovi i temperatura mogu uticati na kvalitet slike.

Neka područja uspešne primene termovizije u mašinskoj industriji su :

- necentrična ili savijena vratila mogu se otkriti termovizijom, a u slučaju necentričnosti, kliznim kontaktom zupčanika u zupčastom paru ili pak trenjem između fleksibilnih članova drugih tipova parova, stvara se toplota trenja, što dovodi do gubitka energije u formi toplote koja se može posmatrati na termalnim slikama, odnosno detektovati termovizijom, slika 1-4,
- neispravni klipni ventili na kompresoru će dovesti do povećanja tempertaure iz razloga što vreo komprimirani gas kreće napred-nazad preko ventila; termalnim skeniranjem može se vrlo brzo otkriti oštećeni ventil,
- nedovoljno podmazivanje rezultira toplotnim trenjem, koje se može otkriti termovizijom,
- oštećeni ležajevi, zupčanici, lanci, kvačila, klizanje remenja i trošenje remenja može se otkriti korišćenjem termovizije,
- mogu se otkriti veze i pogoni sa prekomernim kontaktnim trenjem,
- kontrola curenja kod hidrauličnih sistema, koji mogu uključivati propuštanje preko klipa i brtve vratila, različitih vrsta ventila i kutija ventila, pumpi, cevi,
- upotrebom termovizije moguće je merenje nivoa količine tečnosti u rezervoaru.



SLIKA 1-4. Primer korišćenja termovizije za lokaciju izvora toplote kod zupčastog prenosnika

1.8.3. ANALIZA STANJA ULJA

Uloga ulja prilikom podmazivanja zupčastih prenosnika je da redukuje negativne efekte triboloških procesa u pogledu trenja, habanja i rasta temperature[59]. Stoga, ulje kao kontaktni element zupčastih parova je i nosilac informacija o stanju celog sistema sa aspekta triboloških i drugih procesa starenja. Iz navedenog razloga analiza ulja predstavlja veoma efektivan metod monitoringa stanja tehničkih sistema čime se obezbeđuju rane upozoravajuće informacije o potencijalnim problemima koji vode ka otkazu i zastoju tehničkih sistema. Pored toga što se menjaju same komponente menja se i samo mazivo čime se gubi svojstvo podmazivanja. Razvijeni su monogobrojni uređaji za analizu ulja, koristeći razne metode, a sve u cilju pouzdanijeg nadgledanja i dijagnosticiranja potencijalnih problema nastalih u procesu podmazivanja. Prilikom korišćenja menjaju se sve tribološke osobine elemenata tribološkog sistema. Čvrsti elementi trpe fizičke, a mazivo, fizičke i hemijske promene[59]. Iz razloga što su trenje i habanje dva glavna tribološka procesa svih elemenata tribomehaničkog sistema uslovljenih istim okolnostima, postoji i može se utvrditi funkcionalna povezanost između njih i uslova rada. To je upravo faktor na kome se zasniva dijagnostika stanja maziva, a preko nje i dijagnostika stanja

delova tehničkog sistema[59]. Habanje čvrstih elemenata sistema je spor proces pa ga je teško pratiti, a osim toga teško je često zaustavljati sistem i rasklopiti ga radi merenja pohabanosti. Te promene vremenom dostižu kritični nivo sa stanovišta pojedinih svojstava relevantnih za dati sistem koji se podmazuje što ima za posledicu neprihvatljivost dalje upotrebe ulja u sistemu. Kada zagađivači uđu u cirkulacioni sistem za podmazivanje uljem oni imaju tendenciju da uzrokuju trošenje i oštećenja komponenti. Međutim, ako izolujemo ove zagađivače i analiziramo ih, moguće je odrediti njihovo poreklo i razmere štete koje se mogu očekivati. Da bi se analizirali zagađivači koriste se razne metode kao što su spektrometrijska analiza, analiza infracrvenim zrakama, brojanje čestica, analiza trošenja čestica i druge. Svaka tehnika ima svoje područje uspešnog delovanja i svoja ograničenja. Ova ograničenja se mogu kompenzovati upotrebom drugih tehnika. Analiza ulja predstavlja jako kvalitetnu tehniku prognoze i praćenje stanja opreme. U spektrometru ulje se pobudi električnom strujom do tačke kada emituje svetlost. Svaki element prisutan u analiziranom ulju emituje svetlost karakteristične boje i frekvencije. Spektrometri prevode intenzitet boja u kompjuterizovani merač. Tipičan izveštaj iz ovog testa će navesti devet glavnih uzroka trošenja metala analiziran na industrijskim uljima zupčastih prenosnika kao i na hidrauličnim uljima. Računar uspoređuje trenutnu količinu metala trošenja sa uzorkom svežeg ulja i takođe sa uzorcima iz sličnih mašina. Računar takođe uspoređuje rezultate prethodnih uzoraka uzetih iz iste opreme da bi uspostavio trendove trošenja. Međutim, svaki lubrikant sadrži aditive. Aditivi doprinose prikazu elemenata otkrivenih spektrometrijskom metodom. Otkriveni elementi aditiva mogu se upotrebiti za promatranje konzistencije lubrikanta nasuprot učinkovitosti aditiva. Najčešći elementi pronađeni spektrometrijskom analizom su željezo, olovo, kalaj i bakar. Glavni fokus ove analize je praćenje akumulacija malih čestica metala trošenja i elementarnih sastojaka aditiva, kao i da se identifikira moguće uvođenje zagađivača. Spektrometrijska analiza je efikasna za čestice veličine manje od pet mikrona. Treba imati na umu da spektroskopija nije osetljiva na otkrivanje čestica većeg prečnika u uzorku ulja. Nažalost, velike čestice su veći pokazatelj abnormalnog stanja ili režima trošenja. Mana spektrometrijske metode je da najteži režimi trošenja, kao što su ljuspanje, teški oblici trošenja i rezanja stvaraju velike čestice koje prolaze neopaženo kroz spektroskopske testove tako da velike zagađujuće čestice prođu neopažene primenom spektroskopske analize. Veličina čestice kod koje spektrometri gube svoju sposobnost otkrivanja zavisi od brojnih faktora a prvenstveno od tipa spektrometra i samog modela. Ipak, u generalnom smislu, smatra se da spektrometri gube svoju sposobnost otkrivanja čestica u rasponu od 5-10 mikrona. Osnovni ciljevi analize i monitoringa ulja tokom eksploatacije zupčastog prenosnika su[59]:

- analiza procesa habanja elemenata sistema,
- analiza procesa kontaminacije ulja,
- praćenje promena u svojstvima maziva radi optimizacije veka upotrebe i kontrole funkcionalnosti sistema (npr. prodor kontaminata, stanje temperature i pritiska, efikasnost prečistača i dr.) i
- utvrđivanje stanja oštećenja i uzroka otkaza.

1.8.4. BROJAČI ČVRSTIH ČESTICA

Brojanje čestica je tehnika koja se koristi zajedno sa analizom trošenja metala. Analiza trošenja metala ne može izmjeriti sve čestice, zato se prekomerna kontaminiranost česticama može zanemariti ako brojanje čestica nije rutinski deo programa analize ulja. Dobijena informacija je ključna za utvrđivanje pojave prevelikog trošenja ili ulaska

nečistoća. Postoje mnoge metode za analizu distribucije veličine čestica i iste su bazirane na različitim principima. Prebrojavanje čestica prati sve čestice unutar uzorka koji se obično kreće u veličini od 5 do 100 mikrona (ponekad i do 200 mikrona). Međutim, brojanje čestica ne razlikuje sastav prisutnih materijala i sve čestice su izbrojane i prijavljene u dijapazonu veličina čestice. U jednoj od tehnika prebrojavanja čestica svetlo iz solid-state lasera koristi se za osvetljavanje područja za očitavanje na tečnosti. Svetlo, razbacano zbog čestica koje prolaze kroz ovaj intenzivni snop, se skuplja pod pravim uglom u odnosu na snop i fokusirano je na foto detektor. Svi impulsi preko prethodno odabranog nivoa diskriminacije se pretvaraju u digitalni format. Kada se jednom nađu u digitalnom formatu može se računati da impulsi daju naznaku veličine čestice(a). Čestice blokiraju laser i sprečavaju njihovo otkrivanje pomoću posebnih detektora. U drugoj tehnici brojač čestica radi tako što prosijava laserski snop kroz ulje koje se analizira. Naravno i ova metoda nije bez ograničenja. Ona nije u stanju da analizira tamna ulja, teško zagađena ulja ili uzorke koji sadrže vodu. Da bi se procenile čestice veće od 5-10 mikrona moraju se uzeti u obzir druge metode. Za veće čestice trošenja dostupne su tehnike kao što su:

- metoda digestije kiseline,
- metoda digestije mikrotalasom,
- DR ferografija, ferografija koja meri odnos krupnih i sitnih čestica u ostacima uljnog uzorka,
- RFS Rotrode Filter Spektroskopija.

Prve dve metode su relativno komplikovane da bi se uključile kao prediktivno sredstvo za analizu zbog vremena koje je potrebno da bi se ispitao uzorak i njihove visoke cene. Ove metode pružaju popis ukupne koncentracije elemenata u uzorku ulja. Metoda digestije kiseline može pružiti omjer velikih i malih čestica u originalnom uzorku, ali se ne mogu dobiti metodom digestije mikrotalasom. Treća metoda, nazvana DR ferografija, je osetljiva i na velike i na male čestice metala u ulju za podmazivanje i može utvrditi omjer u kojem se abnormalno trošenje može okarakterisati kod rotacionih mašina. Međutim, DR ferografija je još uvek bazirana na magnetnoj separaciji i to je glavni nedostatak u slučaju kada uzorak sadrži čestice svih veličina koje nisu metalnog porekla, ili pak uključuje nemetalne neorganske čestice kao [to su pesak ili prljavština]. Rotrode filter spektroskopija (RFS) je prvi puta predstavljena 1992. godine. Ova spektrometrijska tehnika otkriva velika ili gruba trošenja metala i zagađivače u uzorku već korištenog ulja. Sve čestice do veličine od 25 mikrona su prvi pokazatelji abnormalnih situacija trošenja. RFS omogućava mali trošak i efikasnu metodu ferografije i superiorna je u odnosu na DR ferografiju jer otkriva elemente sa metalom, bez metala i kontaminirane elemente (obično 12 elemenata). U sistemu podmazivanja zupčastog prenosnika pojavljuju se različite vrste onečišćenja: plinovita (zrak), tekuća (voda) i kruta (čvrste čestice). Onečišćenje čvrstim (krutim) česticama podeljeno je u tri grupe: ekstremno tvrde, tvrde i mekane čestice. Ekstremno tvrde čestice mogu uzrokovati jaka oštećenja elemenata zupčastog prenosnika, prvenstveno zupčanika i ležajeva ako se u kratkom roku ne odstrane iz sistema za podmazivanje. Preventivne mere mogu smanjiti prodor onečišćenja u sam sistem. Ključnu ulogu ne igra samo tvrdoća čestica nego i njihova veličina i količina. U sistemima podmazivanja zupčastih prenosnika veoma često se stvaraju skupine krupnih onečišćenja veličine čak i do nekoliko milimetara, koje se kasnije kroz korištenje značajno smanjuju i eliminišu filtracijom. Nakon nekoliko sati rada većina čestica je tako mala da više nije vidljiva golim okom. Kod puštanja u rad novog zupčastog prenosnika pojavljuju se dodatna onečišćenja zbog abrazivnog trošenja do

kojeg dolazi kada se uhadavaju nerazrađeni elementi. Analitička ferografija je tehnika koja izdvaja pohabane magnetne čestice iz ulja[60]. Ove čestice se sležu na staklenoj površini poznatoj kao ferogram. Mikroskopsko ispitivanje omogućava da odredimo tip habanja, a verovatno i izvor habanja u tehničkom sistemu. Analitička ferografija je izuzetan indikator izrazito povećanog habanja delova od nebojenih metala, ali je neprikladna u slučaju habanja delova od obojenih metala. Test je od izuzetne koristi kod već uspostavljenog procesa habanja. Rezultati uključuju izveštaj o veličini, morfologiji i količini čestica od nebojenih metala i nečistoća. Ferografija je dosta rasprostranjena tehnologija analize pohabanih čestica. Predstavlja dijagnostičko-prognozirajuću tehniku koja nudi pogodan način tačnog procenjivanja on-line stanja podmazivanih delova u kontaktu bez isključivanja tehničkog sistema. Jedna automatizovana verzija ove tehnike je DR (Direct Read) ferografija koja meri odnos krupnih i sitnih čestica u ostacima uljnog uzorka. Mala količina uzorka se razređuje rastvaračem i pušta da teče kroz malu kapilarnu cev koja se kreće kroz magnetno polje. Dva optička senzora su nezavisno jedan od drugog postavljeni na ulaz i neznatno usmereni niz kapilarnu cev mereći gustoću čestica nebojenih metala sabranih na oba mesta. Ovi podaci se mogu koristiti pri određivanju koncentracije pohabanih čestica i indeksa ozbiljnosti situacije. DR ferografija je i dalje bazirana na magnetnom odvajanju, tako da se ovaj princip ne može koristiti u slučaju čestica od obojenih metala bilo koje veličine, kao i u slučaju anorganskih nemetalnih čestica (pesak, nečistoće, i sl.). Ovaj nedostatak dolazi do izražaja posebno kod monitoringa opreme sa kritičnim delovima od obojenih metala. Trenutno su u primeni četiri procedure klasifikacije onečišćenja ulja za podmazivanje čvrstim česticama[61], tabela 1-1.

Standard	ISO 4405	ISO 4406:1999	NAS 1638	SAE AS 4059
Parametri	Visoko onečišćeni mediji	Ulja za podmazivanje, hidraulička ulja	Ulja za podmazivanje, hidraulička ulja	Ulja za podmazivanje, hidraulička ulja
Parametri		Broj čestica > 4 μm (c) > 6 μm (c) > 14 μm (c)	Broj čestica 5-15 μm 15-25 μm 25-50 μm 50-100 μm > 100 μm	Broj čestica > 4 μm > 6 μm > 14 μm > 21 μm > 38 μm > 70 μm
Metoda analize	Laboratorijska metoda:1 litra fluida filtrira se kroz posebnu membranu, koja se zatim važe	1. Mikroskopsko («ručno») određivanje Fluid koji se podvrgava analizi filtrira se preko membrane, a razred čistoće (stupanj onečišćenja procenjuje se ili broji primjenom mikroskopa 2. Automatsko brojanje čestica Fluid koji se podvrgava analizi sprovodi se kroz brojač čestica, koji registrira podjelu čestica po veličini.		
Napomena	Vrlo dugotrajna metoda	1. Mikroskopsko («ručno») određivanje Dugotrajna metoda, nedovoljno tačna i pouzdana. 2. Automatsko brojanje čestica Rezutati su odmah dostupni.		

TABELA 1-1. Procedure klasifikacije onečišćenja ulja

ISO 4405[62]

U pojednostavljenom obliku opis prikupljanja informacija o česticama u ulju se može definisati da se zapremina ulja filtrira uz pomoć vakumske pumpe, preko jedne ili dve filterske membrane te nakon toga se meri razlika težine pre i posle filtriranja ulja. Druga membrana se koristi za određivanje tačnosti samog postupka. Kako bi se gravimetrijski odredilo onečišćenje ulja iz sistema se mora uzeti reprezentativni uzorak. ISO 4405 tačno propisuje proceduru čišćenja opreme koja se koristi ali u procesu utvrđivanja čestica kao i proceduru pripreme membrana koje se koriste za analizu. Membrane se pre upotrebe ispiru isopropanolom, suše u peći dok ne postignu konstantnu težinu. Važno je da se naknadno hlađenje odvija u okolini poznate suvoće. U suprotnom, membrana može apsorbovati vlagu iz okolnog vazduha što će uticati na konačni rezultat analize. Nakon toga, membrana se vaga i ova vrednost se registruje kao $m(T)$. Membrana(e) se smešta(ju) u nosač (držač, kalup) i ulje se filtrira. Nakon toga sledi ispiranje nečistoće na membrani primenom filtriranog otapala, kako bi se ispiranjem kompletno uklonilo ulje. Sledi sušenje membrane, hlađenje i ponovno vaganje. Izmerena vrednost označava se $m(E)$. Konačno, onečišćenje se gravimetrijski izračunava po sledećoj formuli: $M(G) = m(E) - m(T)$.

ISO 4406:1999[61]

ISO 4406 broj čestica određuje se kumulativno, na primer: $> 4 \mu\text{m} (c)$, $> 6 \mu\text{m} (c)$, $> 14 \mu\text{m} (c)$ (mikroskopski, filtrirajući fluid kroz membranu ili automatski, koristeći brojače čestica) i razvrstavaju u skladu s referentnim vrednostima. Cilj podele čestica u skladu s referentnim vrednostima je da olakša određivanje vrednosti – kodnu oznaku pojedinog razreda čistoće. „Stari“ ISO 4406 revidiran je 1999. godine i redefinisane su granične vrednosti broja i veličine čestica kod merenja. Metode brojanja i kalibracije su takođe promenjene. Iako su se kod standarda promenile referentne vrednosti za svakodnevnu primenu važno je spomenuti da će se kodna oznaka razreda čistoće ulja promeniti samo u posebnim slučajevima. Kod uvođenja „novog“ ISO 4406 standarda vodilo se računa i osiguralo da se ne menjaju vrednosti razreda čistoće ranije korištene pri izradi preporuka za čistoću ulja u sistemima, tabela 1-2, tabela 1-3 i tabela 1-5.

	„Stari“ ISO 4406:1987	„Novi“ ISO 4406:1999	
Veličina čestica	$> 5 \mu\text{m}$ $> 15 \mu\text{m}$		$> 4 \mu\text{m}(c)$ $> 6 \mu\text{m}(c)$ $> 14 \mu\text{m}(c)$
Određivanje dimenzije	Najduža dimenzija čestice		Promer kružnice ekvivalentne površine ISO 11171:1999
Ispitni prah	ACFTD prah	1-10 μm ultrafina frakcija	ISO 12103-1A1
		SAE fina frakcija AC fina frakcija	ISO 12103-1A2
		SAE 5-80 μm ISO MTD kalibracijski prah za brojače čestica	ISO 12103-1A3

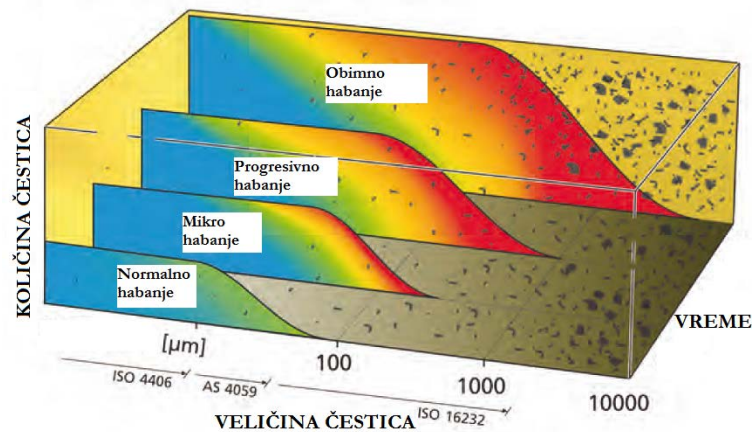
		SAE krupna frakcija	ISO 12103-1A4
Usporedive veličine čestica	Stara ACFTD kalibracija	Usporedivi ACFTD prah	Nova NIST kalibracija
		> 1 μm 4,3 μm 15,5 μm	> 4 μm(c) > 6 μm(c) > 14 μm(c)

TABELA 1-2. Pregled promena - „Stari“ ISO 4406:1987 i „Novi“ ISO 4406:1999

Broj čestica/ml		Razred čistoće
Od	Do	
2.500.000		> 28
1.300.000	2.500.000	28
640.000	1.300.000	27
320.000	640.000	26
160.000	320.000	25
80.000	160.000	24
40.000	80.000	23
20.000	40.000	22
10.000	20.000	21
5.000	10.000	20
2.500	5.000	19
1.300	2.500	18
640	1.300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8

TABELA 1-3. Podela broja čestica u razrede čistoće

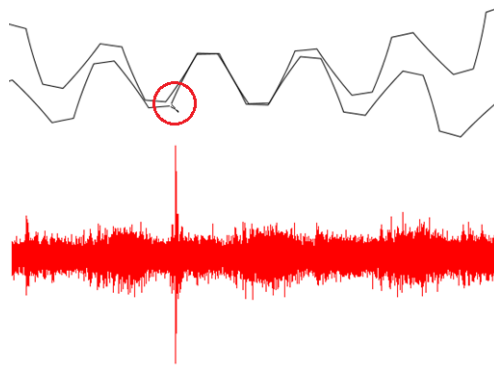
Porast rezultata određivanja čistoće za jedan (1) razred može značiti dvostruko povećanje broja čestica u uzorku. Primjer: ISO razred čistoće 18/15/11 pokazuje da je u 1 ml analiziranog uzorka zatečeno: 1.300-2.500 čestica > 4 μm(c), 160-320 čestica > 6 μm(c), 10-20 čestica > 14 μm(c).



SLIKA 1-5. Distribucija čestica u ulju, usvojeno i adaptirano iz [63]

1.8.5. OTKRIVANJE OŠTEĆENJA ZUPČASTIH PAROVA POMOĆU VIBRACIJA

Koncept detekcije oštećenja na mašini uključuje nadgledanje mašine sa dovoljno čestim merenjima kako bi se otkrila degradacija prije nego se pojavi kvar. U mnogim se industrijama često koristi metoda otkrivanja oštećenja bazirana na merenju i analizi signala vibracija s ciljem procene stanja mašine. Analiza vibracija je postala jako važna u otkrivanju oštećenja zupčastih parova, onosno zupčastih prenosnika. Uloga nadgledanja vibracija zupčastih parova je da se otkrije bilo koja promena u signalu vibracija nastala zbog degradacije zupčanika kao i dobijanje informacije o ranom upozorenju. Rano otkrivanje oštećenja omogućava odgovarajući raspored zaustavljanja cele mašine u cilju sprečavanja katastrofalnih otkaza [64].



SLIKA 1-6. Detekcija promene u signalu vibracija usled uzupčavanja zuba sa pukotinom

Ideja otkrivanja promena u signalu vibracija povezanih sa prisustvom pukotine u korenu zuba koji je u sprezi prikazano na slici 1-6. Otkrivanje oštećenja na mašinama ili bilo kojem drugom sistemu uključuje otkrivanje sklopa sa oštećenjem ili elementa unutar sklopa. Kada se pojavi oštećenje na elementu i kompletan element je u oštećenom stanju celi sistem još uvek može vršiti funkciju cilja, iako funkcioniše u degradiranom stanju. To će reći da celi sistem nije u stanju otkaza jer se nije desio otkaz sistema. Kada se radi sa otkrivanjem oštećenja na zupčanicima, zub na zupčaniku može se posmatrati kao podelement zupčanika. Ako zub ima pukotinu koja smanjuje određena dinamička svojstva ispod

predefinirane granice zub se smatra oštećenim jer se oštećenje pojavilo u nekom trenu tog vremena. Zupčanik može još uvek vršiti svoju zadatu funkciju, ali sa smanjenim kapacitetom.

2 OSNOVNE KOMPONENTE VIBRACIONOG SIGNALA ZUPČASTIH PAROVA

2.1. KOMPONENTE VIBRACIJA ZUPČANIKA

Karakteristike vibracionih signala koji generišu zupčasti prenosnici, zavise od većeg broja faktora koji se mogu podeliti u četiri grupe [65]:

- konstrukcioni parametri – specifične krutosti zuba zupčanika i kvaliteta tolerancije pri izradi zupčanika,
- faktori proizvodne tehnologije – odstupanja od projektovanih konstrukcionih parametara nastali kao rezultat grešaka u izradi zupčanika, odnosno proizvodnji,
- radni parametri – obodna brzina zupčanika i njena promena u toku rada kao i vanjski moment kao i karakter njegove promene,
- parametri stanja – vezani za operativno stanje elemenata zupčastog prenosnika i to pre svega zupčanika i ležajeva, te narušeno stanje zupčanika može biti usled lokalizovanih oštećenja (naprsli zub, odlomljeni zub...) ili distribuiranih oštećenja (ljuspanje, pitting, korozija...).

U kontrolisanim uslovima za slučaj nepromenljivog opterećenja (kao na primer u laboratorijskim testovima) osnovni zadatak u monitoringu zupčastih prenosnika jeste uspostavljene korelacije između promene stanja prenosnika i odgovarajućeg obeležja vibracionog signala. Kod zupčastih prenosnika koji rade u realnim uslovima (kao na primer prenosnici koji su deo rudarske mehanizacije), a što prvenstveno zavisi od karakteristike opterećenja, veoma često postoji jasno izražena vremenska promena opterećenja koja u velikoj meri može uticati na nivo, odnosno sadržaj, vibracionog signala. Pri datom opterećenju i operativnom stanju elemenata zupčastog prenosnika snimljeni vibracioni signal generalno sadrži komponente koje potiču od zupčanika u sprezi, rotirajućih elemenata (vratila) i ležajeva[23].

Greške nastale u toku izrade, odnosno u proizvodnom procesu zupčastih parova, su isključivo geometrijske, one su generalno, nezavisne od opterećenja. Isto tako one su najviše izražene kod novih zupčanika i, nakon određenog vremena u radu, usled uhodavanja odnosno mikro-habanja dolazi do njihovog poništavanja. Poseban slučaj grešaka u proizvodnji zupčanika su tzv. „fantomske“ komponente. Randall je u [18] dao opisni model vibracija zupčastog prenosnika u kojem je razdvojio sledeće komponente vibracionog signala:

- periodična komponenta frekvencije jednake frekvenciji uzupčavanja usled devijacije profila zuba u odnosu na idealni profil,
- komponenta amplitudne modulacije kao rezultat varijacije opterećenja,
- komponenta frekventne modulacije kao rezultat broja obrtaja, odnosno nejednakog koraka zuba,
- tranzijenti koji se generalno javljaju usled lokalnih oštećenja pojedinih zuba.

Devijacije u odnosu na idealni profil zuba se javljaju usled različitih faktora od kojih su najznačajniji deformacija zuba pod opterećenjem kao i geometrijske greške usled proizvodnih grešaka i unutrašnjih zazora.

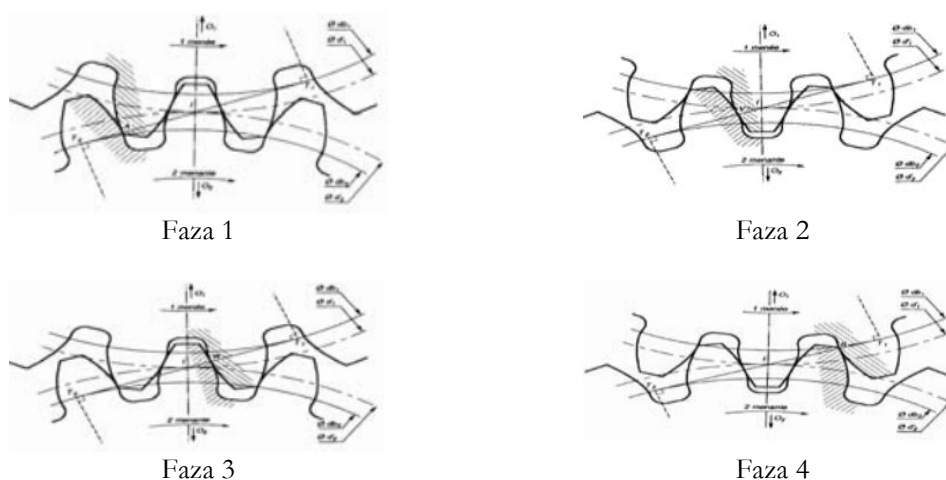
2.2. UTICAJ PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA

Usled promenljive krutosti zuba kao i njihove deformacije pod opterećenjem, što za posledicu ima podelu opterećenja između različitog broja zuba, nastaje tranzientan karakter vibracionog signala, slika 2-1. Ovakav vibracioni signal će transformisan u frekventni domen sadržavati komponentu na frekvenciji uzupčavanja i njenim harmonicima. Svaki zupčasti par prilikom rada, odnosno uzupčavanja, generiše frekvenciju uzupčavanja, odnosno njene harmonike, međutim njihove amplitude će biti veoma zavisne od opterećenja zupčastog para.

Često se u praksi s ciljem minimizacije nivoa buke i vibracije pri radu na predefinisanoj nivou opterećenja sprovodi modifikacija profila zuba. Modifikovan profil se u ovom slučaju više ne može tretirati kao idealan te iz ovog razloga praktično je nemoguće predvideti nivo i sadržaj vibracionog signala na različitim nivoima opterećenja bez razvoja dinamičkih modela i detaljnih merenja profila zuba. Iz navedenog razloga, a u cilju pouzdanog praćenja i ocene stanja zupčastih parova u automatizovanom ili manuelnom modu, potrebno je da su merenja koja se upoređuju, izvedena nad istim ili približno bliskim nivoom opterećenja. Ako opterećenje varira u toku uzupčavanja onda će i amplituda vibracija varirati u skladu sa opterećenjem.

Oštećenja koja dovode do amplitudne modulacije su uglavnom kategorisana na osnovu obrasca signala vibracija nastala oštećenjem u vremenskom domenu, na primer:

- lokalizovana oštećenja, kao što su rupičenje na boku zuba će proizvesti kratak impuls čije trajanje je slično periodu uzupčavanja sa periodičnošću jednakoj frekvenciji rotacije zupčanika na kome se nalazi oštećenje.
- distributivna oštećenja poput ekscentričnosti zupčanika će proizvesti kontinuiranu modulaciju frekvencijom koja odgovara brzini rotacije zupčanika.



SLIKA 2-1. Različite faze sprežanja zuba[23]

2.3. UTICAJ GREŠKE U PROIZVODNJI ZUPČASTOG PARA

Osnovni uzrok vibracija u zupčastim parovima jeste tranzijentni karakter uzupčavanja zuba zupčanika. Čest slučaj da način izrade zupčanika dovede do pojave grešaka u geometriji profila zuba. Ove greške se mogu iskazati preko:

- srednje (DC) komponente koja će biti jednaka za sve zube i koja će generisati frekventne komponente nad frekvencijom uzupčavanja i njenim harmonicima i
- promenljive (AC) komponente koja neće biti ista za različite zube i koje će generisati stohastičke vibracije od zuba do zuba, kao različitog karaktera, kad se posmatra uzupčavanje od zuba do zuba, ove će komponente biti periodične u odnosu na obrtanje zupčanika (tj. kad analizirani zub ponovo ostvari kontakt), na taj način promenljive komponente će biti iskazane kroz niskofrekventnu amplitudnu modulaciju oko frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika.

S obzirom da su greške nastale izradom, odnosno proizvodnim procesom, isključivo geometrijske one su, generalno, nezavisne od opterećenja. Isto tako one su najviše izražene kod novih zupčanika te nakon određenog vremena u radu, usled mikro-habanja, odnosno uhodavanja, dolazi do njihovog poništavanja. Poseban slučaj grešaka u proizvodnji zupčanika su tzv. „fantomske“ komponente.

2.4. UNIFORMNO HABANJE

Habanje zupčanika odnosi se na progresivni gubitak materijala nastao kontaktom površina zuba, kombinacijom pokreta kotrljanja i klizanja pod mešovitim ili uslovnim graničnim podmazivanjem. To je jedan od glavnih oblika oštećenja zupčanika. Neposredni rezultati habanja zupčanika uključuju dinamičku grešku prenosa rotacije, gubitke u prenosu energije i visoke nivoe vibracije i buke [66]. Izraženije trošenje može također uzrokovati neujednačen raspored oštećenja, što može dovesti do pojave drugih tipova oštećenja zupčanika, kao što je lomljenje zubi. Zbog navedenih razloga, tema o nadgledanju habanja zupčanika poprima značajnu pažnju u zajednici stručnjaka koji se bave nadgledanjima stanja mašina. Signali vibracija zupčanika su odraz dinamičkih karakteristika zupčanika prilikom merenja što se može smatrati korisnim za efikasnu procenu efekata habanja zupčanika u realnom vremenu. Uticaj habanja na dinamičke karakteristike zupčanika istražen je i

teorijski. Poznato je da habanje površine zuba ima značajne efekte na dinamičko opterećenje i njegovu distribuciju. Zbog promena na radnoj površini zuba, uzrokovanih habanjem, prenosni odnos zupčastog para više ne bi bio konstantan [67], posebno u slučaju zupčanika sa pravim zubcima čije su greške prenosa veoma osetljive na habanje [66].

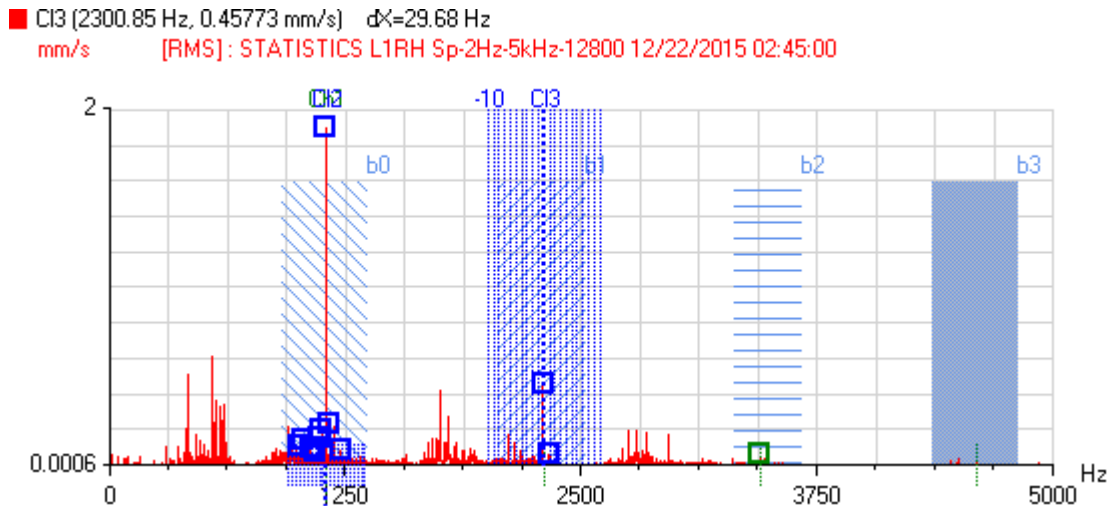
Isto tako, dinamičke karakteristike zupčanika mogu uticati na proces habanja, tako da postoji dvostrani odnos između njih. Stoga, može se zaključiti da će se efekti habanja zupčanika manifestovati kao promene sadržaja vibracije, tako da bi trebalo biti moguće razviti pristup za nadzor habanja zupčanika baziran na analizi vibracija. Nažalost, studije o nadzoru habanja zupčanika na bazi vibracija su prilično oskudne. To se može pripisati činjenici da je odgovor signala vibracije na habanja zupčanika prilično složen. Postojeće studije su otkrile da ujednačeno habanje zuba vodi do povećanja amplitude harmonika frekvencije uzupčavanja, dok su amplitude višeg reda harmonika frekvencije uzupčavanja pouzdan način otkrivanja ujednačenog habanja u ranoj fazi [18]. Nedavno su analize spektruma i Cepstruma primenjene u kombinaciji da bi se identifikovalo stanje pohabanoosti za parove zupčanika visokog odnosa kontakta [68]. Utvrđeno je da se pitting i scuffing na zupčaniku mogu otkriti praćenjem amplituda frekvencija uzupčavanja ili harmonika (koje bi se, kao što će biti navedeno u sledećoj diskusiji, mogle primeniti samo na ravnomerno raspoređen deo). Za monitoring procesa habanja zupčanika naveden je jednostavan parametar, naziva RMS filter podudaranja [69]. Ovaj parametar je definisan kao logaritamska vrednost (izražen u dB) prosečnog odnosa snage između komponenti aktuelnog signala vibracije i komponenti referentnog signala. Ovaj parametar je osetljiviji i pouzdaniji u otkrivanju oštećenja zupčanika nego klasični parametri kao što su RMS i vršna vrednost i lako ga je pratiti. Međutim, RMS filter podudaranja se još uvek fokusira na promene snage signala i na taj način nije u mogućnosti da odražava promene u spektralnoj distribuciji signala koja je takođe usko povezana sa stanjem zupčanika. Kao što je poznato, habanje je nezaobilazno u životnom veku zupčanika i može značajno promeniti profil zuba abrazivnim habanjem pre nego se pojave evidentna oštećenja, kao što su jamičenje i ljuspanje. Stoga, poželjno je razviti tehniku analize vibracija koja je u stanju da prati proces habanja zupčanika i nadalje ukazuje na promene u procesu.

2.5. EFEKTI HABANJA NA SIGNALE VIBRACIJA ZUPČANIKA

Vrlo dobro je prihvaćena činjenica da je greška prenosa (TE^{22}) glavna sila pobude vibracija zupčanika. TE se sastoji od geometrijskih devijacija neopterećenih radnih površina idealno razmaknutih evolventnih profila i elastičnih deformacija zuba (elastična deformacija u području kontakta i elastičnog savijanja celog zuba) pod uslovima opterećenja. Uniformno habanje se javlja kao posledica klizanja između zuba koje je prisutno sa obe strane (i gornje i donje) podeone površine, ali ne i na samoj podeonoj površini. Iz tog razloga, habanje neće biti podjednako na čitavoj površini zuba gde isti ostvaruje kontakt sa ostalim zubima – profil zuba je poremećen. Habanje koje je uniformno po svim zubima zupčanika će dovesti do izražene frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika, slika 2-2. U smislu amplitude, komponente uniformnog habanja će biti vidljive u frekventnom spektru tek kad nadvladaju komponente koje nastaju usled deformacije zuba pod opterećenjem. U slučajevima veoma izraženog habanja udeo komponenti uniformnog habanja u okviru amplitude na frekvenciji

²² Transmission Error

uzupčavanja će biti znatno veći nego udeo od deformacije zuba. Isto tako, u prisustvu intenzivno pohabanih zuba, čest je slučaj da viši harmonici frekvencije uzupčavanja imaju veće amplitude od svog osnovnog harmonika.



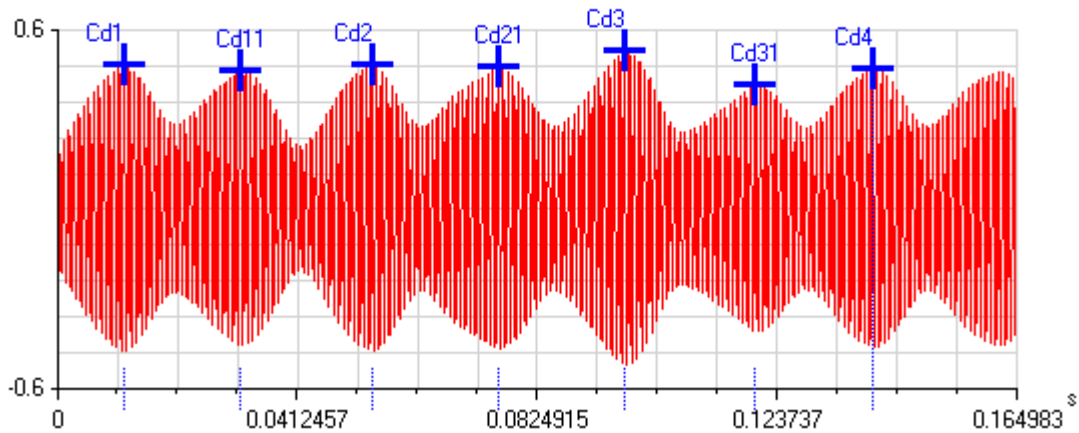
SLIKA 2-2. Uniformno habanje po svim zubima zupčanika uz izražene frekvencije uzupčavanja i njene harmonike

2.6. EFEKTI AMPLITUDNE MODULACIJE

Kao što je već navedeno, merenje i analiza vibracija je najčešća tehnika za praćenje stanja zupčastih prenosnika. Iz razloga što je sistem prenosa snage kod zupčastih prenosnika periodičan, spektar izmerenih vibracija sačinjavaju frekvencije vratila i njihovi harmonici kao i frekvencija uzupčavanja i njeni harmonici. U idealnom slučaju, ukoliko oštećenja nisu prisutna, zupčastim prenosnicima dominiraju redovne komponente frekvencija i Gausove smetnje koje nastaju u smirenom i jednolikom prenosu snage i brzine vrtnje. Svako odstupanje od ideala dovodi do varijacija u prenosu snage što rezultira promenljivim silama između zubi u toku uzupčavanja. Randall je u [18] amplitudnu modulaciju, u kontekstu vibrodijagnostičke analize zupčastih parova, opisao kao osetljivost amplitude vibracija na opterećenje. Ukoliko amplituda opterećenja varira očekivano je da i amplituda vibracionog signala varira. Sa druge strane, amplitudna modulacija posmatrana u vremenskom domenu može da se javi kao posledica lokalnih oštećenja tipa ekscentričnog zupčanika, zupčanika na krivom vratilu ili pak usled uniformnih oštećenja tipa habanja jednog zuba na podeonom krugu te je ovaj slučaj okarakterisan izolovanim tranzijentom koji se periodično ponavlja jednom u obrtanju zupčanika, slika 2-3.

Čak i pri uslovima konstantnih brzina i opterećenja moguće je da postoje promenljive sile na zubima zupčanika. Ukoliko zubi na zupčastom paru nisu savršeno kruti, kontaktna krutost će periodično da varira zajedno sa brojem zuba u kontaktu i položaja kontakta na površini zuba. Navedene promenljive sile će pobuditi vibracije na frekvenciji uzupčavanja [70].

■ Cd3 (0.09761 s, 0.52438 g) Cd31 (0.12019 s, 0.41416 g) dX=0.02257 s [44.29 Hz] dY=-0.1102 g [-21%]
g : STATISTICS L1RH BPF_TSA 09/28/2015 22:25:00



SLIKA 2-3. Prikaz amplitudne modulacije u vremenskom domenu - pojasno filtriran signal sa zupčastog para gde gonjeni zupčanik ima 57 zuba. Razmak između kursora odgovara jednom obrtaju gonjenog zupčanika.

2.7. EFEKTI FREKVENTNE MODULACIJE

Varijacija u broju obrtaja zupčanika odnosno nejednak korak između zuba na zupčaniku dovodi do varijacije osnovne frekvencije odnosno do fenomena frekventne modulacije iskazane kroz bočne pojaseve oko frekvencije uzupčavanja. U opštem slučaju odnos amplitudne i frekventne modulacije u signalu je zavisen od inercije rotirajućih komponenti. Sa porastom inercije rotirajućih delova amplitudna modulacija će biti jače izražena nego frekventna. Veće promene opterećenja u toku uzupčavanja zubi zupčanika ne samo da će izazvati amplitudnu modulaciju signala vibracija nego će uzrokovati i promenu brzine rotacije samih zupčanika, što će imati za posledicu modulaciju frekvencije uzupčavanja. To se može tumačiti kao dodatna inercija kada je u pitanju frekventna modulacija rotirajućih elemenata i ista utiče na amplitudnu modulaciju. Utvrđeno je da veći inercijski efekat smanjuje efekat frekventne modulacije. Impulsne komponente većina lokalnih oštećenja na zubima će rezultovati u tranzijentnim komponentama signala koje će biti superponirane sa komponentama amplitudne i frekventne modulacije. Za razliku od komponenti frekventne i amplitudne modulacije koji, posmatrano u vremenskom domenu, daju promene koje su simetrične u odnosu na srednje vrednosti signala, impulsne komponente dovode do pomeranja srednje vrednosti. Usled kratkog trajanja impulsnih komponenti, ukoliko je dovoljne amplitude, iste mogu da pobude i sopstvenu frekvenciju zuba zupčanika, a naročito onih kojima je krutost poremećena usled pojave zamorne naprsline u korenu zuba.

2.8. OSTALE KOMPONENTE VIBRACIONOG SIGNALA ZUPČASTIH PRENOSNIKA

Pored komponenti koje nastaju uzupčavanjem zupčanika, vibracioni signal zupčastog prenosnika generalno sadrži i komponente koje potiču od [23]:

- rotirajućih masa-komponente koje se generalno javljaju u nižim i srednjim frekventnim domenima, a uzroci pojave ovih komponenti mogu biti razni: dinamički debalans rotirajućih masa-komponenta koja se u slučaju dominantnog debalansa linearnog sistema javlja na prvom harmoniku uz relativni fazni ugao od $90^{\circ} \pm 30^{\circ}$,

kao takva, komponenta se jasno identifikuje u frekventnom spektru, a u slučaju dominacije debalansa nad ostalim oštećenjima i u vremenskom zapisu,

- nesaosnost u spojnici-komponente koje se javljaju usled nelinearnosti geometrijskih osa, spojnicom spregnutih rotora, komponente koje su posledica nesaosnosti zavise od tipa nesaosnosti (paralelna, ugaona, kombinovana) kao i tipa spojnice (kruta ili elastična). Generalno komponente nesaosnosti leže na prvom i drugom harmoniku, a u prisustvu opšte (kombinovane nesaosnosti) i na trećem harmoniku osnovne frekvencije rotacije. Zavisno od tipa nesaosnosti relativna fazna relacija između signala snimljenih sa obe strane spojnice mogu biti različite,
- krivo vratilo, u slučaju simetričnog ugiba vratila komponenta se javlja na prvom harmoniku, u suprotnom nastaje i drugi harmonik osnovne frekvencije,
- vratilo sa prslinom-zavisno od položaja i veličine naprsline na vratilu broj harmonika osnovne frekvencije može biti različit,
- oštećenja elektromotora usled poremećenog elektromagnetnog polja-kod većine tipova oštećenja elektromotora, usled izražene magnetostikcije između rotora i statora, javlja se komponenta dvostruke mrežne frekvencije i modulacija oko nje pri čemu frekvencija modulacije zavisi od konkretnog tipa oštećenja,
- zazori, obično su iskazani kao familija harmonika osnovne frekvencije,
- pobuđene sopstvene frekvencije-generalno su to dominantne asinhronne komponente čija amplituda blago varira u toku rada zupčastog prenosnika,
- kotrljajnih ležajeva, komponente koje se javljaju zavise od tipa i stepena oštećenja ležaja,
- susednih mašina u radu.

2.9. OŠTEĆENJA ZUPČASTIH PAROVA

Najčešće, oštećenja zupčanika nastaju u uslovima velikih opterećenja [71]. Lokalna oštećenja su opasnija jer ona imaju tendenciju brzog razvoja nakon inicijalnog nastanka i obično imaju značajan uticaj na prenos snage. Ukoliko se ne otkriju u ranoj fazi posledice mogu biti katastrofalne izazivajući lom zuba, rupičenje bokova zubi ili tkz. zarezivanje što predstavlja najčešće oblike lokalnih oštećenja zubi zupčanika. Ovde će biti opisani različiti oblici oštećenja i razaranja zuba zupčanika i definisanje osnovnih pojmova prema literaturi [70, 72]. Prema analizama različitih autora, definicijama oštećenja zuba prema standardu ISO 10825, odnosno standardu ANSI/AGMA 1010-E95 definisano je 36 različitih oštećenja zupčaničkih parova. Mogu se podeliti u sedam grupa: osnovnih tipova oštećenja zuba zupčanika [73, 74]:

- lom zuba,
- habanje,
- zaribavanje,
- oštećenja zbog zamora materijala,
- oštećenja zbog vanjskih uticaja,
- greške izrade i
- korozija.

Kada su u pitanju vibrodijagnostika oštećenja zupčanika, uopšteno se oštećenja zupčanika mogu podeliti na dve vrste, i to:

- lokalna i
- distributivna.

Lokalna i distributivna oštećenja menjaju oblik signala vibracija nastalih u procesu uzupčavanja zupčanika. Lokalna oštećenja (npr. naprslina u korenu zuba zupčanika, jamičenje) utiče na krutost uzupčavanja te na taj način stvaraju promene u signalu vibracija generisanje od strane zubi koji se uzupčavaju, dok će distributivna oštećenja (npr. nesaosnost i ekscentričnost) dovesti do fluktuacije opterećenja čime se menja amplituda vibracija. Uopšteno ove promene u signalu vibracija izazivaju impulsne, amplitudne i fazne modulacije [18].

U stvari, kao što je objašnjeno od strane Randalla u [18], distributivna oštećenja dovode do povećanja amplituda bočnih pojaseva grupisanih oko frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika, dok lokalna oštećenja izazivaju širu familiju modulacija bočnih pojaseva jednoličnog niskog nivoa i impulsa. Konkretno, ukoliko postoji jednostavna funkcija modulacija, kao što je frekvencija rotacije, amplitudna modulacija stvara jedan par bočnih pojaseva dok s druge strane, fazna modulacija proizvodi familiju bočnih pojaseva. Kao što je objašnjeno od strane Randalla [18], lokalna oštećenja proizvode frekvencije komponenti u širokom rasponu frekvencija. Komponente su zbog amplitudne i frekventne modulacije, koji uzrokuju bočne pojaseve oko frekvencije uzupčavanja i dodatno impulse koji nastaju jednom po okretaju i mogu pobuditi rezonanciju zupčastog prenosnika. Sada je poznato da su udari nastali od strane lokalnih oštećenja zupčanika nestacionarni po prirodi te da su konvencionalni pristupi u obradi signala mehaničkih vibracija neadekvatni i nedovoljni. Lokalna oštećenja zuba zupčanika (tj. zamorna naprslina, rupičenje, itd) proizvode oštre tranzijente (prelaze) u obliku signala vibracija koji se može klasificirati kao nestacionaran, nelinearan i ne Gaussov po svojoj prirodi. Većina istraživanja navedena u literaturi, koja su bazirana na vremensko-frekventnim tehnikama su provedena u uslovima jako velikih oštećenja zupčastih parova. Pored toga, većina ovih istraživanja je provedena na zupčanicima sa pravim zubcima kod kojih se oštećenja relativno na jednostavan način reflektuju u FFT spektrumu vibracionog signala zbog niskog kontaktnog odnosa. Međutim, zbog visokog kontaktnog odnosa kod zupčanika sa kosim zubcima ovaj oblik oštećenja puno slabije ima uticaj na signale vibracija [75]. Stoga, kod ovih tipova zupčanika je puno teže utvrditi postojanje oštećenja u ranoj fazi nastanka. Površinska oštećenja javljaju se na radnim površinama bokova zuba u obliku: habanja usled klizanja, korozije, pregrevanja, i erozije [72, 73, 76]. Habanje usled klizanja spada u najčešće oblike oštećenja zuba.

Habanje kao opšti pojam se odnosi na uklanjanje materijala sa površina koje klizu jedna po drugoj. Habanje obuhvata i abrazivno dejstvo štetnih primesa u mazivu-abrazivno habanje kao i habanje zbog lokalnog lepljenja i odvajanja čestica materijala zuba-adheziono habanje. Habanje usled klizanja javlja se u toku eksploatacije od samog početka u vidu udubljenja u zoni velike brzine klizanja. Na početku se javlja između kinematskog i podnožnog kruga, a kasnije između kinematskog i temenog kruga te se potom širi na celu površinu aktivnog dela boka zuba. Kao što je već navedeno, na početku rada zupčastog para javlja se tzv. habanje u toku razrade, koje ima pozitivan efekat na raspodelu opterećenja u sprezi dva zuba jer dovodi do poravnanja-poliranja površine mašinski obrađenog boka zuba. Može se javiti u vidu umerenog habanja i u vidu poliranja. Kod umerenog habanja primećuje se da je materijal skinut sa površina glave i noge zuba, dok je poliranje veoma spor proces habanja u toku kojeg se hrapavost kontaktnih površina postepeno smanjuje do sjaja ogledala. Prekomerno habanje se može nazvati kao habanje koje posle određenog perioda rada dostiže kritičan obim. Posebni oblici habanja usled klizanja su: umereno grebanje, izraženo grebanje i interferentno habanje [73]. Kod umerenog grebanja javljaju se sitni žlebovi u

pravcu klizanja, nepravilno raspoređeni po bokovima zuba. Izraženo grebanje je vrsta abrazivnog habanja sa prisutnim uglačanim linijskim žlebovima u pravcu klizanja zuba, kao posledica kopanja površina spregnutih zuba oštrim ivicama hrapavih površina ili tvrdim česticama prilepljenim za njih. Interferentno habanje je habanje vrha jednog zuba i/ili podnožja zuba koji je s njim u sprezi, slika 2-4.

Kao rezultat ovog habanja javljaju se udubljenja u podnožjima i zaobljenja na vrhovima zuba dva spregnuta zupčanika. Habanje se može smanjiti izborom maziva i povećanjem kvaliteta obrade radnih površina, kao i izborom materijala. Bokovi zubi malog zupčanika treba da imaju veću tvrdoću, jer trpe veći broj promena opterećenja u toku rada. Korozija je isto tako vid površinskog razaranja bokova zuba. Hemijska korozija predstavlja degradaciju površinskih slojeva materijala pod hemijskim dejstvom primesa iz maziva, slika 2-7. Kontaktna korozija je površinsko oštećenje zbog ponavljanja malih pomeranja jedne kontaktne površine po drugoj, što dovodi do ubrzanog oštećenja abrazijom. Ljuspanje se javlja zbog procesa oksidacije u toku termičke obrade. Pri radu zupčastih parova mogu se javiti visoke temperature koje dovode do pregrevanja praćenog pohabanom zonom i plastičnom deformacijom bokova zuba. Poseban vid oštećenja površina bokova zuba je erozija, kavitacijska, hidraulična ili električna [73]. Kavitacijska erozija nastaje zbog visokofrekventnih vibracija ili kada je mazivo zagađeno vodom, vazduhom ili drugim gasovima, slika 2-7. Hidrauličnu eroziju izaziva dejstvo mlaza ili struje tečnosti koja sadrži vazduh i sitne čestice. Električna erozija se javlja pri pražnjenju električnog luka ili varnica između spregnutih bokova, praćena malim kraterima glatkih ivica na bokovima zuba i nekad, većim sagorelim oblastima.

Zaribavanje je oštećenje bokova zuba zbog dejstva velikih površinskih pritisaka i brzina klizanja, a javlja se kao vid specifičnog habanja sa brazdama i zarezima u smeru klizanja [72, 73, 76]. Hladno zaribavanje se javlja pri obimnim brzinama ispod 4 m/s, kod zupčanika izrađenih od poboljšanog čelika sa nižom kvalitetom obrade, relativno retko, a toplo zaribavanje nastaje pri velikim brzinama klizanja i površinskim pritiscima kod termički obrađenih cilindričnih zupčanika. Primer izraženog zaribavanja zbog velikog odstupanja paralelnosti osa spregnutih zupčanika je dat na slici 2-6.

Trajne deformacije se pojavljuju kao utisnuta mesta na bokovima zuba pri prolazu stranih čestica kroz zahvat u vidu valovitosti brazdi ili hrapavih ivica [72, 73, 76]. Valovitost su trajne deformacije nastale na mestima najvećeg opterećenja bokova zuba. Ove deformacije imaju oblik malih grebena, normalnih na pravac klizanja. Grebeni su valoviti i daju površini bokova izgled sličan pesku ili talogu. Brazde su poseban vid oštećenja od izrazitih grebena i žlebova koji nastaju plastičnom deformacijom, ali ponekad i dodatnim habanjem bokova zuba.

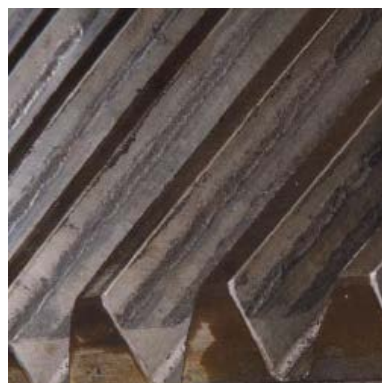
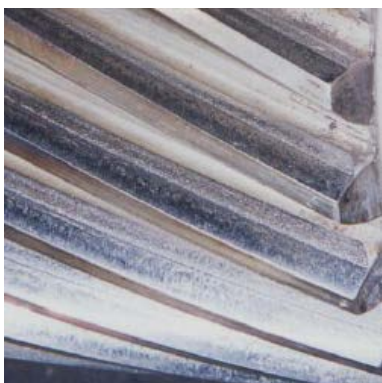
Najčešće se javlja na zupcima sporohodnih zupčanika izrađenih od materijala male tvrdoće, sa velikom komponentom klizanja u pravcu linije kontakta zuba. Hrapave ivice predstavljaju deformaciju u obliku grubih, često oštrih, izduženih ivica na krajevima zuba nastalih usled velikih opterećenja praćenih klizanjem ili usled zaribavanja, a ponekad u toku proizvodnih operacija.



SLIKA 2-4. Velika istrošenost podnožja zubi – levo. Pri vrhu zubi vide se utori po cijeloj površini boka a na desnoj strani bokova došlo je do plastične deformacije – desno



SLIKA 2-5. Nejednako „nošenje“ odnosno jedna strana zupčanika ima veću površinu preklopa



SLIKA 2-6. Početni stadij zaribavanja – levo, adhezija – desno

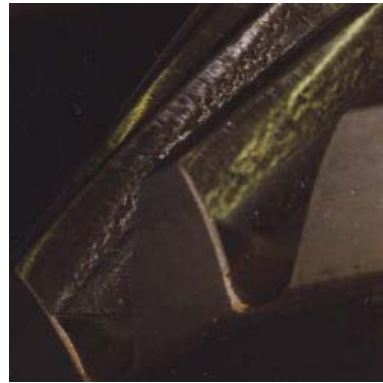


SLIKA 2-7. Eroziija - levo, korozija - desno

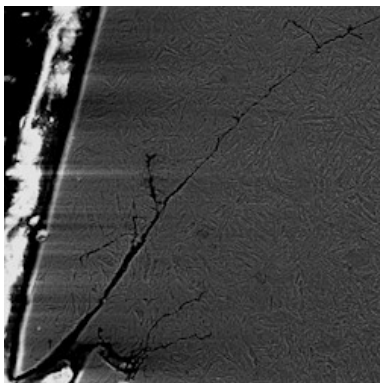
Zamorna oštećenja površine materijala nastaju zbog ponovljenih opterećenja bokova zuba u toku rada, uklanjanjem dela materijala i formiranjem naprslina [72, 73, 76]. Javljaju se u vidu pitinga, ljuspastog pitinga, ljuštenja i površinskog drobljenja kao posledica površinskih i potpovršinskih napona od kontaktnog opterećenja. Najčešće se javlja piting u vidu malih jamica veličine od nekoliko desetina μm do 0,2 mm. Piting se uglavnom pojavljuje nakon više od 10^4 promena opterećenja, odnosno sprežanja istog para zuba [73]. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da su aktivne površine bokova zuba ispod kinematske površine (noga zuba) više izložene pitingu nego površine bokova iznad nje kod pogonskog i kod gonjenog zupčanika, ali je češće kod pogonskog zupčanika. Razlikuju se početni, progresivni i mikro-piting. Početni piting se javlja na početku rada zupčastog para, čak i odmah posle razrade.

Prepoznaje se kao oštećenje u vidu malih, plitkih jamica koje su posledica nepravilne obrade površina, a može preći u progresivni piting, slika 2-8. Početni piting može eliminisati početne nepravilnosti kontaktnih površina i time zaustaviti zamorno oštećenje. Mikro-piting je pojava mreže mikro-jama ili mikro-naprslina, kao rezultat nedovoljne debljine uljnog filma u odnosu na opterećenje. Ljuspasti piting je vid oštećenja površine zuba koji uključuje probijanje i izbacivanje tankih ljuspica materijala u velikoj oblasti, čime se stvaraju plitke šupljine približno konstantne dubine oblika trouglova sa vrhom nadole, slika 2-8. Ljuštenje-otcepljenje je oštećenje slično ljuspastom pitingu, pri čemu su slomljeni komadi materijala često deblji od kaljenog sloja i nepravilnog su oblika.

Obično se javlja kod otvrdnutih površina bokova cilindričnih zupčanika sa pravim zupcima [73]. Naprslina zuba nastaju zbog kaljenja, brušenja ili zamora [72, 73, 76]. Do naprslina zbog kaljenja dolazi pri termičkoj obradi zbog prekomernih unutrašnjih napona. Ove naprslina se često otkrivaju tek posle određenog vremena rada ili pri brušenju. Naprslina zbog brušenja javljaju se u toku ili posle obrade brušenjem i uglavnom imaju pravilan raspored. Ove naprslina su kratke, ne mnogo duboke, javljaju se kao setije približno paralelnih naprslina najčešće normalno na pravac putanje brusnog točka ili u obliku rešetke od naprslina. Zamorne naprslina rezultat su ponavljanja naizmeničnih ili cikličnih opterećenja čiji su intenziteti najčešće znatno manji od zatezne čvrstoće materijala, slika 2-9.



SLIKA 2-8. Početno rupičenje (piting) – levo, uznapredovalo rupičenje - desno



SLIKA 2-9. Početna naprslina- levo, završna naprslina - desno

Do loma zuba može doći zbog preopterećenja, smicanja zuba, posle plastične deformacije i zbog zamora[72, 73, 76]. Lom usled preopterećenja je rezultat jednokratnog ili malog broja dejstva velikog opterećenja. Ovaj lom se javlja kao krt, žilav ili kvazi-krt lom. Smicanje zuba je lom sa površinom odsečenom slično mašinski obrađenoj površini.



SLIKA 2-10. Lom zuba delimičan – levo, lom kompletnog zuba - desno

Ovaj otkaz se javlja kod zupčanika od materijala niske čvrstoće, spregnutog sa zupčanicom od jačeg materijala pri jednokratnom preopterećenju. Zamorni lom se javlja zbog savojnog opterećenja ili kao lom dela zuba, slika 2-10. Zamorni lom od savijanja nastaje zbog rasta naprsline tokom velikog broja ciklusa opterećenja. Na površini loma izdvajaju se dve zone:

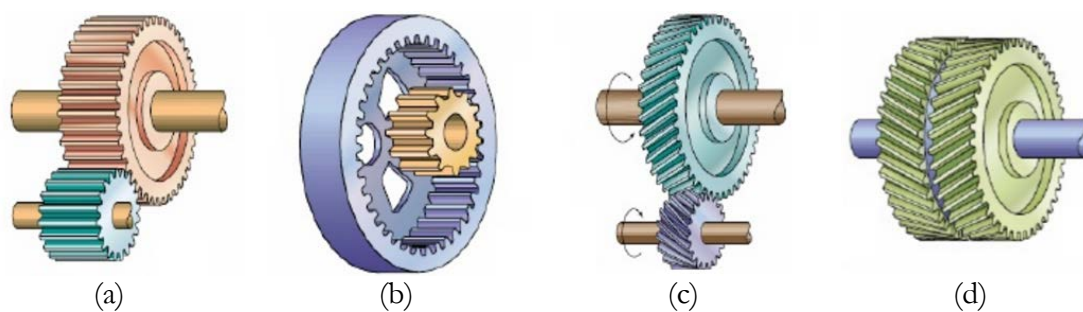
površina zamora i površina konačnog loma. U zoni zamora nema znakova plastične deformacije, a površina zone konačnog loma je glatka, mat i često ispresecana zatvorenim linijama, često i sa strijama uzastopnog rasta naprsline. Zamorni lom dela zuba nastaje na krajevima zuba cilindričnih i koničnih zupčanika, zbog koncentracije opterećenja uz izraženi piting koji inicira zamornu prslinu u susednom zupcu. Složeno opterećenje zuba izaziva različite vidove oštećenja koji podstiču jedno drugo. Zato je potrebno proračunom nosivosti zupčanika obuhvatiti sve kriterijume: čvrstoću bokova i podnožja zuba, zaribavanje i habanje.

3 VIBRODIJAGNOSTIČKA ANALIZA ZUPČASTIH PAROVA

3.1. ZUPČASTI PRENOSNICI

Zupčasti prenosnik je veoma često korištena grupa mehaničkih prenosnika i gotovo da nema grane industrije gdje se oni ne koriste. Osnovna prednost zupčastih prenosnika je u visokom stepenu iskorišćenja, visokoj trajnosti i izdržljivosti, relativno malim dimenzijama u odnosu na snagu prenošenja uz omogućavanje velikog raspona prenosa snage. Neki od nedostataka se ogledaju u visokoj ceni izrade koja se prvenstveno ogleda u zahtevu za tačnom i preciznom mašinskom obradom na posebnim mašinama, generišu buku i vibracije zbog krutog prenosa snage od ulaza do izlaza. Prema položaju osi zupčanog para zupčasti prenosnici se mogu podeliti na:

- prenosnici sa paralelnim vratilima – prenosnici sa cilindričnim zupčanicima,
- prenosnici sa vratilima koja se seku – prenosnici sa koničnim zupčanicima,
- prenosnici sa mimoilaznim osama vrtila – hiperboloidni zupčanici.

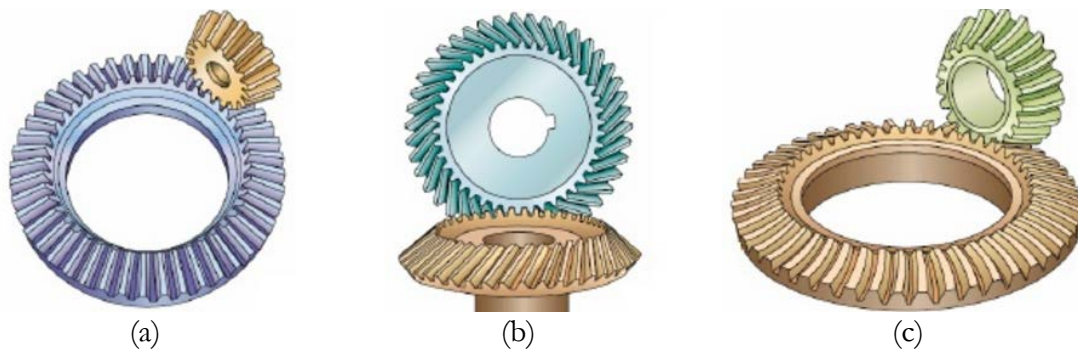


SLIKA 3-1. Cilindrični zupčasti prenosnici: a) pravi zupci (vanjsko ozubljenje), b) pravi zupci (unutrašnje ozubljenje), c) kosi zupci (helikoidni zupci), d) strelasti zupci

Najrasprostranjeniji mehanički prenosnici su upravo zupčasti prenosnici, oni se primenjuju za širok raspon opterećenja i dijapazon brzina. Prenosjenje snage vrši se gotovo bez gubitaka, imaju dug vijek trajanja i veliku sigurnost pogona. Dozvoljavaju preopterećenja,

ne zahtevaju velike troškove održavanja, a stalni prenosni odnos ne zavisi od veličine opterećenja.

Zupčasti prenosnici sa cilindričnim zupčanicima sa pravim i kosim zubima koriste se za snage i do 20.000 kW i ulazne brojeve obrtaja do 100.000 min⁻¹, prenosni odnosi za trostepene prenosnike i do 200 (300), a iskoristivost im je do 99,5%. Prenosnici sa koničnim zupčanicima se koriste za prenosne do 6(10), skuplji su od cilindričnih zupčanika. Zato se češće koriste za promenu toka snage, a ređe za redukciju i multiplikaciju obrtnog momenta. Izvode se i kao planetarni najčešće kod diferencijala.



SLIKA 3-2. Konični zupčasti prenosnici: a) pravi zupci, b) kosi zupci, c) zakrivljeni zupci

Pužni prenosnici imaju sposobnost ostvarivanja veoma velikog prenosnog odnosa u jednom stepenu, ali im pada i stepen iskorišćenja sa povećanjem prenosnog odnosa. Višehodni puževi daju veću iskoristivost, ali je manji prenosni odnos. Za razliku od većine zupčastih prenosnika pužni prenosnici veoma tiho rade, a imaju i donekle sposobnost prigušenja vibracija. Zupčaste prenosnike čine zupčasti parovi koje čine zupčanici. Zupčanik čini telo zupčanika i zupčasti venac. Telo zupčanika omogućuje stabilan položaj zupčastog venca, spajanje i oslanjanje na vratilo, prenošenje obrtnog momenta i sila koje deluju na zupce i sl. Zupčasti venac čine zupci, međuzublja i prsten (venac) ispod podnožnog cilindra. Zupci su po visini ograničeni temenom i podnožnom površinom, a u aksijalnom pravcu čeonom površinom. Zupčanici sa kosim zubima u odnosu na zupčanike sa ravnim zubima imaju sledeće prednosti: zubi postepeno ulaze u zahvat, zahvat počinje na jednoj strani zuba i postepeno se širi po celoj širini zuba, u zahvatu se istovremeno nalazi veći broj zubi, zubi se opterećuju postepeno tako da je rad tiši, moguća je veća opteretivost dok je granični broj zubi (zbog podrezivanja korena) manji. Nedostatak je pojavljivanje aksijalne komponente sile koju mora preuzeti vratilo i ležajevi pa problem uležištenja postaje složeniji. Ugao nagiba boka zuba se definiše u odnosu na osu. Dva zupčanika sa kosim zubima u zahvatu imaju suprotne uglove nagiba boka zuba. Ugao nagiba boka zuba se kreće između 8° i 20°. Kod vrednosti manjih od 8° gubile bi se gotovo sve prednosti koje pružaju zupčanici sa kosim zupcima, a kod vrednosti većih od 20° aksijalna sila bi bila prevelika.

3.2. KARAKTERISTIČNE FREKVENCije ZUPČASTOG PRENOSNIKA

Kod sistema transmisije baziranih na zupčastim parovima glavni izvor vibracija je aktivnost uzupčavanja zupčanika. Svi neoštećeni zupčanici imaju svoje vlastite karakteristike vibracija određene njihovim konstrukcionim parametrima i njihovim stanjima. Karakteristične

osobine vibracija zupčastih prenosnika su preventivno zbog cikličnih promenljivih sila uzupčavanja zupčanika. Ove sile uzupčavanja stvaraju vibracije koje se prenose na kućište zupčastog prenosnika gde se kao takve mogu meriti. Geometrija profila zupčanika ima presudan uticaj na nastajanje vibracija. Bilo koja dva zupčanika koji se uzupčavaju moraju imati istu frekvenciju uzupčavanja. Savršena sinusoidalna sila uzupčavanja bi podrazumevala savršen jedinstveni ton spektra vibracija. Kod stvarnih zupčanika površine nisu idealno glatke i oblik zuba nije idealan, stoga spektar vibracija će uvek sadržavati harmonike osnovnih frekvencija uzupčavanja.

Međutim, postoji fenomen koji se javlja kad se pojavi oštećenje kod zupčanika koji se uzupčavaju. Nastaje modulacija signala vibracija zbog oštećenja. Oštećenje generiše modulaciju amplitude i faze frekvencije uzupčavanja. Ovo rezultira karakterističnim rastom amplituda oko moduliranih bočnih pojaseva frekventnog domena. Za zupčaste prenosnike koji su u dobrom stanju, nivo bočnih pojaseva uglavnom ostaje konstantan u toku vremena. Stoga povećanje broja i amplitude takvih bočnih pojaseva oko frekvencije uzupčavanja može ukazivati na postojanje oštećenja [77].

Vibrodijagnostička analiza signala zupčastih parova zahteva detaljno poznavanje frekventnih komponenti koje isti mogu generisati. Pregled odnosno poreklo mogućih komponenti vibracionog signala zupčastog prenosnika je dat poglavljem 2. Vibrodijagnostička analiza signala sa zupčastih parova zahteva detaljno poznavanje frekvencijskih komponenti koje isti mogu generisati. Na nivou zupčastog para, ne uzimajući u obzir rotirajuće mase i kotrljajne ležajeve, karakteristične komponente vibracionog signala se mogu javiti na sledećim frekvencijama:

- frekvencija pogonskog zupčanika,
- frekvencija gonjenog zupčanika,
- frekvencija uzupčavanja,
- frekvencija obrasca uzupčavanja,
- frekvencija lovljenih zuba.

Komponente spektra na brojevima obrtaja vratila pogonskog i gonjenog zupčanika se očekivano javljaju. U slučaju malih brojeva obrtaja (na primer krajnji stepeni redukcije kod višestepenih zupčastih prenosnika) amplitude na ovim frekvencijama mogu biti veoma male. Na nivou zupčastog para, ne uzimajući u obzir rotirajuće mase i kotrljajne ležajeve, karakteristične komponente vibracionog signala potiču od frekvencije uzupčavanja GMF^{23} i njenih harmonika, subharmonika kao i komponenti koje nisu celobrojni umnošci GMF , ali su njena direktna posledica. Frekvencija uzupčavanja se računa nad svakim stepenom zupčastog prenosa kao proizvod broja zuba zupčanika i njegove osnovne frekvencije, bilo nad pogonskim ili gonjenim zupčanicom:

$$GMF = Z_p * f_{ul} = Z_g * f_{iz} \quad (1)$$

gde je:

Z_p – broj zuba ulaznog (pogonskog) zupčanika,

f_{ul} – osnovna frekvencija ulaznog (pogonskog) zupčanika,

Z_g – broj zuba izlaznog (gonjenog) zupčanika,

²³ Gear mesh frequency

f_{iz} – osnovna frekvencija izlaznog (gonjenog) zupčanika.

Kako je već napomenuto frekvencija uzupčavanja nastaje kao posledica varijabilne krutosti zuba kao i odstupanja profila zuba od idealnog profila. Na taj način ona je uvek prisutna u vibracionom signalu snimljenom nad zupčastim prenosnikom i zavisno od stepena oštećenja može biti manje ili veće amplitude. Osim frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika kod oštećenih zupčastih prenosnika je tipična pojava i komponenti koje su posledica različitih obrazaca pojave oštećenja nad zubima. Jedna od takvih komponenti je i tzv. montažna frekvencija uzupčavanja u oznaci $GAPF^{24}$, koja najčešće nastaje usled:

- tipičnog obrasca habanja nad pojedinim zubima nastalog usled greške u izradi zupčanika,
- lokalizovanih oštećenja na pojedinim zubima nastalih usled prolaska stranih tela (najčešće metalnih uključaka) između dva zupčanika,
- usled zakretanja zupčanika sa pravim zupcima u toku remonta.

Za izračunavanje montažne frekvencije uzupčavanja kao i ostalih karakterističnih frekvencija zupčastog para potrebno je poznavanje zajedničkih prostih činilaca za oba zupčanika. Da bi se odredili zajednički činiooci oba zupčanika vrši se faktorizacija brojeva zuba za oba zupčanika u proste brojeve (1, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47,...) nakon čega se nalaze prosti činiooci koji su prisutni u oba zupčanika. Prosti brojevi ili prim-brojevi su svi prirodni brojevi djeljivi bez ostatka samo s brojem 1 i sami sa sobom, a veći od broja 1. Ukoliko je npr. $Z_p = 8$ a $Z_g = 20$, razdvajanje brojeva zuba u proste činioce daje:

$$Z_p = 1 \times 2 \times 2 \times 2$$

$$Z_g = 1 \times 2 \times 2 \times 5$$

Najveći prost činilac u Z_p je 2, dok je u Z_g 5. Zajednički prosti činiooci u oba slučaja su 1 i 2 a njihov proizvod je 2, to praktično znači da će se zub na jednom zupčaniku uzubiti sa svakim drugim zubom na susjednom zupčaniku. Uzimajući u obzir prethodno navedeno $GAPF$ komponenta se može izračunati na dva različita načina:

- kao odnos frekvencije uzupčavanja i proizvoda zajedničkih prostih činilaca u oznaci P_{ZPC_i} :

$$GAPF = \frac{GMF}{P_{ZPC_i}} \quad (2)$$

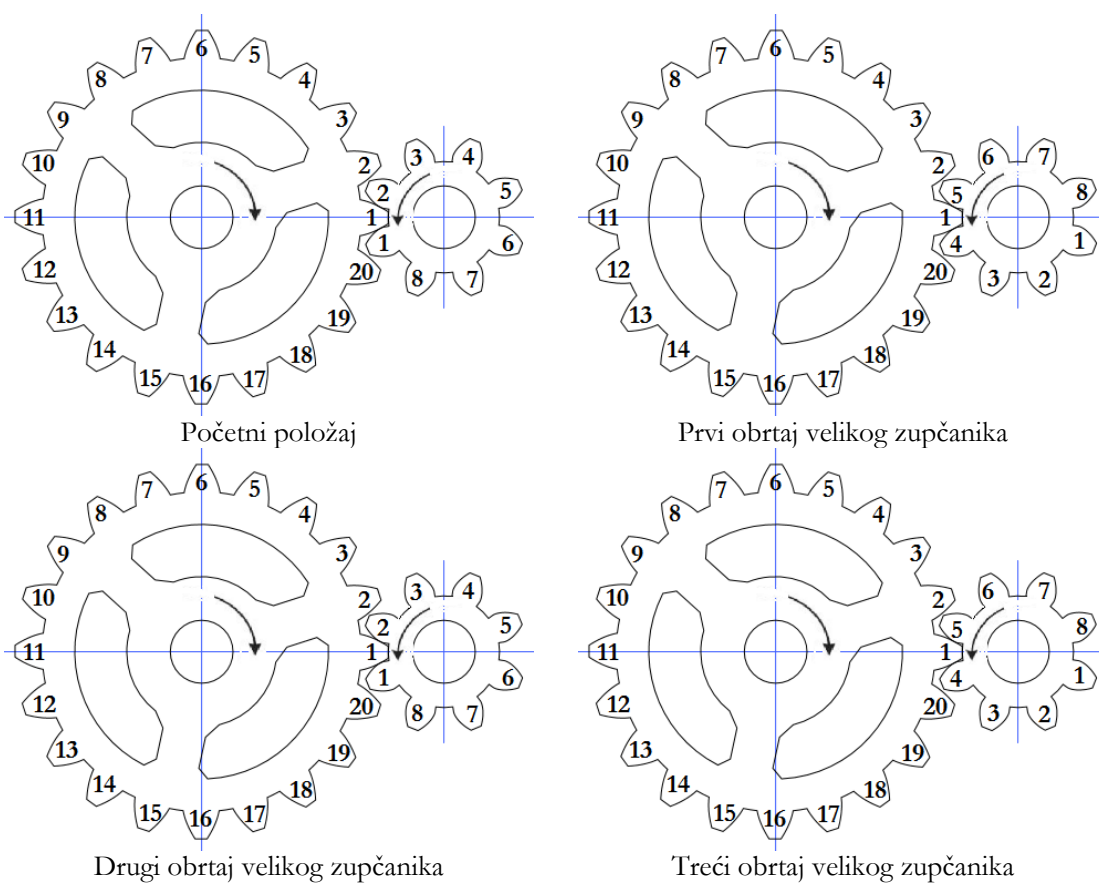
- kao proizvod osnovne frekvencije zupčanika (broj obrtaja vratila koje ga nosi) i najvećeg prostog činiooca na zupčaniku:

$$GAPF = f_{ul} \times \max(PC_{ul}) = f_{iz} \times \max(PC_{iz}) \quad (3)$$

gde je:

$\max(PC_{ul})$ najveći prost činiooc broja zuba na ulaznom zupčaniku odnosno $\max(PC_{iz})$ na izlaznom zupčaniku.

²⁴ Gear assembly phase frequency



SLIKA 3-3. Vizuelizacija obrasca uzupčavanja dva zupčanika

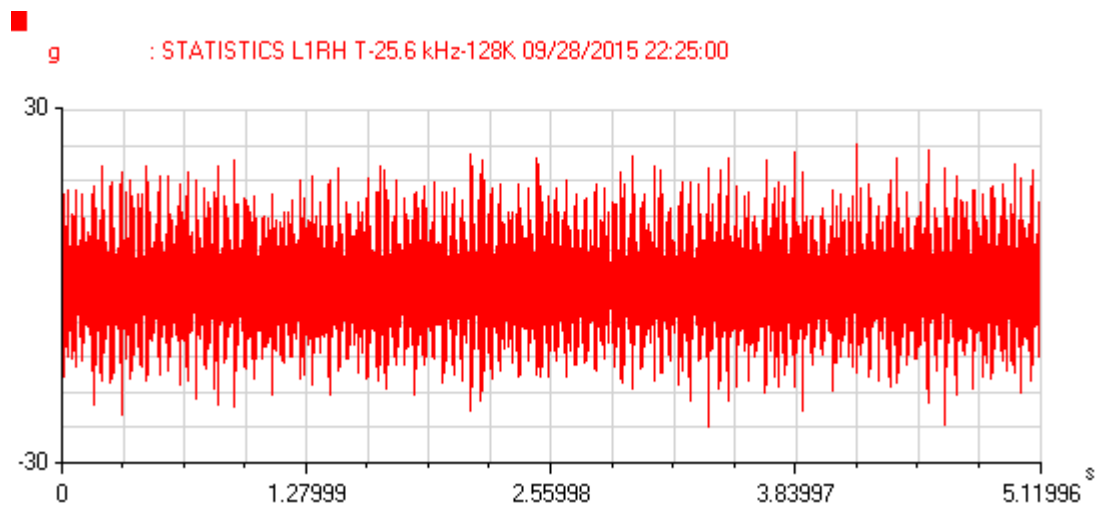
U početnom položaju zubi označeni sa 1 su u kontaktu. Nakon jednog punog kruga velikog zupčanika njegov zub oznake 1 će biti u kontaktu sa zubom broj 4 malog zupčanika. Nakon drugog punog obrtaja velikog zupčanika njegov zub broj 1 će biti u kontaktu sa zubom broj 1 na malom zupčaniku. Posle trećeg obrtaja velikog zupčanika zub broj 1 velikog zupčanika je u kontaktu sa zubom broj 4 malog zupčanika, baš kao i na početku, odnosno nakon prvog obrtaja velikog zupčanika. Ovakav obrazac sprežanja zupčanika znači da će zubi malog zupčanika 1 i 4 biti u kontaktu sa zubima velikog zupčanika: 1, 9, 4, 17 i 11. Ovo je prvi obrazac sprežanja. Drugi obrazac sprežanja podrazumeva početni položaj u kom zub broj 1 velikog zupčanika ostvaruje kontakt sa zubom broj 2 na malom zupčaniku. Ovakav pak obrazac sprežanja zupčanika znači da će zubi malog zupčanika 2, 8 i 5 biti u kontaktu sa zubima velikog zupčanika 2, 11, 5, 14 i 8. Treći obrazac sprežanja podrazumeva početni položaj u kom zub broj 1 velikog zupčanika ostvaruje kontakt sa zubom broj 3 na malom zupčaniku. Ovakav pak obrazac sprežanja zupčanika znači da će zubi malog zupčanika 3, 9 i 6 biti u kontaktu sa zubima velikog zupčanika 3, 12, 6, 15 i 9.

Ukupni broj mogućih obrazaca uzupčavanja za konkretni zupčasti par direktno određuje raspodelu habanja kroz zupčasti par. U konkretnom slučaju, slika 3-3 demonstrirano je da svaki zub na velikom zupčaniku dolazi u kontakt sa dva različita zuba malog zupčanika. Isto tako svaki zub malog zupčanika je u kontaktu sa pet različitih zuba velikog zupčanika.

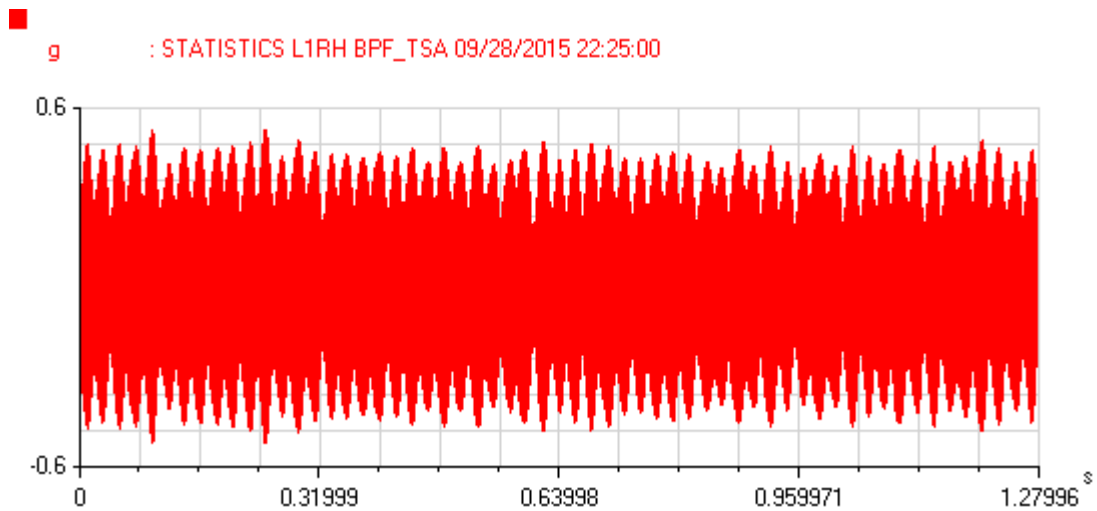
Zamislamo sad da je zub broj 1 velikog zupčanika bio oštećen i da se pri njegovom kontaktu sa zubom malog zupčanika to oštećenje prenosi na zub malog zupčanika. Kad se taj novooštećeni zub malog zupčanika nađe u kontaktu sa nekim drugim zubom velikog zupčanika to se oštećenje prenosi na zub velikog zupčanika. Biće potrebno ukupno tri obrtaja velikog zupčanika da bi se oštećenje prenelo na oba zupčanika na način da oštećeni zubi sa jednog zupčanika budu u kontaktu sa oštećenim zubima susednog zupčanika. Posle nekog vremena eksploatacije dobićemo odgovarajući obrazac habanja zupčanika koji odgovara kontaktima zuba 1 i 4 malog zupčanika sa zubima 1, 9, 4, 17 i 11 velikog zupčanika. Što u konkretnom slučaju za analizirani primer frekvencija ovih kontakata će biti $1/2$ frekvencije uzupčavanja.

Iz navedenog razloga sada je jasnije zašto se pri projektovanju zupčastih parova definišu brojevi zuba koji imaju samo jedan zajednički prost činioc, broj 1. U tom slučaju obezbeđeno je uniformno habanje zupčanika. Svaki zub na pogonskom zupčaniku dolazi u kontakt sa svakim zubom gonjenog zupčanika posle odgovarajućeg broja okretaja svakog od zupčanika. Ovakva kombinacija brojeva zuba se naziva kombinacijom „lovljenog zuba“ i prisutna je kod svih ozubljenja namenjenih za odgovorne aplikacije.

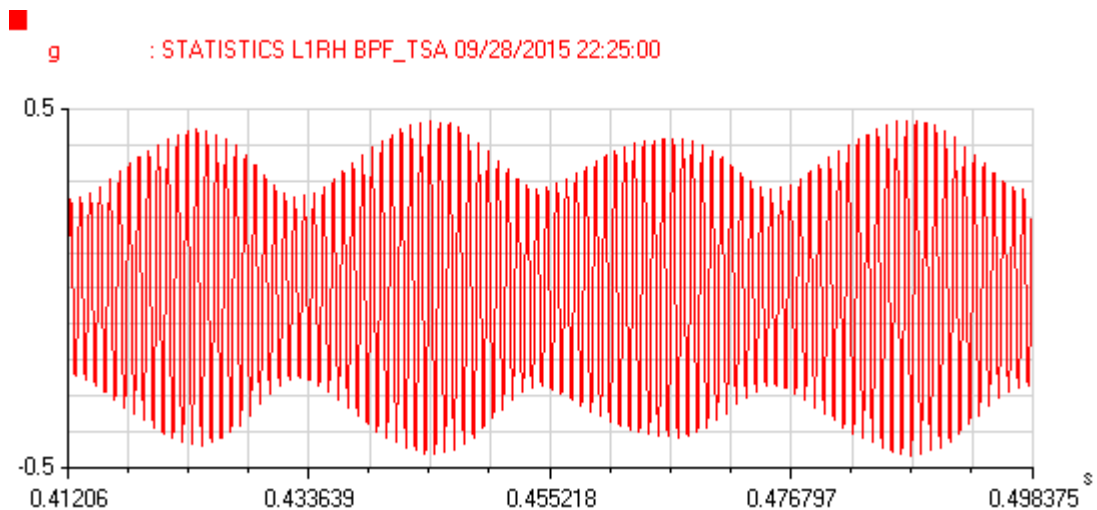
Sirov signal vibracija koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostjućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja je prikazan na slici 3-4, dok je sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostjućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja prikazan na slici 3-5. S druge strane sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostjućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasno filtriran oko frekvencije uzupčavanja i zumiran nad 4 ciklusa sprežanja zupčanika prikazan na slici 3-6.



SLIKA 3-4. Sirov signal vibracija koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja



SLIKA 3-5. Sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja



SLIKA 3-6. Sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasno filtriran oko frekvencije uzupčavanja i zumiran nad 4 ciklusa sprezanja zupčanika

Pored GMF i GAPF komponenti, tipična komponenta vibracionog signala zupčastog prenosioca je i tzv. frekvencija lutajućeg zuba u oznaci HTF. Ista definiše periodičnost sprezanja između dva odabrana zuba na oba zupčanika, odnosno njena recipročna vrednost definiše periodu posle koje će se odabrana dva zuba ponovo sresti, odnosno uzupčiti. Kada se govori o odabranim zubima misli se na oštećene, odnosno zube sa određenom greškom koju u toku uzupčavanja, odnosno u kontaktu doprinose nastanku značajnog tranzijenta u signalu. Izračunava se kao:

$$HTF = \frac{GMF \times P_{ZPC_i}}{Z_p \times Z_g} \quad (4)$$

Ukoliko je prenosni odnos zupčastog para celobrojna vrednost u kontakt će dolaziti uvek isti parovi zuba na spregnutim zupčanicima što će posle određenog vremena dovesti do

ozbiljne neravnomerne pohabanosti po zupčanicima. Iz tog razloga se, kad je god to moguće, definišu prenosni odnosi koji nisu celi brojevi. Osim osnovne frekvencije pogonskog i gonjenog vratila kao i prethodno opisanih frekvencija u vibracionim signalima sa oštećenih zupčastih parova je moguće i prisustvo sopstvene frekvencije zuba zupčanika. Treba zapaziti da je ova frekvencija niska pošto je potrebno više okretaja osnovnog vratila da pomenuta kombinacija zuba ponovo dođe u kontakt. Da bi se ista snimila potrebno je koristiti dugotrajne vremenske zapise odnosno visokorezolucijske, niskofrekvencijske spektre.

4 TEHNIKE PROCESIRANJA SIGNALA U VIBRODIJAGNOSTICI ZUPČASTIH PAROVA

Dalje u tekstu je prikazan pregled i matematički su opisani specifični pokazatelji vibracionog signala koji se koriste u vibrodijagnostičkoj analizi zupčastih parova. Uprošteno, postoje četiri osnovna nivoa procesa dijagnostike oštećenja mašina koristeći vibraciju kao parametar, prikazano na slici 4-1.



SLIKA 4-1. Dijagram dijagnostike oštećenja

Četiri su osnovna nivoa procesa dijagnostike:

- prikupljanje podataka (prostor merenja): prikupljanje podataka signala vibracija eksperimentalno ili teoretsko prikupljanje koristeći dinamičko modeliranje i simulaciju,
- obrada podataka-predprocesiranje (prostor funkcija): primena metoda procesiranja signala za analizu podataka vibracija signala,
- ekstrakcija nekih karaktersitičnih obeležja karakterističnih za posmatrani sistem,
- prepoznavanje obrasca greške (prostor grešaka): mapiranje ekstraktovanih podataka da bi se procenilo stanje mašine, prepoznala vrsta oštećenja ili prognoza preostalog životnog veka sistema.

4.1. PRIKUPLJANJE PODATAKA

Dinamički odgovor može biti izmeren eksperimentalno ili simuliran teorijski. Sproveden je znatan broj istraživanja za analizu eksperimentalno izmerenih signala vibracije u svrhu otkrivanja oštećenja zupčanika [30-34]. U navedenoj literaturi mogu se pronaći detaljnije informacije o eksperimentalnim merenjima sistema korištenih za sakupljanje signala

vibracije sa zupčastih prenosnika. Štaviše, proučavani su različiti dinamički modeli zupčanika za simulaciju dinamičkih odziva [35-39]. Da bi se dobio dinamički odziv zupčastog prenosnika sa napuklim zubom naprslina mora biti modelirana te se nakon toga može izračunati i krutost uzupčavanja. Nakon toga, može se simulirati dinamički odziv koristeći dinamički model.

4.2. OBRADA PODATAKA

Tokom poslednjih decenija razvijene su različite metode obrađivanja podataka za analizu signala vibracija. Ove metode mogu biti kategorizirane u sledeće glavne metode obrade signala vibracija:

- analize u vremenskom domenu,
- analize u frekventnom domenu,
- Cepstrum analiza,
- analize u vremensko-frekventnom domenu.

4.2.1. ANALIZA U VREMENSKOM DOMENU

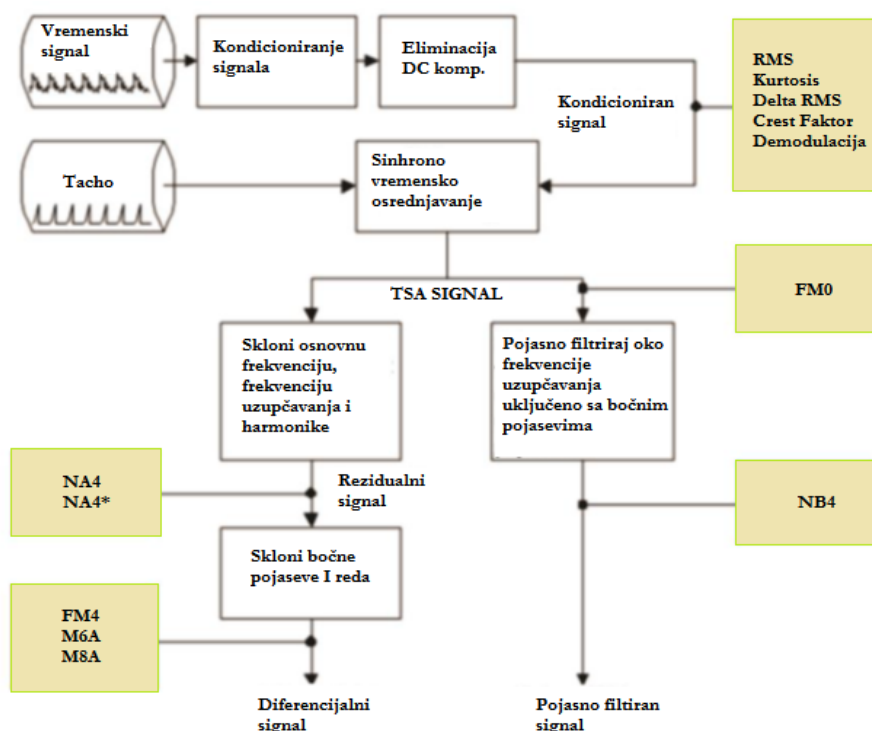
Napredne metode vibrodijagnostičke analize zupčastih parova razlikuju pet različitih iskaza vibracionog signala [23]:

- sirovi vremenski signal,
- sinhrono vremensko osrednjeni zapis,
- rezidualni signal,
- diferencijalni signal,
- pojasno filtrirani signal – vremenski signal pojasno filtriran oko frekvencije uzupčavanja.

Pod sirovim vremenskim signalom podrazumeva se električni signal koji generiše merni pretvarač koji se kasnije preprocesira u okviru merno akvizicionog sistema. U okviru predprocesiranja se osim digitalizacije signala i primene tzv. antialiasing filtera vrši i oduzimanje tzv. DC komponente (srednja vrednost signala) kao i skaliranje električne veličine kalibracionim koeficijentom kako bi prikazana merna veličina bila iskazana u fizikalnim jedinicama. Kao karakteristični pokazatelji sirovog vremenskog signala koriste se statistički parametri kao što su: srednja kvadratna vrednost (RMS^{25}), vrednosti u različitim frekventnim opsezima, vršna vrednost signala (Peak), crest faktor CF, kurtosis parametar, parametar asimetrije i njihovo korišćenje rasprostranjeno u oceni stanja zupčanika [17, 78]. Analiza u vremenskom domenu se primenjuje direktno na vremenski signal, npr. ekstrakcijom statističkih podataka za ispitivanje bilo kakve moguće promene u signalu zbog degradacije ili postojanja oštećenja. Objašnjenje primene statističkih indikatora u vremenskoj domeni može se pronaći u [4, 79, 80]. Sinhronizovano vremensko osrednjavanje je tehnika koja je svoju najširu primenu našla baš u vibrodijagnostici zupčastih parova. Sinhronizovano vremensko osrednjavanje (TSA²⁶) je jedna od najefikasnijih tehnika za ekstrakciju sadržaja periodičnih signala koji su sinhronizovani sa rotacijom zupčanika od interesa. Detaljnije objašnjenje TSA se može naći [3, 77, 81].

²⁵ RMS – Root Mean Square

²⁶ TSA – Time Synchronized Averaging



SLIKA 4-2. Način dobijanja različitih vremenskih vibracionih signala zupčastog prenosioca i njihova karakteristična obeležja, modifikovano i preuzeto iz [82]

Za razliku od klasičnog osrednjavanja u frekventnom domenu koje podrazumeva linearno, eksponencijalno ili tzv. peak-hold osrednjavanje nezavisno dobijenih frekventnih spektara na bazi vremenskih zapisa koji su nezavisni ili pak delom preklopljeni, sinhrono vremensko osrednjavanje podrazumeva:

- kontrolisanu akviziciju u smislu korišćenja referentnog tacho signala koji obezbeđuje informaciju o vremenu kada početi sa prikupljanjem vremenskog zapisa na istom faznom položaju što dozvoljava poređenje nezavisno snimljenih signala i aritmetičko osrednjavanje snimljenih signala na već pomenuti način,
- pri dovoljnom broju osrednjavanja, rezultat sinhronog vremenskog osrednjavanja jeste eliminacija svih asinhronih komponenti vibracionog signala kao što su komponente kotrljajnih ležajeva, komponente susednih stepeni zupčastog prenosa (u slučaju da prenosni odnos nije celi broj), uticaj susednih mašina itd.

Ovo ugaono resampling se izvodi kao prvi korak u rešavanju malih promena u brzini rotacije mašine, kao i u rešavanju uzoraka koji nisu prikupljeni na tačno istim ugaonim pozicijama. Ova metoda u suštini raspoređuje vibraciju na mnogo obrtaja kritičnog perioda zupčanika ili ležaja. Veliki nedostatak TSA je značajan gubitak informacija sadržanih u distribuciji ili autokorelacijskoj funkciji, koja sadrži važne informacije povezane sa mogućnošću dijagnostike oštećenja [83]. Uprkos ovom gubitku informacija, metoda se široko primenjuje kao korak u predobradi i kao gruba procena. Približno 40% radova na temu detekcije oštećenja zupčanika i ležajeva koriste ovu metodu. Kao karakteristična obeležja sinhronog vremenski osrednjenog signala obično se koriste isti parametri kao i kod sirovog signala i još jedan dodatni tzv. FM0 parametar [24]. FM0 parametar je jednostavan

parametar za praćenje promena u procesu uzupčavanja zuba zupčanika. Intenzivna lokalizovana oštećenja zupčanika najčešće dovode do povećanja Peak-Peak vrednosti mada u isto vreme ne dovode do promene frekvencije uzupčavanja. FM0 parametar je definisan kao odnos Peak-Peak vrednosti sinhrono osrednjenog vremenskog signala i sume amplituda komponenti frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika. Za teško pohabane zupčanike Peak-Peak parametar ostaje relativno nepromenjen dok se frekvencija uzupčavanja smanjuje dovodeći do porasta FM0 parametra. Sa druge strane pak FM0 parametar nije dovoljno osetljiv na manja oštećenja zupčanika:

$$FM0 = \frac{PP(TSA)}{\sum_{i=1}^n A(f_i)} \quad (5)$$

gde je:

PP(TSA) Peak-Peak vrednost sinhrono osrednjenog vremenskog signala, dok je $\sum_{i=1}^n A(f_i)$ suma harmonika frekvencije uzupčavanja.

Rezidualni signal, slika 4-2, se dobija na bazi sinhrono vremenski osrednjenog signala eliminacijom osnovnih komponenti i harmonika osnovne frekvencije i frekvencije uzupčavanja. Karakteristična obeležja rezidualnog signala su tzv. NA4 i NA4* parametri. NA4 parametar je razvijen sa ciljem detekcije početnog nastajanja oštećenja na zupcima i daljeg praćenja progresije oštećenja:

$$NA4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^4}{\left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^N (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \right] \right\}^2} \quad (6)$$

gde su:

r_i – komponente rezidualnog signala,

\bar{r} – srednja vrednost rezidualnog signala,

N – ukupni broj tačaka u vremenskom zapisu,

m – trenutni redni broj vremenskog zapisa.

NA4* parametar je predložen kao naprednija verzija prethodnog parametra koji je osetljiviji pri kasnijim fazama oštećenja zuba. Ova osetljivost na teška oštećenja je postignuta normalizacijom četvrtog statističkog momenta rezidualnog signala sa kvadratom varijanse rezidualnog signala neoštećenog zupčastog para, a ne sa kvadratom varijanse trenutnog zapisa kao u slučaju NA4:

$$NA4^* = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^4}{(\hat{M}_2)^2} \quad (7)$$

gdje je \hat{M}_2 varijansa rezidualnog signala zupčastog para u neoštećenom stanju.

Diferencijalni signal se dobija na bazi sinhronog vremenski osrednjenog signala eliminacijom frekvencija osnovnih komponenti, harmonika osnovne frekvencije i frekvencije uzupčavanja zajedno sa bočnim pojasevima kao posledicom modulacije. S obzirom na način dobijanja rezidualnog signala, diferencijalni se signal najčešće sračunava jednostavnom eliminacijom komponenti bočnih pojaseva iz rezidualnog signala. Karakteristična obeležja diferencijalnog signala su tzv. FM4, M6A i M8A parametri. FM4

parametar je razvijen u cilju lokalizovanih oštećenja koje se javlja na ograničenom broju zuba zupčanika, računa se kao četvrti statistički moment diferencijalnog signala:

$$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^2} \quad (8)$$

gde su:

d_i - tačke diferencijalnog signala,

\bar{d} - srednja vrednost diferencijalnog signala.

M6A i M8A parametri razvijeni sa istim ciljem kao i FM4 parametar sa tom razlikom da su oni osetljiviji na pojavu izrazitijih udarnih komponenti u diferencijalnom signalu.

$$M6A = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^6}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^3} \quad (9)$$

$$M8A = \frac{N^3 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^8}{\left[\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right]^4} \quad (10)$$

Pojasno filtriran signal se dobija pojasnim filtriranjem sinhrono osrednjenog vremenskog signala oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja. Na tako dobijeni signal se primenjuje Hilbertova transformacija pri čemu magnitudni deo dobijenog signala predstavlja meru modulacije usled bočnih pojaseva. Karakteristični parametar ovako dobijenog envelopnog signala je NB4 parametar, koji se računa kao odnos četvrtog statističkog momenta envelopnog signala dobijenog nad pojasno filtriranim sinhrono osrednjenim vremenskim zapisom i kvadrata varijanse envelopnog signala:

$$NB4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^4}{\left\{ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^N (E_{ij} - \bar{E}_j)^2 \right] \right\}^2} \quad (11)$$

gde su:

E_i - komponente diferencijalnog signala,

\bar{E}_j - srednjaj vrednost difrencijalnog signala.

4.2.2. ANALIZA U FREKVENTNOM DOMENU

Analiza u frekventnom domenu koristi transformisanu verziju vremenskog signala u frekventni domen. Fourierova transformacija (FT) je široko primenjivanja transformacija za analizu vremenskih signala ali u frekventnom domenu. Analiza u frekventnom domenu nudi mogućnosti izolovanja specifičnih sadržaja frekvencija u vezi sa specifičnim sadržajima komponente mašine ili frekvencija povezanih sa oštećenjima sastavnih elemenata mašine [3]. Različite tehnike bazirane na Fourierovoj analizi spektra su detaljno objašnjene u [2] i [84]. Detaljno poznavanje karakterističnih komponenti zupčastog para omogućava njihovu

identifikaciju u frekventnom spektru. Usled prirode sprezanja zupčanika, svaki zupčasti par će generisati komponentu na frekvenciji uzupčavanja. Kada je u pitanju analiza u frekventnom domenu, ono što ukazuje na postojanje problema na zupčastom paru su [23]:

- pojava viših harmonika frekvencije uzupčavanja,
- pojava izraženih bočnih pojaseva (kao rezultat izražene amplitudne i frekventne modulacije) oko harmonika frekvencije uzupčavanja i njihova simetrija, odnosno asimetrija oko centralnih frekvencija.

Jedan od načina pouzdane primene vibrodijagnostičkih metoda za analizu zupčastih parova jeste korišćenje skalarnih parametara kao obeležja vibracionog signala. U okviru priprema za izvođenje vibrodijagnostičkog testa nad zupčastim prenosnikom, a naročito u slučaju višestepenih zupčastih prenosnika, preporučljivo je prethodno izračunati sve očekivane prinudne frekvencije komponenti u signalima kao što su: osnovni brojevi obrtaja pogonskog i svih gonjenih vratila (komponente 1X i njihove harmonike), frekvencije uzupčavanja nad svim stepenima prenosa (komponente 1X i njihove harmonike), komponente frekvencija obrazaca uzupčavanja nad svim stepenima prenosa (GMF komponente i njihove harmonike) itd. Korišćenje softvera za izračunavanje navedenih prinudnih frekvencija u mnogome olakšava analizu snimljenih spektara, odnosno identifikaciju spektralnih komponenti. Pri analizi snimljenih frekvencijskih spektara sa zupčastih prenosnika, poput ostalih tipova oštećenja rotirajućih mašina, tragamo za komponentama prinudnih frekvencija i njihovim harmonicima. Kako snimljeni signali oštećenih zupčastih prenosnika mogu biti amplitudno i frekventno modulirani potrebno je koristiti i sve raspoložive alate za identifikaciju bočnih pojaseva oko frekvencija uzupčavanja. Skalarni parametri koji se mogu izvesti na osnovu frekventnog spektra oštećenog zupčastog para moraju oslikavati dva navedena fenomena: porast amplitude komponente uzupčavanja kao i fenomen modulacije iskazan preko bočnih pojaseva. U ovom radu, u domenu analize, u frekventnom domenu korišćeni su sledeći parametri:

- ekstrakcija amplitude komponente frekvencije uzupčavanja u frekventnom spektru

$$EA_i = a * f_i \pm j * f_i \quad (12)$$

gde je:

a – redni broj harmonika komponente uzupčavanja f_i ,

j – broj frekventnih linija Δf levo i desno od komponente $a * f_i$, kao opseg za pretragu lokalnog maksimuma,

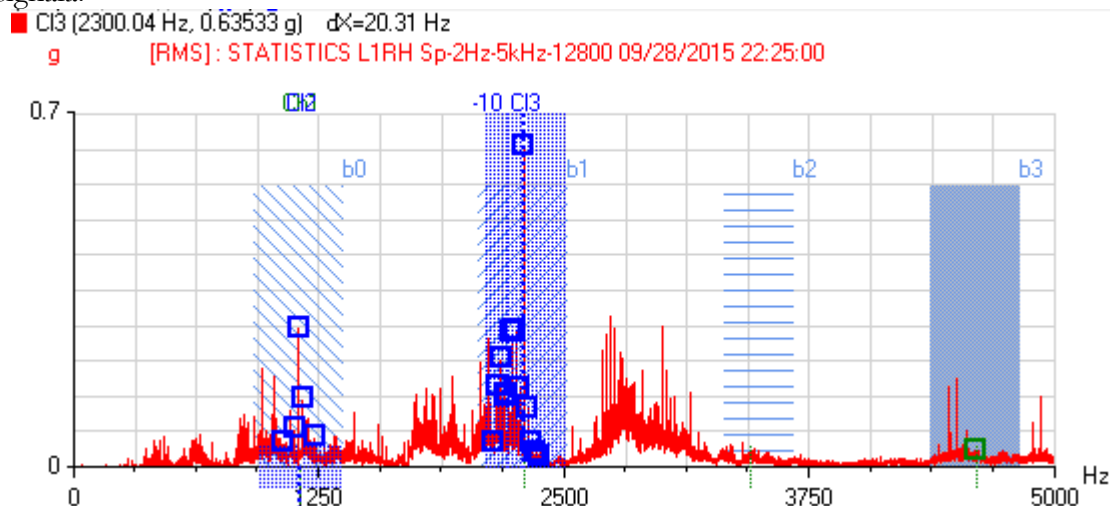
- energija frekventnog spektra (EN_i) u frekventnom opsegu koji obuhvata prvih pet bočnih pojaseva oko prvih pet harmonika frekvencije uzupčavanja,
- odnos prethodna dva parametra tzv. faktor modulacije (FMI) nad i -tim harmonikom komponente uzupčavanja

$$MF = EA_i / EN_i \quad (13)$$

- suma parametara EA za prvih pet harmonika odabranih frekvencija uzupčavanja.

Kod zupčastih prenosnika dominantni vibracijski signal je signal vibracija usled uzupčavanja zupčanika, koja je u pratnji efekata modulacije niskog reda prouzrokovanih promenom opterećenja i mogućim geometrijskim kao i greškama montaže. Dodatni uticaji će se javiti u signalu kada se pojavi lokalizovano oštećenje na zupčaniku. Nastaće odgovarajuća dodatna modulacija (amplitudna i fazna), a u frekventnom domenu bočni

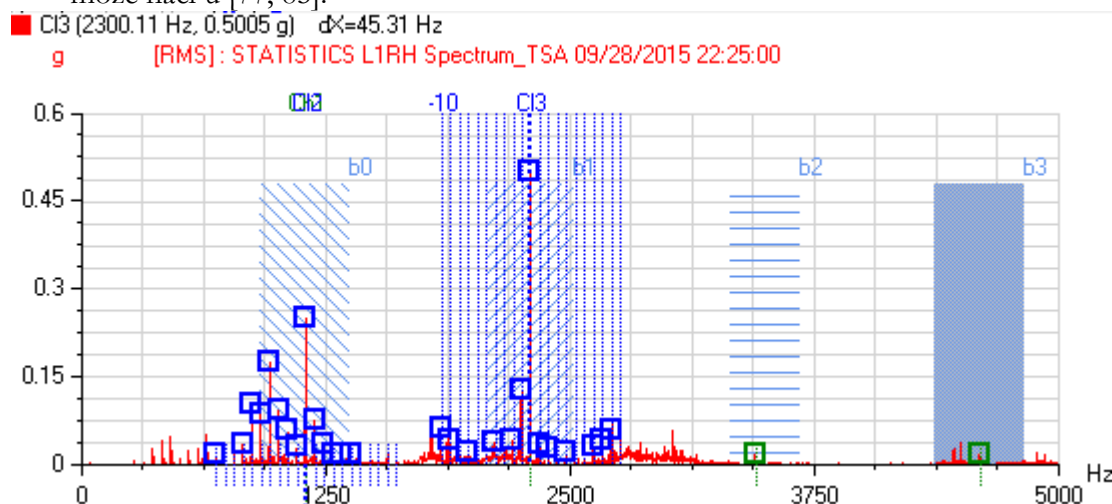
pojasevi će se raširiti preko širokog raspona frekvencija [85, 86]. Da bi se poboljšala ekstrakcija sakrivenih oštećenja koja generišu tranzijente u signalu često veoma male energije, razvijene su različite tehnike bazirane na TSA signalu u cilju poboljšavanja TSA signala.



SLIKA 4-3. Ekstrakcija komponente frekventnog spektra nad prvim harmonikom frekvencije uzupčavanja i energija frekventnog pojasa oko nje – snimak sa korištenog probnog stola (slučaj sa nedostajućim zupcem pogonskog zupčanika)

Dve najčešće korištene metode su sledeće:

- demodulacija amplitude i faze, lokalno oštećenje na zupčaniku kao što je naprslina na zubu će prouzrokovati dodatne efekte amplitudne i fazne modulacije. Metoda demodulacije može se koristiti za ekstrakciju obeležja oštećenja na zupčaniku. Demodulirani signal nosi informaciju povezanu i sa modulacijom amplitude i faze. McFadden [87] preporučuje korištenje faze radije nego demodulaciju amplitude za otkrivanje naprslina na zubu zupčanika. Više detalja o tehnikama demodulacije se može naći u [77, 85].



SLIKA 4-4. Frekvencijski spektar oštećenog zupčastog para, uvećan oko frekvencije uzupčavanja i njenih bočnih pojaseva

- metode „rezidualnog“ signala, dodatni impulsi nastali zbog prisustva oštećenja su prekriveni regularnim komponentama signala. Ipak, ideja o generiranju rezidualnog signala je da se uklone regularne komponente signala da bi se efikasnije otkrila oštećenja. Ovu tehniku je prvi predložio Stewart [24] koji je razvio brojne indikatore za detekciju i praćenje stanja oštećenja.

4.2.3. CEPSTRUM ANALIZA

Cepstrum analiza je razvijena 60-tih godina prošlog veka u cilju analize seizmičkih vibracija. Danas se ona najviše primenjuje za analizu zupčastih parova. Cepstrum funkcija je definisana kao spektar snage nad logaritmovanim spektrom snage [88]:

$$C(\tau) = F^{-1}\{\log F(x(t))\} \quad (14)$$

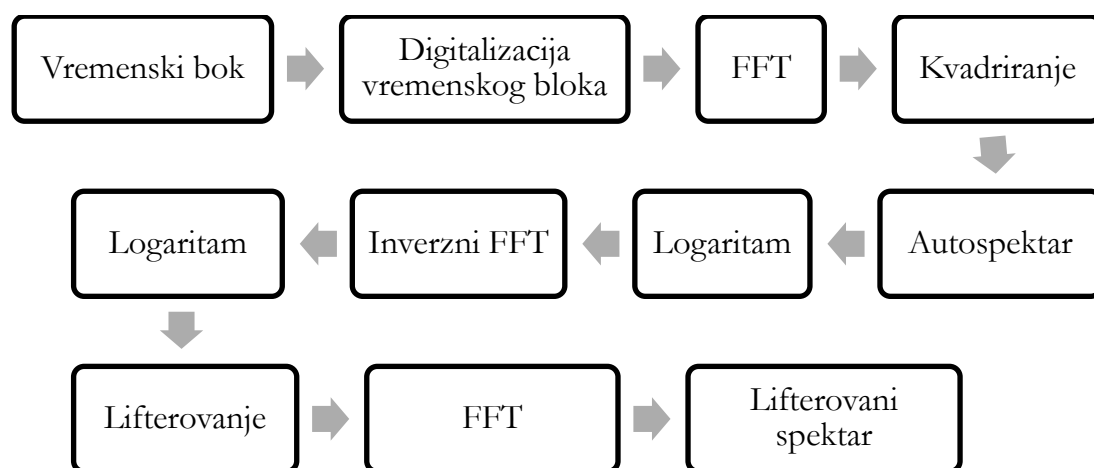
gde je:

$F(x(t))$ - spektar snage nad vremenskim signalom $x(t)$,

F^{-1} - operater inverzne Fourier-ove transformacije,

$C(\tau)$ - Cepstrum funkcija u domenu kvazivremena τ (kvefrencija²⁷)

Oštećenja zupčastih parova su praćena fenomenima modulacije (amplitudne i frekventne) koje se u frekventnom domenu javljaju u formi bočnih pojaseva sa obe strane karakteristične frekvencije – frekvencije uzupčavanja i njenih harmonika. Kao što je pomenuto u uvodu spektri vibracija zupčastih prenosnika obično sadržavaju familije bočnih pojaseva harmonika frekvencije uzupčavanja. Kod zupčatih prenosnika u dobrom stanju nivo bočnih pojaseva ostaje konstantan tokom veoma dugog vremena. Promena u broju i amplitudi bočnih pojaseva obično ukazuje na pogoršanje stanja zupčastog para. Ovakvi bočni pojasevi obično nastaju zbog modulacije vibracija nastalih uzupčavanjem izazvanih frekvencijama rotacije zupčanika, a u slučaju oštećenja na jednom zubu-pojava oštećenja za jedan broj obrtaja.



SLIKA 4-5. Algoritam dobijanja cepstrum funkcije

²⁷ Quefreny

Algoritam dobijanja Cepstrum funkcije je prikazan na slici 4-5. U konkretnom slučaju familije bočnih pojaseva će imati isti razmak što predstavlja osnovnu frekvenciju modulacije. Shodno tome, razmak bočnih pojaseva sadržava bitnu dijagnostičku informaciju jer je u direktnoj vezi sa izborom modulacije. Međutim, može biti teže razlikovati i proceniti razmak bočnog pojasa uz pomoć spektralne analize zbog razloga loše rezolucije.

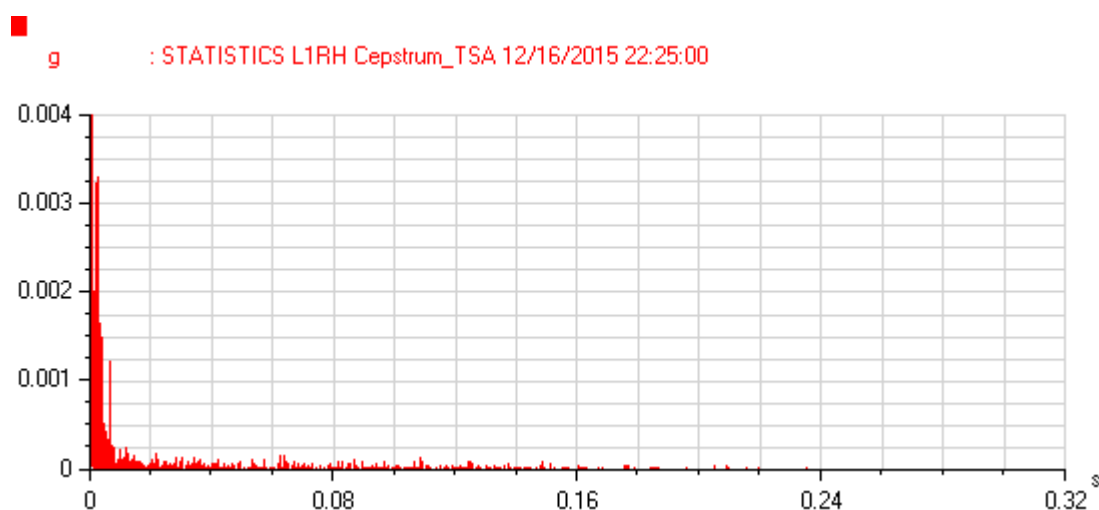
U cilju prevazilaženja ovog problema moguće je iskoristiti Cepstrum analizu. Cepstrum je stoga korisna u tumačenju strukture spektra i na otkrivanju periodičnog spektra. Kvefrencija Cepstrum pikova predstavlja period modulacije a njegova recipročna vrednost predstavlja frekvenciju modulacije. Osnovna namena primene Cepstrum funkcije jeste identifikacija periodičnosti u vremenskom domenu, čime ista postaje atraktivna za aplikacije gde se očekuju fenomeni modulacije, odnosno pojava bočnih komponenti oko karakteristične frekvencije.

Dominantne komponente Cepstrum funkcije i njeni celobrojni umnošci (rahmonici) odgovaraju razmaku između komponenti unutar bočnih pojaseva. Na taj način moguće je identifikovati prisustvo komponenti modulacije. Cepstrum funkcija može biti korisna iz nekoliko razloga: prvi rahmonik (odnosno harmonic u domenu kvefrencije) ukazuje na rastojanje, između članova bočnih pojaseva bez obzira u kom delu frekventnog opsega se bočni pojasevi nalaze, odnosno bez obzira koju karakterističnu frekvenciju modulišu, veoma direktno ukazuje na postojanje modulacije iako se ona možda ne uočava u vremenskom zapisu i frekventnom spektru.

U daljnjem tekstu su dati prikazi Cepstrum funkcija snimljeni na probnom stolu, slika 4-6 i slika 4-7, pri napomeni da položaj kursora odgovara prvom rahmoniku za osnovni broj obrtaja od $46 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$.



SLIKA 4-6. Cepstrum funkcija snimljena na probnom stolu – slučaj sa pohabanim zupčanicima



SLIKA 4-7. Cepstrum funkcija snimljena na probnom stolu – slučaj sa ispravnim zupčanicima

4.2.4. ISTORIJA PRIMENE CEPSTRUMA NA MEHANIČKE PROBLEME

Prvi rad o analizi Cepstruma [89] definiše analizu Cepstruma kao “snagu Cepstruma logaritma snage spektruma”. Prvobitna primena je bila detekcija eha kod seismičkih signala, gde se pokazalo da je Cepstrum značajno superiornija tehnika u odnosu na do tada korištene. Ova čisto dijagnostička primena nije zahtevala povratak na logaritamski spektar, a razlog za definiciju verovatno je bio taj da je softver za generisanje snage spektra već bio dostupan. Iako je istraživanje objavljeno u radu [89] provedeno i od strane autora FFT algoritma (John Tukey-a) kao koautora, rad je objavljen dve godine prije FFT algoritma [90], dok se potencijal Cepstrum mogućnosti još nije shvatio. Tukey navodi [89]: iako su spektralne tehnike, koje uključuju operacije drugog reda sada vrlo poznate, naizgled jednostavnije prvostepene Fourierove tehnike su mnogo manje poznate, (zatim se odnosi na rad gdje je jedini autor, koji potvrđuje da je on napravio napomenu). Dakle, originalni Cepstrum nije bio reverzibilan čak ni u logaritamskom spektrumu tako da, iako je reč i pojam “lifter” (filter u Cepstrumu) definirana u originalnom radu, usvojen je kao konvolutivni filter primenjen na logaritamski spektar, a ne prozor Cepstruma. Za određivanje nivoa zvuka govora [34] iskorištena je dijagnostička mogućnost Cepstruma omogućujući zadovoljavajuće rezultate, tako da je analiza govora bila jedna od najranijih aplikacija Cepstruma, a veći deo je razvijen u laboratoriji Bell Telephone. Skoro je objavljena rana istorija razvoja Cepstruma koju su objavila dva pionira Oppenheim i Schaffer [91], ali njihov rad prvenstveno pokriva aplikacije u analizi govora, komunikacijama, seizmologiji i geofizici i nisu date aplikacije u mehanici. Oni opisuju kako je Oppenheimova doktorska disertacija na MIT-u [92] predstavila koncept “homomorfni sistema”, gdje se nelinearne veze mogu konvertirati u linearne da bi se omogućilo linerno filtriranje u domeni transformacije. Tipični primeri su bili konverzija multiplikacije u sumu uz logaritamsku operaciju i konverzija konvolucije primenjajući prvo Fourier-ovu transformaciju (da bi se konvertirala konvolucija u multiplikaciju) a zatim logaritamsku konverziju. To je bio mali korak napred da bi se obavila (linearna) inverzna Fourier-ova transformacije na logaritamski spektar za dobijanje nove vrste Cepstruma. Ovo je bila osnova Schafferove doktorske disertacije na MIT-u [93]. Zadržavajući fazu u svim operacijama, “kompleksni Cepstrum” je definisan kao inverzna Fourier-ove transformacije

kompleksnog algoritma kompleksnog spektruma, što je omogućavalo reverzibilnost u vremenskoj domeni. Oppenheim i Schafer saradivali su na knjizi [94] u kojoj je navedeno nekoliko daljih razvoja i aplikacija Cepstruma, posebno analitička forma Cepstruma uzorkovanih signala gde se Fourier-ova transformacija mogla zameniti Z transformacijom. Originalna definicija snage Cepstruma je bila:

$$C_p(\tau) = |\tau\{\log(F_{xx}(f))\}|^2 \quad (15)$$

gde je

$F_{xx}(f)$ - snaga spektruma može da bude osrednjena vrednost snage spektruma ili kvadrata amplitude spektruma jednog zapisa. Definicija kompleksnog Cepstruma je:

$$C_c(\tau) = \tau^{-1}\{\log(F(f))\} = \tau^{-1}\{\ln(A(f)) + j\phi(f)\} \quad (16)$$

gde je:

$$F(f) = \tau\{f(t)\} = A(f)e^{j\phi(f)} \quad (17)$$

u uslovima amplitude i faze spektruma. Bitno je napomenuti da „kompleksni Cepstrum“ je realni bez obzira na njegov naziv iz razloga što je logaritamska amplituda spektruma ravna faza spektruma neparna. Snaga Cepstruma se definiše kao:


$$C_p(t) = \tau^{-1}\{2\ln(A(f))\} \quad (18)$$

Takozvani realni Cepstrum se dobije na način izjednačavanja faze sa nulom u jednačini (16)

$$C_r(t) = \tau^{-1}\{\ln(A(f))\} \quad (19)$$

što ustvari predstavlja jednostavno skaliranu verziju Cepstruma definisanu u (18). Treba imati na umu da kompleksni Cepstrum zahteva da se faza $\phi(f)$ „odmotava“ u neprekidnu funkciju frekvencije što predstavlja ograničenje u njenoj upotrebi. Ovo se ne može iskoristiti npr. kod stacionarnih signala, napravljenih od komponenata diskretnih frekvencija (gdje je faza nedefinisana kod srednjih frekvencija) i stacionarnih slučajnih komponenti (gde je faza slučajna). Može se samo koristiti sa funkcijama koje se dobro ponašaju kao što su odgovori impulsa gde je faza dobro definisana (i često povezana sa logaritamskom amplitudom). Odmotavanje se često može postići koristeći algoritam kao što je UNWRAP u Matlabu, iako isti može dati greške tamo gde je nagib faze strm (ogroman). Ovaj problem se obično može rešiti ponavljajućom interpolacijom spektra faktora 2 dok se uzastopnim koracima ne dobije isti rezultat. Tada se može koristiti predposlednji korak. Greške kod odmotavanja se takođe mogu pojaviti kada je amplituda vrlo mala, tako da buka utiče na procene faze. Kao što je već spomenuto, Oppenheim i Schafer u [94] su razvili analitičku formulaciju Cepstruma za transfer funkcije iz digitalizovanih signala koji su izraženi koristeći Z transformaciju u smislu njihovih polova i nula u Z ravni. Oppenheim i Schafer su ipak uspeali da pokažu da su stvarni i imaginarni dijelovi Fourier-ove transformacije Cepstruma minimalne funkcije faze (logaritamske amplitude i spektar faze) u stvari Hilbertove transformacije samih sebe. U originalnom radu [89] autori su osmislili reč “Cepstrum” obrnuvši prvi slog reči “spectrum”, uz opravdanje da je to “spektrum spektruma”. Slično

tome, reč “quefreny” dobivena je iz “frequency” i autori su takođe predložili i brojne druge reči uključujući nazive prikazane na slici 4-7.



SPECTRUM	• CEPSTRUM
HARMONIC	• RAHMONIC
FREQUENCY	• QUEFRENCY
FILTER	• LIFTER

SLIKA 4-8. Ekvivalentni nazivi obeležja signala

Randall je čitajući [34] postao svestan mogućnosti upotrebe Cepstruma za detekciju i kvantifikaciju familija periodično raspoređenih spektralnih komponenata i shvatio je, ne samo da će ovo otkriti familije harmonika, nego i jednako raspoređene modulacije bočnih pojaseva. Lokalna oštećenja na zupčanicima daju impulsivnu modulaciju signala frekvencije uzupčavanja (amplitudnu i frekvencijsku modulaciju) što ima za posledicu veliki broj bočnih pojaseva razmaknutih brzinom onog zupčanika koji na sebi ima oštećenje. Većina takvih bočnih pojaseva su vidljivi samo na spektrumu sa logaritamskom skalom amplitude, tako da je Cepstrum idealan način za sakupljanje (prosečnih) informacija velikog broja takvih bočnih pojaseva u relativno mali broj rahmonika u Cepstrumu, od kojih prvi sadrži većinu informacija. On je čak eksperimentisao sa izračunavanjem Cepstruma koristeći FFT metodu prije nego se pridružio Brüelu i Kjæru u Kopenhagenu 1971. Međutim, iako su B&K imali u potpunosti dizajniran mini računar baziran na FFT analizatoru 1971. godine to nikad nije objavljeno u javnosti tako da su se tražile druge metode za dobijanje Cepstruma. Godine 1973. B&K su objavili članak „Application Note No. 13-150 pod nazivom “Analiza Cepstruma i dijagnostika oštećenja zupčastog prenosnika” [95]. Nekoliko drugih članaka su bili varijacije na temu upotrebe heterodinskog analizatora za obavljanje analize “frekvencija” na linearnoj skali frekvencija sa konstantnim protokom, prvo da bi se dobila originalna snaga spektruma na skali logaritamske amplitude, a zatim analiza logaritamskog spektruma u Cepstrum na linearnoj skali. Treba napomenuti da je procena frekvencije (zapravo recipročni ekvivalent quefreny) veoma precizna zato što je to prosek razmaka bočnih pojaseva nad celim spektrumom. Iako B&K FFT analizator nije objavljen, dizajner Arne Grøndahl, je napisao program za pozivanje FFT algoritam assembler jezika, koristeći Fortran program, tako da je bilo moguće obaviti izračunavanje Cepstruma, čak i kompleksnog Cepstruma, sa metodama u celosti baziranim na FFT, čak rane 1975 godine te je autor objavio dalje rezultate dijagnostike zupčanika u to vreme [96]. Otprilike u isto vreme Georges Sapy sa Electricité de France (EDF) je utvrdio da se Cepstrum može koristiti za detekciju oštećenih ili nedostajućih lopatica na parnoj turbini [97].

4.2.5. ANALIZA U VREMENSKO-FREKVENTNOM DOMENU

Usled prisustva udarnih komponenti koje potiču od prirode sprezanja zupčanika kao i usled postojanja modulacije koja u slučaju pojedinih tipova oštećenja može biti dominantna, vibracioni signal zupčastog prenosnika može biti veoma nestacionaran. Signal kao takav ne

pogoduje klasičnoj frekventnoj analizi koja ne može prikazati svu nestacionarnost signala. Iz tog razloga su metode vremensko-frekventnih transformacija pogodnije za prikaz frekventnog sadržaja signala u funkciji vremena. Tehnike vremensko-frekventne transformacije koje su do danas razvijene imaju veliki potencijal u primeni kod signala koji se karakterišu prisustvom većeg broja nestacionarnih periodičnih ili neperiodičnih komponenti kao i relativno malim odnosom signal/šum. Samim tim, zbog sličnosti ovakvih signala sa vibracionim signalima, koji su dobijeni sa oštećenih zupčastih parova, vremensko-frekventne transformacije su našle svoju primenu i u njihovoj dijagnostici. Najpoznatije tehnike vremensko-frekventne transformacije su:

- vremenski kratka Fourier-ova transformacija (STFT),
- Wigner-Ville distribucija i
- analiza talasića (wavelet analysis).

Fourier-ova transformacija omogućuje dobar uvid u frekventni sadržaj signala i adekvatan je alat za stacionarne signale, ali daje pregled samo frekventnih odnosa. Ovakav nedostatak klasične Fourier-ove transformacije rešen je upotrebom vremenske kratke Fourier-ove transformacije koja pruža podatke i o vremenu na kojoj se frekvencijska komponenta pojavljuje čime je omogućeno smisleno posmatranje nestacionarnih signala. STFT je transformacija koja u svom prikazu istovremeno daje i vremenske i frekventne odnose, bilo u formi 3D dijagrama vodopada, izoplota ili spektrograma. Fourier-ova transformacija daje idealan uvid u frekvencijski sadržaj analiziranog signala. Naravno, signal nad kojim se vrši Fourier-ova transformacija mora zadovoljavati određena svojstva. Dovoljni uveti za postojanje Fourier-ove transformacije su:

- snažni Dirichletovi uslovi, signal koji se posmatra mora imati konačan broj minimuma i maksimuma na bilo kojem intervalu vremena i signal koji se posmatra mora imati konačan broj diskontinuiteta na bilo kojem konačnom intervalu vremena,
- slabi Dirichletovi uslovi, signal mora biti apsolutno integrabilan.

Nakon što je signal zadovoljio uslove sledi integracija proizvoda signala te kompleksne harmonijske funkcije tj.:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} = X(\omega) \quad (20)$$

gde je:

$X(\omega)$ - označava meru sličnosti između signala $x(t)$ kompleksne harmonijske funkcije $e^{-j\omega t}$

Ideja, koja se krije iza svake transformacije, je da se signal predstavi u obliku koji je pogodan za određenu obradu. Pored mnogobrojnih transformacija koje su razvijene u oblasti obrade signala uglavnom se ističu one koje transformišu signal u njegovu frekvencijsku domenu. Primer takve transformacije je Fourier-ova transformacija (FT). Kada se FT primeni na signal dobiju se informacije o tome koje su frekvencijske komponente prisutne u signalu (frekvencijski spektar). Međutim, ono što se gubi je informacija o vremenu kada se pojedinačne komponente javljaju pa je to loša strana ove transformacije za neke primene. Zbog neograničenog trajanja sinusoide Fourier-ova analiza nije pogodna za obradu nestacionarnih signala, a to su oni čiji se frekvencijski sadržaj menja s vremenom. U odnosu na standardni FFT, STFT se razlikuje po upotrebi vremenskog prozora, tj. analizirajućeg

otvora željenih karakteristika u oba domena (vremenskom i frekventnom). Za vremenski otvor T bira se funkcija konačne energije koja ima tražena svojstva lokalizacije u vremenskom i frekventnom domenu.

Razlika između obične i vremenski kratke Fourier-ove transformacije (STFT) je u tome što kompleksnoj harmonijskoj funkciji $e^{-j\omega t}$ dodajemo lokalni analizirajući otvor $g(t)$. To je mali vremenski otvor s određenim željenim karakteristikama u obe domene. Osim toga vremenski otvor je pomičan u vremenu te stoga sadrži i vremenski pomak τ .

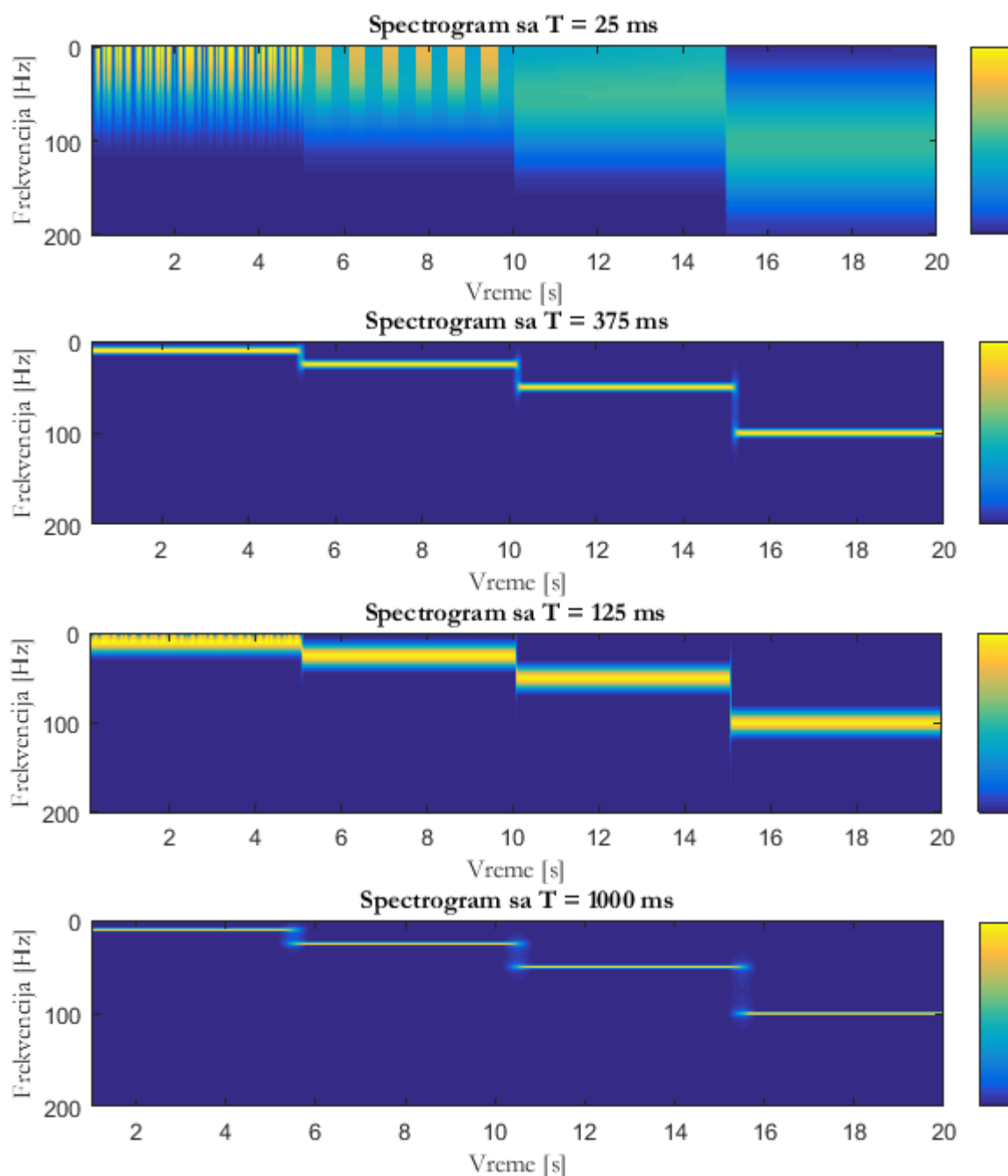
$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (21)$$

Funkcija koja se treba transformisati množi se sa vremenskom funkcijom koja je različita od nule samo u kratkom vremenskom periodu. Računa se Fourierova transformacija (jednodimenzionalna funkcija) dobivenog umnoška, dok se vremenski otvor pomiče po vremenskoj osi dobivajući pritom dvodimenzionalnu reprezentaciju početnog signala. Jasno je kako vremenski kratka Fourierova transformacija nije uvek identična. Njezino rešenje uveliko ovisi o izboru vremenskog otvora tj. funkcije $g(t)$.

Pomeranje funkcije prozora po vremenskoj osi daje vremensku zavisnost promene frekvencije. Za određenu frekvenciju vremenski prozor w se kontinualno pomera od početka do kraja vremenskog bloka signala i vrši Fourier-ovu transformaciju za svaki položaj g . Na taj način u odnosu na klasični FFT rezultat, transformacije je uvećan za dimenziju signala tj. transformacija je dvodimenzijska (u vremenu i frekvenciji). Osnovni problem s kojim se susrećemo kod STFT transformacije je konstantna rezolucija u vremensko-frekvencijskoj domeni, koja je određena vremenskim otvorom. Smanjenje rezolucije u jednoj domeni rezultira povećavanjem rezolucije u drugoj (Heisenbergov princip neodređenosti). Osnovni problem STFT se svodi na pronalaženje otvora željenih karakteristika. Kako bi se pokazao uticaj širine vremenskog otvora na lokalizacijsku karakteristiku funkcije otvora u vremenskoj i frekvencijskoj domeni data su tri primera s različitim širinama vremenskog otvora. Opisan problem može se videti i iz sledećeg primera. U primeru se transformiše signal $x(t)$ koji se sastoji od četiri sinusoida:

$$x(t) = \begin{cases} \cos(2\pi 10t); & 0 \leq t < 5s \\ \cos(2\pi 25t); & 5 \leq t < 10s \\ \cos(2\pi 50t); & 10 \leq t < 15s \\ \cos(2\pi 100t); & 15 \leq t < 20s \end{cases} \quad (22)$$

Signal je uzorkovan sa 400 Hz, a sledeće slike prikazuju spektrograme za veličine otvora 25, 125, 375 i 1000 ms, slika 4-9.



SLIKA 4-9. Prikaz primene STFT koristeći različite dužine otvora

Otvor od 25 ms nam omogućuje odrediti tačno vreme u kojem se dešava promena frekvencije, ali precizne frekvencije su teško određive. Otvor od 1000 ms omogućuje da se frekvencija tačno vidi, ali vreme promene frekvencija je zamagljeno. Svakako, mogli bismo definisati prozorsku funkciju i na drugi način, ali ostaje kao glavni nedostatak ovoga pristupa konstantna “dužina prozora”. Bilo bi mnogo pogodnije kada bismo koristili “uži prozor” u delu gde je signal jako promenljiv, a “širi prozor” u delu gde se signal sporo menja. Analiza signala pomoću talasića, koju nazivamo transformacija talasićima (WT=Wavelet Transformation), upravo omogućava korištenje “prozora” promenljive

dužine. Tokom proteklih dvadesetak godina brojne tehnike obrade signala u vremensko-frekventnom domenu su se pokazale pogodne za analizu vibracija i veoma često se koriste, te su iste prihvatljive u oblasti nadgledanja stanja [75], kao što su pristupi korišćenja vremenski kratke Fourier-ove transformacije (STFT) [20], Wigner-Ville distribucija (WVD) [98] i analiza talasića (Wavelet Transformacija-WTs) [99]. Peng i Chu tvrde da se tehnika analize talasića (WT) pokazala izuzetno pogodnom za analizu vibracija, zbog činjenice da većina signala vibracija sadrži trenutne impulsne nizove i druge elemente koji su prolazni i nestacionarni u prirodi [99] te isto tako WT omogućuje razlaganje signala na različite frekvencije sa različitim rezolucijama, odnosno WT obezbeđuje vremensko-frekventnu dimenziju u prikazivanju signala.

4.3. PREPOZNAVANJE OBLIKA GREŠKE

Na osnovu izmerenog i procesiranog signala mogu se izvući korisne informacije za dijagnostiku oštećenja. Obeležja ekstraktovana u fazi procesiranja podataka mogu predstavljati stanje mašine kojemu se može pristupiti na odgovarajući način. Predefinisana vrednost korištenih obeležja se obično uzima kao prag koji predstavlja zdrav sistem bez oštećenja. Bilo koja devijacija u trendu od ove vrednosti može nagovestiti degradaciju sistema ili oštećen deo sistema. Step devijacije predstavlja ozbiljnost degradacije [100]. Rano otkrivanje oštećenja nije uvek moguće samo proveravanjem trenda klasičnih statističkih obeležja. Za neke sisteme ova statistička obeležja samo mogu reagovati nakon relativno velike devijacije trenda. S ciljem, razvijene su metode bazirane na modelima da bi poboljšale dijagnostiku oštećenja i da bi dale dublji uvid u ponašanje sistema. Metode bazirane na modelima uključuju izgradnju parametarskog modela koji opisuje sistem sa ulaznim i izlaznim varijablama. Ove metode uključuju stvaranje ostataka izlaznih varijabli (varijable stanja) koje pokazuju razliku između zdravih i slučajeva sa greškama [101].

Uopšteno, sistem za ekstrakciju karakteristika (obilježja) izvlači karakteristične potpise iz izmerenih signala vibracijski prikupljenih sa zupčastog prenosnika. Izdvojene karakteristike bi trebale biti osetljive na stanje zupčanika zupčastog prenosnika i trebali bi odražavati promenu u stanju zupčastog para ili omogućiti praćenje razvoja oštećenja zupčastog para u toku vremena. Kao što je ranije rečeno, analiza i obrade signala vibracija u oceni stanja rotirajućih mašina je najčešća tehnika zbog njene prednosti koja se ogleda u analizi bez razaranja. Proces ekstrakcije karakteristika pruža informaciju koja najbolje predstavlja oštećenja, odnosno neispravna stanja koja su sadržana u signalu. U istraživanjima su predložene različite metode za ekstrakciju karakteristika baziranih na vibracijama u okviru dijagnostike oštećenja zupčastih prenosnika [102, 103]. Različite tehnike, kao što je genetski algoritam, analiza talasića i fuzzy zaključivanje su uspešno korišteni za ekstrakciju karakteristika u dijagnostici zupčastih prenosnika [104]. U vremenskom domenu signala vibracija intenzivno su korištene karakteristike bazirane na kurtosisu i spektralnom kurtosisu [81, 105]. Ostala istraživanja, uključujući otkrivanje karakteristika baziranih na statistici i kratkotrajnim promenama, su isto tako izvođena u prošlosti [106, 107]. Sveobuhvatni popis karakteristika u vremenskom i frekventnom domenu za detekciju i dijagnostiku zupčastih prenosnika je raspravljen u [108].

4.4. NASTAJANJE VIBRACIJA ZUPČASTIH PAROVA

4.4.1. GREŠKA PRENOSA

Izvori vibracija odnosno buke kod zupčastih prenosnika se uopšteno mogu podeliti na dva dela, cviljenje i lupanje zupčastih prenosnika [109]. Cviljenjem zupčastih prenosnika nastaje frekvencija uzupčavanja i njenih harmonika koji se prvenstveno koriste pri dijagnostici zupčastih parova i glavni su fokus ove disertacije. Lako opterećeni zupčanici su pokazali ispoljavanje nelinearnog ponašanja kada površine zubi koje se sprežu izgube kontakt i kasnije se sudaraju. Sudaranje (lupanje) može biti izazvano promenom brzine. Unutrašnja pobuda može isto tako biti izvor lupanja i često se pri modeliranju objašnjava kao pobuda greške prenosa [110]. Cviljenje zupčastih prenosnika sa druge strane potiče iz opterećenih zupčanika. Cviljenje zupčastih prenosnika se može prikazati i zbog gubitka delimičnog kontakta što je rezultat povećane krutosti uzupčavanja kod povećanih opterećenja. Teoretski, za zupčasti par sa zubima savršenih evolventa i beskonačne krutosti, rotacija izlaznog zupčanika bi bila samo funkcija ulaznog zupčanika i prenosnog odnosa. Konstantan broj obrtaja ulaznog zupčanika bi rezultirao konstantnom broju obrtaja izlaznog zupčanika. Zbog ciljanog namerno modifikovanog oblika i neželjenih modifikacija, kao što su greške prilikom proizvodnje, zupčanici neće imati savršeno evolventan oblik. Isto tako, zbog ograničene krutosti prilikom uzupčavanja doći će greške prilikom rotacije izlaznog zupčanika u odnosu na ulazni zupčanik. Ova greška u rotaciji predstavlja grešku prenosa i računa se kao:

$$TE(t) = R_{b,p}\Psi_p(t) + R_{b,g}\Psi_g(t) \quad (23)$$

gde su $R_{b,p}, R_{b,g}$ osnovni radijusi a $\Psi_p(t), \Psi_g(t)$ rotirajući položaj pogonskog i gonjenog zupčanika. U predmetnoj jednačini greška rotacije je opisana kao dužina na dodirnoj liniji. Greška rotacije TE^{28} se može opisati kao [111]: „Razlika između trenutne pozicije gonjenog zupčanika i pozicije koju bi on zauzeo da je savršeno uzubljen. Greška prenosa i promena krutosti uzupčavanja često se smatra kao primarna pobuda povećanja buke zupčanika i njena minimizacija gotovo uvek smanjuje nivo buke i vibracija“.

4.5. MATEMATIČKI MODEL VIBRACIJA ZUPČASTOG PRENOSNIKA

Uz sve veći fokus na zupčanike u mašinskoj industriji znatna pažnja posvećena je proučavanju dinamičkog modeliranja zupčanika. Objavljeni su mnogi članci o dinamici zupčastih prenosnika. Neka istraživanja su razvila sofisticirane modele koji uzimaju u obzir najvažnije dinamičke faktore kod zupčastih prenosnika kao što su periodične promene krutosti zuba, pobude nastale u toku grešaka prenosa, efekti spajanja između torzionalnih i bočnih vibracija zupčanika i vratila [112]. Osim toga, drugi pristupi su se fokusirali na modeliranje uzupčavanja zuba budući da je glavni izvor vibracija kod zupčastih prenosnika obično proces uzupčavanja zupčanika. Svrha ovih istraživanja je da dekonvuliraju neke od nepoznatih aspekata koji se odnose na interakciju nelinearnih efekata uključujući sile trenja kod interakcije u toku uzupčavanja i efekta bočnog zazora uz vremenski promenljivu krutost uzupčavanja.

²⁸ TE – Transmission Error

Ukratko, glavni cilj matematičkog modeliranja je proučavanje naprezanja zuba zupčanika, prirodne frekvencije sistema, karakteristika vibracija zupčastog prenosnika kao što su amplitude i komponente spektra, rasprostiranje buke itd. U zavisnosti od različitih aplikacija korišteni su SDOF²⁹/MDOF³⁰ modeli opruga mase ili opruga mase sa amortizerom jednostepenih ili dvostepenih zupčastih prenosnika. Ranija istraživanja su razmatrala torzionalne vibracije sistema. U skorije vreme razvijeni su modeli u kojima se razmatraju poprečne vibracije ili kombinovane torzionalne i poprečne vibracije [112]. Kod ovih modela krutost uzupčavanja zupčanika modelirana je kao konstanta, jednostavna sinusoidalna funkcija, Fourierov red, pravougaoni oblik talasa koji odgovara jednom i dvostrukom paru zubi uzupčavanja, funkcija aproksimacije i izvedeni izraz. U rešenju dinamičkih jednačina, korištene su analitičke, približno analitičke i numeričke metode. Za neke vrlo jednostavne SDOF matematičke modele korištena su približno analitička rešenja. Za složenije MDOF modele sistema, a pogotovu kada su i torzionalne i poprečne vibracije uzete u obzir, moraju se koristiti numeričke tehnike. Među ovim numeričkim metodama Runge-Kutta tehnike integracije su sve popularnije zbog tačnosti i vremena potrebnog za računanje.

Na bazi opisanog modela datog u poglavlju 3.1 moguće je definisati matematički model vibracija generisanih od strane zupčastih prenosnika [113]. Koristeći konvencionalni pristup vibracioni signal može biti opisan kao stacionarna funkcija sa karakterističnim frekventnim komponentama i faznim uglovima pojedinih obrtnih delova. Fazni uglovi rastu linearno u vremenu pri čemu njihov prvi vremenski izvod odgovara obrtnoj frekvenciji. Da bi se pak jasno izrazile periodičnosti i ugaone zavisnosti pojedinih komponenti u sumarnom signalu, u jednačinama koje slede, vibracioni signal je izražen kao nestacionarna funkcija u vremenu sa fazom izraženom kroz ugaoni položaj rotirajuće komponente. Trenutna vrednost frekvencije u oznaci $f(t)$, pojedine rotirajuće komponente se može izraziti kroz prvi vremenski izvod vremenski zavisne faze $\Theta(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Theta(t)}{dt} \quad (24)$$

S druge strane ugaoni položaj pojedine rotirajuće komponente u vremenu t je moguće definisati kroz integral njegove frekvencije od vremena $t = 0$.

$$\Theta(t) = \Theta_0 + 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (25)$$

Za funkciju za koju se kaže da je periodična u odnosu na ugaonu varijablu smatra se da se ponavlja posle 2π ugaone varijable. Drugim rečima, vrednost funkcije pri uglu Θ je jednaka kao i pri $\Theta + 2\pi$, gde je m celobrojna vrednost.

²⁹ Single-Degree-Of-Freedom

³⁰ Multi-Degree-Of-Freedom

4.5.1. VIBRACIJE ZUPČANIKA

Ugaone vibracije zupčanika su periodične sa ugaonim položajem zupčanika koji se može predstaviti ugaonim položajem rotora na kom je zupčanik montiran $\theta_s(t)$ [113]. Vibracije zupčanika oznake g montiranog na vratilu s , mogu biti iskazane kao suma komponenti koje su zavisne od opterećenja $V_{sg}^{(1)}(t)$ i dodatnim komponentama koje potiču od geometrijskih grešaka $V_{sg}^{(2)}(t)$:

$$V_{sg}(t) = V_{sg}^{(1)}(t) + V_{sg}^{(2)}(t) \quad (26)$$

Komponente vibracija od uzupčavanja $V_{sg}^{(1)}(t)$ sadrže komponente na frekvenciji uzupčavanja i njenim harmonicima sa amplitudama koje su zavisne od srednje vrednosti i devijacije opterećenja na zupčaniku (efekat amplitudne modulacije) kao i komponente nominalno konstantne amplitude koje potiču od srednje vrednosti geometrijske greške na svim zubima zupčanika (greške u proizvodnji zupčanika i uniformno habanje). Komponente usled periodične promene obrtnog momenta i nejednakog rastojanja između zuba su opisane kroz faznu modulaciju s obzirom da iste utiču isključivo na trenutnu frekvenciju obrtanja, a ne i na frekvenciju obrtanja zupčanika definisanu nad kompletnom periodom obrtanja. Za prvih M harmonika vibracija nad harmonicima frekvencije uzupčavanja zupčanika g na vratilu s može biti iskazano kao [113]:

$$V_{sg}^{(1)}(t) = \sum_{m=1}^M [A_{sgm}(\bar{L}, \theta_s) + \bar{E}_{sgm}] \cos \left(mN_{sg} \left(\theta_s + \beta_{sg}(\theta_s) \right) + \phi_{sgm} \right) \quad (27)$$

gde je:

$\theta_s = \theta_s(t)$	- ugaoni položaj vratila,
$A_{sgm}(\bar{L}, \theta_s)$	- amplituda usled deformacije zuba pod opterećenjem,
\bar{E}_{sgm}	- srednja vrednost amplitude harmonika m usled geometrijskih grešaka i uniformnog habanja,
N_{sg}	- broj zuba na zupčaniku,
$\beta_{sg}(\theta_s)$	- fazna modulacija usled varijacije obrtnog momenta,
ϕ_{sgm}	- faza harmonika m u ugaonoj poziciji $\theta_s(t) = 0$.

Amplituda usled deformacije zuba je funkcija srednje vrednosti opterećenja L i dinamičke komponente opterećenja koja je funkcija $\theta_s(t)$

$$A_{sgm}(\bar{L}, \theta_s) = A_{sgm}(\bar{L}) \left(1 + \alpha_{sg}(\theta_s) \right) \quad (28)$$

gde je:

\bar{L}	- srednja vrednost opterećenja,
$A_{sgm}(\bar{L})$	- amplituda usled srednje vrednosti opterećenja,
$\alpha_{sg}(\theta_s)$	- amplitudna modulacija usled promenljivog opterećenja.

Fazna modulacija koja je zavisna od opterećenja $\beta_{sg}(\theta_s)$ u jednačini i efekti amplitudne modulacije $\alpha_{sg}(\theta_s)$ u jednačini su periodične sa rotacijom vratila θ_s tako da se iste mogu razviti u *Fourier-ov* red:

$$\beta_{sg}(\theta) = \sum_{k=1}^K b_{sgk} \cos(k\theta + \zeta_{sgk}) \quad (29)$$

$$\alpha_{sg}(\theta) = \sum_{k=1}^K a_{sgk} \cos(k\theta + \lambda_{sgk}) \quad (30)$$

gde su:

a_{sgk} i b_{sgk} -koeficijenti *Fourier-ovog* reda, dok su ζ_{sgk} i λ_{sgk} faze za $\theta = 0$.

Pored komponenti vibracija na frekvencijama uzupčavanja i njenim harmonicima kao i zbog modulacija usled promene opterećenja, u zbirnom signalu su prisutne i komponente vibracija usled geometrijskih grešaka profila zuba koje se razlikuju od zuba do zuba kao i dodatne impulsne komponente. Amplitude ovih komponenti nisu značajno zavisne od opterećenja i broja obrtaja i u opštem slučaju se mogu iskazati kao prvih K harmonika osnovne frekvencije vratila:

$$V_{sg}^{(2)}(t) = \sum_{k=0}^K E_{sgk} \cos(k\theta_s(t) + \xi_{sgk}) \quad (31)$$

gde je:

ξ_{sgk} -faza k-tog harmonika na ugaonoj poziciji $\theta = 0$.

4.5.2. VIBRACIJE ROTIRAJUĆIH MASA

Komponente vibracionog signala koje potiču od rotirajućih masa se javljaju na osnovnom i višim harmonicima osnovne frekvencije. Amplitude vibracija koje se javljaju su posledica dinamičkih efekata rotirajućih masa i time se mogu smatrati zavisnim najviše od broja obrtaja. Radijalna opterećenja u manjoj meri mogu uticati na amplitudu vibracija usled debalansa zbog deformacije geometrijske ose obrtanja, ali se smatra da su uticaji znatno manji od uticaja dinamičkih efekata. Stoga je vibracije rotirajućih masa moguće prikazati kao[113]:

$$V_s(t) = \sum_{k=0}^K A_{sk}(f_s) \cos(k\theta_s + \phi_{sk}) \quad (32)$$

gde su:

$\theta_s = \theta_s(t)$ - ugaoni položaj vratila,
 $f_s = f_s(t)$ - frekvencija obrtanja vratila,
 $A_{sk}(f_s)$ - amplituda k -tog harmonika na frekvenciji f_s ,
 ϕ_{sk} - faza vibracionog signala na ugaonom položaju vratila $\theta_s = 0$.

Obrtna frekvencija vratila u oznaci $f_s(t)$ je trenutna frekvencija vratila dobijena kao prvi vremenski izvod ugaonog položaja vratila. Za zupčasti par koji radi pod konstantnim brojem obrtaja varijacija broja obrtaja će biti posledica promene obrtnog momenta, mada se može pretpostaviti da je kompletan odziv vibracija vratila proporcionalan srednjoj vrednosti frekvencije obrtanja \bar{f}_s . U tom slučaju izraz za vibracije rotirajućih masa postaje:

$$V_s(t) = \sum_{k=0}^K A_{sk}(\bar{f}_s) \cos(k\theta_s + \phi_{sk}) \quad (33)$$

5 IZAZOVI VIBRODIJAGNOSTIKE ZUPČASTIH PAROVA PRIMENOM VEŠTAČKE INTELIGENCIJE

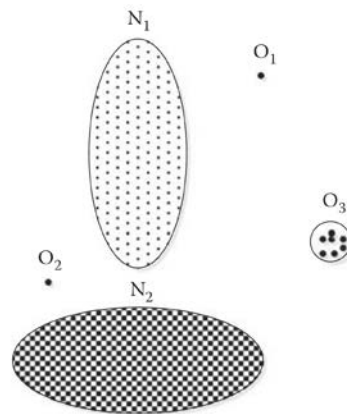
5.1. DIJAGNOSTIKA ANOMALIJA-GREŠAKA

Zadatak otkrivanja anomalija je da se prepozna prisustvo neobičnog (i moguće opasnog) stanja unutar ponašanja ili aktivnosti sistema s obzirom na neki model “normalnog” ponašanja koje se može teško dovesti u korelaciju ili ne može lako biti naučeno posmatranjem. Prilikom procesa dijagnostike rotacione mašine na bazi vibracija nezaobilazan je proces učenja i zaključivanja baziran na vremenskom praćenju određenih pokazatelja stanja. Osim toga, dijagnostiku dodatno komplikuje razmatranje pouzdanog indikatora ocene stanja (prepoznavanje razlike između bezopasnih i potencijalno rizičnih promena ponašanja). U ovom radu je predložena arhitektura za učenje otkrivanja oštećenja i njihova klasterizacija bazirana na modelu vještačke inteligencije, onosno primenom vještačke neuronske mreže. Isto tako u radu je opisan pristup izrade modela koristeći tehnike za redukciju količine obeležja, odnosno pokazatelja stanja i tehnike za klasifikaciju dobijenih podataka kako bi se lakše donosile odluke o stanju samog sistema. U ovom poglavlju su objašnjeni ciljevi primene tehnika redukovanja količine nadgledanih pokazatelja stanja u cilju dijagnostike i utvrđivanja stanja mašine baziranih na merenju vibracija, pozadina primene vještačke inteligencije kao i problemi koji nastaju predloženim istraživanjem. Prilikom ispitivanja algoritama vještačke inteligencije za otkrivanje grešaka i utvrđivanje stanja moramo imati na umu nekoliko praktičnih zahteva koje nameće sama domena i namena. Naime, svrha bilo kojeg sistema za monitoring stanja je da poboljša sposobnost korisnika opreme da jednostavnije i pouzdanije utvrdi stanje tehničkog sistema. Otkrivanje anomalija se odnosi na pronalazak obrazaca u podacima koji nisu u skladu sa očekivanim ponašanjem. Takvi neusaglašeni obrasci mogu se nazivati anomalije, ekstremne vrednosti, izuzeci, odstupanja, iznenađenja, specifičnosti ili kontaminanti (zagađivači). Anomalije i ekstremne vrednosti su dva najčešće korištena termina u kontekstu otkrivanja anomalija i ponekad se koriste naizmenično. Otkrivanje anomalija se koristi kod raznih aplikacija, uključujući otkrivanje prevara sa kreditnim karticama, osiguranjem ili

zdravstvenom zaštito, detekciji sajber sigurnosti, detekciji oštećenja kod sistema sa kritičnom zaštitom, vojnom nadzoru neprijateljskih aktivnosti i naravno kod sistema za monitoring stanja tehničkih sistema. Otkrivanje anomalija je važno jer se anomalije u podacima prevode u značajne (često kritične) i jako korisne informacije u mnogim domenima primena npr. anomalijsko ponašanje mašine. Otkrivanje ekstremnih vrednosti ili anomalija u podacima proučavali su statistički istraživači još od devetnaestog veka. Tokom vremena, takođe, druga društva za istraživanje su razvila tehnike za otkrivanje anomalija. Mnoge od ovih tehnika su razvijene za specifične domene, dok su druge uopštene. Ovo poglavlje pruža strukturirani, sveobuhvatni pregled istraživanja o otkrivanju anomalija da bi se objasnio smisao primene veštačke inteligencije u proceni stanja zupčastih prenosnika na osnovu izmerenih vibracija i prikazalo kako se tehnike razvijene u jednom području, mogu primeniti u drugim domenama, konkretno u nadgledanju stanja i dijagnostici anomalija zupčastih prenosnika.

5.2. ŠTA JE TO ANOMALIJA

Obrasci za podatke koji ne odgovaraju dobro definisanom pojmu normalnog ponašanja su anomalije.



SLIKA 5-1. Jednostavni dvodimenzionalni set podataka za ilustraciju anomalija

Na slici 5-1, podaci imaju dva normalna regiona, N_1 i N_2 većina zapažanja se nalazi u ova dva regiona. Tačke koje su dovoljno daleko od ova dva regiona predstavljaju anomalije, npr. tačke O_1 i O_2 , i tačke u regionu O_3 . Anomalije u podacima mogu nastati iz više razloga, međutim, svi ovi razlozi imaju zajedničku karakteristiku koju analitičari smatraju interesantnom a to su da su svi povezani sa realnim sistemom. Uklanjanje šuma u podacima je u velikoj meri povezano sa otkrivanjem anomalija budući da se bavimo i neželjenim informacijama u podacima koje otežavaju prepoznavanje postojanja anomalije ili oblika anomalije. Šum kao informacija nije od interesa analitičarima iz razloga što otežava analizu podataka tako da se nastoji ukloniti prije nego se podaci analiziraju.

5.3. IZAZOVI I OSNOVNI MOTIVI PRIMENE VEŠTAČKE INTELIGENCIJE U CM

Uopšteno govoreći, anomalija je obrazac koji nije u skladu sa očekivanim (tj. normalnim) ponašanjem. Stoga, jednostavni pristup otkrivanja anomalije jeste definisati normalno ponašanje; bilo koje zapažanje koje ne pripada normalnom području su anomalije. Međutim nije uvek tako jednostavno, iz više razloga [114]:

- teško je pronaći normalno područje koje obuhvata „svako“ normalno ponašanje, štaviše, granice između normalnog i abnormalnog ponašanja mogu biti nejasne, anomalijaska zapažanja blizu granice može ustvari biti normalna i obrnuto,
- kada anomalije nastanu često postoji šum koji dovodi do jako teškog uočavanja anomalija te uočene anomalije izgledaju normalno što dovodi do komplikacija prilikom definisanja normalnog ponašanja,
- s obzirom na tendenciju da se normalno ponašanje razvija, trenutna definicija normalnog ponašanja može biti netačna u budućnosti,
- dostupnost označenih podataka za obučavanje i/ili validaciju modela korištenih u tehnikama za otkrivanje anomalija je uopšteno ograničeno,
- podaci obično sadrže šum koji nalikuje anomalijama ili prekriva anomalije i često je vrlo teško ukloniti ovaj šum.

S obzirom na ove izazove, nije lako rešiti problem otkrivanja anomalije, barem u njegovoj ranoj fazi. U stvari, većina tehnika otkrivanja anomalija rešava specifične formulacije problema uzrokovanog faktorima koji uključuju prirodu podataka, dostupnost označenih podataka, tip anomalija koje se trebaju otkriti itd. Ovi faktori su često određeni prirodom domene primene gde se trebaju otkriti anomalije. Istraživači redovno usvajaju pojmove iz raznih disciplina, uključujući statistiku, mašinsko učenje, data mining i razne oblike veštačke inteligencije i primenjuju ih na svoje specifične formulacije problema.

5.4. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE U OCENI STANJA I DIJAGNOSTICI OŠTEĆENJA MAŠINA

Prednosti koje nude veštačke neuronske mreže učinile se da one postanu nezaobilazan alat u rešavanju složenih problema koji se javljaju u savremenom svetu. S duge strane, u zadnjih 5-10 godina došlo je do velikog napretka u razvoju računarske snage u obradi podataka, ali isto tako i količini podataka koji su prikupljeni, ali su isti nedovoljno kvalitetno iskorišteni. Razvoj društva i tehnologije (prvenstveno računarske) nametnuo je potrebu i omogućio da mašine i uređaji sami izvršavaju složene zadatke koje su nekad činili ljudi. Ekonomija, globalizacija trgovine, pristup informacijama, sve veća konkurentnost na tržištu i sl. zahteva potrebu za brzim i ispravnim odlučivanjem. Neminovnost je da konkurentnost na tržištu diktira smanjenje troškova uz povećanje efikasnosti uz sve veću globalizaciju. Uvode se nove tehnologije i proizvodi koji moraju biti jednostavni u toku korišćenja i često izvršavati složene radnje. Ljudski kapaciteti se zamenjuju uređajima i spravama baziranim na veštačkoj inteligenciji, naročito u onim poslovima koji su ponavljajući, zamorni, jako složeni i kod kojih bi ljudi bili prespori, preskupi, neefikasni i gde bi verovatnoća skupe greške bila veća.

Računari su jedinstveni, imaju veću brzinu obrade podataka u odnosu na ljudski mozak, mogu neprekidno i veoma efikasno raditi, nemaju subjektivno mišljenje i nemaju emocije. Postoji veliki broj problema koji su nelinearni u prirodi i koje je teško opisati uz pomoć jednostavnih algoritama ili matematičkih funkcija. U ovakvim slučajevima nastoji se odabrati efikasna metoda koja će na najbolji način rešiti ovakve probleme. Razvoj istorije

veštačkih neuronskih mreža (eng. ANN³¹) počinje 1943. godine kad su McCulloch i Pitts predložili svoj model veštačkih neurona, dok danas veštačke neuronske mreže imaju veoma široku primenu. Porast obima podataka u zadnjoj deceniji nameće želju i potrebu njihovog kvalitetnijeg iskorišćenja gde veštačke mreže imaju veoma dobre rezultate. Veštačke neuronske mreže se mogu koristiti za klasifikovanje podataka, izračunavanje regresijskih krivih, donošenje odluka, prepoznavanja oblika itd. Odgovor na klasično računarstvo je pojavljivanje neuronskog računarstva i njegovo nastojanje je ostvariti ili simulirati paralelnu obradu informacija na sličan način kako to obavlja ljudski mozak prilikom rešavanja problema. Osnovna ideja jeste stvaranje računarskog modela veštačke inteligencije (eng. AI³²). Neki vrlo važni događaji za razvoj neuronskih mreža su:

- 1943. McCulloch i Pitts predlažu McCulloch-Pitts model neurona,
- 1949. Hebb objavljuje knjigu "The Organization of Behavior", u kojoj prikazuje Hebbian sistem učenja,
- 1958. Rosenblatt uvodi jednostavnu jednoslojnu mrežu koja se danas naziva perceptron,
- 1969. izdata je knjiga "Perceptrons", autora Minsky i Papert, koja prikazuje ograničenja jednoslojnog perceptrona nakon čega gotovo sva istraživanja ulaze u mirovanje,
- 1982. Hopfield izdaje više naučnih radova na temu Hopfield-ovih mreža,
- 1982. Kohonen razvija samoorganizovane mape koje sada nose njegovo ime. Kohonen postaje najviše citiran finski istraživač zbog navedenog razvoja,
- 1986. algoritam učenja sa povratnim širenjem (eng. the Back-Propagation learning algorithm) za višeslojne perceptrone ponovo je otkriven i od tog trenutka kreće razvoj celog naučnog polja,
- Početkom 1990-tih svi veći američki univerziteti uvode izučavanje neuralnih mreža u klasični nastavni program čime njihovo istraživanje počinje da biva sve masovnije, a danas skoro da nema oblasti gde se primenjuje veštačka inteligencija, a da nije analizirana primena veštačkih neuralnih mreža,
- 1990-tih. Razvija se pod-područje mreža temeljenih na radial basis funkcijama, (eng. Radial Basis Function Networks),
- 1992. Ukrajsko-Japanski tim ukrainian-japanese team je napravio novi neuroračunar koji je koristio napredne elemente, dato mu je ime "B-512",
- 2000-tih razvoj sklopova neuronskih mreža, vektorskih strojeva i Bayesian tehnika.

Veštačka neuronska mreža, ili jednostavno neuronska mreža, je vrsta veštačke inteligencije (računarski sistem) koji oponaša način na koji ljudski mozak obrađuje i pohranjuje podatke. Neuronska mreža radi na principu skupa težinskih veza između različitih neurona koji su najmanje matematičke jedinice za obradu podataka. Postoje dve glavne vrste neuronskih mreža: fiksne-neprilagodljive (neadaptivne) kod kojih se težinski faktori ne menjaju, isti su fiksni i prilagodljive (adaptivne) koje u radu menjaju težinske koeficijente. Neprilagodljive neuronske mreže su one koje nakon faze treniranja ostaju takve kakve jesu, tj. nakon treniranja više ne menjaju svoju strukturu u toku rada. Prilagodljiva neuronska mreža menja težinske faktore u radu, nikad nije fiksna, menja se i prilagođava trenutnim podacima u toku svog postojanja. Koristi se u onim sistemima kod kojih moraju učiti u toku

³¹ Artificial Neural Networks

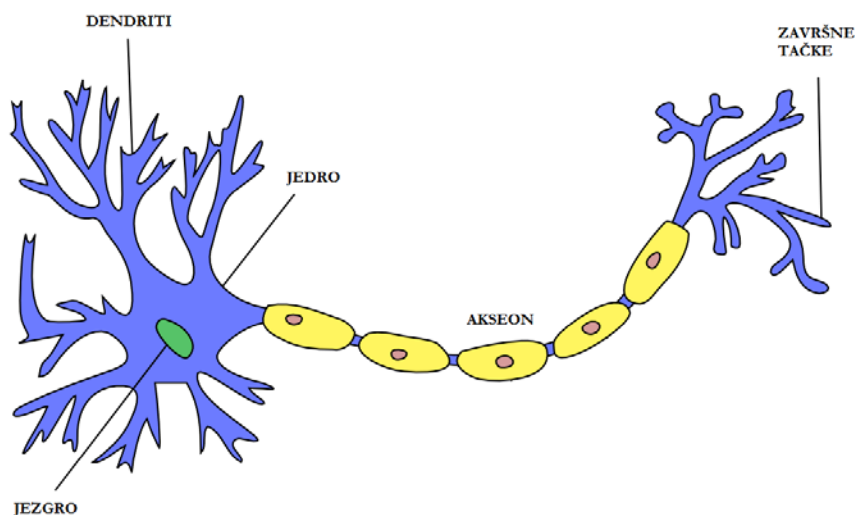
³² AI - Artificial Intelligence

korišćenja. Neuronske mreže mogu učiti na dva načina. Kod nadziranog učenja (eng. supervised learning), podaci za obučavanje se sastoje od ulazno-izlaznih parova, a neuronska mreža pokušava pronaći funkciju koja, kada joj se daju ulazne vrednosti, generiše izlazne. Ova vrsta algoritama zahteva tzv. učitelja. Učitelj je vanjski kontroler koji vrši podešavanje težina na osnovu razlike stvarnog i željenog izlaza neuronske mreže. Ova razlika predstavlja grešku i algoritam teži da je minimizuje. Kod nenadgledanog učenja (eng. unsupervised learning) nema razlike između ulaznih i izlaznih podataka (npr. grupisanja podataka prema karakteristikama koje još nisu definisane). Kroz proces učenja mreža menja svoju arhitekturu, veze i težine veza (težinske koeficijente). Algoritmi za učenje mreža najčešće uključuju traženje optimalnih težinskih koeficijenata. Postoje algoritmi koji uz promenu težinskih koeficijenata menjaju i samu strukturu mreže (broj slojeva, broj neurona, i sl.). Obično algoritmi koji menjaju strukturu se baziraju na evolucijskim algoritmima, npr. genetskim algoritmima ili genetskim programiranjima, pri tome genetsko programiranje nudi najveću slobodu pri kreiranju raznih struktura mreža, kao i njihovih veza. U toku učenja, moguće je odabrati različite aktivacijske funkcije za svaki pojedini neuron. Obično neuroni koji pripadaju istom sloju imaju i jednaku aktivacijsku funkciju.

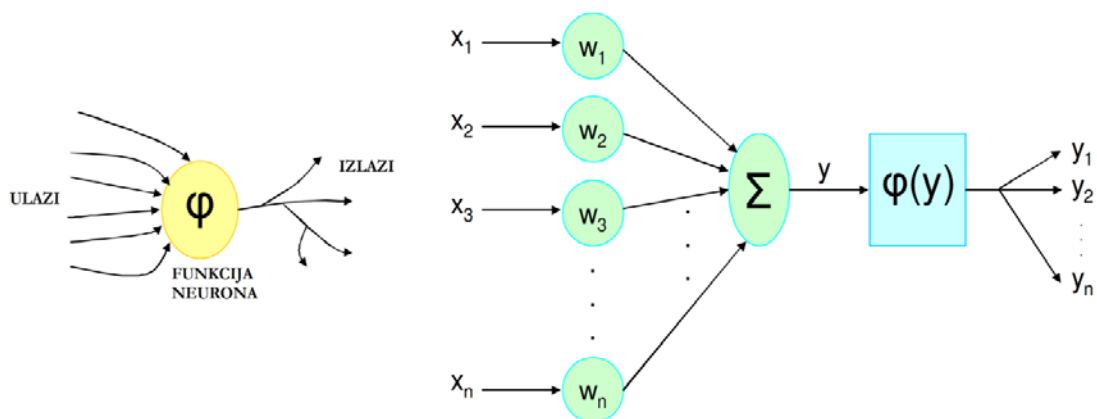
5.4.1. VEŠTAČKI NEURON

Neuronske mreže se mogu podeliti u dve opšte kategorije: biološke i veštačke neuralne mreže [115]. Biološke neuronske mreže predstavljaju nervne sisteme živih bića koja imaju složeniji neurološki profil. Biološki nervni sistem mozga čoveka najčešći je uzor za realizaciju veštačkih neuronskih mreža. Čovek je najsavršenije biće i sa najvećim je stepenom razvoja, njegov mozak predstavlja najviši stepen evolucije u razvoju i kao takav je i dalje nedovoljno istražen. Ipak, na osnovu dosadašnjih osnovnih saznanja o strukturi i načinu rada ljudskog mozga bili su dovoljni da se na osnovu njih naprave modeli i realizuje veštački neuron [116-118]. Najmanja jedinica veštačke neuronske mreže jeste veštački neuron. Jedinica za procesiranje ulaznog u izlazni signal predstavlja jedan neuron. Veštački neuron mogu biti uređaji, matematički izrazi i dr. Reagovanje na podražaj veštačkog neurona je njegova glavna karakteristika, a strukture koje se sastoje od takvih neurona imaju sposobnost učenja, tj. prilagođavanja određenom problemu. Kao što kod mozga živog bića biološki neuroni čine složene strukture međusobnih mreža, tako kod veštačkih neuronskih mreža postoje veštačke veze između veštačkih neurona. Kod bioloških mreža veze su u obliku hemijskih procesa i električnih signala, dok su kod veštačkih neuronskih mreža veze u obliku konstanti koje se nazivaju težinski koeficijenti. Iako veštačke neuronske mreže oponašaju biološke, značajno se razlikuju od njih i predstavljaju uprošten oblik biološkog neurona. Bitno je napomenuti da se prilikom projektovanja veštačkih neuronskih mreža iskorištavaju samo pojedini procesi i mehanizmi prisutni kod bioloških sistema, pojednostavljaju se i prilagođavaju matematičkim algoritmima koji se onda koriste za učenje veštačkih neuronskih mreža. Model biološkog neurona sadrži uvek istu grupu elemenata kojima se povezuje za ostale neurone ili koje su njegov individualni deo. Neuron kao osnovni element neuralne mreže ima svoje ulaze i svoj izlaz. Neuron ili nervna ćelija je biološka ćelija sposobna za procesiranje informacija. Sastavljen je od tela neurona (eng. soma) i dva tipa grana (pipaka) aksona i dendrita. Ulazi neurona su dendriti. Prirodni neuroni imaju po nekoliko stotina dendrita. Dendrit se sa neuronom spaja preko sinapse. Neuronski izlaz naziva se akson, koji se dalje grana na aksonske ogranke i završne tačke, kojima informaciju iz neurona prosleđuje novim dendritima. Struktura biološkog neurona

prikazana je na slici 5-2. Na ovaj način lako se uočava pojava slojevite organizacije jer izlazi jedne grupe neurona, odnosno sloja predstavljaju ulaze nove grupe [119]. U odnosu na strukturu bioloških neurona može se napraviti model, a zatim i fizička realizacija veštačkog neurona. Na osnovu strukture prikazane na slici 5-2 može se napraviti „grub“ model veštačkog neurona prikazan na slici 5-3, levo. Na slici 5-3 levo, simbolom φ predstavljena je težinska suma i aktivaciona funkcija primenjena na težinsku sumu. Polazeći od ovog modela može se napraviti i razviti oblik koji uključuje sve potrebne parametre za simulaciju rada biološkog neurona.



SLIKA 5-2. Struktura biološkog neurona



SLIKA 5-3. Model veštačkog neurona, LEVO-pojednostavljena forma i DESNO-razvijen oblik

Navedeni model prikazan je na slici 5-3, gde su:

- x_i - ulazni podaci dendrita (ulazi veštačkog neurona),
- w_i - težinski koeficijenti dendrita,
- $\varphi(v_i)$ - aktivaciona funkcija,
- y_j - (akson i njegovi ogranci) izlazi neurona i
- v_j - težinska suma ulaza x_i .

Kao i kod biološkog neurona i veštački ima dendrite (resivere), sinapse (funkcionalne veze između dva neurona i aksone (transmitere) čime odašilje signale generisane od strane tela neurona. Uticaj bioloških veza na rad neurona se menja uticajem pojedinih konstanti, a ovo se najviše odnosi na promene i opis rada sinapsi kroz sinaptičke težine. Preko svakog od dendrita stiže određena informacija koja se prosleđuje neuronu. Fizički posmatrano nisu sve informacije od dendrita podjednako bitne. Pojedini dendriti nose različite informacije, ali na izlazu treba da se pojave uticaji onih za dati proces validnih [119]. Ova osobina simbolično se kontroliše sinaptičkim težinama, koje su brojčane vrednosti, i kojima se množi informacija koja je došla sa dendrita. Posle sinapsi sve skalirane veličine od dendrita sumiraju se u neuron gde se i sumarno posmatraju. Ako ova suma ima vrednost koja je iznad praga posmatranog neurona, neuron će biti „efikasan“ i pomenuti signal modifikovan svojom funkcijom φ . Funkcija φ simboliše inteligentnu funkciju mozga [120]. Kao takva ova funkcija prenosa φ mora biti ograničena i neopadajuća [119]. Uopšteno posmatrajući, kreiranje veštačke neuralne mreže sa namenom za rešavanje konkretnog problema zahteva izbor funkcije kojom će se menjati sinaptičke težine i funkcije samih neurona [121]. Haykin je naveo nekoliko važnih osobina veštačkih neuralnih mreža-VNM [119]:

- VNM mogu biti linearne i nelinearne; mnoge pojave u prirodi su nelinearne teško su matematički opisive, a s druge strane važne su,
- VNM uči tako što stvara relacije između ulaznih i izlaznih podataka,
- VNM ima sposobnost da prilagođava težinske koeficijente sa promenama stanja u samoj mreži,
- svaki neuron u mreži je pobuđen aktivnošću drugih neurona,
- VNN ima sposobnost da se samoorganizuje, sačuva i raspodeli informacije koje je primila tokom procesa učenja,
- paralelna priroda VNM čini je pogodnom za korišćenje u modernim elektronskim komponentama i veoma je otporna na greške.

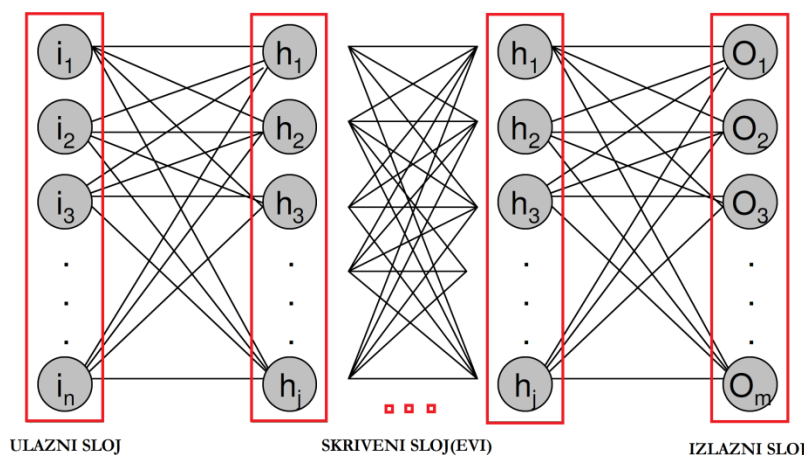
Kako bi neuronska mreža činila celinu pored jednog neurona mora postojati način da se kreira i poveže proizvoljan broj novih neurona. Ti novi neuroni trebaju da zadovolje već nabrojane karakteristike sa ciljem da kreiraju „sredstvo“ koje može da donosi određene zaključke. Naredni korak u procesu primene veštačkih neuronskih mreža je da se definišu međusobni odnosi neurona, aktivacione funkcije neurona i definiše način učenja kome će se mreža podvrgnuti. Model veštačke neuronske mreže može se razdeliti na tri segmenta u navedenom smislu [119]:

- arhitektura mreže,
- aktivaciona funkcija neurona i
- zakoni učenja.

5.4.2. ARHITEKTURA MREŽE

Arhitektura mreže predstavlja način vezivanja pojedinih neurona u kompletnoj mreži. Zbog neophodne sistematizacije velikog broja neurona svaka mreža je organizovana u slojeve [122]. Neuroni unutar jednog sloja obavljaju tačno određenu funkciju i svaki sloj je celina za sebe. Svi slojevi su međusobno povezani, pri čemu su izlazi jednog sloja ulazi sledećeg i tako dalje. Uopšteno, mreže se mogu klasifikovati u tri sloja: ulazni, izlazni i skriveni [44]. Označavanje slojeva najčešće je prvim slovom iz engleskih naziva. Tako su neuroni ulaznog sloja označeni sa i (input), skrivenog sa h (hidden) i izlaznog sa o (output). Ulazni i izlazni

sloj su oni slojevi kojima se podaci uvode ili uzimaju iz mreže dok je skriveni sloj međusloj kojim se tražena funkcija realizuje.



SLIKA 5-4. Prikaz slojevite arhitekture veštačke neuralne mreže

Skriveni sloj unutar mreže može imati proizvoljan broj podslojeva i u direktnoj je zavisnosti od potreba kako bi se problem rešio, a mogućnost rešavanja problema u direktnoj je vezi sa brojem slojeva unutar skrivenog sloja. Kod postavljanja veštačke neuralne mreže jedan od prvih koraka predstavlja i definisanje broja slojeva potrebnih kako bi se problem postavljen pred veštačku mrežu rešio. Tek nakon toga, definišu se međusobne veze i matematičke funkcije koje ih opisuju. Najčešće se u prikazivanju mreže skriveni sloj crta kao jedinstven sloj jer se time smanjuje kompleksnost crteža. Na slici 5-4 prikazana je struktura jedne veštačke neuralne mreže kod koje je skriveni sloj predstavljen sa dva sloja, dok su ulazni i izlazni sloj predstavljeni sa različitim brojem ulaznih, odnosno izlaznih (neurona) signala. U zavisnosti od problema koji se rešava i strukture mreže koja je odabrana, ove dve veličine se izračunavaju ili su definisane početnim problemom [121].

5.4.3. AKTIVACIONA FUNKCIJA NEURONA

Svaki biološki neuron u sebi sadrži informaciju u obliku električnog potencijala između spoljašnjeg i unutrašnjeg dela tela neurona. Informacije od drugih neurona se u obliku sinaptičkog potencijala prenose putem sinapsi čime se povećava ili smanjuje ukupni postojeći potencijal u telu neurona. Ukoliko ovaj potencijal dostigne određenu vrednost, šalje se informacija putem novog „aktivacionog” potencijala, koji u zavisnosti od svoje veličine aktivira odgovarajuća hemijska jedinjenja, odnosno neurotransmitere. Ovako pojednostavljen princip funkcionisanja bioloških neuronskih mreža omogućava izvođenje vrlo važnih funkcija kao što su razmišljanje, učenje, emocija, percepcija, motorika i slično [119, 123].

Aktivaciona funkcija neurona predstavlja matematičku funkciju kojom neuron, ukoliko reaguje na prispelu informaciju menja ulazni signal, i kao takav ga predaje ostalim neuronima. Definiše se na ulazu u mrežu i direktno zavisi od problema koji se rešava kao i dinamike signala koji se obrađuje. Zadatak aktivacione funkcije je da vrednost funkcije mreže transformiše u prihvatljivu vrednost izlaza. Gotovo uvek se postavlja uslov da izlazne veličine moraju biti ograničenog dijapazona, tako da većina aktivacionih funkcija za

kodomen ima konačan podinterval skupa realnih brojeva: $(0, 1)$ ili $(-1, 1)$ ili čak binarni skup izlaznih vrednosti.

Tip aktivacione funkcije	Izgled funkcije	Matematički izraz
Linearna funkcija		$a(x) = x$
Funkcija linearna po delovima		$a(x) = \begin{cases} 1, & x > \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} + x, & -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\ 0, & x < -\frac{1}{2} \end{cases}$
Funkcija praga		$a(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Bipolarna aktivaciona funkcija praga		$a(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$
Sigmoidalna (logistička) funkcija		$a(x) = \frac{1}{1 + e^{-bx}}$
Bipolarna sigmoidalna funkcija		$a(x) = \tanh\left(\frac{x}{2}\right) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$

SLIKA 5-5. Prikaz najčešće korištenih aktivacionih funkcija u okviru neuronskih mreža [119], promenljiva x predstavlja ulazni signal.

U savremenim veštačkim neuralnim mrežama, kao matematička interpretacija, funkcija prenosa najčešće se koristi u obliku [119] odskočne (Hevisajdove) funkcije, logičke funkcije

sa pragom i Sigmoidalne (logaritamske, arctan-ne ili Gausove) funkcije. Kao što je već navedeno, funkcionisanje veštačkih neuronskih mreža zasnovano je na sličnom principu pri čemu telo neurona predstavlja sumator, a ulazne promenljive veličine imaju ulogu dentrita, dok je izlazna veličina akson. Aktivaciona funkcija je matematička funkcija dobijena obradom ulaznih parametara slika 5-4.

Funkciju sinapsi kod veštačkog neurona preuzimaju tzv. težinski koeficijenti na način povezivanja izlazne, promenljive iz drugog neurona sa ulazima posmatranog sumatora. Težinski koeficijenti su predstavljeni pozitivnim ili negativnim brojem, pri čemu je intenzitet veze definisan veličinom, tj. iznosom samog težinskog koeficijenta (faktora), a vrsta te veze predznakom.

Aktivacione funkcije ili funkcije prenosa mogu biti linearne, ali i nelinearne, što je od posebnog značaja kod većine realnih problema koji se proučavaju, priroda veze između posmatranih ulaza i izlaza nelinearna [122, 123]. Najjednostavniji oblik aktivacione funkcije je linearna funkcija kod koje je izlaz iz posmatranog neurona jednak težinskoj sumi njegovih ulaza. Za ulazne vrednosti, pri kojima se funkcija ponaša linearno, uglavnom se uzima interval od $-0,5$ do $+0,5$, dok se za sve preostale ulazne vrednosti iznad i ispod pomenutog intervala dodeljuje 1, odnosno 0. Kod funkcije skoka ili praga, svim vrednostima koje pređu određenu granicu (prag) dodeljuje se neka fiksna vrednost, dok se sve vrednosti koje se nalaze ispod zadate granice preslikavaju u nulu. Najčešće se za vrednost praga uzima 0, dok se svim vrednostima iznad definisanog praga dodeljuje broj 1, čime se dobija binarni izlaz iz neurona. Kada je izlaz funkcije određen intervalom od -1 do 1 , tada je reč o bipolarnoj aktivacionoj funkciji. Sigmoidna ili logistička funkcija pripada u grupu najčešće korištenih aktivacionih funkcija, prvenstveno iz razloga da je derivabilna, odnosno uključuje i parametar „b“ kojim se određuje nagib funkcije[122]. Sigmoidna funkcija u stvari ima slične karakteristike kao i funkcija praga uz postojanje područja nesigurnosti unutar određenog intervala što je čini najčešće korištenom aktivacionom funkcijom[123].

5.4.4. ZAKON UČENJA

Učenje u neuronskim mrežama predstavlja veoma bitan proces kojim se one razlikuju od klasičnih računarskih pristupa [43]. Samo učenje mreže podrazumeva proces podešavanja i korekcije vrednosti težinskih koeficijenata na sinapsama [43]. Ukoliko se određenim dendritom šalje više informacija neuronu, težinski koeficijent sinaptičke veze tog dendrita je sve veći i obrnuto, što odgovara biološkim neuralnim mrežama i Hebbovom učenju. Na ovaj način neuron uči sa koje strane se pojavljuju informacije od značaja i koji „put ih donosi“. Ukoliko se nekim putem skoro nikada ne šalju informacije on polako „nestaje“, čime se njegov značaj smanjuje i sve je manja verovatnoća da će pojava neke informacije u tom putu imati uticaja na konačnu odluku. Podsticanjem ili sprečavanjem nekih veza između neurona pravi se razlika između manje, odnosno više bitnih informacija, dobro ili pogrešno naučenih ili nekih drugih poređenja. Čovek svoje iskustvo i znanje stiče celog života i na taj način sve više učvršćuje veze koje definišu bitne informacije, dok proces zaboravljanja podrazumeva slabljenje ili uništenje neuronskih veza za slabo, odnosno retko korištene podatke. Kod veštačkih neuronskih mreža obučavanje se vrši skupom ulaznih parametara u zavisnosti od problema koji se rešava [43, 44]. Ovaj skup treba da bude dovoljno velik da bi mreža imala više šanse da pronađene zakonitosti i sličnosti ojačavajući

sinaptičke težine. Zbog tog razloga se ovaj skup naziva trening skupom, odnosno procesom treniranja i trebalo bi da sadrži sve reprezentativne uzorke za koje se mreža želi obući. Ukoliko se izostavi neki od bitnih uzoraka može se desiti da mreža nije u stanju da na odgovarajući ulazni signal odreaguje kako treba, ili da se nedovoljno dobro prilagodi i pokuša da “shvati” šta se od nje ustvari traži. Objektivno, nikada ne može napraviti takav trening skup koji bi sadržao sve moguće kombinacije, a naročito za složene probleme koji se rešavaju, proceduru učenja, odabir trening skupa i način kontrole rezultata u toku rada i ima veliku ulogu u kvalitetu rada mreže[43]. Kako se svi ovi koraci mogu okarakterisati kao faza učenja, direktno se nameće stav o bitnosti s jedne i složenosti s druge strane ove faze u kreiranju veštačke neuronske mreže [43, 44, 118, 123].

Dve osnovne faze na kojima je baziran princip rada neuronskih mreža se odnose na fazu učenja i fazu testiranja[118]. Izlazne informacije kao funkcije ulaza sadržane su u sklopu težinskih koeficijenata koji se kroz proces učenja postepeno prilagođavaju sve dok izlaz iz neuronske mreže, koji se proverava u okviru grupe podataka odabranih za testiranje, ne da zadovoljavajuću vrednost. Proces učenja kod neuronskih mreža predstavlja proces menjanja težinskih faktora u mreži, koji nastaje kao posledica upoređivanja dobijene vrednosti sa željenom sve dok se podešavanjem težina i vraćanjem na prvi korak ne dobiju odgovarajuće izlazne vrednosti [123]. Tipovi učenja u okviru neuronskih mreža mogu biti:

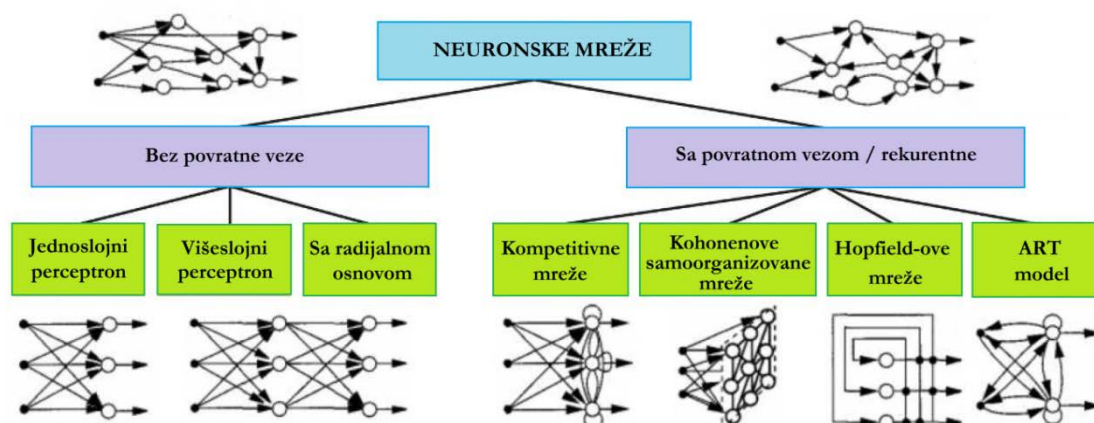
- nadgledano učenje kod kojeg su poznate sve vrednosti izlaznih, promenljivih u okviru skupa za treniranja, razlika između dobijenih i realnih vrednosti se koristi za podešavanje težinskih koeficijenata u mreži; konvergencijom greške, odnosno smanjivanjem razlike između željene i izračunate vrednosti, povećava se uspešnost učenja,
- nenadgledano učenje gde vrednosti izlaznih, promenljivih iz skupa za učenje nisu poznate, ovaj tip učenja je samoorganizujući, odnosno mreži se predstavljaju samo stimulatívni ulazi na bazi kojih se mreža interno organizuje i daje izlaze čiji kvalitet i upotrebljivost određuje korisnik koji trenira mrežu.

Iteracija podrazumeva podešavanje jednog izlaznog vektora u odnosu na ulazni, pri čemu se često tokom jedne iteracije obrađuje i više paralelnih podešavanja, što se onda naziva epoha [43]. Proces učenja odvija se po epohama. U svakoj epohi mreži se daju svi podaci iz grupe za treniranje. Kod online učenja koeficijenti težina se korigiraju nakon svakog pojedinog zapisa iz grupe učenja, a u offline načinu rada tek nakon čitave grupe. Korigovanje težinskih koeficijenata zavisi o odabranom algoritmu učenja, a veoma često se koristi minimizacija greške na izlaznim, promenljivim. Funkcija za ocenu greške često se koristi suma kvadrata greške. Radi se o totalnoj kvadratnoj grešci sumiranoj preko svih izlaznih jedinica i svih uzoraka za treniranje. Cilj učenja jest minimiziranje greške prilagođavanjem težina a obično se prilagođavanje vrši kao serija malih promena težina dok greška ne postane ”dovoljno mala”. Pristup tome zahteva poznavanje kako se greška menja kroz promenu težina. Pravilo učenja perceptron algoritma se bazira na prilagođavanju težinskih koeficijenata u cilju minimiziranja razlike između stvarnih izlaza i onih koji su željene ciljne vrednosti. Pravilo učenja perceptrona proizlazi iz pravila Delta pravila[43]. Postoje brojni algoritmi za učenje mreža i svaki ima svoju uspešnu primenu kod određenih problema i naravno, ne postoji univerzalno dobar algoritam. Nakon svake epohe za ocenu greške i prekid učenja može se koristiti grupa podataka za validaciju. Uslovi za obustavljanje učenja neuronske mreže mogu biti, ili procenat uspešne klasifikacije, ili odstupanja željenih i dobivenih izlaznih vrednosti. Ako je dobivena manja srednja greška na testnim podacima

od one na podacima za učenje to može biti indikator da je uzeto premalo podataka za testiranje. U tom slučaju potrebno je ponoviti podjelu podataka (grupe za učenje, grupe za validaciju, grupe za konačni test) i učenje mreže. Podešavanje težinskih faktora u mreži, odnosno faza učenja se odvija kroz više iteracija, odnosno prolaza kroz mrežu. Mreže se obično treniraju u nekoliko hiljada iteracija uz napomenu da mreža može i da se isuviše istrenira, odnosno da izgubi sposobnost obrade onih podataka koji se nalaze izvan grupe podataka za učenje.

5.5. KLASIFIKACIJA VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Veštačke neuralne mreže mogu se klasifikovati u mnogo kategorija shodno parametru po kome se klasifikacija vrši. Neki od parametara koji fundamentalno utiču na organizaciju i rad mreže su [119]: broj slojeva, vrsta veza između neurona, vrsta obučavanja neuralnih mreža, smer prostiranja informacija, vrsta podataka koja se obrađuje. Teško je govoriti o standardizovanoj podjeli jer se mreže neprestano razvijaju. U literaturi postoji veliki broj autora koji su dali svoje viđenje klasifikacije, a u ovom radu biće izložena podjela koja se pojavljuje kao zajednička kod većine autora.



SLIKA 5-6. Tipovi neuronskih mreža, modifikovano i preuzeto iz [124]

Višeslojne mreže bez povratnih veza poznate kao višeslojni perceptroni su najčešće korištene neuronske mreže kod kojih su neuroni organizovani unutar slojeva koji su povezani jednosmernim vezama[23]. Različiti tipovi veza dovode do različitog ponašanja. Generalno, neuronske mreže bez povratnih veza su statičke, tj. one generišu samo jednu grupu izlaznih vrednosti na bazi ulaznih. Rekurentne mreže kod kojih izlaz u sadašnjem trenutku je funkcija izlaza iz prethodnog trenutka pak se smatraju dinamičkim mrežama – svaki put kad se ulazna vrednost predstavi rekurentnoj mreži generiše se izlazna vrednost neurona. S obzirom na postojanje povratnih veza, ulazi u neurone se modifikuju što dovodi mrežu u novo stanje. Veze između neurona se popularno nazivaju težinama (eng. Weights) i predstavljene su realnim brojevima čiji je zadatak skaliranje uticaja veze. Hebb-ovo pravilo [125] za učenje u jednostavnim neuronskim modelima diktira da ako su dva susedna neurona u aktiviranom stanju tada i veza između njih mora dobiti na značaju, odnosno biti ojačana. Ojačanje veze znači povećanje težinskog koeficijenta kojim je ta veza prikazana. Oslabljenje veze pak znači smanjivanje vrednosti težinskog koeficijenta veze. Uobičajena pravila za obučavanje neuronskih mreža se zasnivaju na ovom principu. Najjednostavniji oblik neuronske mreže je perceptron. Sastoji se od ulaznog sloja (u koji se unose vektori

ulaznih promenljivih) i izlaznog sloja (gde se generišu izlazne vrednosti). Veštačke neuralne mreže mogu se klasifikovati u mnogo kategorija shodno parametru po kome se klasifikacija vrši. Neki od parametara koji fundamentalno utiču na organizaciju i rad mreže su [119]: broj slojeva, vrsta veza između neurona, vrsta obučavanja neuralnih mreža, smer prostiranja informacija, vrsta podataka koja se obrađuje. Teško je govoriti o standardizovanoj podeli jer se mreže neprestano razvijaju. U literaturi postoji veliki broj autora koji su dali svoje viđenje klasifikacije, a u ovom radu biće izložena podela koja se pojavljuje kao zajednička kod većine autora[126].

1. Prema broju slojeva mreže mogu biti: jednoslojne i višeslojne.
2. Prema vrsti veza između neurona mogu se izdvojiti sledeće grupe: slojevite, potpuno povezane, lestvičaste i celularne. Moguće su i kombinacije nekih od navedenih grupa. Slojevite mreže organizovane su u slojeve tako da su izlazi jednog sloja ulazi sledećeg. Potpuno povezane mreže su one mreže gde izlaz jednog neurona vodi ka ulazima ostalih u mreži. U ovom slučaju organizacija mreže se usložnjava, pogotovo imajući u vidu da se i neuroni izlaznog sloja povezuju sa neuronima ulaznog. Na ovaj način formira se petlja i signali se teže nadgledaju.
3. Prema vrsti obučavanja veštačke neuralne mreže se mogu podeliti na:
 - nadgledano obučavanje – eng. supervised training,
 - delimično nadgledano obučavanje i
 - nenadgledano obučavanje – eng. unsupervised training.
4. Prema smeru prostiranja informacije u mreži mogu biti sa prostiranjem unapred (feedforward), kod kojih viši slojevi ne vraćaju informaciju u niže slojeve, ili sa prostiranjem unazad eng. backward, gde viši slojevi vraćaju informacije nazad u niže slojeve. U literaturi se mreže sa prostiranjem unapred mogu naći i pod nazivom nerekurzivne, nerekurzivne ili nepovratne, dok se mreže sa prostiranjem unazad mogu naći kao rekurzivne, rekurzivne ili povratne.

5.6. VIŠESLOJNA PERCEPTRON MREŽA

U zavisnosti od problema koji se želi rešiti bira se i struktura neuronske mreže. U praksi najčešće korištene strukture mreža u dijagnostici stanja i automatskoj dijagnostici su MLP³³ (višeslojna perceptronska mreža) i RBF³⁴ (neuronska mreža sa radijalnim bazisnim funkcijama)[45]. Kod MLP mreže neuroni su grupisani u slojeve. Veze između neurona se uspostavljaju na način da iz neurona u prethodnom sloju do neurona u sledećem sloju, tako da su neuroni iz jednog sloja u vezi samo sa neuronima iz prethodnog i iz sledećeg sloja, dakle neuroni unutar jednog sloja nisu međusobno povezani. MLP kvalitetno uče i na podacima koji u sebi mogu sadržavati grešku ili šum, iako nemaju tačnost kao RBF mreže, koje s druge strane zahtevaju podatke sa vrlo malom greškom, MLP mreže su našle veoma veliku primenu u dijagnostici, klasifikaciji i automatizaciji oštećenja rotirajućih mašina.

Višeslojna neuronska mreža se sastoji od blokova neurona koji su raspodeljeni u više slojeva. U višeslojnoj statičkoj neuronskoj mreži neuroni se raspoređuju u nekoliko slojeva. Spoj nekoliko slojeva daje neuronskoj mreži mogućnost uspostavljanja veze između ulaza i izlaza kod složenih nelinearnih problema i ova se osobina koristi za prikazivanje složenih nelinearnih odnosa između promenljivih. Kod višeslojnih statičkih neuronskih mreža ne

³³ Multi-layer Perception

³⁴ Radial Basis Functions

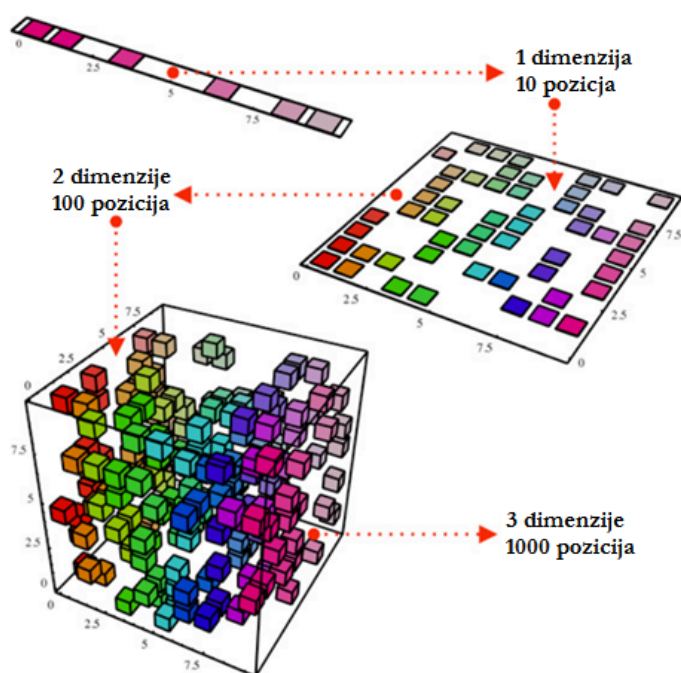
postoji međusobna povezanost čvorova istog sloja. Ulazni sloj neuronske mreže se obično označava kao nulti. Na prvi sloj neuronske mreže (prvi skriveni sloj) se nadovezuje drugi sloj (drugi skriveni sloj). Teorijski, može biti neograničen broj skrivenih slojeva, ali to bi otežalo učenje neuronske mreže. U neuronskim mrežama poslednji sloj je izlazni sloj. Kao što je već rečeno kod MPL neuronskih mreža svaki neuron vezan je sa svim neuronima susednih slojeva, dok sa ostalima nije povezan. Veze između pojedinih neurona unutar jednog sloja ne postoje. Ne postoji generalno pravilo za određivanje broja skrivenih slojeva i čvorova u neuronskoj mreži. Broj skrivenih slojeva neuronske mreže i broj neurona u njima zavisi o konkretnim zadacima koji se postavljaju neuronskoj mreži. Broj ulaznih i izlaznih čvorova je također određen specifičnošću problema. Broj neurona i veza određen je brojem uzoraka koje neuronska mreža može pouzdano obraditi. U višeslojnim neuronskim mrežama aktivacijske funkcije izlaznog sloja mogu biti linearne funkcije, budući da je neuronska mreža sposobna rešavati nelinearne probleme pomoću nelinearnih aktivacijskih funkcija u skrivenim slojevima.

5.7. TEHNIKE REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI

Problem dimenzionalnosti prilikom obrade podataka je pojava gde povećanje u dimenzionalnosti grupe podataka rezultira potrebom eksponencijalno više podataka kako bi se dobio kvalitetan reprezent uzorka te grupe podataka. Za borbu protiv problema dimenzionalnosti razvijene su brojne linearne i nelinearne tehnike redukovanja dimenzionalnosti, detaljnije objašnjene u [127, 128]. Ove tehnike imaju za cilj smanjenje broja dimenzija (promenljivih) u grupi podataka putem odabira osobina (promenljivih) ili ekstrakcijom osobina bez značajnijeg gubitka informacija. Iste su kvalitetno primenjene u dijagnostici i nadzoru stanja opreme, ležajeva [41, 42, 129, 130] i zupčastih parova [131-134]. Ekstrakcija karakteristika je proces transformacije originalne grupe podataka u grupu podataka manjih dimenzija.

Dve vrlo poznate i usko povezane tehnike ekstrakcije osobina su analiza glavnih komponentata (PCA) i samoorganizovane mape (SOM). Smanjenje dimenzionalnosti se može smatrati kao sistem „kanala“ da bi se dočarala ili približila prezentacija rijeke podataka. Problem dimenzionalnosti se može prikazati na primeru prikazanom na slici 5-7. Uz jednu dimenziju, slika 5-7 (gornja levo) postoje samo deset mogućih pozicija, tako da je potrebno deset podataka da bi se stvorio reprezentativni uzorak koji „pokriva“ problematični (analizirani) prostor. Uz dve dimenzije imamo $10^2 = 100$ mogućih pozicija, što znači stotinu podataka je potrebno da bi se stvorio reprezentativni uzorak. Sa samo tri dimenzije imamo $10^3 = 1000$ mogućih pozicija, što znači potrebno je hiljadu podataka da bi se stvorio reprezentativni uzorak koji „pokriva“ problematični prostor.

Iako je teško prikazati grafički ovaj eksponencijalni rast potrebnog broja podataka nastavlja rasti eksponencijalno u beskonačnost kako bi se stvorio reprezentativni uzorak. Tehnike redukovanja dimenzionalnosti se također koriste da bi se smanjile dve neželjene karakteristike u podacima, a to su šum (varijansa) i redundantnost (visoko povezane promenljive).



SLIKA 5-7. Problem dimenzionalnosti, modifikovano i preuzeto iz [135]

Analiza glavnih komponenta (PCA³⁵) je metod za smanjivanje dimenzije skupa podataka uz istovremeno zadržavanje maksimalno moguće varijacije koja je prisutna u tim podacima. Ovu metodu je prvi put opisao Karl Pearson 1901. godine. Iako je vršio izračunavanja sa samo dve ili tri varijable Pearson je verovao da se analiza glavnih komponenti može koristiti i za rešavanje problema sa mnogo više varijabli. Opis izračunavanja je dat mnogo kasnije od strane Hotellinga, 1933. godine [136]. Međutim i dalje su izračunavanja bila previše komplikovana i zamorna kada bi trebalo napraviti analizu sa većim brojem varijabli. Široka upotreba analize glavnih komponenti je usledila zapravo tek nakon pojave računara. Da bi se redukovao broj varijabli, odnosno dimenzija prostora, potrebno je pronaći kriterijum za odbacivanje nekih varijabli, odnosno za zadržavanje onih varijabli koje nose najveći deo informacija sadržanih u polaznom skupu varijabli. Postoji niz kriterijuma kod kojih se koriste samo one glavne komponente kojima odgovaraju svojstvene vrednosti veće od 1 (Kajzerov kriterijum)[137] kojima odgovaraju svojstvene vrednosti veće od proseka svih svojstvenih vrednosti i koje nose, odnosno zadržavaju svaka posebno unapred zadati deo informacija, pri čemu se broj komponenta određuje proizvoljno. Nema pravila koje bi diktiralo izbor jednog od navedenih kriterijuma. Jedino čime se treba rukovoditi jeste cilj da broj zadržanih varijabli ne bude prevelik i da gubitak informacija iz polaznog sistema bude što manji. Kao jedna od metoda redukcije dimenzionalnosti PCA predstavlja ortogonalnu linearnu transformaciju i koristi da se ukupan broj ulaznih varijabli prikaže redukovano u smislu transformacije na novu grupu varijabli (odnosno ulaznih obeležja signala) na način da se dobije maksimalna varijacija u novoformiranoj grupi varijabli, odnosno karakterističnim komponentama. Novoformirane karakteristične komponente se dobijaju tako da su međusobno nezavisne nekorelisane, odnosno ortogonalne. Redukcija varijabli se

³⁵ Principal Component Analysis

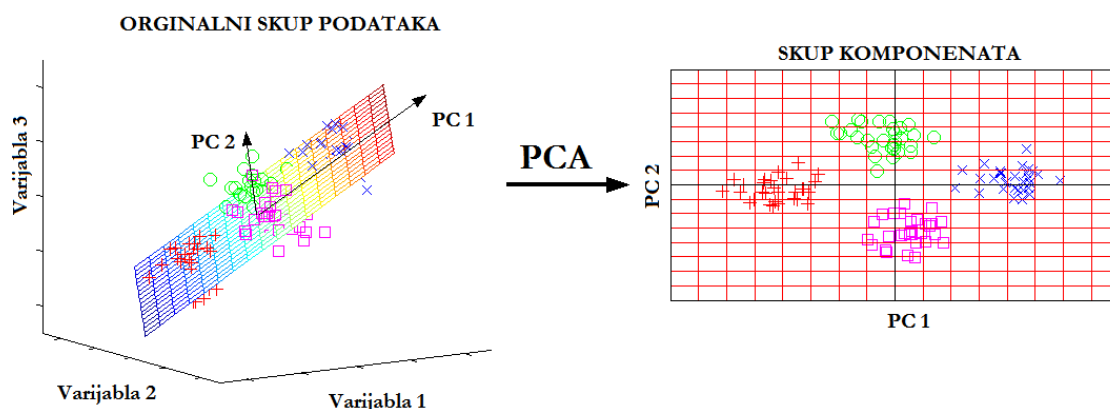
dobija odabirom redukovane grupe karakterističnih komponenti umesto originalne grupe ulaznih varijabli tako što se bira svega nekoliko prvih karakterističnih komponenti koje u sebi nose visok udeo informacija sadržan u originalnoj ulaznoj grupi varijabli.

Na prethodni način se pojednostavljuje analiza jer se veliki broj varijabli (pokazatelja) reducira na manji broj koji u postupku zadržavaju skoro sve informacije sadržane u početnom skupu podataka. Ovim, ne samo što je smanjen broj promenljivih u analizi, već se ostvaruje i napredak u razumevanju strukture fenomena koji se proučava. Osnovni zadatak PCA je određivanje linearne kombinacije originalnih promenljivih koja će imati maksimalnu varijansu. S druge strane, drugi i uopšteni zadatak je određivanje nekoliko linearnih kombinacija originalnih promenljivih koje će pored toga imati maksimalnu varijansu, biti istovremeno međusobno nekorelisane i pored toga će, što je moguće manje, gubiti informaciju koja sadrži skup originalnih promenljivih. Primenom ove metode originalne promenljive se transformišu u nove promenljive koje se nazivaju glavne komponente [138]. Prva glavna komponenta se izdvaja tako da obuhvata najveći deo varijanse originalnog skupa podataka, a naredne komponente se formiraju tako da obuhvate onaj deo varijanse originalnog skupa podataka koji nije obuhvaćen prethodno izdvojenim glavnim komponentama te se realizacijom navedenog postižu dva cilja [139] [140]:

- redukuje se originalni skup podataka,
- olakšava se interpretacija tog originalnog skupa.

PCA je veoma često prvi korak u analizi podataka, a pogotovu podataka sa više dimenzija, a sve u cilju otkrivanja obrazaca i odnosa između izmerenih parametara za dalje multivarijacione analize [136]. Prva glavna komponenta (PC1) čini maksimum ukupne varijanse. Druga (PC2) je u korelaciji sa prvom i računa maksimum preostale varijanse i tako dalje, dok se ne sačini ukupna varijansa. Iz praktičnih razloga, dovoljno je da se zadrže samo one komponente koje čine značajan procenat ukupne varijanse. Linearni koeficijenti od recipročnog odnosa linearne kombinacije nazivaju se koeficijenti opterećenja, odnosno koeficijenti korelacija između originalne promenljive i glavne komponente. Vrednosti koje predstavljaju uzorke u prostoru, definisane od strane glavnih komponenta, su komponentni rezultati. Rezultati se mogu koristiti kao ulaz za druge multivarijacione tehnike, umesto originalnih izmerenih varijabli.

Da neka od originalnih varijabli ne bi imala prejak uticaj na glavne komponente i stvarala prevelik uticaj na rezultate, vrši se njihovo kodiranje tako da imaju aritmetičku sredinu nula i varijansu jednaku jedinici. Drugim rečima, izračunavaju se standardizovane vrednosti iz originalnih podataka. U interpretaciji novodobijenih varijabli koristi se matrica strukture čiji su elementi linearne korelacije originalnih varijabli i novodobijenih varijabli ili faktora. Prvi zadatak metode glavnih komponenta jeste određivanje linearne kombinacije originalnih promenljivih koja će imati maksimalnu varijansu. Drugi zadatak metode glavnih komponenta jeste određivanje nekoliko linearnih kombinacija originalnih promenljivih koje će, pored toga što imaju maksimalnu varijansu, biti među sobom nekorelisane gubeći, u što je moguće manjoj meri, informaciju sadržanu u skupu originalnih promenljivih. U postupku primene ove metode originalne promenljive transformišu se u nove promenljive (linearne kombinacije) koje nazivamo glavne komponente. Ta transformacija se dobija rotacijom varijabli, kao što je prikazano na slici 5-8.



SLIKA 5-8. Transformacija originalnih varijabli iz trodimenzionalnog u dvodimenzionalni prostor, modifikovano i preuzeto iz [141].

Analiza glavnih komponentata je izuzetno pogodna metoda za primenu u nadgledanju stanja opreme [41, 42, 142, 143] prvenstveno u smanjenju broja promenljivih. Primena tradicionalne spektralne analize za otkrivanje oštećenja na zupčastim parovima je donekle ograničena zbog prirode signala koji nastaju zbog prisutnosti takvih oštećenja. Karakteristične frekvencije koje nastaju različitim oštećenjima zupčastih parova ne mogu se uvek otkriti koristeći spektar sirovih signala [3]. Osnovna procedura za dijagnostiku oštećenja kod zupčastih prenosnika primenjuje analizu spektra sirovog vremenskog zapisa, sirovi vremenski zapis i Cepstrum analizu [68]. Kao dodatni statistički parametar za jednostavnu metodu otkrivanja prisutnosti oštećenja na zupčastim prenosnicima može uključivati izračunavanje kurtosis signala u vremensku domenu. Nažalost, takve tehnike obično funkcionišu u slučajevima velikog razvijenog oštećenja i kada nema mnogo smetnji od drugih komponentata sa visokom energijom koje dolaze zbog šuma i/ili drugih komponentata visoke frekvencije. Otkrivanje oštećenja zupčastih prenosnika postaje problem jer je interes prvenstveno u otkrivanju oštećenja u ranoj fazi kada su ista još uvek mala. Tada će impulsi nastali oštećenjem imati jako niske amplitude i biće ih nemoguće otkriti u sirovom spektru signala. Većina predloženih metoda za otkrivanje oštećenja na zupčastim parovima uključuju smanjenje šuma kod snimljenih signala da bi se olakšalo otkrivanje impulsa nastalih zbog oštećenja [104, 105, 144, 145]. Uspešan postupak otkrivanja oštećenja bi, kao prvo, trebao izdvojiti odgovarajući sadržaj frekvencije izmerenog signala, a zatim otkriti prisustvo oštećenja u izdvojenom frekventnom pojasu. Prema tome, mnoge metode dijagnostike oštećenja zupčastih parova uključuju određeno pred procesiranje i filtriranje da bi se izdvojio odgovarajući niz frekvencija koje su povezane sa oštećenjima zupčastog para, očistio sadržaj visoke energije iz signala i pripremio za proces dijagnostike. Različite dekompozicije malotalasne analize, filtriranje i primena tehnike vremenskog osrednjavanja su među najčešće korištenim tehnikama za ovu svrhu. Naredna faza nakon predobrade je faza za otkrivanje i eventualno lokalizovanje (kvalifikaciju) oštećenja. Međutim, nakon primene svih procedura, odluku o tome da li je oštećenje prisutno ili ne, mora doneti ekspert uz npr. predstavljanje odluke o vrednosti praga razmatrane osobine ili samo na osnovu poređenja prethodnih nivoa. Identifikacija oštećenja (lokalizacija) je kod mnogih metoda sledeći korak koji se radi nakon što se otkrije oštećenje. U većini slučajeva to se radi koristeći specifične frekvencije nastale različitim oštećenjima. Ove frekvencije zavise od brzine rotacije, broja zupčanika i njihove

geometrije. Brzina rotacije je često nepoznata i/ili se ne može izmeriti. Treba napomenuti da većina procedura za otkrivanje oštećenja zahteva posledičnu analizu te se identifikacija obično radi određujući specifičnu frekvenciju oštećenja. Postoji nekoliko metoda koje nude automatsku dijagnostiku oštećenja kao one koje su navedene u [142, 146-151] i većina njih je bazirana na prepoznavanju obrasca. Metoda predložena u ovom istraživanju nudi automatsko otkrivanje i kvalifikaciju (identifikaciju tipa) oštećenja zupčastih prenosnika bez potrebe za procenom specifičnih frekvencija oštećenja. Ovo su vrlo važne osobine predložene metode iz razloga što predložena metoda ima potencijal da se lako ugradi i iskoristi za dijagnostiku oštećenja u realnim inustrijskim sistemima. Veoma česta metoda koja se koristi za redukciju količine promenljivih u procesu analize i klasifikacije podataka prilikom dijagnostike oštećenja rotacionih mašina koristeći veštačke neuronske mreže kroz metode klasifikacije i prepoznavanja obrasca je metoda analize glavnih komponenata (eng. Principal Component Analysis)[143]. U mašinskom učenju prepoznavanje obrazaca-šablona (engl. Pattern Recognition³⁶) je proces dodeljivanja oznaka datoj ulaznoj vrednosti. Jedan oblik prepoznavanja obrazaca je klasifikacija koja pokušava da svrsta svaku ulaznu vrednost u jednu klasu iz datog skupa klasa. Uopšteno, pod klasifikacijom se podrazumeva svrstavanje posmatranih pojava u jednu od predefinisanih grupa na osnovu vrednosti posmatranih obeležja. Kada je u pitanju analiza oštećenja zupčastih parova koristeći signale vibracija, prepoznavanje obrasca obično se može podeliti u dve faze: fazu ekstrakcije osobina i fazu prepoznavanja. Faza ekstrakcije osobina obezbeđuje odgovarajuće parametare iz vektora nadgledanih veličina koje su izdvojene iz signala vibracija, čime se formiraju tzv. vektori obrasca koji se u drugoj fazi koriste za razlikovanje definisanih kategorija. Tako će svaki signal koji odgovara određenom stanju iz ranije navedenih kategorija biti okarakterisan jedinstvenim obrascem vektora. Analiza glavnih komponenti je metoda koja je korištena u ovom istraživanju za ekstrakciju relevantnih osobina iz vektora obeležja. Već je opisan način rada metode glavnih komponenata, dok je u narednom poglavlju ova metoda primenjena na konkretan slučaj u toku istraživanja teme u doktorskoj disertaciji. Kao što je već navedeno, osnovna ideja metode glavnih komponenata je transformacija originalnog vektora obeležja (P) u novi vektor C, koji ima manju dimenziju k, $k < P$. Izbor novih varijabli k je baziran na varijansi za koju su odgovorne glavne komponente. U ovom konkretnom slučaju metoda glavnih komponenata ima za cilj da prvo ekstrahuje većinu detaljnih informacija sadržanih u vektorima obeležja, budući da zadržava većinu njihovih varijabilnosti, a zatim grupiše prikupljene vektore obrasca.

5.8. SAMOORGANIZOVANE KOHONENOVE MAPE

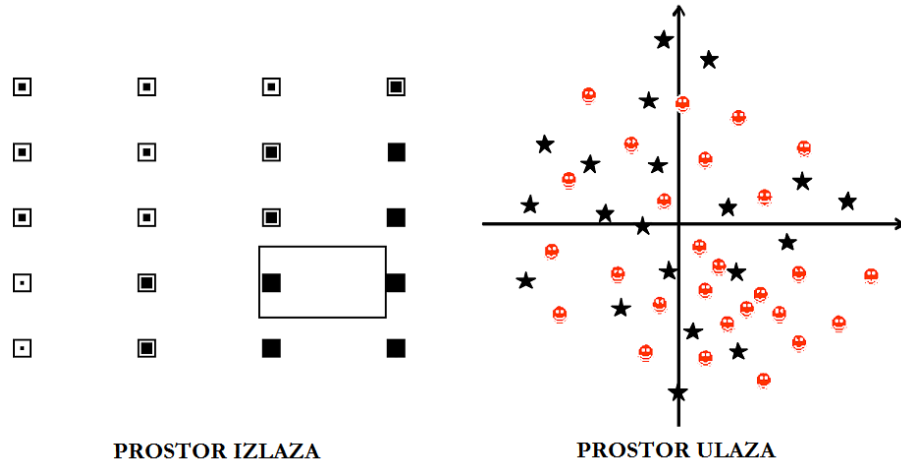
Iako se termin (eng. Self-organizing map) može koristiti za veliki broj različitih pristupa, najčešće se koristi kao sinonim za Kohonenove samoorganizovane mape ili jednostavno samoorganizovane mape (SOM³⁷). Ovaj oblik neuronske mreže se takođe često naziva i Kohonenove neuronske mreže, samoorganizovane mape obeležja, ili mape topolškog očuvanja obeležja, ili neka od navedenih kombinacija [152]. SOM-e predstavljaju tip veštačke neuronske mreže koja se obučava nenadgledano s ciljem dobivanja takozvane mape manje dimenzionalnosti podataka (najčešće dvodimenzionalnog oblika) koja

³⁶ Pattern Recognition

³⁷ Self-Organizing Map

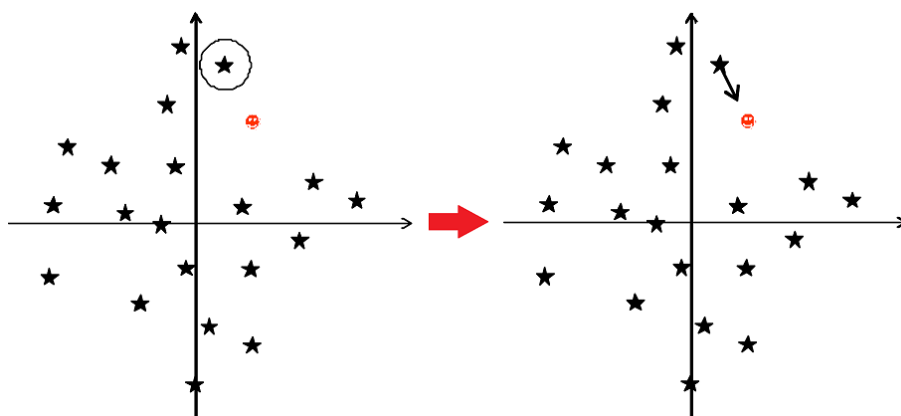
predstavlja diskretizovane podatke ulaznog prostora treniranih uzoraka. SOM-e se razlikuju od drugih veštačkih neuronskih mreža iz razloga što one koriste komativno učenje što je suprotno učenju baziranom na korekcijama grešaka (kao što su algoritam učenja sa povratnim širenjem, (eng. the Back-Propagation learning algorithm) kao i zbog toga što koriste funkciju susedstva kako bi sačuvala topološke osobine ulaznog prostora. Navedene osobine čine SOM-e korisne za vizualizaciju višedimenzionalnih grupa podataka u smanjenim dimenzijama i mogu se ubrojati u tehniku redukcije dimenzionalnosti. Profesor Kohonen je finski istraživač i akademik koji je radeći 70-tih i ranih 80-tih na Helsinškom tehnološkom univerzitetu 1982. predstavio svoj algoritam samoorganizirajućih mapa, ali sam algoritam je popularnost stekao tek nakon drugog izdanja njegove knjige 1988. i naučnog rada pod nazivom „The Neural Phonetic Typewriter“. Od tog datuma do sada objavljeno je puno radova i knjiga na temu SOM-a, ali dve knjige objavljene od navedenog autora se smatraju kao glavna referenca iz ove oblasti [152, 153]. Profesor Kohonen je opisao SOM kao „alat za vizualizaciju i analizu višedimenzionalnih podataka. Ovo su naravno najatraktivnija područja primene SOM-a, ali se one mogu koristiti i za grupisanje (clustering), smanjenje dimenzionalnosti (dimensionality reduction), klasifikaciju (classification), uzorkovanje (sampling) i rudarenje podacima-otkrivanje zakonitosti u podacima (data mining). Ovaj rad se fokusira na korišćenju SOM-a za klasifikaciju i prepoznavanje oblika analiziranih oštećenja zupčastih parova koristeći signale mehaničkih vibracija. SOM obuhvata brojne karakteristike koje imaju sličnosti sa radom ljudskog mozga, ili se bar smatra da tako radi. U stvari, sama ideja da SOM ima na raspolaganju grupu neurona koji se kroz iskustvo učenja specijaliziraju u identifikaciji određenih vrsta obrazaca je u skladu sa radom ljudskog mozga. Ideja da su određeni delovi mozga odgovorni za posebne veštine i zadatke je izuzetno slična principima na kojima radi SOM. Koncept organizovanja informacija u prostoru, gde su slični koncepti mapirani na susedna područja, predstavlja zaštitni znak SOM-a veruje se da je jedna od paradigmi funkcionisanja ljudskog mozga. Osnovna ideja SOM-a je da se omogući određena količina klasifikacionih sredstava (zvaćemo ih neuroni, iako se široko koristi i pojam jedinice) koje su organizovane na bazi obrazaca dostupnih za klasifikaciju (koji će se ovdje nazivati obrasci ulaza). Vrlo relevantna karakteristika SOM-a, koja u stvari predstavlja zaštitni znak, jeste razvijanje organizovane mreže u kojoj susedni neuroni dele sličnosti i na ovaj način obrasci koji su slični će aktivirati slična područja u SOM-i. Stoga, može se reći da će se različiti delovi SOM-e aktivirati uz specifične tipove obrazaca ulaza, što će dovesti do reprezentacije bazirane nad globalnom organizacijom i lokalnim usavršavanjem. SOM se obučava iterativno kroz veliki broj epoha. Uz pojam učenja veštačke neuronske mreže vezani su pojmovi iteracije i epohe. Pod iteracijom podrazumevamo korak u algoritmu postupka za učenje u kojem se odvija podešavanje težinskih koeficijenata, dok je epoha jedno predstavljanje celokupnog skupa za učenje. Epoha se isto tako može definisati kao jedna obrada svih obrazaca ulaza (jedno predstavljanje skupa za učenje), stoga svaki obrazac ulaza će se obraditi onoliko puta koliko ima epoha. SOM-a se obučava kompetitivnim učenjem. **Kompetitivno učenje je proces nenadgledanog učenja veštačkih neuronskih mreža pri kojem se neuroni takmiče za dozvolu da se aktiviraju za određeni skup ulaznih podataka.** SOM je neuronska mreža sa jednim slojem gde su neuroni postavljeni duž n dimenzionalne mreže. Kod većine aplikacija ova mreža je dvodimenzionalna i pravougaona, iako mnoge aplikacije koriste šestougone mreže ili više dimenzionalnih prostora. U ovoj mreži možemo definisati susedstva kao ono što inače zovemo prostor izlaza, nasuprot prostora ulaza obrazaca podataka. Koncepti prostora ulaza i prostora izlaza su vrlo važni budući da čine centar aktivnosti SOM-e. U stvari, SOM-a se može smatrati

kao alat koji mapira (projektuje) vektore iz prostor ulaza na prostor izlaza pokušavajući da očuva topološke odnose koji su promatrani u prostoru ulaza. Na slici 5-9 prikazan je primer oba prostora. Desna strana slike prikazuje prostor ulaza gdje smajlići predstavljaju obrasce ulaza, a zvezdice predstavljaju neurone; u ovom konkretnom slučaju i za potrebe vizualizacije svaki vektor je definisan samo na osnovu dve koordinate.



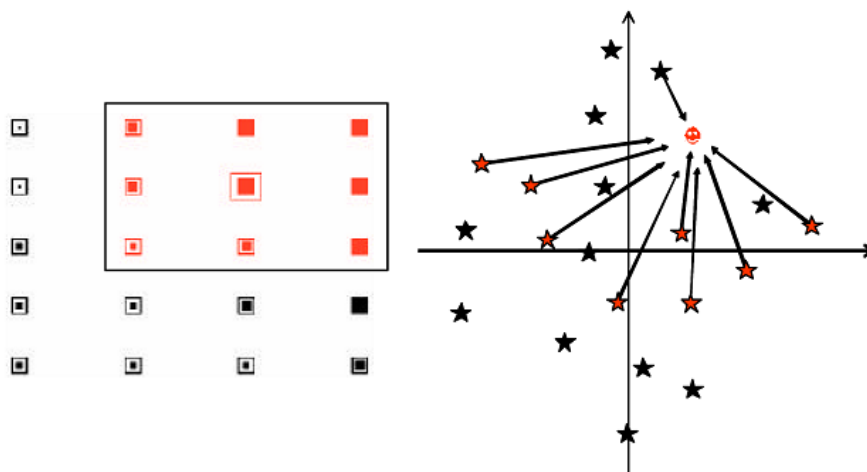
SLIKA 5-9. Osnovna arhitektura SOM-e. Na levoj strani je prikazan prostor izlaza dok je na desnoj strani prikazan primer ulaznog prostora. U ovom slučaju svaki vektor se sastoji od samo dve komponente.

Na levoj strani slike prikazana je reprezentacija prostora izlaza i tu su ostvarene susedske veze. Svaki neuron, koji je neuron sloja ulaza, ima onoliko težina (koje se često nazivaju koeficijentima) koliko i obrasca ulaza i stoga se može smatrati **kao vektor u istom prostoru kao i obrasci**. Kao što je prikazano na desnoj strani slike 5-9, smajlići predstavljaju obrasce ulaza, a zvezdice predstavljaju neurone u ovom već predstavljenom dvodimenzionalnom prostoru. Kada obučavamo ili koristimo SOM-u sa datim obrascem ulaza, onda računamo udaljenost između tog specifičnog obrasca i svakog neurona u mreži.



SLIKA 5-10. Proces treniranja SOM-e uključuje poklapanje svakog ulaznog obrasca u mreži, identifikaciju najbližeg neurona (leva strana) i ažuriranje pozicije neurona kako bi se poboljšala reprezentacija ulaznog obrasca

Zatim odaberemo neuron koji je najbliži pobedničkom neuronu i kažemo da je obrazac mapiran na taj neuron ili da je neuron pobedio u reprezentaciji tog obrasca ulaza. Kao posledica neuron će se pomaći ka poziciji obrasca ulaza da bi popravio svoju reprezentaciju (kao što je prikazano na slici 5-10). Obim ovog pokreta je kontrolisan parametrom koji se obično naziva **stopa učenja**. U cilju očuvanja topologije u prostoru izlaza neophodno je ispraviti poziciju pobedničkog neurona, ali i poziciju susjednih neurona kao što je prikazano na slici 5-11. Na taj način je mreža progresivno organizovana (odmotana) sa određenim delovima prostora ulaza koji su predstavljeni određenim podgrupama susjednih neurona.

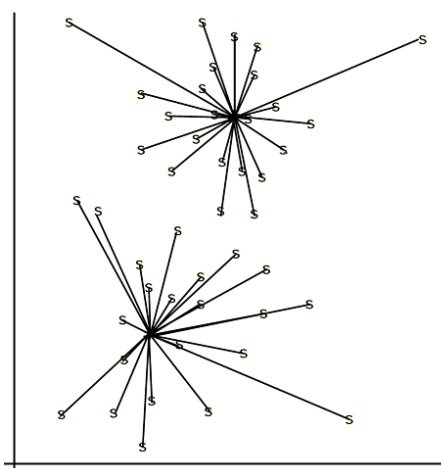


SLIKA 5-11. Pojam susedstva u izlaznom prostoru (leva strana) prisiljava kretanje svih susednih neurona u ulaznom prostoru (desna strana)

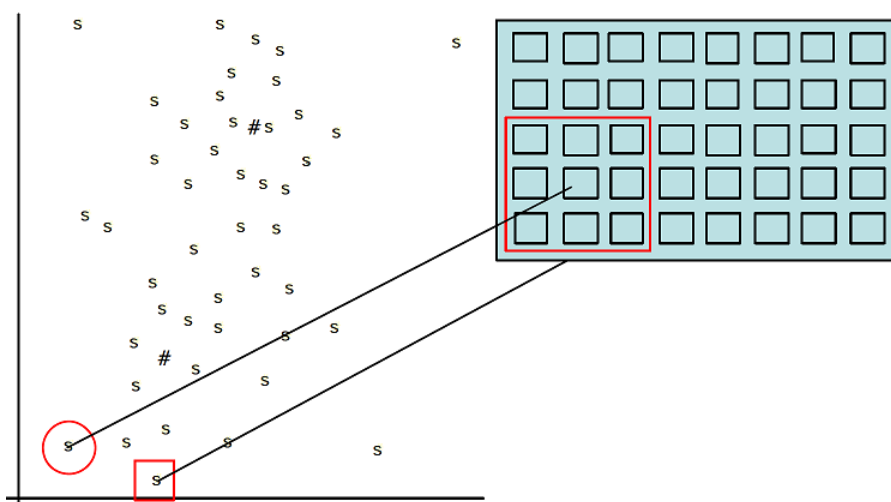
Ako je SOM-a istrenirana uspešno onda će obrasci, **koji su blizu prostora ulaza**, biti mapirani na neurone koji su blizu (ili su isti) prostora izlaza i obrnuto. Stoga, kao što je već rečeno, SOM-a omogućava „očuvanje topologije“ u smislu da su susedstva (koliko je moguće više) očuvana kroz proces mapiranja. Uopšte govoreći, nije bitno koliko treniramo mrežu, uvek će biti neka razlika između bilo kojeg obrasca ulaza i neurona na koji je mapiran. Ova je situacija identična vektorskoj kvantizaciji (diskretizaciji kontinuirane veličine), gde postoji određena razlika između obrasca i vektorske reprezentacije vektoru kodova.

Stoga, na ovu razliku se odnosimo kao na **grešku kvantizacije** i koristimo je kao meru za prezentaciju koliko dobro neuroni predstavljaju obrasce ulaza. Drugim rečima, greška kvantizacije se izračunava sabiranjem svih udaljenosti između svakog obrasca ulaza i neurona na koji je mapiran, dajući pojam kvaliteta reprezentacije uz pomoć SOM-e (na slici 5-11). Prikazana su dva neurona koji moraju predstaviti 45 obrazaca ulaza, linije predstavljaju udaljenost između svakog obrasca ulaza i najbližeg neurona). Kako bi se procenila složenost prostora izlaza računa se **topološka greška**. Topološka greška meri prosečni broj vremena drugog najbližeg suseda na dati ED koji nije mapiran na suseda od prvog (slika 5-12). Što je veća topološka greška to je više kompleksniji prostor izlaza. Visoka topološka greška može ukazivati da je problem klasifikacije kompleksan i da je očuvanje topologije otežano, ili može ukazivati da treniranje nije bilo adekvatno i da je mreža savijena.

U tom kontekstu možemo gledati na SOM kao na “gumenu površinu” koja je rastegnuta i savijena preko celog prostora ulaza, tako da bi bila blizu svim tačkama treniranja u tom prostoru. Ovaj proces se postiže iterativnim načinom preko velikog broja epoha. U tom smislu, SOM-a je slična sloju ulaza neuronske mreže sa radijalnim bazisnim funkcijama (RBF), ili algoritmu klasterizacije metodom k-srednjih vrednosti (eng. K-means algorithm). K-means algoritam je jedan od najpoznatijih i najjednostavnijih algoritama klasterizacije. Velika razlika je u tome da kod navedenih metoda ne postoji pojam susedstva “prostora izlaza” (svi neuroni su “nezavisni” jedan od drugog), dok kod SOM-e neuroni su “usko povezani” u prostoru izlaza. Stoga, nameće se pojam rasporeda neurona što nije prisutno u drugim konkurentnim algoritmima učenja.



SLIKA 5-12. Prikazivanje ulaznog prostora s 45 ulaznih obrazaca i 2 neurona, greška kvantizacije je data sumom svih udaljenosti svakog ulaznog obrasca do najbližeg neurona



SLIKA 5-13. Topološka greška je data na način koliko neće puta drugi najbliži sused u ulaznom prostoru (leva strana) mapirati susedstvu neurona u izlaznom prostoru (desna strana)

Ove veze su ekvivalentne snažnim povratnim informacijama, uobičajenim u drugim konkurentnim algoritmima za učenje. Prije treninga neuroni se mogu inicijalizirati nasumično. Tipično, proces treniranja SOM sastoji se od dva glavna dela. Tokom prvog

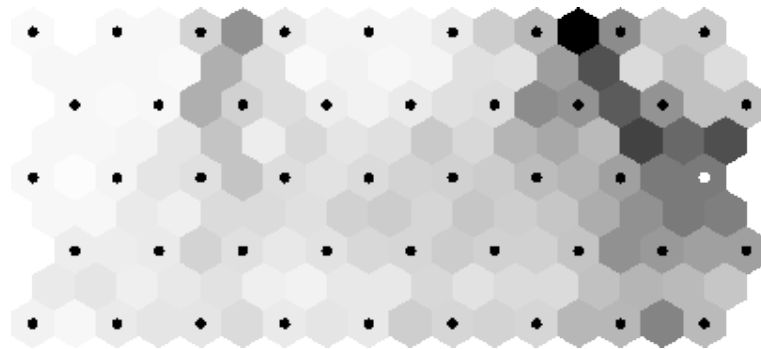
dela treninga neuroni su se “raširili” i zatim povukli prema opštem području (u prostoru ulaza) gde će ostati. To se obično naziva faza „odmotavanja“ u toku treniranja. Nakon ove faze definiše se opšti oblik mreže u prostoru ulaza i onda se nastavlja na drugi deo, obično nazvan faza finog podešavanja gde će se SOM-a prilagoditi neuronima koliko god je to moguće obrascima ulaza, čime se smanjuje greška kvantizacije. Vizualizacija procesa treniranja je detaljnije obrađena u [152].

Za razliku od najčešćeg tipa veštačkih neuralnih mreža prostiranjem unazad (eng. backward), gde viši slojevi vraćaju informacije nazad u niže slojeve, Kohonenove neuronske mreže su nenadgledani algoritmi odnosno ne zahtevaju informaciju o tome kako podatke treba klasifikovati. Ovo ih čini veoma pogodnim za upotrebu u klasifikaciji oštećenja rotirajućih mašina, a time i oštećenja zupčastih parova.

SOM-a se sastoji od izvesnog broja čvorova od kojih svaki sadrži skup težinskih faktora jednake dužine kao ulazni vektor podataka (odnosno, za svaki atribut u skupu podataka postoji po jedan težinski koeficijent, koji se nazivaju nekada i prototip vektor). Najjednostavnija je jednodimenzionalna topologija SOM-e koja je ujedno i jedina za koju je dokazana konvergencija. Međutim, najčešće se koristi dvodimenzionalna verzija zbog mogućnosti da predstavi znatno složenije skupove podataka, dok empirijski obično konvergira. Trodimenzionalne topologije su relativno slabo istražene zbog visoke kompleksnosti.

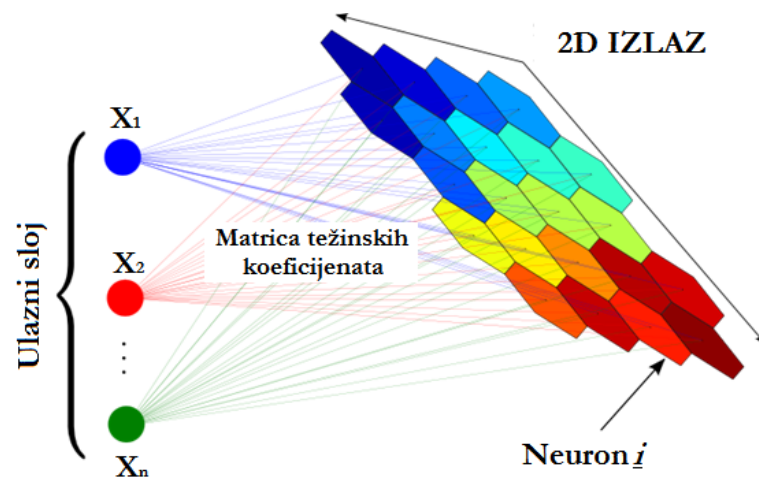
Na slici 5-13 je prikaz dvodimenzionalne topologije SOM-e. U toku rada SOM-e uzima se po jedna instanca podataka. Svaki neuron određuje Euklidsko rastojanje između svog trenutnog vektora težinskih koeficijenata i vrednosti date instance podataka. Neuron za koji je ovo rastojanje najmanje od svih u mreži se proglašava za pobednika. Instanca podataka je najbliža grupi instanci za koje je isti pobednik isti neuron. SOM-a se može objasniti kao skup neurona od kojih svaki predstavlja po jednu grupu podataka pri čemu podatak pripada onoj grupi koja je predstavljena čvorom pobednikom. Međutim, SOM-a se može posmatrati i kao struktura koja predstavlja manji broj grupa podataka, tako što se uzme da po nekoliko bliskih neurona predstavlja jednu grupu. Procedura treniranja SOM-e omogućava da se neuroni koji imaju slične težinske koeficijente nalaze blizu u topološkoj mapi. Razvijeno je nekoliko tehnika vizualizacije rezultata SOM-e, najpopularnija je bazirana na takozvanoj (eng. unified distance matrix, U matrix), ujedninjena matrica udaljenosti, U matrica [154]. U matrica prikazuje odnose između susednih neurona.

U matrica se dobiva na osnovu izračuna udaljenosti susednih neurona i prikazuje se različitim bojama između susednih čvorova. Tamna boja između neurona odgovara većoj udaljenosti a samim tim i većem razmaku između veličina u ulaznom prostoru. Svetla boja između neurona naglašava da su code book vektori bliže jedan drugome u ulaznom prostoru. Svetla područja se mogu smatrati kao klasteri dok se tamna područja smatraju kao separatori (razdvajajući) klastera. Ovakav način vizualizacije može biti od velike pomoći u pokušajima da se pronađu klasteri u ulaznim podacima bez da imamo bilo kakvih informacija o samim klasterima. Na slici 5-14 su prikazani neuroni u mreži označeni crnim tačkama. Prikaz otkriva razdvajanje klastera u gornjem desnom uglu. Klasteri su razdvojeni tamnim rascjepom što je još jedna potvrda korisnosti U-matrice u vizualizaciji distribucije podataka, odnosno jednostavnog načina vizualizacije granica klastera na mapi, u konkretnom slučaju korišćenjem SOM-e.



SLIKA 5-14. Siva skala U-matrice SOM-e

Naravno, pored sive skale koristi se i obojena skala u veoma velikom broju slučajeva prikazana na slici 5-15. Veoma često, kod skale u boji se prikazuje i legenda sa brojčanom vrednošću u kojoj broj označava vrednost elemenata U matrice i udaljenost između susednih neurona.



SLIKA 5-15. Ilustracija mapiranja uz pomoć SOM-e kao i dodeljivanje boje vektoru težine u cilju vizualizacije sličnosti

6 EKSPERIMENTALNA ANALIZA

6.1. CILJ EKSPERIMENTA

Cilj eksperimentalne verifikacije jeste potvrda postavljene hipoteze rada a to je da primenom metoda veštačke inteligencije, posebno metoda nadgledanih i nenadgledanih neuronskih mreža kao i metoda redukcije dimenzionalnosti skupa obeležja, moguće pouzdano identifikovati tip oštećenja zupčastog para kao i njegov nivoa. U ovom konkretnom slučaju cilj je bio pouzdana detekcija različitih otkaza (oštećenja) zupčanika i to:

1. ispravan zupčasti par,
2. zupčanik sa nedostajućim delovima jednog zuba u dva koraka – nivoa oštećenja (okrznut zub zupčanika),
3. zupčanik sa jednim nedostajućim zubom,
4. naprslina u korenu zuba u četiri koraka - nivoa oštećenja,
5. pohaban zupčasti par u tri koraka - nivoa oštećenja,
6. kombinacija svih navedenih parametara.

6.2. POSTAVKA EKSPERIMENTA – OPIS PROBNOG STOLA

Za potrebe izvođenja opisanog eksperimenta projektovan je a nakon toga i izrađen, probni sto odnosno model rotirajuće mašine sa zupčastim prenosnikom. Probni sto je zamišljen na način da je na njemu lako izvodljivo:

1. kontinualna i diskretna promena brzine obrtanja zupčastog para,
2. uvođenje oštećenja ležajeva,
3. uvođenje oštećenja zupčastih parova,
4. analiza uticaja opterećenja zupčastog para na nivo i sadržaj vibracionog signala.



SLIKA 6-1. Probni sto za analizu vibracija rotirajućih mašina sa zupčastim prenosnicima

Probni sto se sastoji od jednostepenog zupčastog prenosnika, slika 6-1. Odabrani tipovi zupčanika za eksperimentalna ispitivanja su zupčanici sa kosim zubima kao najčešće korišteni tip zupčanika u industriji. Podmazivanje zupčastog para je provedeno potapanjem u ulju. Za pogon ulaznog vratila zupčastog prenosnika korišten je asinhroni elektromotor snage od 2.2 kW na koji je, u cilju kontrolisane promene broja obrtaja i obrtnog momenta, povezan frekventni regulator. Izlazni rukavac elektromotora je preko elastične spojnice povezan sa ulaznim vratilom zupčastog prenosnika.

Izlazno vratilo zupčastog prenosnika povezano je sa vratilom asinhronog elektromotora snage 4 kW koji je u cilju ostvarenja opterećenja povezan sa drugim frekventnim regulatorom i korišten kao DC generator disipirajući generisanu energiju na pripadajuće otpornike. Ulazno vratilo pogonskog AC motora kao i vratilo DC generatora (obebeđivanja konstantnog momenta kočenja) je u odnosu na vratila zupčastog para poravnato laserskim uređajem za centriranje kako bi se eliminisao uticaj nesaosnosti vratila u toku ispitivanja. Brzina rotacije kao i moment opterećenja je podešavan na ulaznom vratilu zupčastog prenosnika.

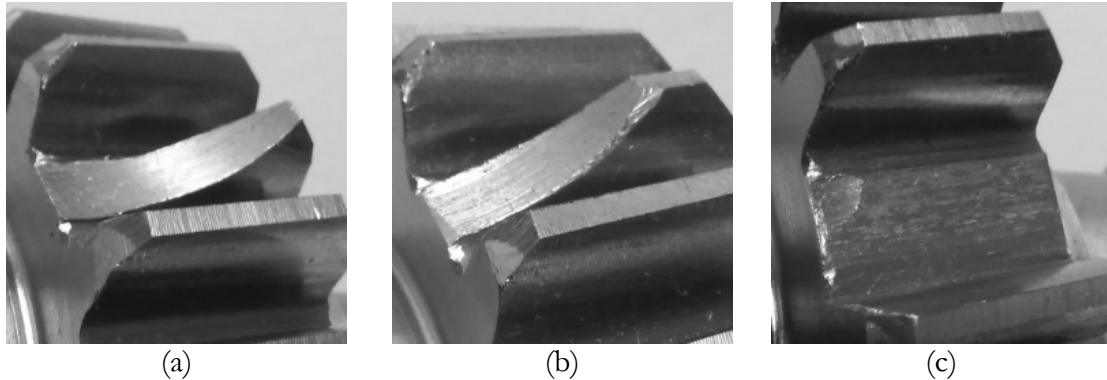
Broj obrtaja se meri laserskim beskontaktnim mernim pretvaračem i koristi se za predprocesiranje signala vibracija. Merenje vibracija je vršeno preko akcelerometra montiranog na kućište zupčastog prenosnika koji je pričvršćen preko usadnog vijaka u vertikalnom pravcu na lokaciji ležaja ulaznog zupčanika do pogonskog motora. Lokacija merenja vibracije je određena na način da se odabrala lokacija sa najvećim amplitudama ubrzanja vibracija mereći u sva tri ortogonalna pravca na oba ležaja ulaznog vratila u sva tri ortogonalna pravca. Kotrljajni ležajevi zupčastog prenosnika su tipa 6203 proizvođača SKF kako na ulaznom tako i na izlaznom vratilu. Zupčanici zupčastog prenosnika su sa kosim zupcima bez pomeranja profila sledećih karakteristika: ulazni zupčanik sa 25 zuba i izlazni zupčanik sa 57 zuba, modula 3.0 mm

Rb.	Obeležje zupčanika	Oznaka	Zp	Zg	Jed. m.
1.1	Broj zuba pogonskog / gonjenog	z	25	57	
1.2	Širina boka pogonskog / gonjenog	b	20	21	[mm]
1.3	Normalni modul	mn	3		[mm]
1.4	Poprečni modul	mt	3.0488		[mm]
1.5	Korak	p	9.425		[mm]
1.6	Normalni korak	pt	9.578		[mm]
1.7	Osnovni korak	ptb	8.983		[mm]
1.8	Oсно растоjanje	a	125.0000		[mm]
1.9	Proizvodno osno растоjanje	av	125.0000		[mm]
1.10	Radno osno растоjanje	aw	125.0000		[mm]
1.11	Ugao dodirnice	a	20.00		[°]
1.12	Normalni ugao dodirnice	at	20.2989		[°]
1.13	Ugao dodirnice na koraku cilindra	awn	20.0000		[°]
1.14	Normalni ugao dodirnice na koraku	awt	20.2988		[°]
1.15	Ugao nagiba zuba	b	10.26		[°]
1.16	Osnovni ugao nagiba zuba	bb	9.6381		[°]
1.17	Temeni prečnik	da	82.2195	179.7805	[mm]
1.18	Referentni prečnik	d	76.2195	173.7805	[mm]
1.19	Osnovni prečnik	db	71.4860	162.9880	[mm]
1.20	Prečnik korena	df	68.7195	166.2805	[mm]
1.21	Radni prečnik	dw	76.2195	173.7805	[mm]
1.22	Temeni deo	ha	3.0000	3.0000	[mm]
1.23	Podnožni deo	hf	3.7500	3.7500	[mm]
1.24	Debljina zuba na temenom prečniku	sna	2.1747	2.3567	[mm]
1.25	Debljina zuba na temenom prečniku	sta	2.2158	2.3976	[mm]
1.26	Debljina zuba na podeon. prečniku	sn	4.7124	4.7124	[mm]
1.27	Debljina zuba na podeon. prečniku	st	4.7890	4.7890	[mm]
1.28	Debljina zuba na prečniku korena	sb	5.3903	7.1774	[mm]
1.29	Jedinica deblj. zuba na tem. prečniku	sa*	0.7386	0.7992	[modul]
1.30	Korekcija	dY	0.0000		[modul]
1.31	Ukupna korekcija	x1+x2	0.0000		[modul]
1.32	Korekcija profila zuba	x	0.0000	0.0000	[modul]

TABELA 6-1. Osnovne dimenzije eksperimentalnog zupčastog para korištenog na probnom stolu

Generisanje (izazivanje) oštećenja zupčanika vršeno je diskretno, unošenjem oštećenja kako lokalnih tako i distribuiranih, nasilnim metodama. U ovom radu je u cilju dobijanja oštećenja zupčanika korišteno:

1. Oštećenje OKRZNUT ZUB (u dva koraka) - pločasto glodalo za žlebove prečnika 40 mm. Generisanje oštećenja je vršeno na glodalici pri čemu je kontrolisano glodan jedan zub zupčanika u dva koraka, slika 6-2 a i b



SLIKA 6-2. Korišteni zupčanik sa oštećenjem - okrznut zub, a – 0,25c mm, b – 0,5c mm, c – 1xc

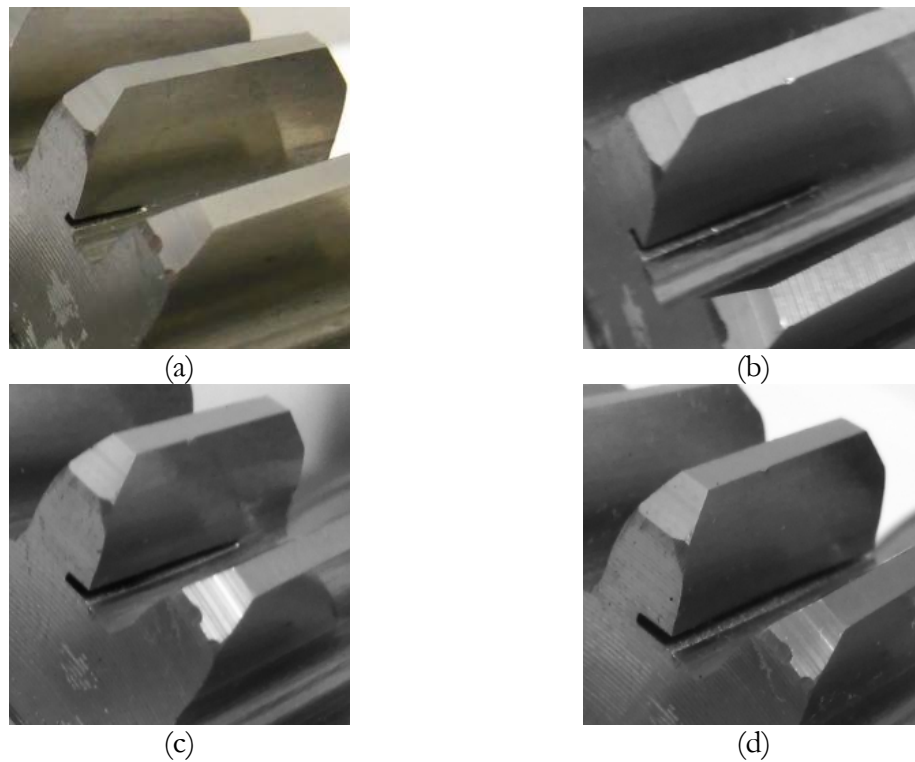
Geometrije različitih nivoa okrznutog zuba su prikazane u tabeli 6-2. Simulacija okrznutog zuba, je kao što je već navedeno, vršena uz pomoć pločastog glodala. Veličina oštećenja je definisana na način da se sa predmetnim glodalom prečnika 40 mm oštećivao jedan zub zupčanika na način da se isti oštećuje od korena do vrha menjajući veličinu oštećenja na osnovu širine zupčanika.

U konkretnom slučaju širina zupčanika je iznosila $c = 20$ mm. Veličina okrznutog zuba kroz dva koraka se kretala 0,25 i 0,5 širine zupčanika, dok je za oštećenje nedostajući zub ta širina odgovarala kompletnoj širini zupčanika, tabela 6-2.

Veličina okrznuća (%)	Širina (mm)
0	0
25	0,25c
50	0,5c
100	c

TABELA 6-2. Geometrije različitih nivoa okrznutog zuba

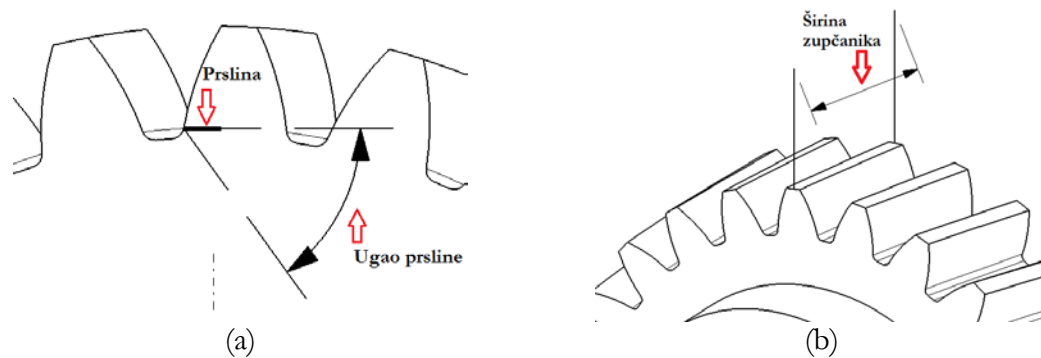
2. Oštećenje NEDOSTAJUĆI ZUB - pločasto glodalo za žlebove prečnika 40 mm. Generisanje oštećenja je vršeno na glodalici pri čemu je izglođan jedan zub zupčanika, slika 6-2 (c)
3. Oštećenje NAPRSLINA u korenu zuba (u četiri koraka) – za unošenje ove vrste oštećenja korišten je erozimat sa elektrodom od bakra debljine 0.5 mm, slika 6-3.



SLIKA 6-3. Korišteni zupčanik sa oštećenjem – naprslina u korenu zuba, (a) 5x0.5, (b) 10x0.5, (c) 15x0.5, (d) 20x0.5

Geometrije različitih nivoa naprsline su prikazane u tabeli 6-3. Naprsline u korenu zuba su, kao što je već navedeno, nasilno rađene uz pomoć erozimata elektrodom debljine 0,5 mm. U cilju simulacije oštećenja naprsline u korenu zuba dubine naprsline su definisane u odnosu na debljinu zuba na podeonom prečniku zupčanika uz osnovni razlog što brz lom zuba nastupa ukoliko je naprslina veća od debljine zuba na podeonom prečniku.

U konkretnom slučaju debljina zuba na podeonom prečniku je iznosila $d = 4,78$ mm. Širina naprsline kroz četiri koraka se kretala 0,25, 0,5, 0,75 i 1 puta širine zupčanika $c = 20$ mm, tabela 6-3. Ugao pukotine je 0 stepeni. Šematski prikaz dimenzija i odnosa prsline su prikazane na slici 6-4.

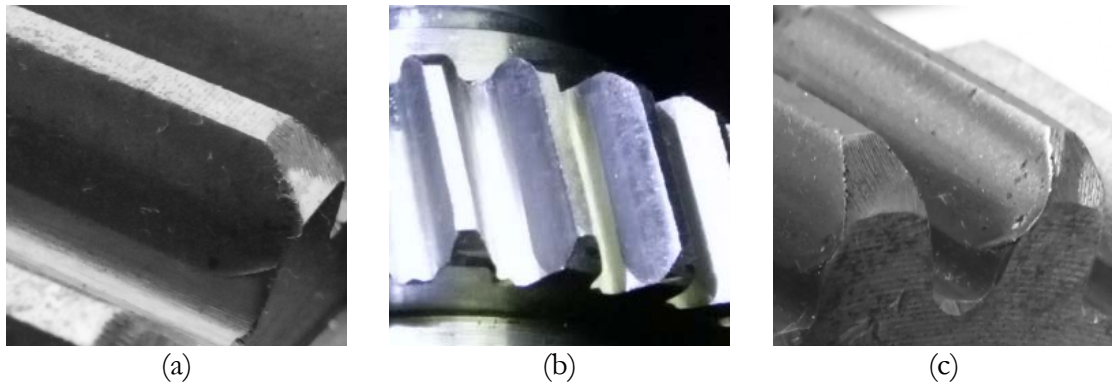


SLIKA 6-4. Šematski prikaz dimenzija naprsline: (a) – ugao naprsline, (b) – širina zupčanika

Veličina naprsline (%)	Dubina (mm)	Širina (mm)	Debljina (mm)	Ugao (step)
0	0	0	0,5	0
25	0,25d	0,25c	0,5	0
50	0,5d	0,5c	0,5	0
75	0,75d	0,75c	0,5	0
100	d	c	0,5	0

TABELA 6-3. Geometrije različitih nivoa naprsline

4. Oštećenje POHABANI zubi zupčastog para (u tri koraka) – dobijeno na način da je u ulje za podmazivanje ubačena određena količina kvarcnog peska i zupčasti par pušten u rad u trajanju od 10 minuta, slika 6-5. Nakon svakog koraka je vršeno merenje mere preko zuba kao kontrolne mere, odnosno u konkretnom slučaju kao mere kvantifikacije količine pohabanosti kako pogonskog tako i gonjenog zupčanika, tabela 6-4. Ovako oštećeni zubi zupčanika će rezultirati promenom profila zuba što i jeste slučaj kod habanja kao oštećenja zupčanika.



SLIKA 6-5. Zupčanik sa oštećenjem – pohabani zubi, (a) - nivo 1, (b) - nivo 2, (c) – nivo 3

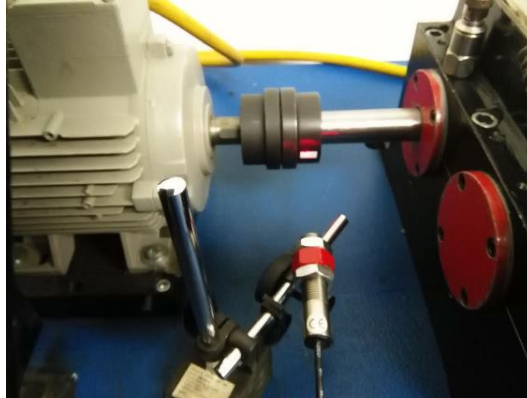
Broj zuba koji je korišten u toku merenja mere preko zuba je za pogonski zupčanik četiri dok je za gonjeni zupčanik sedam. Prečnik valjka prilikom merenja mere preko zuba je 5,25 mm. U toku merenja mere preko zuba korišten je mikrometar sa preciznošću od 0,001 mm i konačna mera preko zuba na oba zupčanika je utvrđena aritmetičkom sredinom nakon 8 merenja na različitim položajima po obimu zupčanika. Merenja su sprovedena nakon procesa unošenja oštećenja, a pre samih merenja vibracija.

Veličina pohabanosti	Pogonski zupčanik (mm)	Gonjeni zupčanik (mm)	Neoštećen pog. zupčanik (mm)	Neoštećen gonje. zupčanik
Nivo 1	82.816	179.395	82.910	179.390
Nivo 2	82.599	179.352	82.910	179.390
Nivo 3	82.477	179.268	82.910	179.390

TABELA 6-4. Dimenzije različitih nivoa pohabanosti zupčanika izražene preko mere preko zuba

6.3. POSTAVKA EKSPERIMENTA – OPIS MERNOG LANCA

Za merenje broja obrtaja korišten je optički beskontaktni laserski davač broja obrtaja SPLS-5³⁸ čiji je TTL signal dalje vođen u merno pojačalo, slika 6-6.



SLIKA 6-6. Laserski davač broja obrtaja i reflektujuća markica

Za snimanje odziva (vibracija) na kućištu ležajeva korišten je industrijski IEPE akcelerometar AC102-1A³⁹. Isti je montiran na kućište ležaja u vertikalnom pravcu. Signali broja obrtaja i vibracija se dalje vode u digitalno merno pojačalo. Korišten je dvokanalni sistem za merenje i analizu vibracija OneproD MVP-2C⁴⁰ u Premium varijanti i pratećim softverom za merenje i analizu XPR-300 Premium ver 4.6.1. i VibGraph ver 7.9

6.4. OPIS TESTOVA I MERNIH VELIČINA

Testovi koji su izvedeni nad modelom zupčastog prenosnika obuhvataju analizu:

1. Nasilnom metodom unesenih oštećenja zupčastog para prethodno navedenih i opisanih,
2. Ispravan zupčasti par.

Testovima su obuhvaćene sve opisane kombinacije tipa oštećenih zupčanika uz neoštećen zupčasti par. Za svaki od pojedinačnih testova su dati rezultati:

1. Osnovne statističke analize snimljenih podataka,
2. Rezultati detekcije prisustva oštećenja korišćenjem frekventnih spektara,
3. Rezultati detekcije prisustva i kvantifikacije oštećenja korišćenjem statističkih pokazatelja izdvojenih iz, kako frekventnih spektara, tako i Cepstrum funkcije.

Odabrani broj obrtaja ulaznog vratila zupčastog para kod svih testova je 49 Hz (2760 min-1). S obzirom na broj zubi korištenih zupčanika, frekvencije uzupčavanja (GMF) pri odabranom broju obrtaja i njihovi harmonici su prikazani u tabeli 6-5:

³⁸ Proizvođač Monarch Instrument, USA

³⁹ Proizvođač Connection Technology Center CTC, USA

⁴⁰ Proizvođač ACOEM GROUP, Francuska

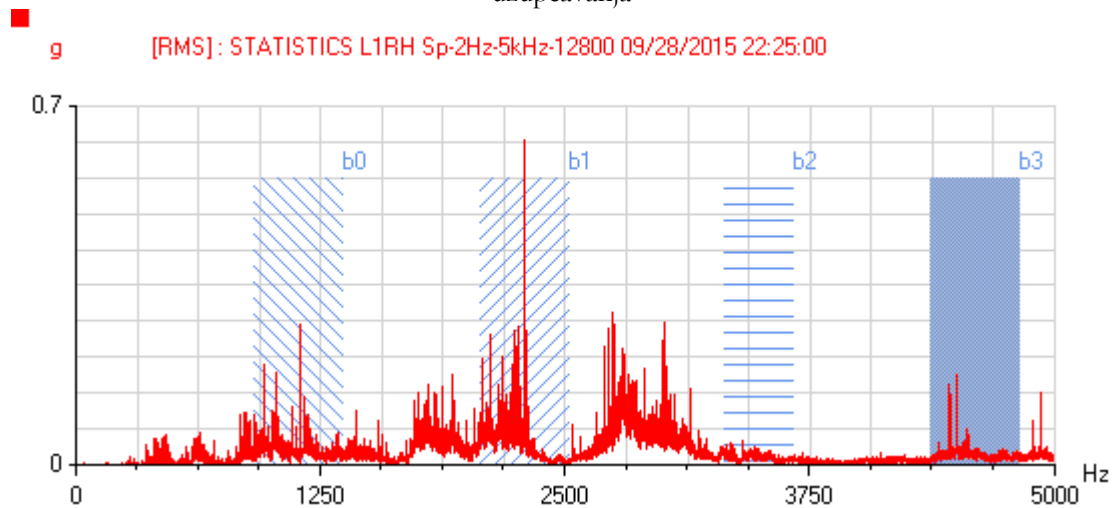
1 x GMF [Hz]	2 x GMF [Hz]	3 x GMF [Hz]	4 x GMF [Hz]	5 x GMF [Hz]
1150	2300	3450	4600	5750

TABELA 6-5. Frekvencije uzupčavanja i njihovi harmonici

S obzirom da je od interesa i analiza fenomena modulacije na bazi skalarnog parametra definisani su i diskretni frekventni opsezi (EMF) oko svakog od harmonika frekvencije uzupčavanja. Odabrana je širina opsega od pet frekvencija modulacije (frekvencija uzupčavanja $\pm 5 \times$ broj obrtaja). Tako definisani frekventni opsezi, odnosno donje i gornje granice svakog od diskretnih opsega su prikazani u tabeli 6-6:

1 x EMF [Hz]	2 x EMF [Hz]	3 x EMF [Hz]	4 x EMF [Hz]	5 x EMF [Hz]
920 1380	2070 2530	3220 3680	4370 4830	5520 5980

TABELA 6-6. Donje i gornje granice diskretnih frekventnih opsega oko harmonika frekvencija uzupčavanja



SLIKA 6-7. Frekventni spektar do 5 kHz sa probnog stola sa prikazanim diskretnim frekventnim pojasevima za ocenu energije sadržane u delovima spektra

Snimanjem je obuhvaćeno merenje sledećih signala:

1. Broj obrtaja rotora, konstantan broj obrtaja od 46 Hz,
2. Moment na ulaznom vratilu zupčastog prenosioca, konstantan obrtni moment od 7 Nm.
3. Vibracija na kućištu zupčastog prenosioca ulaznog vratila iznad ležaja (do motora) u vertikalnom pravcu – LRV kao reprezentativna lokacija.

Kao veličine koje se mere (reprezentativna obeležja signala) su odabrana 32 obeležja ekstraktovana iz vremenskog i frekventnog domena sračunatih na osnovu postprocesiranja sledećih vektorskih iskaza vibracija:

1. Vremenski zapis snimljen sa frekvencijom uzorkovanja od 25.6 kHz (širina obuhvaćenog frekventnog opsega 10 kHz) sa ukupno 128000 tačaka, visokopojasno filtriran sa graničnom frekvencijom od 2 Hz, označen kao „T-25.6 kHz-128K“.

2. Sinhrono osrednjeni vremenski zapis uzorkovan frekvencijom od 25.6 kHz i sa ukupno 100 sinhronih osrednjavanja, označen kao „TSA“.
3. Uskopojasni frekventni spektar opsega do 5 kHz sa 12800 frekventnih linija (rezolucija spektra 0.390 Hz), visokopojasno filtriran sa odsečnom frekvencijom od 2 Hz, označen kao „SP-2 Hz-5 kHz 12800L“.
4. Uskopojasni frekventni spektar vremenski osrednjenog signala opsega do 10 kHz, sa 6400 frekventnih linija (rezolucija spektra 1.5625 Hz), visokopojasno filtriran sa odsečnom frekvencijom od 2 Hz, označen kao „SPTSA-2 Hz-10 kHz 6400L“.
5. Cepstrum funkcija dobijena na osnovu uskopojasnog frekventnog spektra (SP-2 Hz-5 kHz 12800L), označena kao „Cepstrum“.
6. Cepstrum funkcija dobijena na osnovu uskopojasnog frekventnog spektra vremenski osrednjenog signala (SPTSA-2 Hz-10 kHz 6400L), označena kao „CepstrumTSA“.
7. Autokorelacijska funkcija sirovog vremenskog signala, označena kao „AutoCorrelation“.
8. Autokorelacijska funkcija vremenski osrednjenog signala (TSA), označena kao „AutoCorrelation_TSA“.

Na osnovu navedenih vektorskih iskaza postprocesirana su sledeća skalarna obeležja vibracionog signala:

1. Srednja kvadratna vrednost brzine vibracija [mm/s] signala u frekventnom opsegu 10Hz – 1 kHz. Labela parametra – „OLRMS“.
2. Nivo sumarnog ubrzanja [g] u frekventnom opsegu 10 Hz – 20 kHz. Labela parametra – „OLACC“.
3. Amplituda prvog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „1xGMF“.
4. Amplituda drugog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „2xGMF“.
5. Amplituda trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „3xGMF“.
6. Amplituda četvrtog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „4xGMF“.
7. Energija sadržana oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „1xEGMF“.
8. Energija sadržana oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „2xEGMF“.
9. Energija sadržana oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „3xEGMF“.
10. Energija sadržana oko četvrtog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „4xEGMF“.
11. Faktor modulacije oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „1xMF“.
12. Faktor modulacije oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „2xMF“.
13. Faktor modulacije oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „3xMF“.
14. Faktor modulacije oko četvrtog harmonika frekvencije uzupčavanja. Labela parametra – „4xMF“.

15. Kurtosis parametar izveden iz sirovog vremenskog signala. Labela parametra – „KURT_SIR“.
16. Kurtosis parametar izveden iz vremenski osrednjenog signala (TSA). Labela parametra – „KURT_TSA“.
17. Kurtosis parametar izveden iz autokorelacijske funkcije sirovog vremenskog signala (AutoCorrelation). Labela parametra – „KURT_AK“.
18. Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika. Labela parametra – „HS“.
19. Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika. Labela parametra – „LS“.
20. Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika. Labela parametra – „LS_M_HS“.
21. Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika. Labela parametra – „LS_P_HS“.
22. Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika. Labela parametra – „HSC“.
23. Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika. Labela parametra – „LSC“.
24. Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika. Labela parametra – „HSC_M_LSC“.
25. Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika. Labela parametra – „HSC_P_LSC“.
26. Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“. Labela parametra – „CHI“.
27. Peak to peak parametar sirovog vremenskog signala. Labela parametra – „PP_SIR“.
28. Peak to peak parametar vremenski osrednjenog signala. Labela parametra – „PP_TSA“.
29. Peak parametar (vršna vrednost) sirovog vremenskog signala. Labela parametra – „PK_SIR“.
30. Peak parametar (vršna vrednost) vremenski osrednjenog signala. Labela parametra – „PK_TSA“.
31. Crest faktor (CF) sirovog vremenskog signala, parametar koji predstavlja relativni odnos Peak vrednosti i RMS vrednosti. Labela parametra – „CF_SIR“.
32. Crest faktor (CF) vremenski osrednjenog signala, parametar koji predstavlja relativni odnos Peak vrednosti i RMS vrednosti. Labela parametra – „CF_TSA“.

6.5. TEST 1 – DETEKCIJA OKRZNUTOG ZUBA ZUPČANIKA KROZ TRI KORAKA

Kao oštećenje zupčastog para uvedeno je okrznuće zuba zupčanika na jednom zubu pogonskog zupčanika dok su ostali zubi kako pogonskog tako i gonjenog zupčanika bili neoštećeni. Uvedena su tri nivoa okrznuća. U skladu objašnjenim načinom unošenja oštećenja, okrznuća su:

- okrznuće 0% - Labela „OZ0“;
- okrznuće 25% - Labela „OZ1“;
- okrznuće 50% - Labela „OZ2“;
- okrznuće 100% - Labela „OZ3“.

Za detekciju nivoa okrznutog zuba pogonskog zupčanika korištena je ulazna matrica sa:

- svim snimljenim podacima – ukupno 32 obeležja vibracionog signala,
- samo sa obeležjima koji su uticajni nakon sprovedene PCA analize.

Za svaki nivo oštećenja okrznutog zuba pogonskog zupčanika snimljeno je ukupno 500 zapisa što čini ukupno 2000 zapisa za kompletan test. Datoteka sa ulaznim podacima za kompletan set obeležja se nalazi u fajlu na priloženom CD-u: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZK.txt“ dok se datoteka redukovanog seta obeležja nakon provedene PCA analize nalazi u fajlu: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZR.txt“ u istom direktorijumu.

Obeležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Makimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.61800	1.61506	1.36869	1.82448	0.100174
OLACC	3.91207	3.93830	3.33849	4.27831	0.207147
1xGMF	0.45802	0.45814	0.40738	0.50408	0.024589
2xGMF	0.62455	0.62230	0.47424	0.81377	0.074675
3xGMF	0.02550	0.02547	0.01469	0.04079	0.005766
4xGMF	0.04260	0.04232	0.02751	0.05957	0.007129
1xEGMF	1.00740	1.00863	0.89170	1.06875	0.034065
2xEGMF	1.82104	1.82361	1.68238	1.91564	0.041829
3xEGMF	0.38567	0.38882	0.33694	0.40756	0.013724
4xEGMF	0.47848	0.47917	0.41787	0.54673	0.028908
1xMF	2.20571	2.19507	1.93659	2.50796	0.138354
2xMF	2.95644	2.91145	2.18943	3.80090	0.352156
3xMF	15.95779	15.02277	9.55650	26.29093	3.899769
4xMF	11.62533	11.23220	7.61656	19.01765	2.495937
KURT_SIR	4.52375	4.48779	4.22767	5.01873	0.187274
KURT_TSA	2.59616	2.58361	2.30408	2.97151	0.107960
KURT_AK	2.37360	2.25289	1.70488	3.57497	0.420173
HS	0.00025	0.00026	0.00017	0.00034	0.000040
LS	0.00277	0.00278	0.00172	0.00408	0.000698
LS_M_HS	0.00251	0.00249	0.00144	0.00385	0.000697
LS_P_HS	0.00302	0.00301	0.00201	0.00431	0.000701
HSC	1.01960	1.02055	0.66200	1.36347	0.159144
LSC	0.98826	0.99396	0.61496	1.45802	0.249353
HSC_M_LSC	0.03134	0.05514	-0.68458	0.61667	0.289463

HSC_P_LSC	2.00787	1.97077	1.40551	2.57981	0.302024
CHI	0.02502	0.03204	-0.31251	0.32609	0.144673
PP_SIR	42.66529	42.78603	37.10882	46.95178	2.135184
PP_TSA	5.67653	5.50210	4.60064	7.65524	0.554589
PK_SIR	23.24528	23.20505	19.85803	27.33165	1.469769
PK_TSA	2.78882	2.71308	2.25457	3.98810	0.325251
CF_SIR	5.95434	5.87846	5.23267	7.13782	0.440443
CF_TSA	3.23454	3.21658	2.86458	3.77043	0.227655

TABELA 6-7. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik bez oštećenja, labela “OZ0”

Obeležje	Srednja vrednosot	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.46405	1.48342	1.22013	1.59500	0.092825
OLACC	3.47992	3.50935	3.04225	3.74420	0.172479
1xGMF	0.40856	0.41068	0.26333	0.51940	0.056313
2xGMF	0.51867	0.50904	0.42511	0.69343	0.053469
3xGMF	0.02498	0.02503	0.01724	0.03536	0.004874
4xGMF	0.04117	0.04130	0.02463	0.06109	0.007225
1xEGMF	0.88366	0.89178	0.71260	0.97927	0.061404
2xEGMF	1.55030	1.53935	1.41473	1.74398	0.083282
3xEGMF	0.36635	0.36964	0.30993	0.39287	0.016289
4xEGMF	0.47686	0.48027	0.38536	0.53455	0.034617
1xMF	2.18713	2.17994	1.87845	2.77509	0.187000
2xMF	3.01067	3.01412	2.41220	3.64507	0.252781
3xMF	15.26097	14.43041	8.96064	21.85467	3.195523
4xMF	12.02043	11.41760	8.18987	20.81783	2.744817
KURT_SIR	4.80845	4.76529	4.35280	5.43260	0.247577
KURT_TSA	2.72285	2.66855	2.41563	3.31959	0.176313
KURT_AK	2.46764	2.39924	1.69877	3.32542	0.383927
HS	0.00015	0.00014	0.00009	0.00024	0.000041
LS	0.00231	0.00218	0.00109	0.00420	0.000712
LS_M_HS	0.00216	0.00207	0.00099	0.00402	0.000701
LS_P_HS	0.00246	0.00234	0.00119	0.00438	0.000724
HSC	0.59296	0.55240	0.34999	0.94980	0.163285
LSC	0.82411	0.77970	0.38833	1.49919	0.254136
HSC_M_LSC	-0.23115	-0.19320	-0.95712	0.21392	0.259641
HSC_P_LSC	1.41708	1.38505	0.78451	2.21233	0.339236
CHI	-0.15362	-0.14283	-0.48922	0.15196	0.158511
PP_SIR	38.59982	38.50960	34.47156	43.12061	1.762665
PP_TSA	5.28878	5.09574	3.60488	7.41546	0.778140
PK_SIR	19.41613	19.44484	17.79172	20.88045	0.755295
PK_TSA	2.69010	2.60285	1.91377	3.86709	0.395447
CF_SIR	5.58801	5.52903	5.21297	6.49063	0.256867

CF_TSA	3.50524	3.48737	2.85948	4.39009	0.296128
--------	---------	---------	---------	---------	----------

TABELA 6-8. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa prvim nivoom okrnjuća zuba, labela “OZ1”

Obeležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.53207	1.54202	1.27376	1.69274	0.101121
OLACC	3.63833	3.71820	3.12752	3.91182	0.187289
1xGMF	0.33813	0.34002	0.19143	0.45814	0.076129
2xGMF	0.62681	0.62374	0.52541	0.78253	0.049979
3xGMF	0.03615	0.03641	0.02377	0.04688	0.005113
4xGMF	0.05040	0.04969	0.03569	0.07534	0.008460
1xEGMF	0.87904	0.88547	0.72769	0.97279	0.060432
2xEGMF	1.77253	1.78456	1.55051	1.86258	0.058817
3xEGMF	0.38927	0.38830	0.34089	0.42036	0.015081
4xEGMF	0.50812	0.51329	0.41180	0.55303	0.031013
1xMF	2.70791	2.60943	2.10231	4.09684	0.494883
2xMF	2.84353	2.83611	2.26725	3.30086	0.216506
3xMF	10.99731	10.85351	8.09624	14.92348	1.678105
4xMF	10.36389	10.20491	6.68620	15.09510	1.825166
KURT_SIR	4.85877	4.81731	4.54799	5.31125	0.191525
KURT_TSA	2.71731	2.64837	2.46702	3.22997	0.178036
KURT_AK	2.28849	2.15559	1.53881	3.36838	0.541609
HS	0.00018	0.00020	0.00007	0.00032	0.000061
LS	0.00186	0.00188	0.00106	0.00258	0.000373
LS_M_HS	0.00168	0.00169	0.00090	0.00248	0.000384
LS_P_HS	0.00205	0.00208	0.00117	0.00278	0.000372
HSC	0.73265	0.79924	0.26144	1.29710	0.243329
LSC	0.66538	0.67112	0.37875	0.92285	0.133257
HSC_M_LSC	0.06727	0.07176	-0.50693	0.71612	0.289515
HSC_P_LSC	1.39803	1.41005	0.77210	2.03355	0.264790
CHI	0.02707	0.06476	-0.43469	0.39888	0.209251
PP_SIR	42.11197	42.26118	36.16724	48.02324	2.336795
PP_TSA	5.84312	5.61102	4.81497	8.39157	0.779189
PK_SIR	21.74320	21.74405	19.06979	25.32366	1.436296
PK_TSA	2.89576	2.81276	2.29241	4.12274	0.385505
CF_SIR	5.98292	5.99699	5.26122	6.96390	0.372079
CF_TSA	3.56101	3.52686	3.03416	4.66892	0.336757

TABELA 6-9. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa drugim nivoom okrnjuća zuba, labela “OZ2”

Obeležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.66830	1.68252	1.39308	1.93182	0.103692
OLACC	3.74116	3.75632	3.07797	4.26349	0.226303
1xGMF	0.23966	0.23578	0.08630	0.45709	0.082719

2xGMF	0.58978	0.59088	0.45973	0.70388	0.058401
3xGMF	0.03466	0.03475	0.02407	0.04629	0.004763
4xGMF	0.04088	0.04116	0.02278	0.05814	0.008652
1xEGMF	0.93912	0.95417	0.78513	1.10952	0.070691
2xEGMF	1.67071	1.68215	1.38246	1.79646	0.072743
3xEGMF	0.39789	0.39995	0.33557	0.42947	0.019221
4xEGMF	0.65410	0.66903	0.48321	0.73205	0.050737
1xMF	4.31992	4.06080	2.42736	9.54663	1.307446
2xMF	2.85545	2.81245	2.33721	3.46649	0.254654
3xMF	11.68467	11.59661	8.54930	15.26907	1.582918
4xMF	16.64336	15.84825	11.49199	25.31362	3.235033
KURT_SIR	4.92216	4.90884	4.61900	5.29519	0.143288
KURT_TSA	2.80930	2.78176	2.54410	3.35698	0.151010
KURT_AK	2.09553	1.85867	1.56053	3.25034	0.508418
HS	0.00024	0.00023	0.00011	0.00043	0.000079
LS	0.00064	0.00066	0.00026	0.00104	0.000184
LS_M_HS	0.00040	0.00042	0.00006	0.00077	0.000167
LS_P_HS	0.00088	0.00090	0.00038	0.00132	0.000229
HSC	0.96485	0.93414	0.44155	1.70309	0.315576
LSC	0.22893	0.23659	0.09333	0.37285	0.065696
HSC_M_LSC	0.73592	0.67991	0.28656	1.51335	0.294131
HSC_P_LSC	1.19378	1.11413	0.56702	1.98334	0.348275
CHI	0.60364	0.60651	0.37870	0.79951	0.101115
PP_SIR	46.68961	46.22332	40.70620	55.42744	2.756492
PP_TSA	6.00283	5.83836	4.92924	9.12786	0.718627
PK_SIR	24.51060	24.37733	21.31663	29.66597	1.762026
PK_TSA	2.77991	2.73017	2.10097	4.33894	0.357206
CF_SIR	6.56238	6.54929	5.73645	7.79916	0.446155
CF_TSA	3.62622	3.54102	3.05572	4.93345	0.379986

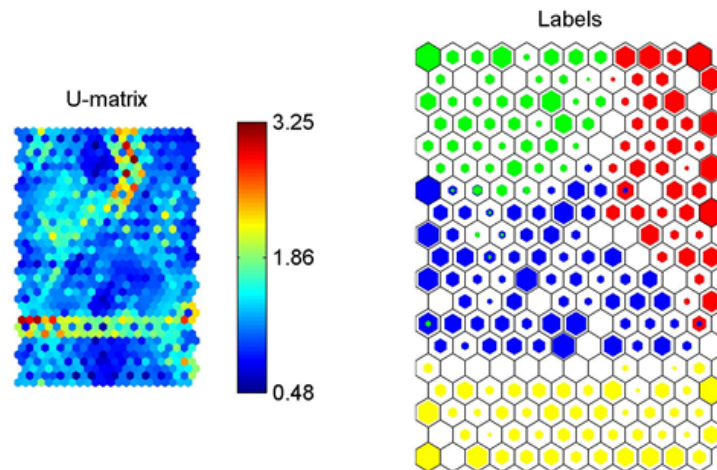
TABELA 6-10. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa trećim nivoom okružna zuba, labela “OZ3”

6.5.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIIH SAMOORGANIZOVANIIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

U cilju razvoja samoorganizovanih Kohonenovih mapa u okviru ovog rada korišćeno je Matlab programsko okruženje i SOM Toolbox verzija 2.0. Detekcija nivoa okružna zuba u prisustvu je obavljena korišćenjem matrice ulaznih podataka sa 32 navedena obeležja. Dalje u tekstu su dati rezultati obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa i to:

- greške kvantizacije mape,
- normalizovane matrice rastojanja,
- prikaz topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora i
- projekcije pojedinih obeležja na mapi.

Greška kvantizacije je definisana kao srednje rastojanje između ulaznih vektora i njihovih pobjedničkih neurona i predstavlja ocenu rezolucije mape. Kao metoda normalizacije ulaznih vektora kod svih Kohonenovih mapa obuhvaćenih u ovom radu korištena tzv. „var“ metoda u okviru koje sva ulazna obeležja nakon normalizacije imaju varijansu 1. Dobijena je mapa sa greškom kvantizacije od 2.703 prikazana na slici 6-8. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:
 „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZK.mat“.



SLIKA 6-8. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 1 kompletnog seta obeležja mape (desno)⁴¹

6.5.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Kako je i napomenuto, u cilju razvoja modela za identifikaciju stanja zupčastog para odnosno klasifikaciju tipa otkaza, u okviru ovog rada, primenom metoda nadgledanog obučavanja, korišćene su višeslojne perceptronske neuronske mreže sa širenjem izlazne greške unazad i sa jednim slojem skrivenih neurona. Broj ulaznih neurona je definisan dimenzionalnošću ulaznog vektora dok je broj izlaznih neurona definisan vrstom problema, odnosno prirodom otkaza na mašini. Svaki slučaj obuhvaćen eksperimentalnim delom ovog rada koji je rešavan primenom neuronskih mreža je analiziran sa 30 različitih konfiguracija neuronskih mreža, pri čemu su varirani sledeći parametri mreže:

1. Broj neurona u skrivenom sloju,
2. Tip aktivacionih funkcija neurona u skrivenom sloju. Korištene su sledeće funkcije:
 - a. Bool-ova (binarna) funkcija – dalje u tekstu označena kao „Identity“,
 - b. Logistička sigmoidna funkcija – dalje u tekstu označena kao „Logistic“,
 - c. Hiperbolička tangens funkcija – dalje u tekstu označena kao „Tanh“,
 - d. Softmax funkcija - dalje u tekstu označena kao „Softmax“.
3. Tip aktivacionih funkcija neurona u izlaznom sloju. Korišćeni su isti tipovi eksponencijalnih funkcija.

⁴¹ OZ0-crvena boja, OZ1-zelena boja, OZ2-plava boja, OZ3-zuta boja

4. Tip funkcije za procenu izlazne greške. Korišćene su sledeće formulacije za procenu greške:
- suma kvadrata-dalje u tekstu označena kao „SOS“55,
 - greška unakrsne entropije – dalje u tekstu data kao “Entropy”.

U cilju obuke i provere kvaliteta predviđanja neuronske mreže, setovi podataka ulaznih vektora su po metodi slučajnog izbora podeljeni u tri grupe:

- vektori ulaznih podataka koji se koriste za obučavanje odnosno optimizaciju težinskih koeficijenata neuronskih mreža – 70% članova ulaznog vektora,
- vektori ulaznih podataka koji se koriste za prvu proveru pouzdanosti dobijenih rezultata – 15% članova ulaznog vektora,
- vektori ulaznih podataka koji se koriste za finalnu proveru valjanosti dobijenih rezultata – 15% članova ulaznog vektora.

Neuronske mreže su razvijane i testirane u okviru Matlab programskog okruženja korišćenjem Neural Network toolbox-a kao i u okviru software-a Statistica. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija mreže sa najboljim rezultatima predviđanja. Pregled odabranih parametara odabrane konfiguracije mreže (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške) je dat tabelom 6-11. Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZK.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu.

Rb.	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validati. perf.	Training algorithm	Error Funct.	Hidden activa.	Output activation
20	MLP 32-19-4	97.428	95.666	98.000	BFGS 13	Entropy	Identity	Softmax

TABELA 6-11. Konfiguracija neuronske mreže testa 1 pri korišćenju kompletnog ulaznog vektora obeležja

Broj neurona u okviru ulaznog, skrivenog i izlaznog sloja je dat imenom mreže na način da prva vrednost označava broj ulaznih neurona, srednja vrednost označava broj neurona u skrivenom sloju, dok poslednja vrednost označava broj neurona u izlaznom sloju. Tako na primer konfiguracija MLP 32-19-4 označava višeslojnu perceptronsku mrežu sa 32 ulaznih neurona, 19 neurona u skrivenom sloju i 4 izlazna neurona. Broj etapa obučavanja (epoha, iteracija) je dat vrednošću uz oznaku BFGS. Tako na primer BFGS 13, ukazuje da je primenjen metod propagacije greške unazad pri čemu je izvedeno ukupno 13 iteracija. Kako se da videti iz tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja manju od 100%. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-12. Bitno je napomenuti da analizom matrice konfuzije je vidljivo da odabrana mreža ima tačnost predviđanja od 100% u slučaju nivoa oštećenja OZ3, odnosno za slučaj nedostajućeg kompletno jednog zuba pogonskog zupčanika.

Net. name		LABELA OZ0	LABELA OZ1	LABELA OZ2	LABELA OZ3	LABELA All
20. MLP 32-19-4	Total	349.0000	356.0000	357.0000	338.0000	1400.000
	Correct	345.0000	346.0000	335.0000	338.0000	1364.000
	Incorrect	4.0000	10.0000	22.0000	0.0000	36.000
	Correct (%)	98.8539	97.1910	93.8375	100.0000	97.429
	Incorrect (%)	1.1461	2.8090	6.1625	0.0000	2.571

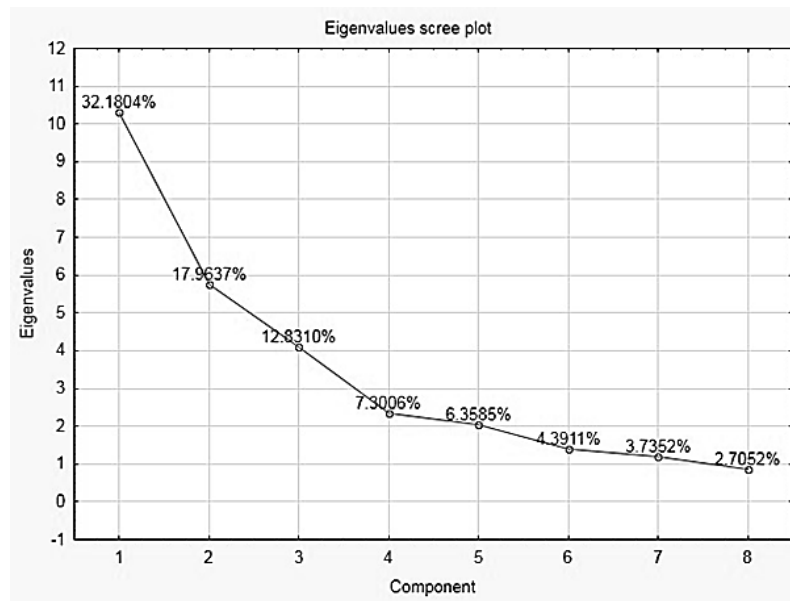
TABELA 6-12. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 1 pri korišćenju kompletnog seta ulaznih obeležja

6.5.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA

Selekcija obeležja je veoma čest problem u klasifikaciji s ciljem pouzdanije dijagnostike oštećenja ili nivoa oštećenosti. Skupovi podataka sa velikim brojem obeležja nisu retkost ni u vibrodijagnostici. Sva obeležja mogu biti važna za neke probleme, ali za neka ciljana istraživanja, samo mali podskup obeležja je obično relevantan. Suma varijansi svih izvornih obeležja je ukupna varijansa. Deo te ukupne varijanse objašnjen jednom glavnom komponentom naziva se svojstvena vrednost ili latentni koren (eigenvalue). Svojstvena vrednost je, kako je već objašnjeno u načinu procene svojstvenih vektora, najveća u prvoj glavnoj komponenti i u svakoj sledećoj njena je vrednost sve manja. Suma svih svojstvenih vrednosti jednaka je ukupnoj varijansi. Cilj je, iteracijskim postupkom, izdvojiti što veći deo ukupne varijanse u tek nekoliko prvih glavnih komponenata, što se uobičajeno izražava u kumulativnim procentima ukupne varijanse, i time reducirati broj izvornih obeležja. Dakle, analiza glavnih komponenata (PCA) se sprovodi na ulaznom skupu obeležja kako bi se definisao skup obeležja manjih dimenzija u cilju pronalaženja MLP-a s boljim performansama. Važnost svakog obeležja izračunata kroz snagu modeliranja bazira se na tome koliko dobro je obeležje zastupljeno od strane PC modela. Obeležja s visokom snagom modeliranja su relevantna za PC modela dok obeležja male snage mogu biti odbačena. Kao rezultat PCA, odabrano je 8 glavnih komponenata čije su svojstvene vrednosti (eigenvalue) prikazane na tabeli 6-13. U tabeli 6-14 prikazan je sažetak analize glavnih komponenata.

Komponenta (obeležje)	Eigenvalues	% Total variance	Cumulative eigenvalue	Cumulative %
PC1	10.29773	32.18041	10.29773	32.18041
PC2	5.74838	17.96369	16.04611	50.14410
PC3	4.10593	12.83102	20.15204	62.97511
PC4	2.33621	7.30065	22.48824	70.27576
PC5	2.03472	6.35850	24.52296	76.63426
PC6	1.40516	4.39113	25.92813	81.02539
PC7	1.19525	3.73517	27.12338	84.76056
PC8	0.86566	2.70520	27.98904	87.46576

TABELA 6-13. Okrznut zub: svojstvena vrednost, individualna i zbirna-kumulativna varijansa glavnih komponenata



SLIKA 6-9. Okrznut zub: individualna varijansa glavnih komponentata

Komponenta (obeležje)	R2X	R2X (Cumul.)	Eigenvalues	Q2	Limit	Q2 (Cumul.)	Signifi.	Iterations
PC1	0.321804	0.321804	10.29773	0.283274	0.031735	0.283274	S	7
PC2	0.179637	0.501441	5.74838	0.197928	0.032742	0.425134	S	12
PC3	0.128310	0.629751	4.10593	0.197414	0.033817	0.538621	S	8
PC4	0.073006	0.702758	2.33621	0.036045	0.034966	0.555251	S	15
PC5	0.063585	0.766343	2.03472	0.146733	0.036198	0.620510	S	27
PC6	0.043911	0.810254	1.40516	0.109621	0.037520	0.662110	S	28
PC7	0.037352	0.847606	1.19525	0.069470	0.038944	0.685584	S	12
PC8	0.027052	0.874658	0.86566	0.002759	0.040482	0.686451	UNK	50

TABELA 6-14. Sažetak_OZK. Odabrani broj glavnih komponentata je 8. 87.4658% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.

Značaj varijable (obeležja) je veoma korisna informacija u analizi glavnih komponentata. S njom se ocjenjuje koliko dobro je varijabla predstavljena koristeći glavne komponente. Ova karakteristika se četo naziva kao snaga i kreće se u rasponu od 0 do 1. Kod modela varijable koje nisu dobro zastupljene, odnosno imaju niske vrednosti snage, iste imaju veću verovatnoću da su beznačajne. Tabela 6-15 prikazuje snagu modeliranja za sva ulazna obeležja kao i njihov značaj. Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 14 obeležja (značaj od 1 do 14) što predstavlja redukovani set obeležja u cilju pronalaženja MLP-a s tačnijom klasifikacijom.

Obeležje	Broj obeležja	Snaga	Značaj
HS	18	0.996638	1
HSC	22	0.996638	2
HSC_P_LSC	25	0.989445	3
HSC_M_LSC	24	0.986590	4
LS_P_HS	21	0.982100	5
LSC	23	0.981837	6

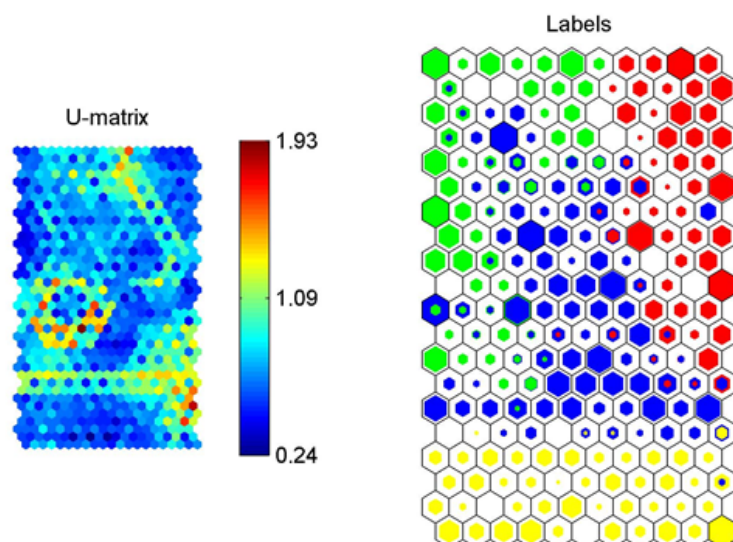
LS	19	0.981837	7
LS_M_HS	20	0.981742	8
CHI	26	0.963083	9
PK_TSA	30	0.956536	10
2xGMF	4	0.930972	11
OLACC	2	0.921997	12
PP_TSA	28	0.921912	13
PK_SIR	29	0.906914	14
1xEGMF	7	0.904021	15
4xGMF	6	0.899266	16
4xMF	14	0.897310	17
1xGMF	3	0.887273	18
KURT_SIR	15	0.884681	19
4xEGMF	10	0.863438	20
1xMF	11	0.856095	21
PP_SIR	27	0.832404	22
KURT_TSA	16	0.800682	23
2xEGMF	8	0.777791	24
3xGMF	5	0.776948	25
KURT_AK	17	0.764052	26
3xEGMF	9	0.753210	27
2xMF	12	0.747826	28
3xMF	13	0.737532	29
CF_SIR	31	0.735047	30
CF_TSA	32	0.708524	31
OLRMS	1	0.664703	32

TABELA 6-15. Okrznut zub: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenata.

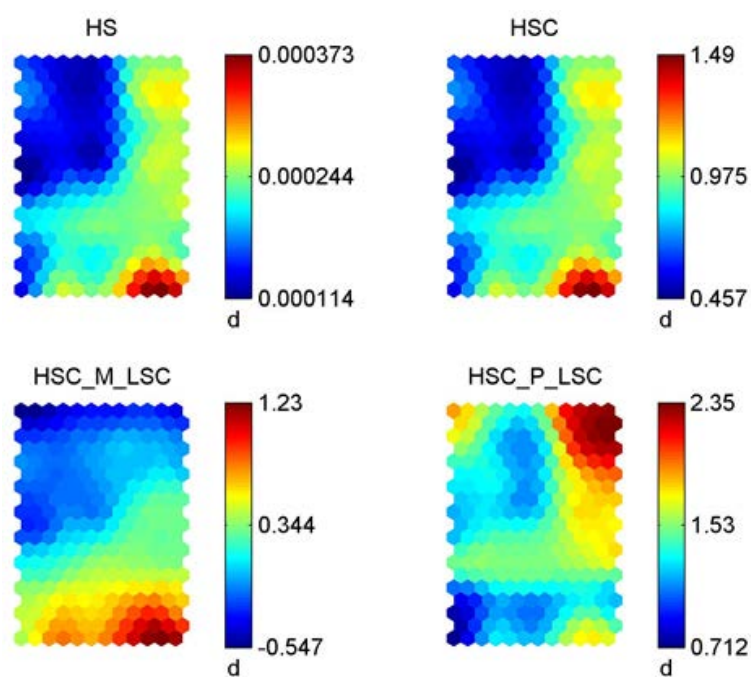
6.5.4. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIIH SAMOORGANIZOVANIIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa korišćenjem ulaznog vektora sa kompletna 32 ulazna obeležja dobijena je relativno loša klasterizacija odnosno relativno velika greška kvantizacije mape. S druge, rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa korišćenjem redukovano g seta obeležja dobivenih analizom glavnih komponenata dobijena je mapa sa greškom kvantizacije od 1.282 prikazana na slici 6-10. Kao relevantna obeležja nakon redukcije dimenzionalnosti metodom analize glavnih komponenata izabrano je prvih 14 obeležja prikazanih u tabeli 6-15. Metodom redukcije dimenzionalnosti obeležja smanjena je greška kvantizacije a vidljivo je i poboljšanje kvaliteta samoorganizovanja ulaznih vektora na matrici rastojanja, slika 6-10. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZR.mat“.

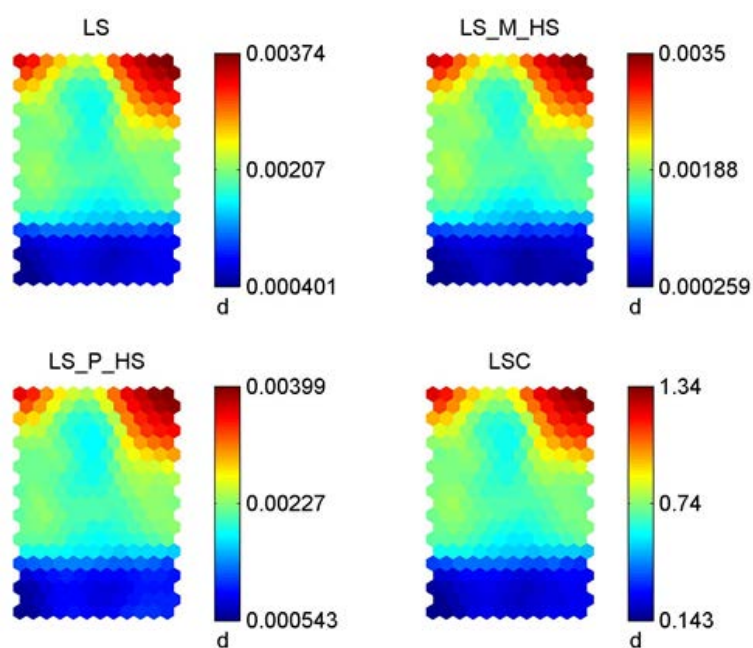


SLIKA 6-10. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 1 redukovanog seta obeležja mape (desno) ⁴²

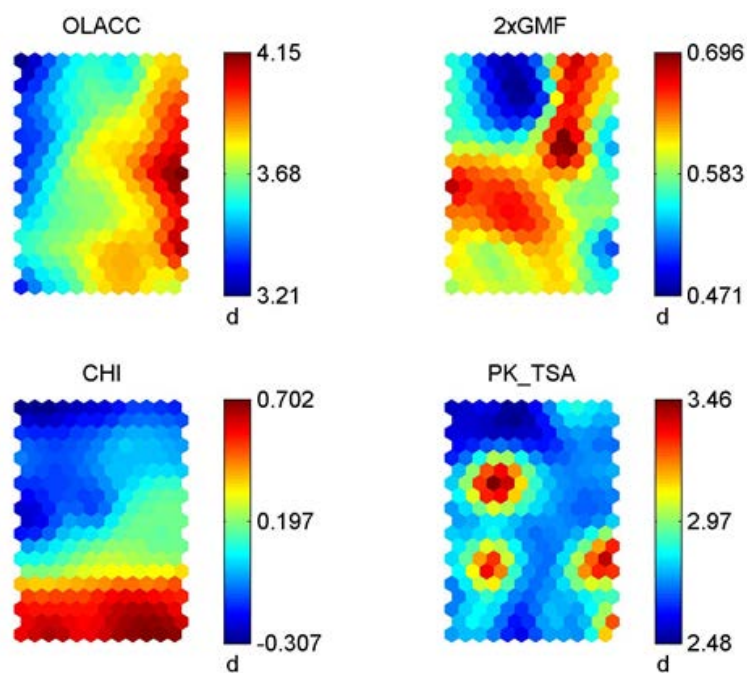


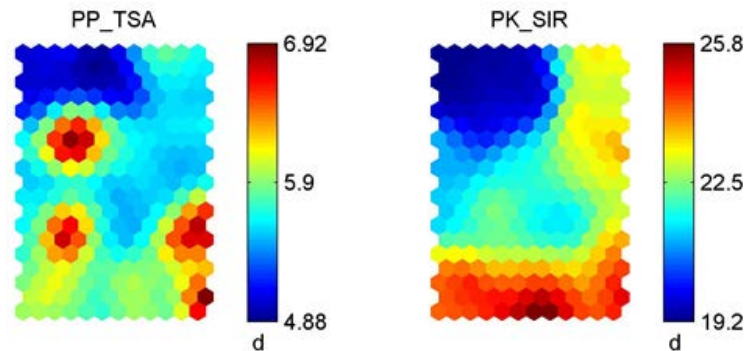
SLIKA 6-11. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja HS, HSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC

⁴² OZ0-crvena boja, OZ1-zelena boja, OZ2-plava boja, OZ3-zuta boja



SLIKA 6-12. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja LS, LS_M_HS, LS_P_HS, LSC





SLIKA 6-13. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, 2xGMF, CHI, PK_TSA, PP_TSA, PK_SIR

6.5.5. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Zbog tačnosti predviđanja izlaznih klasa manjom od 100% kao i razloga pomenutih u poglavlju 6.5.4, razvijene su i testirane višeslojne neuronske mreže za detekciju oštećenja okrnutog zuba zupčanika na bazi redukovanog seta obeležja odabranih u poglavlju 6.5.3 i prikazanih u tabeli 6-15. Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\OZ\OZR.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima predviđanja, prikazana u tabeli 6-16 uz pregled odabranih parametara, odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške). Kako se da videti iz navedene tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja manju od 100% osim u slučaju oštećenja nedostatka kompletnog zuba pogonskog zupčanika. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane kada su u pitanju vrsta oštećenja u obliku djelimičnog okrnuća zuba. Međutim postignut je veći procenat predviđanja kako za neoštećen pogonski zupčanik OZ0 kao i za ostala dva nivoa oštećenja okrnutog zuba OZ1 i OZ2, dok je zadržana tačnost predviđanja od 100% za oštećenje kompletno nedostajućeg zuba OZ3. U odnosu na rezultat dobijen primenom nenadgledanih Kohonenovih mapa, neočekivano, sa većim brojem iteracija je dobijena konfiguracija neuronske mreže veće tačnosti predviđanja. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-17.

Rb	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden active.	Output activation
1	MLP 13-11-4	99.42857	99.33333	97.66667	BFGS 125	Entropy	Logistic	Softmax

TABELA 6-16. Konfiguracija neuronske mreže testa 1 pri korišćenju redukovanog ulaznog vektora obeležja

Net name		LABELA OZ0	LABELA OZ1	LABELA OZ2	LABELA OZ3	LABEL All
1.MLP 13-11-4	Total	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	2000.000
	Correct	497.0000	496.0000	490.0000	500.0000	1983.000
	Incorrect	3.0000	4.0000	10.0000	0.0000	17.000
	Correct (%)	99.4000	99.2000	98.0000	100.0000	99.150
	Incorrect (%)	0.6000	0.8000	2.0000	0.0000	0.850

TABELA 6-17. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 1 pri korišćenju redukovanog seta ulaznih obeležja

6.6. TEST 2 – DETEKCIJA PUKOTINE U KORENU ZUBA ZUPČANIKA KROZ ČETIRI KORAKA

Kao oštećenje zupčastog para uvedena je naprslina u korenu zuba zupčanika na jednom zubu pogonskog zupčanika dok su ostali zupci kako pogonskog tako i gonjenog zupčanika bili neoštećeni. Uvedena su tri nivoa naprsline u korenu zuba zupčanika. U skladu sa objašnjenim načinom unošenja oštećenja, okružna su:

- naprslina 0% - Labela „PRS0“,
- naprslina 25% - Labela „PRS5“,
- naprslina 50% - Labela „PRS10“,
- naprslina 100% - Labela „PRS15“,
- naprslina 100% - Labela „PRS20“.

Za detekciju nivoa naprsline u korenu zuba pogonskog zupčanika korišćena je ulazna matrica sa:

- svim snimljenim podacima – ukupno 32 obeležja vibracionog signala,
- samo sa obeležjima koji su uticajni nakon provedene PCA analize.

Za svaki nivo oštećenja naprsline u korenu zuba pogonskog zupčanika snimljeno je ukupno 500 zapisa što čini ukupno 2000 zapisa za kompletan test. Datoteka sa ulaznim podacima za kompletan set obeležja se nalazi u fajlu na priloženom CD-u: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSK.txt“ dok se datoteka redukovanog seta obeležja nakon provedene PCA analize nalazi u fajlu: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSR.txt“ u istom direktorijumu.

Obeležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.14402	1.14799	1.08189	1.19102	0.028626
OLACC	3.24281	3.24352	3.19070	3.30590	0.028029
1xGMF	0.06467	0.06209	0.05230	0.10081	0.011820
2xGMF	0.83444	0.82985	0.73621	0.93433	0.057781
3xGMF	0.18737	0.18365	0.16501	0.21330	0.013664
4xGMF	0.05601	0.05929	0.02185	0.07700	0.015577
1xEGMF	0.68464	0.68726	0.65480	0.70397	0.012317
2xEGMF	1.62459	1.61459	1.53563	1.75896	0.059891
3xEGMF	0.41913	0.41968	0.39275	0.43684	0.009366
4xEGMF	0.56843	0.57344	0.52241	0.58762	0.015444

1xMF	10.88508	10.98647	6.49542	13.24504	1.661544
2xMF	1.95378	1.95115	1.72642	2.23131	0.117650
3xMF	2.24637	2.27698	1.95228	2.54343	0.135838
4xMF	11.68091	9.69779	7.18389	26.31393	5.699956
KURT_SIR	3.59344	3.58418	3.49797	3.74181	0.062712
KURT_TSA	2.29893	2.31636	2.16855	2.46945	0.070814
KURT_AK	1.77024	1.57112	1.50640	2.70321	0.369207
HS	0.00020	0.00019	0.00011	0.00030	0.000050
LS	0.00118	0.00115	0.00051	0.00180	0.000331
LS_M_HS	0.00098	0.00098	0.00025	0.00157	0.000347
LS_P_HS	0.00139	0.00133	0.00077	0.00202	0.000323
HSC	0.96937	0.92818	0.53709	1.43386	0.237487
LSC	1.07420	1.04707	0.46362	1.63518	0.301273
HSC_M_LSC	-0.10483	-0.17429	-0.68424	0.89943	0.425994
HSC_P_LSC	2.04356	1.95175	1.48373	2.71011	0.335945
CHI	-0.04483	-0.07063	-0.34076	0.46065	0.216395
PP_SIR	35.76737	35.50827	32.40288	40.95017	1.849156
PP_TSA	5.69025	5.59752	5.00665	6.76009	0.430494
PK_SIR	17.83098	17.56748	16.23364	20.82122	1.261859
PK_TSA	2.66933	2.60601	2.32029	3.33006	0.279755
CF_SIR	5.49943	5.40583	4.97485	6.35788	0.396490
CF_TSA	3.01990	2.97918	2.56342	3.59262	0.246928

TABELA 6-18. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS0”

Obeležje	Srednja vrednost	Median	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.19385	1.19450	1.13475	1.25951	0.025543
OLACC	3.31403	3.30486	3.22403	3.41720	0.045978
1xGMF	0.11391	0.11926	0.07674	0.13693	0.015198
2xGMF	0.89425	0.89433	0.76736	1.00809	0.053529
3xGMF	0.18659	0.18967	0.14757	0.23362	0.017936
4xGMF	0.06748	0.06699	0.04983	0.08831	0.008444
1xEGMF	0.63276	0.63434	0.60166	0.68097	0.021737
2xEGMF	1.97330	1.96856	1.91835	2.08346	0.034026
3xEGMF	0.44576	0.44630	0.42021	0.46663	0.009003
4xEGMF	0.57129	0.61101	0.42002	0.62781	0.078883
1xMF	5.65268	5.34745	4.67370	7.99037	0.765665
2xMF	2.21378	2.22523	1.97777	2.52970	0.124170
3xMF	2.40836	2.37303	1.99744	2.96029	0.206134
4xMF	0.06748	0.06699	0.04983	0.08831	0.008444
KURT_SIR	3.41837	3.41353	3.32168	3.51769	0.041656
KURT_TSA	2.29552	2.26062	2.11844	2.68733	0.135165
KURT_AK	1.84414	1.60808	1.50610	2.94669	0.457721
HS	0.00042	0.00043	0.00018	0.00062	0.000117
LS	0.00178	0.00182	0.00116	0.00244	0.000323
LS_M_HS	0.00137	0.00138	0.00081	0.00205	0.000319

LS_P_HS	0.00220	0.00224	0.00149	0.00304	0.000367
HSC	2.08100	2.16556	0.89530	3.11597	0.585252
LSC	1.48711	1.51853	0.96664	2.03270	0.269487
HSC_M_LSC	0.59389	0.62309	-0.91945	1.64368	0.588026
HSC_P_LSC	3.56810	3.77863	2.08825	5.03381	0.696068
CHI	0.14937	0.16994	-0.32714	0.41905	0.160743
PP_SIR	33.71563	33.62504	30.40674	38.95120	1.659288
PP_TSA	6.07463	5.87492	5.20307	8.58415	0.647989
PK_SIR	17.99704	17.83133	15.36376	22.22800	1.204384
PK_TSA	2.74256	2.66496	2.26588	3.98452	0.327110
CF_SIR	5.43137	5.34213	4.60354	6.67213	0.368317
CF_TSA	2.91919	2.89441	2.56281	3.63955	0.227052

TABELA 6-19. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS5”

Obeležje	Srednja vrednost	Median	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.26655	1.26864	1.18825	1.32682	0.028435
OLACC	3.02758	3.03053	2.89477	3.14804	0.058174
1xGMF	3.02758	3.03053	2.89477	3.14804	0.058174
2xGMF	0.14797	0.14928	0.09110	0.18771	0.020748
3xGMF	0.12371	0.12360	0.09173	0.15596	0.011237
4xGMF	0.02975	0.02928	0.02205	0.04385	0.004807
1xEGMF	0.64772	0.64519	0.59362	0.68541	0.019212
2xEGMF	1.31651	1.29020	1.25257	1.44232	0.055653
3xEGMF	0.38357	0.38300	0.37311	0.40092	0.004509
4xEGMF	0.54293	0.54664	0.50022	0.56524	0.015392
1xMF	4.46422	4.34198	3.62599	6.72417	0.643508
2xMF	2.31800	2.30910	2.12613	2.65281	0.113911
3xMF	3.12520	3.09821	2.57072	4.16881	0.278790
4xMF	18.74612	18.66075	11.99544	25.12074	3.150591
KURT_SIR	3.51157	3.51020	3.42552	3.60270	0.042149
KURT_TSA	2.68128	2.68571	2.41622	2.96143	0.118564
KURT_AK	1.77467	1.60151	1.51904	3.04088	0.386226
HS	0.00027	0.00026	0.00016	0.00045	0.000062
LS	0.00182	0.00180	0.00107	0.00277	0.000337
LS_M_HS	0.00154	0.00154	0.00090	0.00244	0.000322
LS_P_HS	0.00209	0.00208	0.00123	0.00309	0.000362
HSC	1.36992	1.30624	0.77919	2.26669	0.311462
LSC	1.51390	1.50056	0.88846	2.30496	0.280663
HSC_M_LSC	-0.14398	-0.13321	-0.95135	0.70847	0.344945
HSC_P_LSC	2.88382	2.90391	1.70706	4.26815	0.482258
CHI	-0.05361	-0.05359	-0.34307	0.22972	0.119103
PP_SIR	32.70864	32.40833	29.62748	38.29023	1.839449
PP_TSA	4.88803	4.81753	4.19403	6.42625	0.405300
PK_SIR	17.18189	16.95687	15.13780	21.52232	1.194231
PK_TSA	2.13300	2.06088	1.77108	3.15973	0.244098

CF_SIR	5.67410	5.60292	5.00038	6.98774	0.389588
CF_TSA	3.06383	3.01656	2.71123	3.84984	0.262504

TABELA 6-20. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS10”

Obeležje	Srednja vrednost	Median	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.20978	1.21092	1.10704	1.27276	0.032450
OLACC	2.81429	2.84624	2.49018	3.05201	0.104306
1xGMF	0.06096	0.06166	0.03195	0.09036	0.011073
2xGMF	0.51545	0.51880	0.43202	0.59498	0.037985
3xGMF	0.09327	0.09397	0.06622	0.12050	0.011033
4xGMF	0.02875	0.02914	0.01841	0.04325	0.004653
1xEGMF	0.62471	0.62246	0.58991	0.66231	0.017902
2xEGMF	1.21938	1.21989	1.15713	1.24388	0.016122
3xEGMF	0.35647	0.35207	0.33845	0.41493	0.018030
4xEGMF	0.56077	0.63097	0.34074	0.66851	0.120422
1xMF	10.60570	10.04120	7.30185	18.74669	2.110701
2xMF	2.37849	2.33838	2.05001	2.80107	0.178436
3xMF	3.87750	3.82489	2.85983	5.37004	0.510194
4xMF	0.02875	0.02914	0.01841	0.04325	0.004653
KURT_SIR	3.78815	3.77697	3.65207	4.01202	0.067683
KURT_TSA	2.78598	2.76331	2.54666	3.35084	0.165113
KURT_AK	2.02276	1.77284	1.52086	3.32595	0.542900
HS	0.00024	0.00024	0.00009	0.00036	0.000073
LS	0.00154	0.00156	0.00075	0.00209	0.000340
LS_M_HS	0.00131	0.00133	0.00064	0.00187	0.000335
LS_P_HS	0.00178	0.00182	0.00086	0.00236	0.000361
HSC	1.17976	1.21612	0.45785	1.78615	0.365158
LSC	1.28474	1.30145	0.62372	1.73902	0.283492
HSC_M_LSC	-0.10498	-0.11209	-1.16551	0.83261	0.419138
HSC_P_LSC	2.46449	2.54469	1.16556	3.26376	0.501737
CHI	-0.05464	-0.05297	-0.55296	0.33274	0.182449
PP_SIR	31.23215	31.22887	28.15854	37.56466	1.771977
PP_TSA	4.57666	4.55665	4.12446	5.18904	0.256858
PK_SIR	16.48647	16.47026	14.46010	21.52293	1.126606
PK_TSA	2.18636	2.17047	1.90936	2.64772	0.164060
CF_SIR	5.87067	5.80668	5.22574	7.05205	0.391189
CF_TSA	3.73641	3.65358	3.27233	4.87282	0.364620

TABELA 6-21. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS15”

Obeležje	Srednja vrednost	Median	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
----------	------------------	--------	---------	----------	-----------------------

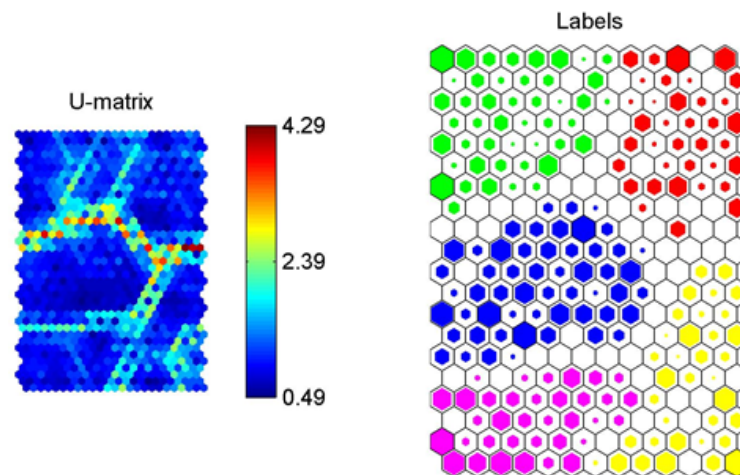
OLRMS	1.28517	1.29021	1.16925	1.36064	0.039200
OLACC	3.07735	3.09879	2.68479	3.28406	0.096297
1xGMF	0.12175	0.12589	0.04721	0.15066	0.020284
2xGMF	0.60655	0.61659	0.51642	0.69103	0.043622
3xGMF	0.10295	0.10304	0.07807	0.13017	0.011203
4xGMF	0.02084	0.02046	0.01714	0.02726	0.002511
1xEGMF	0.63154	0.62934	0.56260	0.66635	0.022623
2xEGMF	1.44265	1.45116	1.21104	1.52828	0.054595
3xEGMF	0.39444	0.39567	0.35193	0.40779	0.007931
4xEGMF	0.61466	0.61756	0.54620	0.65589	0.024460
1xMF	5.38274	5.06954	4.41155	11.91789	1.268365
2xMF	2.38942	2.35058	2.07328	2.77668	0.178804
3xMF	3.88288	3.81680	2.96097	5.14278	0.482121
4xMF	29.91413	29.80682	21.41362	36.81516	3.725056
KURT_SIR	3.83738	3.83470	3.71179	3.94696	0.052058
KURT_TSA	2.49394	2.47150	2.30380	2.77067	0.097855
KURT_AK	1.81652	1.56375	1.51043	3.10492	0.412853
HS	0.00024	0.00023	0.00015	0.00039	0.000058
LS	0.00221	0.00225	0.00145	0.00314	0.000427
LS_M_HS	0.00197	0.00199	0.00118	0.00287	0.000428
LS_P_HS	0.00245	0.00243	0.00171	0.00342	0.000434
HSC	1.20870	1.14374	0.75043	1.94796	0.292078
LSC	1.84396	1.87850	1.20479	2.62056	0.356093
HSC_M_LSC	-0.63526	-0.60639	-1.73098	0.35102	0.448483
HSC_P_LSC	3.05266	2.97513	2.23655	4.22964	0.472320
CHI	-0.20833	-0.21212	-0.52665	0.11564	0.143791
PP_SIR	34.51645	34.36192	30.56148	38.40084	1.908181
PP_TSA	4.65923	4.67136	3.87566	5.52971	0.308569
PK_SIR	17.94557	17.83771	15.58853	20.18029	1.056525
PK_TSA	2.11283	2.11823	1.73085	2.62225	0.175528
CF_SIR	5.84163	5.78754	5.17723	7.14764	0.384731
CF_TSA	3.18281	3.15630	2.75532	3.85365	0.223985

TABELA 6-22. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS20”

6.6.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa pri korišćenju celokupnog seta ulaznih obeležja dobijena je mapa sa greškom kvantizacije 2.185. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSK.mat“.



SLIKA 6-14. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 2 kompletnog seta obeležja mape (desno)⁴³

6.6.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E:\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSK.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima pogađanja, prikazana u tabeli 6-23. Pregled odabranih parametara odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške) je dat tabelom 6-23.

Kako se da videti iz tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja manju od 100% osim u slučaju nivoa naprsline u korenu zuba pogonskog zupčanika u oznaci PRS15. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane kada su u pitanju vrsta oštećenja u obliku naprsline zuba kako manjeg PRS0, PRS5, PRS10 tako i većeg obima PRS20. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-24.

Rb	Net. name	Training p	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden activati	Output activatio
7	MLP 32-9-5	93.08966	95.73333	93.06667	BFGS 31	SOS	Exponent	Logistic

TABELA 6-23. Konfiguracija neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano ulaznog vektora obeležja

⁴³ PRS0-crvena boja, PRS5-zelena boja, PRS10-plava boja, PRS15-zuta boja, PRS20-ljubičasta boja

		LABELA PRS0	LABELA PRS5	LABELA PRS10	LABELA PRS15	LABELA PRS20	LABEL All
7.MLP 32-9-5	Total	500.0000	500.0000	500.0000	500.0000	501.0000	2501.00
	Correct	431.0000	461.0000	493.0000	500.0000	453.0000	2338.00
	Incorrect	69.0000	39.0000	7.0000	0.0000	48.0000	163.000
	Correct (%)	86.2000	92.2000	98.6000	100.0000	90.4192	93.483
	Incorrect (%)	13.8000	7.8000	1.4000	0.0000	9.5808	6.517

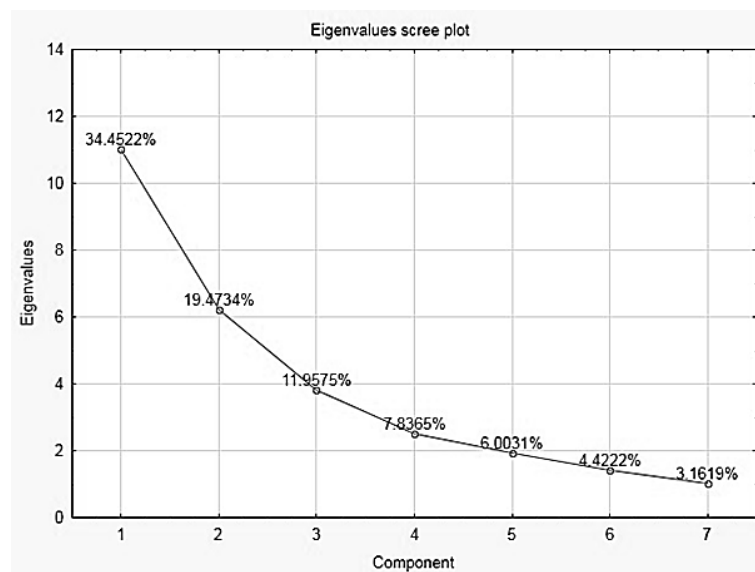
TABELA 6-24. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovanog seta ulaznih obeležja

6.6.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA

Kao rezultat PCA, odabrano je 7 glavnih komponenta čije su svojstvene vrednosti (eigenvalue) prikazane na tabeli 6-25. U tabeli 6-26 prikazan je sažetak analize glavnih komponenta.

Komponenta (obeležje)	Eigenvalues	% Total variance	Cumulative eigenvalue	Cumulative %
PC1	11.02470	34.45218	11.02470	34.45218
PC2	6.23149	19.47339	17.25618	53.92557
PC3	3.82640	11.95751	21.08258	65.88308
PC4	2.50770	7.83655	23.59028	73.71963
PC5	1.92098	6.00307	25.51126	79.72269
PC6	1.41510	4.42217	26.92636	84.14487
PC7	1.01181	3.16191	27.93817	87.30678

TABELA 6-25. Naprslina u korenu zuba: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenta



SLIKA 6-15. Naprslina u korenu zuba: individualna varijansa glavnih komponenta

Komponenta (obeležje)	R2X	R2X (Cumul.)	Eigenvalues	Q2	Limit	Q2 (Cumul.)	Signifi.	Iterations
PC1	0.344522	0.344522	11.02470	0.298999	0.031638	0.298999	S	8
PC2	0.194734	0.539256	6.23149	0.245950	0.032645	0.471411	S	7
PC3	0.119575	0.658831	3.82640	0.203106	0.033720	0.578770	S	13
PC4	0.078365	0.737196	2.50770	0.136163	0.034869	0.636126	S	14
PC5	0.060031	0.797227	1.92098	0.118346	0.036101	0.679189	S	15
PC6	0.044222	0.841449	1.41510	0.101998	0.037423	0.711911	S	17
PC7	0.031619	0.873068	1.01181	0.034371	0.038847	0.721813	UNK	18

TABELA 6-26. Sažetak_PKSK. Odabrani broj glavnih komponenta je 7. 87.3068% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.

Tabela 6-27 prikazuje snagu modeliranja za sva ulazna obeležja kao i njihov značaj. Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 15 obeležja (značaj od 1 do 15) što predstavlja redukovani set obeležja u cilju pronalaženja MLP-a s boljim performansama kao i pouzdanije klasifikacije.

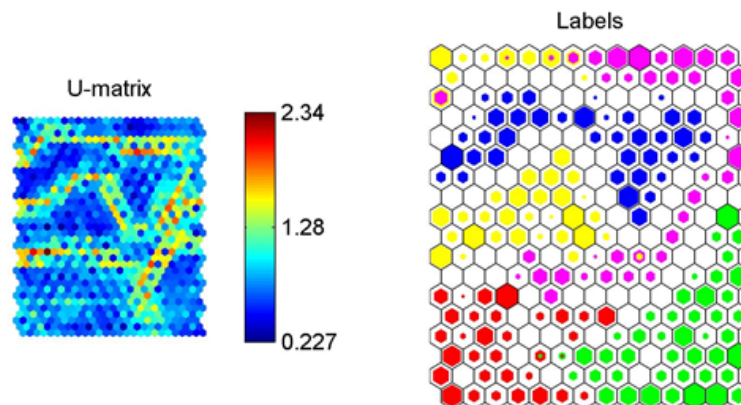
Obeležje	Broj obeležja	Snaga	Značaj
LS_M_HS	20	0.988541	1
LS	19	0.986213	2
HSC_M_LSC	24	0.982889	3
LS_P_HS	21	0.982662	4
LSC	23	0.976430	5
HSC	22	0.970772	6
HS	18	0.966837	7
HSC_P_LSC	25	0.965906	8
PK_SIR	29	0.954352	9
CHI	26	0.946567	10
2xGMF	4	0.943443	11
3xGMF	5	0.942643	12
2xEGMF	8	0.934437	13
1xGMF	3	0.916621	14
OLACC	2	0.902492	15
CF_SIR	31	0.900600	16
3xEGMF	9	0.895518	17
4xGMF	6	0.862612	18
KURT_SIR	15	0.851142	19
3xMF	13	0.846343	20
PP_TSA	28	0.841745	21
PK_TSA	30	0.834483	22
KURT_TSA	16	0.825835	23
PP_SIR	27	0.818049	24
4xMF	14	0.811956	25
KURT_AK	17	0.782916	26
CF_TSA	32	0.781510	27
1xMF	11	0.757625	28
OLRMS	1	0.729956	29

4xEGMF	10	0.706413	30
2xMF	12	0.696397	31
1xEGMF	7	0.634262	32

TABELA 6-27. Naprslina u korenu zuba: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponentata.

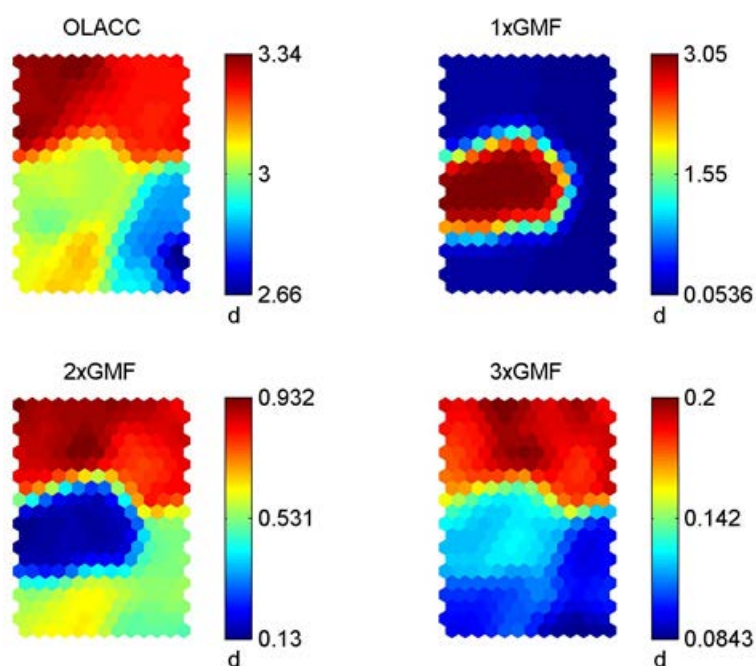
6.6.4. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohnenovih mapa korišćenjem ulaznog vektora sa kompletna 32 ulazna obeležja dobijena je relativno loša klasterizacija odnosno relativno velika greška kvantizacije mape. S druge strane, rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohnenovih mapa korišćenjem redukovanog seta obeležja dobivenih analizom glavnih komponentata dobijena je mapa sa greškom kvantizacije od 1.035 prikazana na slici 6-16. Kao relevantna obeležja nakon redukcije dimenzionalnosti metodom analize glavnih komponentata izabrano je prvih 15 obeležja prikazanih u tabeli 6-27. Metodom redukcije dimenzionalnosti obeležja smanjena je greška kvantizacije a vidljivo je i poboljšanje kvaliteta samoorganizovanja ulaznih vektora na matrici rastojanja, slika 6-16. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSR.mat“.

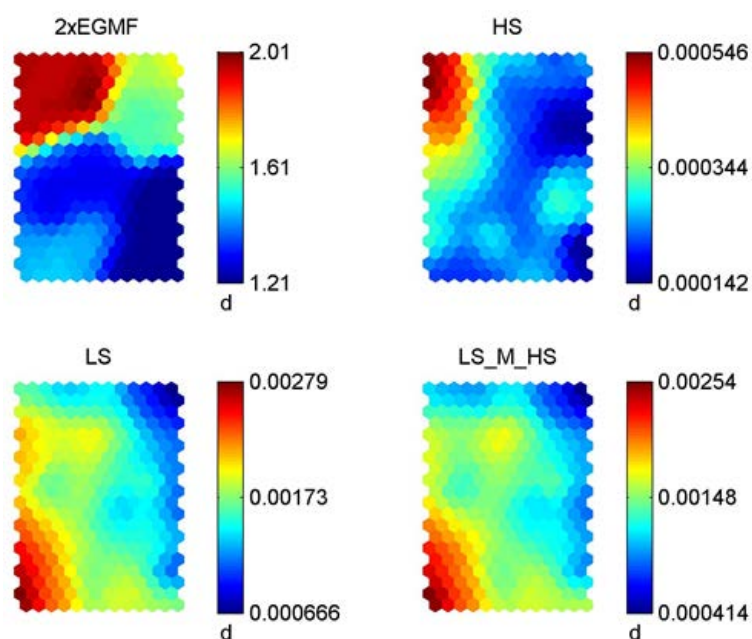


SLIKA 6-16. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 2 redukovanog seta obeležja mape (desno)⁴⁴

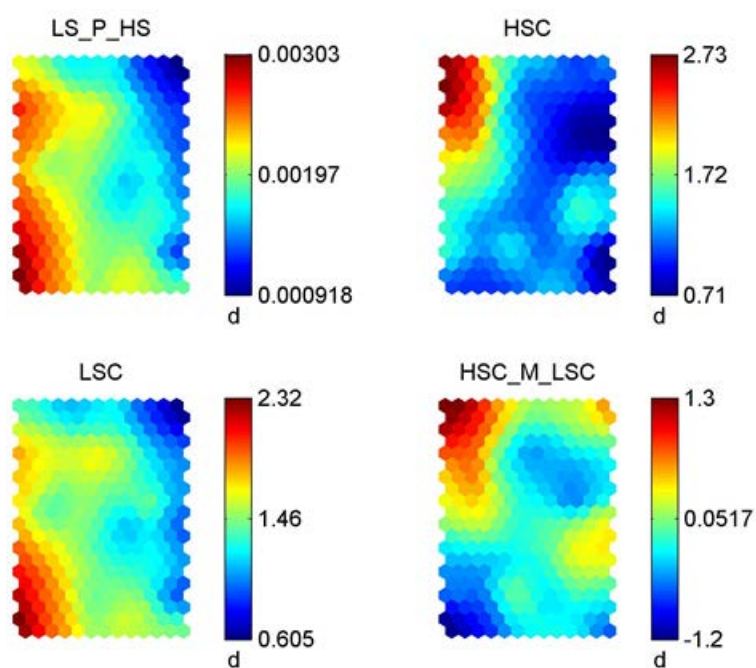
⁴⁴ PRS0-crvena boja, PRS5-zelena boja, PRS10-plava boja, PRS15-zuta boja, PRS20-ljubičasta boja



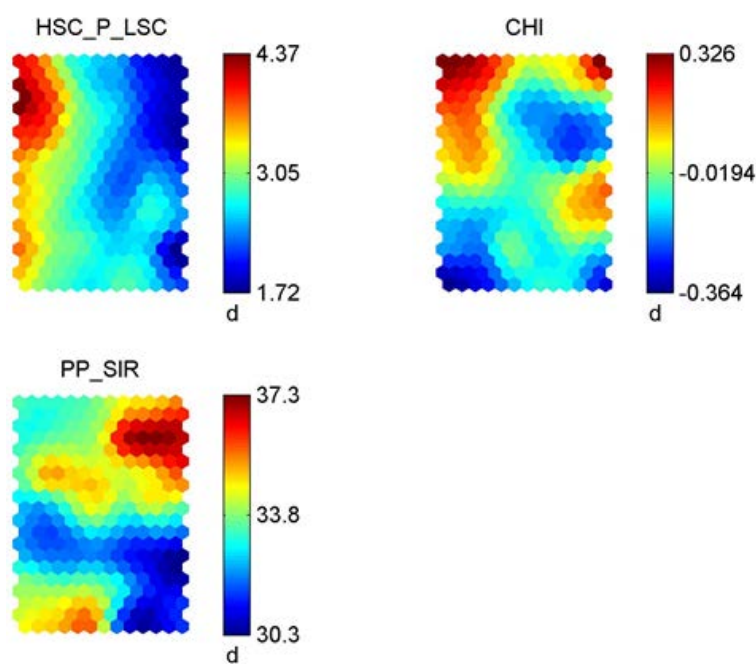
SLIKA 6-17. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, 1xGMF, 2xGMF, 3xGMF



SLIKA 6-18. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xEGMF, HS, LS, LS_M_HS



SLIKA 6-19. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja LS_P_HS, HSC, LSC, HSC_M_LSC



SLIKA 6-20. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja HSC_P_LSC, CHI, PP_SIR

6.6.5. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSR.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima predviđanja, prikazana u tabeli 6-28 uz pregled odabranih parametara, odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške). Kako se da videti iz navedene tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja od 100% za sve nivoe oštećenja. To praktično znači da su pojedine izlazne klase tačno klasifikovane kada su u pitanju vrste oštećenja u obliku naprsline u korenu zuba. U odnosu na rezultat dobijen primenom nenadgledanih Kohonenovih mapa, neočekivano, sa neznatno većim brojem iteracija je dobijena konfiguracija neuronske mreže veće tačnosti predviđanja. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-29.

Rb	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden active.	Output activation
5	MLP 15-11-5	100.0000	100.0000	100.0000	BFGS 33	Entropy	Logistic	Softmax

TABELA 6-28. Konfiguracija neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano ulaznog vektora obeležja

		LABELA PRS0	LABELA PRS5	LABELA PRS10	LABELA PRS15	LABELA PRS20	LABELA All
5.MLP15-11-5	Total	500.0000	500.0000	500.0000	501.0000	500.0000	2501.000
	Correct	500.0000	500.0000	500.0000	501.0000	500.0000	2501.000
	Incorrect	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
	Correct (%)	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.000
	Incorrect (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000

TABELA 6-29. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano seta ulaznih obeležja

6.7. TEST 3 – DETEKCIJA POHABANIH BOKOVA ZUPČASTOG PARA KROZ TRI NIVOVA OŠTEĆENJA

Kao oštećenje zupčastog para uvođeno je oštećenje u vidu pohabanosti bokova zuba kako pogonskog tako i gonjenog zupčanika. Uvedena su tri nivoa pohabanosti izražene preko mere više zubi kako gonjenog tako i pogonskog zupčanika. U skladu sa objašnjenim načinom unošenja oštećenja prikazanih u tabeli 6-4, dimenzije različitih nivoa pohabanosti su:

- habanje 1 - Labela „H1“;
- habanje 2 - Labela „H2“;
- habanje 3 - Labela „H3“;

Za detekciju nivoa pohabanosti bokova zupčanika korišćena je ulazna matrica sa:

- svim snimljenim podacima – ukupno 32 obeležja vibracionog signala,

- samo sa obeležjima koji su uticajni nakon provedene PCA analize.

Za svaki nivo oštećenja nivoa pohabanosti zubi zupčastog para snimljeno je ukupno 500 zapisa što čini ukupno 2000 zapisa za kompletan test. Datoteka sa ulaznim podacima za kompletan set obeležja se nalazi u fajlu na priloženom CD-u: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\HB\HBK.txt“ dok se datoteka redukovanog seta obeležja nakon provedene PCA analize nalazi u fajlu: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\HB\HBR.txt“ u istom direktorijumu.

Obeležje	Srednja vrednost	Mediana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	1.41372	1.42229	1.24634	1.52256	0.063580
OLACC	3.33958	3.35087	2.95800	3.78224	0.160822
1xGMF	0.66687	0.64195	0.54576	1.08393	0.103478
2xGMF	0.96460	0.98628	0.50061	1.15744	0.121010
3xGMF	0.07856	0.07242	0.01457	0.20678	0.042140
4xGMF	0.06620	0.07023	0.02037	0.12023	0.028145
1xEGMF	1.28347	1.28340	1.18718	1.43890	0.040882
2xEGMF	1.72066	1.74481	1.35754	1.84724	0.091552
3xEGMF	0.39208	0.39941	0.33307	0.44492	0.029710
4xEGMF	0.46172	0.47046	0.31351	0.58487	0.057674
1xMF	1.96159	1.99519	1.32748	2.41989	0.254204
2xMF	1.80670	1.79375	1.55591	2.71176	0.191771
3xMF	7.20245	5.36593	1.96241	26.55670	5.572572
4xMF	8.75597	6.37768	4.26325	20.63640	4.889575
KURT_SIR	3.63082	3.64726	3.24005	3.90725	0.138719
KURT_TSA	2.44506	2.41399	2.20315	2.94269	0.130454
KURT_AK	2.27318	2.17441	1.66930	3.10629	0.389955
HS	0.00028	0.00029	0.00010	0.00047	0.000091
LS	0.00101	0.00095	0.00046	0.00199	0.000331
LS_M_HS	0.00073	0.00066	0.00002	0.00172	0.000380
LS_P_HS	0.00129	0.00124	0.00068	0.00233	0.000302
HSC	1.12599	1.14444	0.39969	1.87028	0.364730
LSC	0.35979	0.33772	0.16254	0.71098	0.118192
HSC_M_LSC	0.76621	0.74386	-0.16193	1.59557	0.429710
HSC_P_LSC	1.48578	1.48388	0.81963	2.23542	0.330671
CHI	0.48351	0.54213	-0.16845	0.83074	0.229015
PP_SIR	34.09114	34.27770	25.74586	41.26077	3.579106
PP_TSA	6.84705	6.80598	3.05711	8.39331	0.648617
PK_SIR	17.86438	17.46395	12.80818	23.81629	2.291353
PK_TSA	3.02215	2.98728	1.53626	3.68201	0.299576
CF_SIR	5.34090	5.22648	4.17934	6.97398	0.562988
CF_TSA	2.53127	2.47551	2.17562	3.90167	0.237125

TABELA 6-30. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabanni bokovi zupčastog para nivo 1, labela “H1”

Obležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	2.63204	2.63874	2.26581	2.84828	0.088010
OLACC	5.18148	5.20969	4.65924	5.70980	0.219979
1xGMF	1.67083	1.69824	1.31978	2.07491	0.214305
2xGMF	0.60129	0.59429	0.16237	1.48423	0.303936
3xGMF	0.07985	0.07577	0.02851	0.15794	0.030858
4xGMF	0.06320	0.04295	0.02921	0.14371	0.032988
1xEGMF	2.34093	2.35281	2.03029	2.68189	0.119255
2xEGMF	2.02726	2.00648	1.81624	2.44294	0.134830
3xEGMF	0.66543	0.67012	0.53176	0.77702	0.053653
4xEGMF	0.63260	0.64443	0.50714	0.70184	0.038887
1xMF	1.41647	1.39814	1.20239	1.67590	0.126939
2xMF	4.41607	3.36759	1.64593	11.83833	2.414620
3xMF	9.80817	8.82521	4.86726	23.06899	4.461165
4xMF	12.54440	14.08083	3.68237	21.21728	5.201678
KURT_SIR	3.21779	3.21152	3.12133	3.33109	0.052323
KURT_TSA	1.94526	1.90030	1.77718	2.37354	0.125615
KURT_AK	1.82952	1.56257	1.50027	2.72076	0.434028
HS	0.00055	0.00054	0.00035	0.00087	0.000103
LS	0.00157	0.00156	0.00148	0.00178	0.000053
LS_M_HS	0.00102	0.00103	0.00072	0.00121	0.000104
LS_P_HS	0.00212	0.00211	0.00188	0.00254	0.000127
HSC	2.19978	2.17090	1.41330	3.48634	0.412722
LSC	0.56219	0.55681	0.52841	0.63517	0.019009
HSC_M_LSC	1.63759	1.60984	0.85834	2.89113	0.408480
HSC_P_LSC	2.76197	2.74129	1.96826	4.08154	0.417786
CHI	0.58435	0.58896	0.43609	0.71369	0.059277
PP_SIR	48.90319	48.67875	43.32217	56.38596	2.990391
PP_TSA	8.17353	7.97997	6.56099	12.76519	1.155736
PK_SIR	24.51459	24.39399	20.73118	29.75193	1.823083
PK_TSA	3.65813	3.51351	2.87088	6.33481	0.641827
CF_SIR	4.73155	4.68871	4.23387	5.45946	0.295068
CF_TSA	2.25922	2.29587	1.82519	2.88946	0.216209

TABELA 6-31. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabanni bokovi zupčastog para nivo 2, labela “H2”

Obležje	Srednja vrednost	Medijana	Minimum	Maksimum	Standardna devijacija
OLRMS	2.03241	2.03876	1.46230	2.14617	0.088952
OLACC	2.73176	2.74255	1.90876	2.97061	0.147816
1xGMF	1.32018	1.33968	0.70958	1.45714	0.097582
2xGMF	0.63229	0.63023	0.54765	0.71697	0.041418
3xGMF	0.11918	0.11995	0.05111	0.14454	0.014245
4xGMF	0.08316	0.08882	0.01191	0.11311	0.023871
1xEGMF	1.53170	1.54800	0.96227	1.62495	0.089846
2xEGMF	1.01518	1.00873	0.97168	1.10802	0.023500

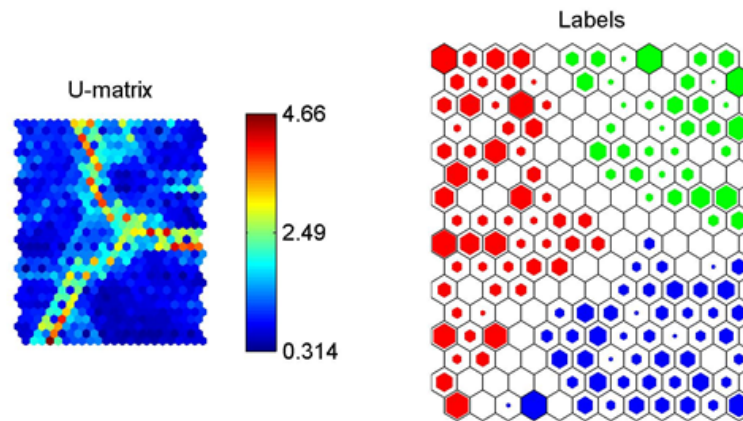
3xEGMF	0.32873	0.33123	0.16149	0.37058	0.029811
4xEGMF	0.32651	0.32909	0.22484	0.36097	0.021571
1xMF	1.16284	1.14936	1.10004	1.35612	0.051009
2xMF	1.61245	1.61337	1.39943	1.86658	0.111682
3xMF	2.77496	2.75412	2.40961	3.36394	0.195497
4xMF	5.11908	3.69441	2.96619	21.59545	4.468546
KURT_SIR	3.15730	3.15580	3.04656	3.23729	0.039069
KURT_TSA	1.83137	1.82915	1.76327	1.99187	0.040011
KURT_AK	1.85299	1.52903	1.50259	2.71945	0.463136
HS	0.00093	0.00094	0.00054	0.00137	0.000180
LS	0.00068	0.00062	0.00019	0.00171	0.000311
LS_M_HS	-0.00025	-0.00028	-0.00087	0.00069	0.000346
LS_P_HS	0.00161	0.00157	0.00097	0.00282	0.000372
HSC	3.72393	3.77729	2.16558	5.48836	0.718800
LSC	0.24374	0.22231	0.06742	0.60969	0.111098
HSC_M_LSC	3.48018	3.46752	1.92274	5.19566	0.718004
HSC_P_LSC	3.96767	3.98413	2.39457	5.78892	0.736548
CHI	0.87521	0.88577	0.69298	0.96340	0.056501
PP_SIR	24.68698	24.77879	16.63572	29.37820	1.972958
PP_TSA	5.06030	5.08767	3.23286	5.87774	0.371624
PK_SIR	12.55516	12.63881	8.70304	15.21779	1.095523
PK_TSA	2.51313	2.51978	1.75228	2.90538	0.179650
CF_SIR	4.59329	4.58557	4.05688	5.38753	0.275449
CF_TSA	4.59329	4.58557	4.05688	5.38753	0.275449

TABELA 6-32. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabani bokovi zupčastog para nivo 3, labela “H3”

6.7.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa pri korišćenju celokupnog seta ulaznih obeležja dobijena je mapa sa greškom kvantizacije 1.459. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\HB\HBK.mat“.



SLIKA 6-21. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 3 kompletnog seta obeležja mape (desno) ⁴⁵

6.7.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\HB\HBK.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima pogađanja, prikazana u tabeli 6-33. Pregled odabranih parametara odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške) je dat tabelom 6-33. Kako se da videti iz tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja manju od 100% osim u slučajevima nivoa pohabanosti bokova zupčastog para u oznaci HB1 i HB2. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane kada su u pitanju vrsta oštećenja u obliku pohabanosti bokova zupčastog para ali samo u jednom slučaju i to u oznaci HB2. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-34 iz koje se može videti da su nivoi oštećenja H1 i H3 sa tačnošću predviđena od 100 % dok je nivo oštećenja H3 sa tačnošću predviđanja manjom od 100%.

Rb	Net. name	Traini perf	Test perf.	Validator perf.	Training algorithm	Erro functi	Hidden activati	Output activatio
11	MLP 32-10-3	99.4285	100.0000	99.55556	BFGS 3	SOS	Tanh	Identity

TABELA 6-33. Konfiguracija neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovano ulaznog vektora obeležja

⁴⁵ H1-crvena boja, H2-zelena boja, H3-plava boja

		LABELA H1	LABELA H2	LABELA H3	LABELA All
11.MLP 32-10-3	Total	500.0000	500.0000	500.0000	1500.000
	Correct	500.0000	493.0000	500.0000	1493.000
	Incorrect	0.0000	7.0000	0.0000	7.000
	Correct (%)	100.0000	98.6000	100.0000	99.533
	Incorrect (%)	0.0000	1.4000	0.0000	0.467

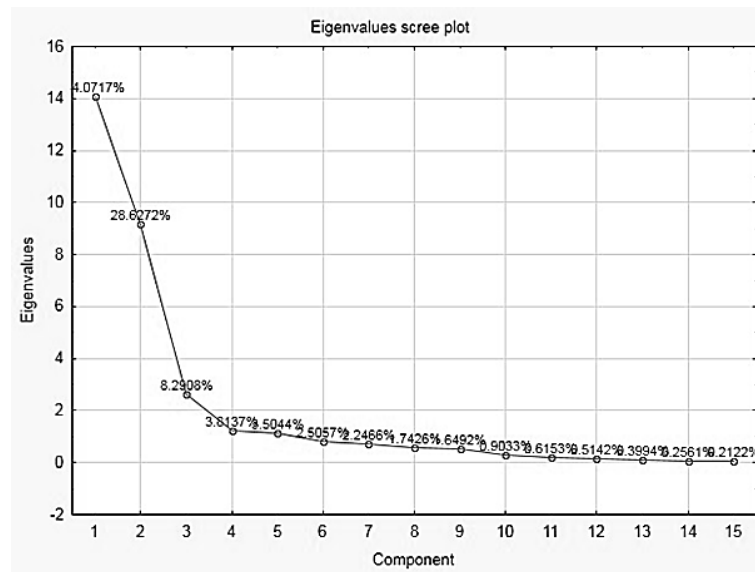
TABELA 6-34. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovanog seta ulaznih obeležja

6.7.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA

Kao rezultat PCA, odabrano je 15 glavnih komponenta čije su svojstvene vrednosti (eigenvalue) prikazane na tabeli 6-35. U tabeli 6-36 prikazan je sažetak analize glavnih komponenta.

Komponenta (obeležje)	Eigenvalues	% Total variance	Cumulative eigenvalue	Cumulative %
PC1	14.10294	44.07169	14.10294	44.07169
PC2	9.16070	28.62718	23.26364	72.69887
PC3	2.65307	8.29084	25.91671	80.98971
PC4	1.22039	3.81373	27.13710	84.80343
PC5	1.12142	3.50442	28.25851	88.30786
PC6	0.80183	2.50571	29.06034	90.81357
PC7	0.71891	2.24659	29.77925	93.06016
PC8	0.55764	1.74261	30.33689	94.80277
PC9	0.52775	1.64921	30.86463	96.45198
PC10	0.28906	0.90330	31.15369	97.35528
PC11	0.19691	0.61534	31.35060	97.97062
PC12	0.16454	0.51418	31.51513	98.48480
PC13	0.12782	0.39944	31.64296	98.88424
PC14	0.08197	0.25615	31.72492	99.14039
PC15	0.06790	0.21219	31.79283	99.35258

TABELA 6-35. Pohabanost bokova zupčanika: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenta



SLIKA 6-22. Pohabanost bokova zupčastog para: individualna varijansa glavnih komponenata

Komponenta (obeležje)	R2X	R2X (Cumul.)	Eigenvalues	Q2	Limit	Q2 (Cumul.)	Signifi.	Iterations
PC1	0.440717	0.440717	14.10294	0.397115	0.031896	0.397115	S	13
PC2	0.286272	0.726989	9.16070	0.485266	0.032904	0.689674	S	5
PC3	0.082908	0.809897	2.65307	0.216310	0.033979	0.756801	S	6
PC4	0.038137	0.848034	1.22039	0.042417	0.035128	0.767117	S	40
PC5	0.035044	0.883079	1.12142	0.140199	0.036359	0.799767	S	10
PC6	0.025057	0.908136	0.80183	0.034162	0.037682	0.806607	S	24
PC7	0.022466	0.930602	0.71891	0.128787	0.039106	0.831514	S	17
PC8	0.017426	0.948028	0.55764	0.074942	0.040643	0.844140	S	26
PC9	0.016492	0.964520	0.52775	0.272765	0.042309	0.886653	S	5
PC10	0.009033	0.973553	0.28906	0.151803	0.044120	0.903860	S	9
PC11	0.006153	0.979706	0.19691	0.052421	0.046096	0.908900	S	17
PC12	0.005142	0.984848	0.16454	0.128918	0.048259	0.920644	S	18
PC13	0.003994	0.988842	0.12782	0.189368	0.050639	0.935672	S	13
PC14	0.002561	0.991404	0.08197	0.086851	0.053269	0.941258	S	13
PC15	0.002122	0.993526	0.06790	0.115421	0.056192	0.948039	S	10

TABELA 6-36. Sažetak_HK. Odabrani broj glavnih komponenata je 15. 99.3526% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.

Tabela 6-37 prikazuje snagu modeliranja za sva ulazna obeležja kao i njihov značaj. Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 15 obeležja (značaj od 1 do 15) što predstavlja redukovani set obeležja u cilju pronalaženja MLP-a s boljim performansama kao i pouzdanije klasifikacije.

Obeležje			Značaj
HSC_P_LSC	25	0.999938	1
LS_P_HS	21	0.999928	2
HS	18	0.999915	3
HSC	22	0.999915	4

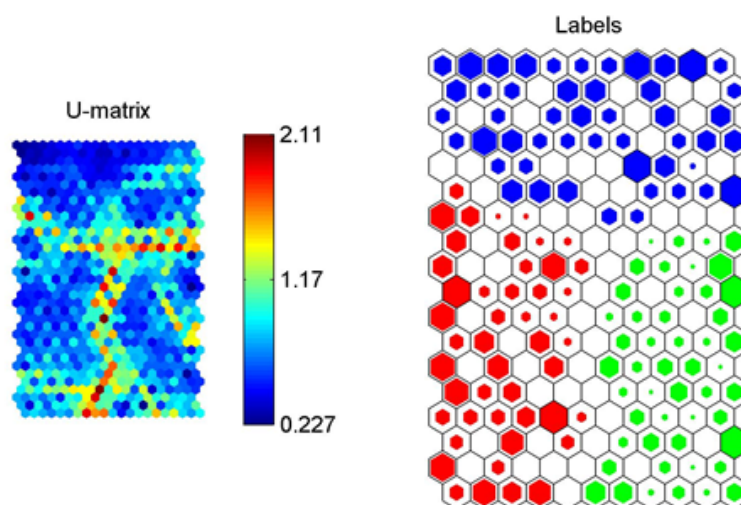
HSC_M_LSC	24	0.999892	5
KURT_AK	17	0.999841	6
LS	19	0.999815	7
LSC	23	0.999815	8
LS_M_HS	20	0.999802	9
3xMF	13	0.998566	10
3xGMF	5	0.998372	11
2xMF	12	0.995385	12
1xGMF	3	0.995184	13
CHI	26	0.994865	14
PK_TSA	30	0.994612	15
CF_SIR	31	0.992779	16
2xGMF	4	0.992631	17
1xEGMF	7	0.992237	18
4xMF	14	0.992105	19
3xEGMF	9	0.991558	20
CF_TSA	32	0.991536	21
OLRMS	1	0.989965	22
2xEGMF	8	0.989922	23
PP_TSA	28	0.989262	24
1xMF	11	0.989228	25
PK_SIR	29	0.988623	26
4xGMF	6	0.988448	27
KURT_SIR	15	0.987983	28
KURT_TSA	16	0.987404	29
OLACC	2	0.986218	30
4xEGMF	10	0.985713	31
PP_SIR	27	0.981370	32

TABELA 6-37. Pohabanost bokova zupčanika: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenta.

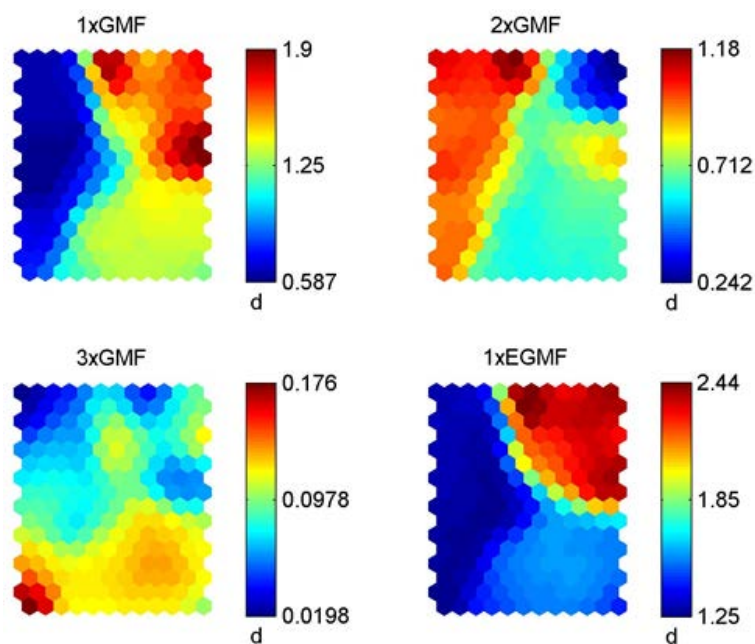
6.7.4. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa korišćenjem ulaznog vektora sa kompletna 32 ulazna obeležja dobijena je relativno loša klasterizacija odnosno relativno velika greška kvantizacije mape. S druge, rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa korišćenjem redukovanog seta obeležja dobivenih analizom glavnih komponenta dobijena je mapa sa greškom kvantizacije od 0.869 prikazana na slici 6-23. Kao relevantna obeležja nakon redukcije dimenzionalnosti metodom analize glavnih komponenta izabrano je prvih 15 obeležja prikazanih u tabeli 6-37. Metodom redukcije dimenzionalnosti obeležja smanjena je greška kvantizacije a vidljivo je i poboljšanje kvaliteta samoorganizovanja ulaznih vektora na matrici rastojanja, slika 6-23. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\HB\HBR.mat“.

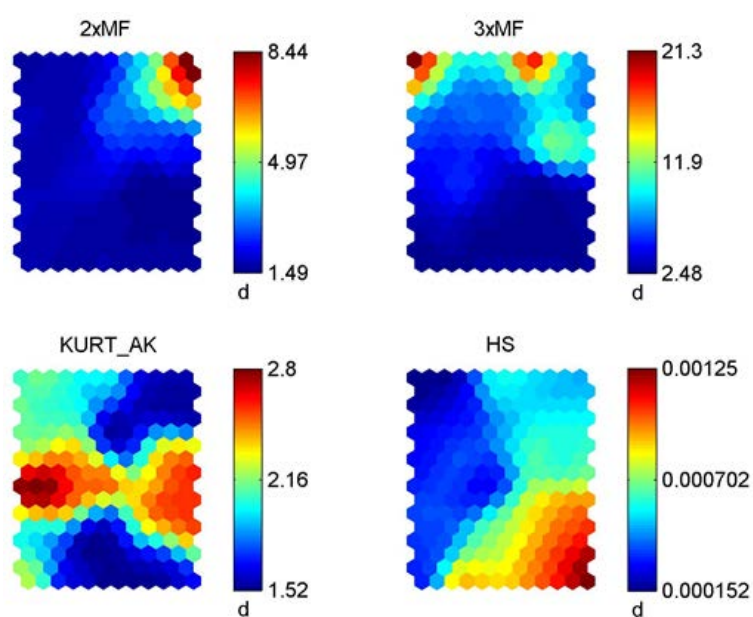


SLIKA 6-23. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 3 redukovanog seta obeležja mape (desno)⁴⁶

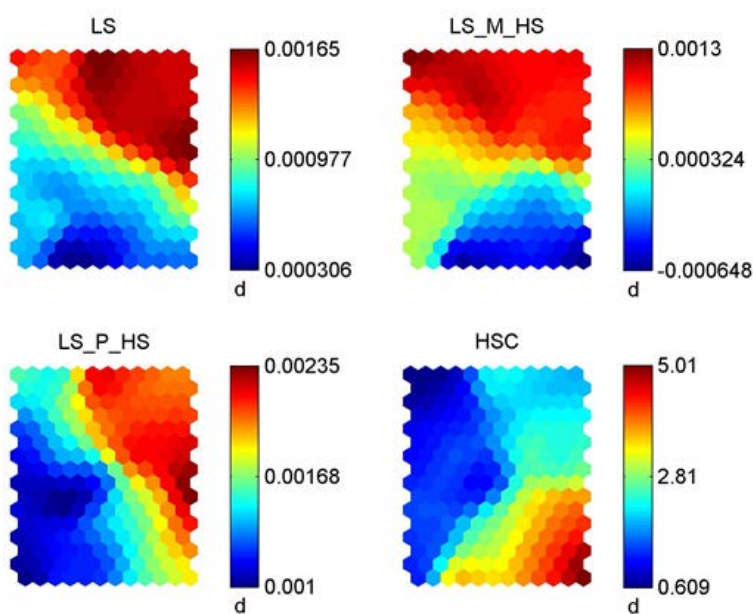


SLIKA 6-24. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja 1xGMF, 2xGMF, 3xGMF, 1xEGMF

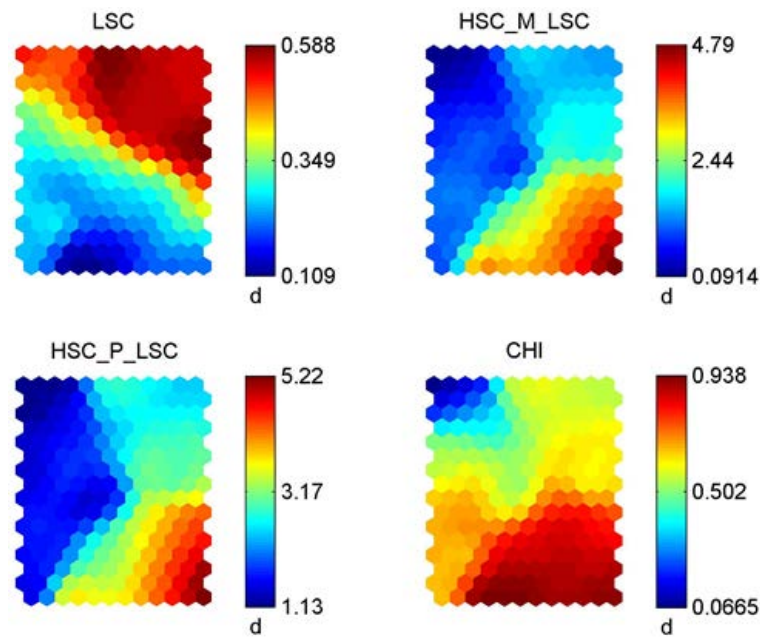
⁴⁶ H1-crvena boja, H2-zelena boja, H3-plava boja



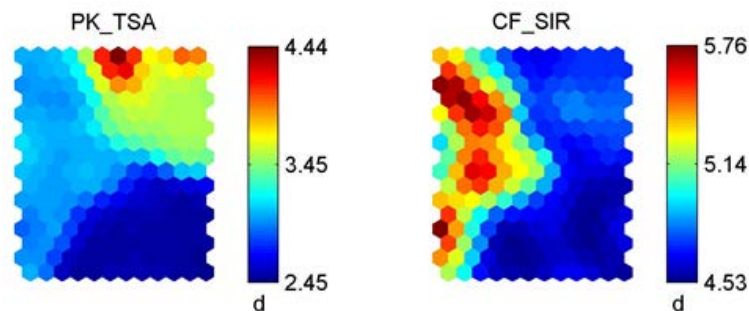
SLIKA 6-25. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xMF, 3xMF, KURT_AK, HS



SLIKA 6-26. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja LS, LS_M_HS, LS_P_HS, HSC



SLIKA 6-27. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja LSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC, CHI



SLIKA 6-28. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja PK_TSA, CF_SIR

6.7.5. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Ostecenja\PRS\PRSR.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima predviđanja, prikazana u tabeli 6-38 uz pregled odabranih parametara, odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške). Kako se da videti iz navedene tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja od 100% za sve nivoe oštećenja zupčastog para. To praktično znači da su pojedine izlazne klase tačno klasifikovane kada su u pitanju vrsta oštećenja u obliku pohabanosti bokova zubi zupčastog para. U odnosu na rezultat dobijen primenom nenadgledanih Kohonenovih mapa, neočekivano, sa većim brojem iteracija je dobijena konfiguracija neuronske mreže veće tačnosti predviđanja. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-39.

Rb	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden active.	Output activation
5	MLP 18-8-3	100.0000	100.0000	100.0000	BFGS 7	Entropy	Tanh	Softmax

TABELA 6-38. Konfiguracija neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovanog ulaznog vektora obeležja

		LABELA H1	LABELA H2	LABELA H3	LABELA All
5.MLP 18-8-3	Total	500.0000	500.0000	500.0000	1500.000
	Correct	500.0000	500.0000	500.0000	1500.000
	Incorrect	0.0000	0.0000	0.0000	0.000
	Correct (%)	100.0000	100.0000	100.0000	100.000
	Incorrect (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.000

TABELA 6-39. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovanog seta ulaznih obeležja

6.8. TEST 4 – DETEKCIJA SVIH OŠTEĆENJA ZUPČASTOG PARA KORISTEĆI KOMPLETAN SET PODATAKA

U ovom testu analizirana su sva oštećenja kako za klasifikaciju analizom MLP-a tako i za klasterizaciju analizom SOM-e. Za detekciju svih oštećenja zupčanika korišćena je ulazna matrica sa:

- svim snimljenim podacima – ukupno 32 obeležja vibracionog signala,
- samo sa obeležjima koji su uticajni nakon provedene PCA analize.

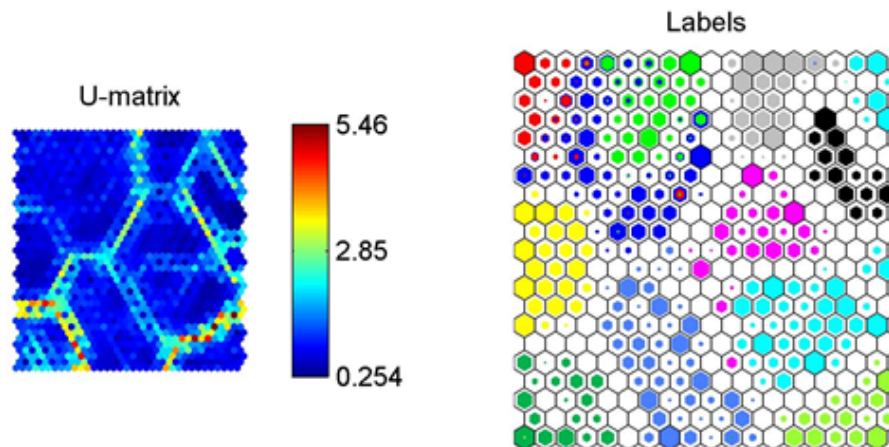
Za svaki nivo oštećenja zupčastog para snimljeno je ukupno 500 zapisa što čini ukupno 5500 zapisa za kompletan test. Datoteka sa ulaznim podacima za kompletan set obeležja se nalazi u fajlu na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\SVI\SVIK.txt“ dok se datoteka redukovanog seta obeležja nakon provedene PCA analize nalazi u fajlu: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Predprocesiranje\Vrsta_Ostecenja\SVI\SVIR.txt“ u istom direktorijumu.

6.8.1. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIIH SAMOORGANIZOVANIIH MAPA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohonenovih mapa pri korišćenju celokupnog seta ulaznih obeležja dobijena je mapa sa greškom kvantizacije 1.656. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u:

„E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\SVI\SVIK.mat“.



SLIKA 6-29. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 4 kompletnog seta obeležja mape (desno)⁴⁷

6.8.2. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM KOMPLETNOG ULAZNOG VEKTORA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Oštećenja\SVI\SVIK.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima pogađanja, prikazana u tabeli 6-40. Pregled odabranih parametara odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške) je dat tabelom 6-40. Kako se da videti iz tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja znatno manju od 100%, odnosno da je predviđanje dosta netačno u odabranom slučaju klasifikacije svih oštećenja. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane kada je u pitanju klasifikacija svih razmatranih oštećenja. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-41 iz koje se može vidjeti da je tačnost predviđanja nedovoljno tačna kako za vrstu oštećenja tako i za njihove nivoe.

Rb	Net. name	Traini perf.	Test perf.	Validatior perf.	Training algorithm	Erro functi.	Hidden aktivati	Output aktivatio
19	MLP 32-17-12	88.6693	86.88889	87.22222	BFGS 16	Entropy	Identity	Softmax

TABELA 6-40. Konfiguracija neuronske mreže testa 4 pri korišćenju kompletnog seta ulaznog vektora obeležja

⁴⁷ OZ0-crvena boja, OZ1-zelena boja, OZ2-plava boja, OZ3-žuta boja, PRS0-ljubičasta boja, PRS5-cijan boja, PRS10-crna boja, PRS15-siva boja, PRS20-blagozelena boja, H1-narandžasta boja, H2-blagoplava boja, H3-smeđa boja.

		LABEL LA-H1	LABEL LA-H2	LABEL LA-H3	LABEL A-OZ0	LABEL A-OZ1	LABEL A-OZ2	LABEL A-OZ3	LABEL A-PRS0	LABEL A-PRS10	LABEL A-PRS15	LABEL A-PRS20	LABEL A-PRS5	LABEL LA-All
19.MLP 32-17-12	Total	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.0000	500.0000	500.0000	501.0000	500.0000	6001.00
	Correct	404.000	481.000	445.000	433.000	385.000	330.000	408.000	499.0000	451.0000	473.0000	488.0000	495.0000	5292.00
	Incorrect	96.0000	19.0000	55.0000	67.0000	115.000	170.000	92.0000	1.0000	49.0000	27.0000	13.0000	5.0000	709.000
	Correct (%)	80.8000	96.2000	89.0000	86.6000	77.0000	66.0000	81.6000	99.8000	90.2000	94.6000	97.4052	99.0000	88.185
	Incorrect (%)	19.2000	3.8000	11.0000	13.4000	23.0000	34.0000	18.4000	0.2000	9.8000	5.4000	2.5948	1.0000	11.815

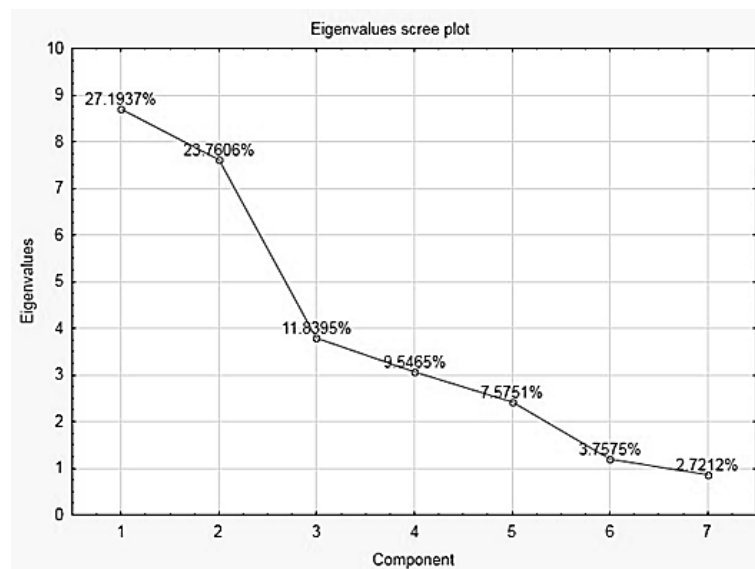
TABELA 6-41. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 4 pri korišćenju kompletnog seta ulaznih obeležja

6.8.3. REZULTATI PRIMENE PCA ALGORITMA U REDUKCIJI DIMENZIONALNOSTI OBELEŽJA

Kao rezultat PCA, odabrano je 15 glavnih komponenata čije su svojstvene vrednosti (eigenvalue) prikazane u tabeli 6-42. U tabeli 6-43 prikazan je sažetak analize glavnih komponenata.

Komponenta (obeležje)	Eigenvalues	% Total variance	Cumulative eigenvalue	Cumulative %
PC 1	8.701992	27.19373	8.70199	27.19373
PC 2	7.603384	23.76058	16.30538	50.95430
PC 3	3.788634	11.83948	20.09401	62.79378
PC 4	3.054879	9.54650	23.14889	72.34028
PC 5	2.424033	7.57510	25.57292	79.91538
PC 6	1.202408	3.75753	26.77533	83.67291
PC 7	0.870788	2.72121	27.64612	86.39412

TABELA 6-42. Svi tipovi oštećenja: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenata



SLIKA 6-30. Svi tipovi oštećenja: individualna varijansa glavnih komponenata

Komponenta (obeležje)	R2X	R2X (Cumul.)	Eigenvalues	Q2	Limit	Q2 (Cumul.)	Signifi.	Iterations
PC 1	0.271937	0.271937	8.701992	0.117152	0.031411	0.117152	S	15
PC 2	0.237606	0.509543	7.603384	0.282672	0.032419	0.366709	S	7
PC 3	0.118395	0.627938	3.788634	0.149850	0.033494	0.461608	S	23
PC 4	0.095465	0.723403	3.054879	0.156304	0.034644	0.545760	S	17
PC 5	0.075751	0.799154	2.424033	0.204884	0.035875	0.638827	S	6
PC 6	0.037575	0.836729	1.202408	0.102880	0.037198	0.675984	S	16
PC 7	0.027212	0.863941	0.870788	0.018244	0.038622	0.681896	UNKNOWN	27

TABELA 6-43. Sažetak_SVIR. Odabrani broj glavnih komponentata je 7. 86.3941% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.

Tabela 6-44 prikazuje snagu modeliranja za sva ulazna obeležja kao i njihov značaj. Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 16 obeležja (značaj od 1 do 16) što predstavlja redukovani set obeležja u cilju pronalaženja MLP-a s boljim performansama kao i pouzdanije klasifikacije.

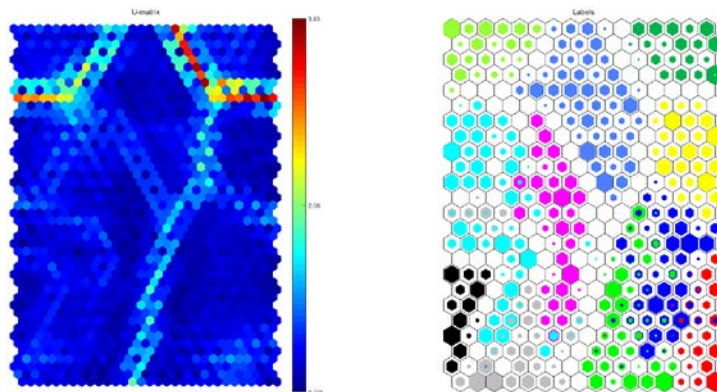
Obeležje	Broj obeležja	Snaga	Značaj
LS_M_HS	20	0.991223	1
LS	19	0.990368	2
LS_P_HS	21	0.988442	3
HS	18	0.987037	4
HSC	22	0.979869	5
HSC_M_LSC	24	0.979868	6
HSC_P_LSC	25	0.967299	7
LSC	23	0.960409	8
OLACC	2	0.946683	9
CHI	26	0.923562	10
3xEGMF	9	0.923215	11
PP_SIR	27	0.921343	12
2xGMF	4	0.920716	13
1xEGMF	7	0.916267	14
PK_SIR	29	0.910155	15
OLRMS	1	0.909475	16
KURT_SIR	15	0.896093	17
2xEGMF	8	0.893102	18
3xGMF	5	0.873908	19
CF_TSA	32	0.832750	20
3xMF	13	0.813719	21
1xMF	11	0.813074	22
PP_TSA	28	0.798780	23
2xMF	12	0.785357	24
CF_SIR	31	0.772903	25
KURT_TSA	16	0.769628	26
4xEGMF	10	0.759167	27
PK_TSA	30	0.756958	28
1xGMF	3	0.749699	29

4xGMF	6	0.741551	30
4xMF	14	0.709164	31
KURT_AK	17	0.464335	32

TABELA 6-44. Svi tipovi oštećenja: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponentata.

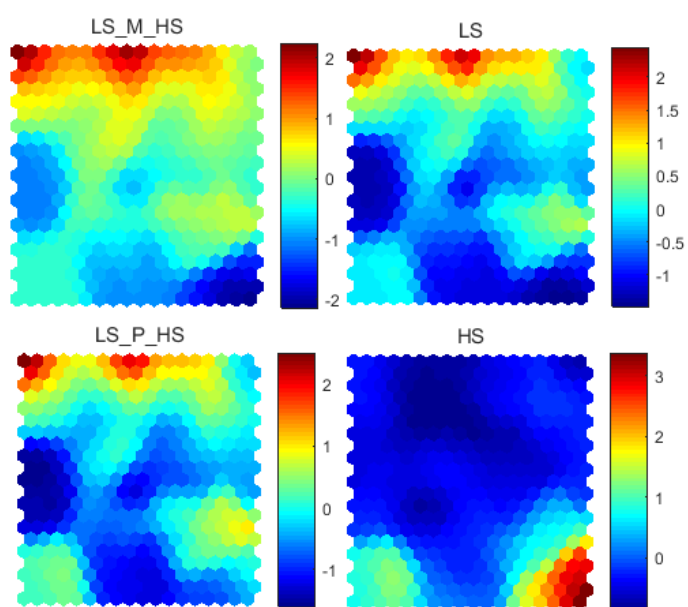
6.8.4. REZULTATI PRIMENE KOHONENOVIH SAMOORGANIZOVANIH MAPA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Kao rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohnenovih mapa korišćenjem ulaznog vektora sa kompletna 32 ulazna obeležja dobijena je relativno loša klasterizacija odnosno relativno velika greška kvantizacije mape. S druge, rezultat obučavanja samoorganizovanih Kohnenovih mapa korišćenjem redukovanog seta obeležja dobivenih analizom glavnih komponentata dobijena je mapa sa greškom kvantizacije od 0.768 prikazana na slici 6-31. Kao relevantna obeležja nakon redukcije dimenzionalnosti metodom analize glavnih komponentata izabrano je prvih 15 obeležja prikazanih u tabeli 6-44. Metodom redukcije dimenzionalnosti obeležja smanjena je greška kvantizacije a vidljivo je i poboljšanje kvaliteta samoorganizovanja ulaznih vektora na matrici rastojanja, slika 6-31. Datoteka sa parametrima dobijene mape se nalazi na priloženom CD-u: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_SOM\Vrsta_Ostecenja\SVI\SVIR.mat“.

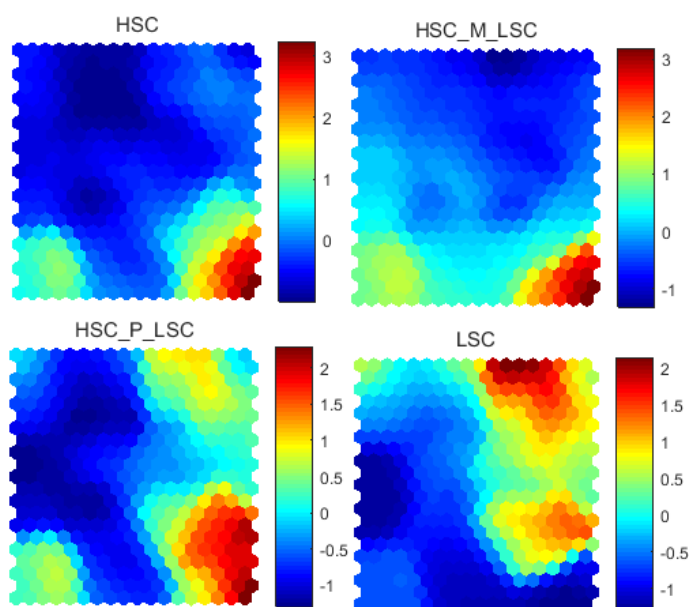


SLIKA 6-31. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 4 redukovanog seta obeležja mape (desno)⁴⁸

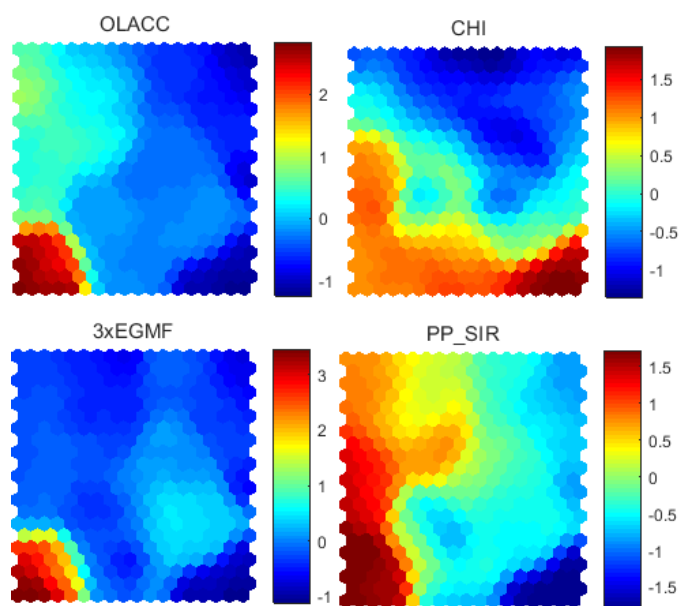
⁴⁸ OZ0-crvena boja, OZ1-zelena boja, OZ2-plava boja, OZ3-žuta boja, PRS0-ljubičasta boja, PRS5-cijan boja, PRS10-crna boja, PRS15-siva boja, PRS20-blagozelena boja, H1-narandžasta boja, H2-blagoplava boja, H3-smeđa boja.



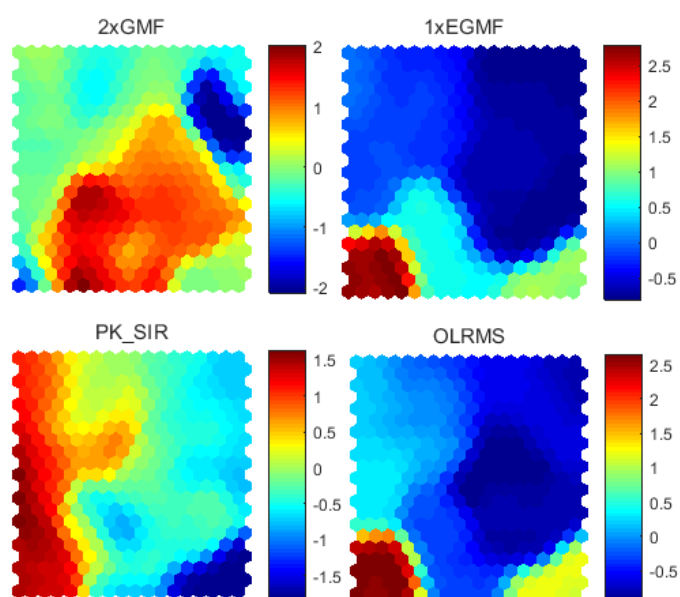
SLIKA 6-32. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja LS_M_HS, LS, LS_P_HS, HS



SLIKA 6-33. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja HSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC, LSC



SLIKA 6-34. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, CHI, 3xEGMF, PP_SIR



SLIKA 6-35. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xGMF, 1xEGMF, PK_SIR, OLRMS

6.8.5. REZULTATI PRIMENE VIŠESLOJNIH PERCEPTRONSKIH NEURONSKIH MREŽA KORIŠĆENJEM REDUKOVANOG SETA OBELEŽJA

Rezultati obučavanja veštačke neuronske mreže dati su fajlom: „E\Probni_Sto\Testovi_VNM\Rezultati_VNM\Vrsta_Oštećenja\SVI\SVIR.spf“ dok su parametri odabrane konfiguracije mreže dati *.xml fajlom u istom direktorijumu. Nakon obučavanja 30 različitih konfiguracija odabrana je i prikazana u tekstu samo jedna konfiguracija sa najboljim rezultatima predviđanja, prikazana u tabeli 6-45 uz pregled odabranih parametara, odabrane konfiguracije (broj skrivenih neurona, tipovi aktivacionih funkcija, metod procene izlazne greške). Kako se da videti iz navedene tabele odabrana mreža ima tačnost predviđanja od 100% osim u slučaju oštećenja nedostatka kompletnog zuba pogonskog zupčanika OZ3 kao i djelimično okrnutog zuba OZ1, OZ2 kao i kod oštećenja u obliku naprsline u korenu zuba pogonskog zupčanika PRS15 i PS20. To praktično znači da su pojedine izlazne klase pogrešno klasifikovane kada je u pitanju klasifikacija svih odabranih vrsta oštećenja i njihovih nivoa. Međutim postignut je znatno veći procenat predviđanja prilikom klasifikacije sveukupnog seta odabranih vrsta oštećenja i njihovih nivoa uz znatno veći broj tačno klasifikovanih oštećenja i njihovih nivoa u iznosu od 100%. U odnosu na rezultat dobijen primenom nenadgledanih Kohonenovih mapa, neočekivano, sa znatno većim brojem iteracija je dobijena konfiguracija neuronske mreže veće tačnosti predviđanja. Uvid u to je dat tzv. matricom konfuzije koja je za prikazanu konfiguraciju mreže data tabelom 6-46.

Rb	Net. name	Traini perf	Test perf.	Validator perf.	Training algorithm	Erro functi	Hidden activati	Output activatio
4	MLP 16-16-12	98.6669	99.11111	98.22222	BFGS 186	SOS	Exponential	Identity

TABELA 6-45. Konfiguracija neuronske mreže testa 4 pri korišćenju redukovano seta ulaznog vektora obeležja

		LABE LA-H1	LABE LA-H2	LABE LA-H3	LABEL A-OZ0	LABEL A-OZ1	LABEL A-OZ2	LABEL A-OZ3	LABEL A-PRS0	LABEL A-PRS10	LABEL A-PRS15	LABEL A-PRS20	LABEL A-PRS5	LABE LA-All
4.MLP 16-16-12	Total	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.000	500.0000	500.0000	500.0000	501.0000	500.0000	6001.00
	Correct	500.000	500.000	500.000	496.000	489.000	488.000	499.000	500.0000	500.0000	455.0000	494.0000	500.0000	5921.00
	Incorrect	0.0000	0.0000	0.0000	4.0000	11.0000	12.0000	1.0000	0.0000	0.0000	45.0000	7.0000	0.0000	80.000
	Correct (%)	100.000	100.000	100.000	99.2000	97.8000	97.6000	99.8000	100.0000	100.0000	91.0000	98.6028	100.0000	98.667
	Incorrect (%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.8000	2.2000	2.4000	0.2000	0.0000	0.0000	9.0000	1.3972	0.0000	1.333

TABELA 6-46. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 4 pri korišćenju redukovanog seta ulaznih obeležja

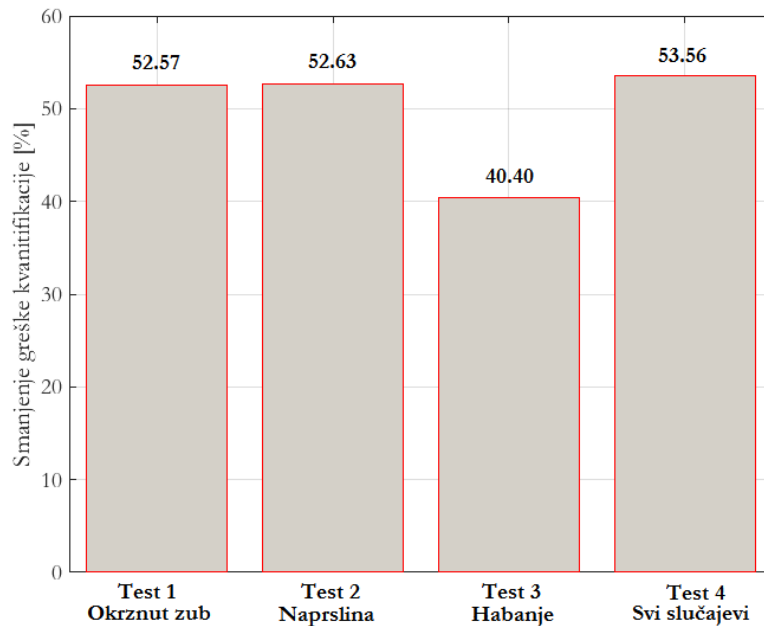
7 ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

7.1. EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA KVALITET SOM MREŽE IZRAŽEN KROZ GREŠKU KVANTIZACIJE

Kako bi se usporedili rezultati dobiveni predloženim pristupom baziranim na VNM i redukciji obeležja primenom PCA metode analizirana je greška kvantizacije kao mere kvaliteta klasterizacije nenadgledane neuronske mreže, odnosno SOM. Rezultati greške kvantizacije kako za kompletan tako i za redukovani set podataka nakon redukcije primenom PCA metode su dati u tabeli 7-1.

Vrsta testa	Vrsta set podataka	Greška kvantizacije/procentat smanjenja
Test 1 - Okrznut zub	Kompletan set podataka	2.703
	Redukovani set podataka	1.282
	Smanjenje greške [%]	52.571
Test 2 - Naprslina	Kompletan set podataka	2.185
	Redukovani set podataka	1.035
	Smanjenje greške [%]	52.632
Test 3 - Habanje	Kompletan set podataka	1.459
	Redukovani set podataka	0.870
	Smanjenje greške [%]	40.404
Test 4 - Svi slučajevi	Kompletan set podataka	1.654
	Redukovani set podataka	0.768
	Smanjenje greške [%]	53.567

TABELA 7-1. Efekti predloženog pristupa na smanjenje greške kvantizacije kao mere kvaliteta klasterizacije SOM



SLIKA 7-1. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na kvalitet SOM matrice / mreže

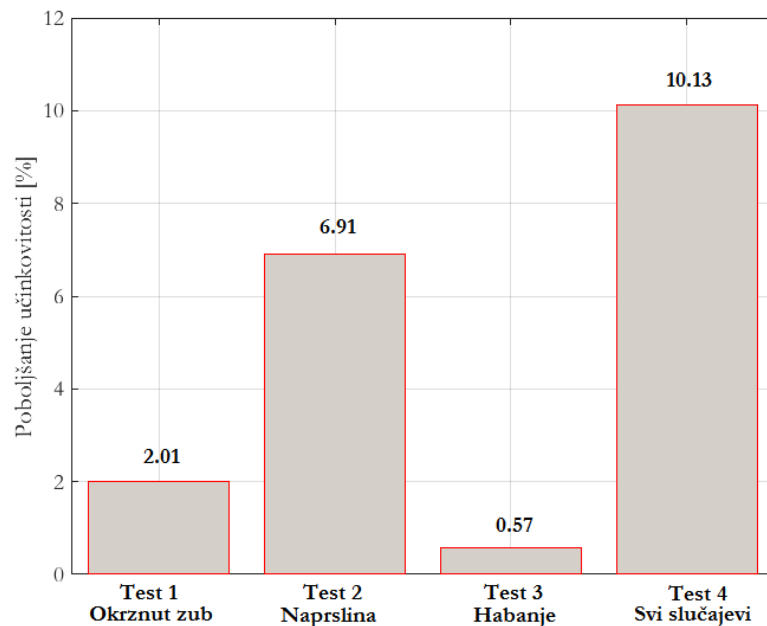
Greška kvantizacije SOM se koristi kao mera za prezentaciju koliko dobro neuroni predstavljaju obrasce ulaza. Drugim rečima, greška kvantizacije se izračunava sabiranjem svih udaljenosti između svakog obrasca ulaza i neurona na koji je mapiran, dajući pojam kvaliteta reprezentacije uz pomoć SOM-e. U radu je razvijen model baziran na analizi glavnih komponenta (PCA) kao metod za redukciju dimenzije skupa podataka uz istovremeno zadržavanje maksimalno moguće varijanse, odnosno primenom PCA redukovan je broj obeležja koja se koriste za donošenje vibrodijagnostičkih zaključaka na osnovu snimljenih signala vibracija nadgledanog zupčastog para. Analizirajući rezultate redukcije broja obeležja ekstraktovanih iz signala vibracija nadgledanih oštećenja zupčastog para kroz grešku kvantizacije SOM vidljivo je da predloženi pristup omogućava poboljšanje klasterizacije nadgledanih oštećenja i procene radnih potencijala zupčastog para. Pojedinačno, poboljšanja za svaki od odabranih testova kroz smanjenje greške kvantizacije su: test 1-okrznut zub 52.75 %, test 2-naprslina u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika 52.63 %, test 3-pohabani bokovi zubi zupčastog para 40.40 %, test 4- svi slučajevi nadgledanih oštećenja 53.56 %.

7.2. EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST OBUČAVANJA VNM

Kako bi se usporedili rezultati dobiveni predloženim pristupom baziranim na VNM i redukciji obeležja primenom PCA metode analiziran je procenat tačnosti obučavanja kao mere postizanja veće tačnosti predviđanja, nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a. Rezultati učinkovitosti obučavanja VNM kako za kompletan tako i za redukovan set podataka nakon redukcije primenom PCA metode su dati u tabeli 7-2.

Vrsta testa	Vrsta set podataka	Odabrana konfiguracija VNM	Učinkovitost obučavanja
Test 1 - Okrznut zub	Kompletan set podataka	MLP 32-19-4	97.429
	Redukovani set podataka	MLP 13-11-4	99.429
	Poboljšanje tačnosti obučavanja [%]		2.011
Test 2 - Narslina	Kompletan set podataka	MLP 32-9-5	93.090
	Redukovani set podataka	MLP 15-11-5	100.000
	Poboljšanje tačnosti obučavanja [%]		6.910
Test 3 - Habanje	Kompletan set podataka	MLP 32-10-3	99.429
	Redukovani set podataka	MLP 18-8-3	100.000
	Poboljšanje tačnosti obučavanja [%]		0.571
Test 4 - Svi slučajevi	Kompletan set podataka	MLP 32-17-12	88.669
	Redukovani set podataka	MLP 16-16-12	98.667
	Poboljšanje tačnosti obučavanja [%]		10.133

TABELA 7-2. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti obučavanja nadgledane neuronske mreže, odnosno MLP-a



SLIKA 7-2. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost obučavanja VNM

Problem obučavanja VNM se svodi na omogućavanje kvalitetnog predviđanja tačnog odgovora odnosno konvergiranju prema tačnom odgovoru u procesu obučavanja. Proces obučavanja uvijek ima određen cilj, odnosno proces obučavanja se sprovodi do postizanja odgovarajuće tačnosti. Veća tačnost obučavanja omogućava tačnije predviđanje, međutim veoma česta pojava je da VNM nikad ne nauči ili procenat tačnosti obučavanja je

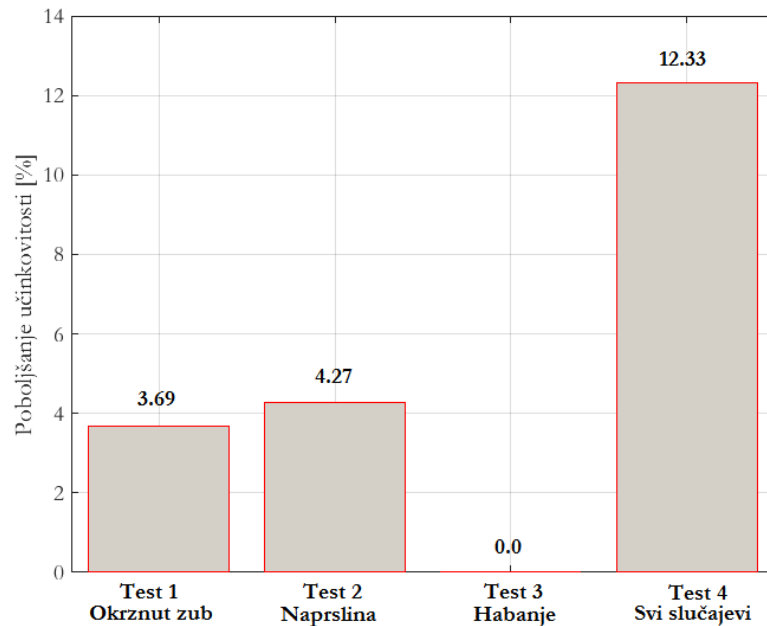
nedovoljno tačan. Ova pojava se dešava ukoliko ulazni set podataka ne sadržava specifične informacije iz kojih se donosi zaključak o željenom izlazu. VNM isto tako ne konvergira prema tačnom odgovoru ukoliko ne poseduje dovoljno podataka kako bi se provelo kompletno obučavanje. Analizirajući rezultate redukcije broja obeležja ekstraktovanih iz signala vibracija nadgledanih oštećenja zupčastog para kroz procenat poboljšanja učinkovitosti obučavanja VNM vidljivo je da predloženi pristup omogućava poboljšanje obočavanja VNM a time i klasifikacije nadgledanih oštećenja kao i procene radnih potencijala zupčastog para. Pojedinačno, poboljšanja za svaki od odabranih testova kroz procenat poboljšanja obučavanja VNM su: test 1-okrznut zub 2.01 %, test 2-naprslina u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika 6.91 %, test 3-pohabani bokovi zubi zupčastog para 0.57 %, test 4-svi slučajevi nadgledanih oštećenja 10.13 %.

7.3. EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST PROVERE VNM

Kako bi se usporedili rezultati dobiveni predloženim pristupom baziranim na VNM i redukciji obeležja primenom PCA metode analiziran je procenat tačnosti obučavanja kao mere postizanja veće tačnosti predviđanja, nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a. Rezultati učinkovitosti provere VNM kako za kompletan tako i za redukovani set podataka nakon redukcije primenom PCA metode su dati u tabeli 7-3.

Vrsta testa	Vrsta set podataka	Odabrana konfiguracija VNM	Učinkovitost provere
Test 1 - Okrznut zub	Kompletan set podataka	MLP 32-19-4	95.667
	Redukovani set podataka	MLP 13-11-4	99.333
	Poboljšanje tačnosti provere [%]		3.691
Test 2 - Narslina	Kompletan set podataka	MLP 32-9-5	95.733
	Redukovani set podataka	MLP 15-11-5	100.000
	Poboljšanje tačnosti provere [%]		4.267
Test 3 - Habanje	Kompletan set podataka	MLP 32-10-3	100.000
	Redukovani set podataka	MLP 18-8-3	100.000
	Poboljšanje tačnosti provere [%]		0.000
Test 4 - Svi slučajevi	Kompletan set podataka	MLP 32-17-12	86.889
	Redukovani set podataka	MLP 16-16-12	99.111
	Poboljšanje tačnosti provere [%]		12.332

TABELA 7-3. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti provere kao mere testiranja konačnog rešenja s ciljem potvrde kvaliteta odabranog modela predviđanja nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a



SLIKA 7-3. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost provere VNM

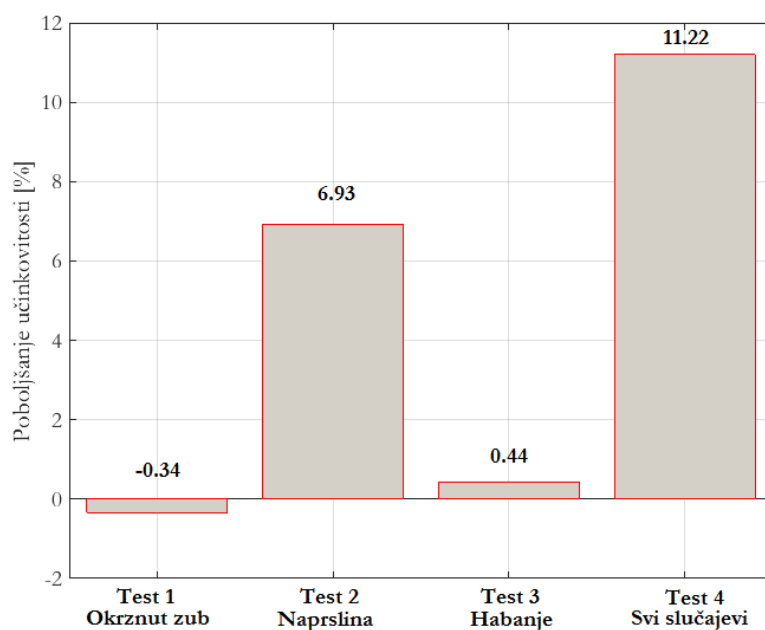
Proces provere kod predviđanja koristeći VNM se koristi u svrhu testiranja konačnog rešenja s ciljem potvrde kvaliteta odabranog modela, odnosno set podataka za proveru se koristi kako bi se procenio odabrani model ili filtrirali loši modeli. Analizirajući rezultate redukcije broja obeležja ekstraktovanih iz signala vibracija nadgledanih oštećenja zupčastog para kroz procenat poboljšanja učinkovitosti provere VNM vidljivo je da predloženi pristup omogućava poboljšanje provere VNM a time i klasifikacije nadgledanih oštećenja kao i procene radnih potencijala zupčastog para. Pojedinačno, poboljšanja za svaki od odabranih testova kroz procenat poboljšanja provere VNM su: test 1-okrznut zub 3.69 %, test 2-naprslna u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika 4.27 %, test 3-pohabani bokovi zubi zupčastog para 0.0 %, test 4-svi slučajevi nadgledanih oštećenja 12.33 %.

7.4. EFEKAT REDUKCIJE DIMENZIONALNOSTI NA UČINKOVITOST VALIDACIJE VNM

Kako bi se usporedili rezultati dobiveni predloženim pristupom baziranim na VNM i redukciji obeležja primenom PCA metode analiziran je procenat tačnosti validacije kao mere minimizacije suvišnog podešavanja (prilagođavanja), nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a. Rezultati učinkovitosti validacije VNM kako za kompletan tako i za redukovan set podataka nakon redukcije primenom PCA metode su dati u tabeli 7-4.

Vrsta testa	Vrsta set podataka	Odabrana konfiguracija VNM	Učinkovitost validacije
Test 1 - Okrznut zub	Kompletan set podataka	MLP 32-19-4	98.000
	Redukovani set podataka	MLP 13-11-4	97.667
	Poboljšanje tačnosti validacije [%]		-0.341
Test 2 - Narslina	Kompletan set podataka	MLP 32-9-5	93.067
	Redukovani set podataka	MLP 15-11-5	100.000
	Poboljšanje tačnosti validacije [%]		6.933
Test 3 - Habanje	Kompletan set podataka	MLP 32-10-3	99.556
	Redukovani set podataka	MLP 18-8-3	100.000
	Poboljšanje tačnosti validacije [%]		0.444
Test 4 - Svi slučajevi	Kompletan set podataka	MLP 32-17-12	87.222
	Redukovani set podataka	MLP 16-16-12	98.222
	Poboljšanje tačnosti validacije [%]		11.199

TABELA 7-4. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti validacije kao mere minimizacije suvišnog podešavanja (prilagođavanja) nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a



SLIKA 7-4. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost validacije VNM

Proces validacije kod predviđanja koristeći VNM se koristi u svrhu minimizacije suvišnog podešavanja (prilagođavanja). U ovom koraku ne prilagođavaju se težinski koeficijenti neurona već se samo sprovodi verifikacija da li prilikom povećanja tačnosti koristeći set podataka za obučavanje dovodi do povećanja tačnosti koristeći set podataka koji se nije koristio ranije u mreži ili se mreža nije obučavala na osnovu njih. Posmatrajući procenat poboljšanja učinkovitosti validacije vidljivo je da u slučajevima test 1-okrznut zub i test 3-

pohabani bokovi zubi zupčastog para postoji mogućnost suvišnog podešavanja (prilagođavanja) dok u druga dva slučaja ta mogućnost je isključena. Pojedinačno, poboljšanja za svaki od odabranih testova kroz procenat poboljšanja validacije VNM su: test 1-okrznut zub -0.34 %, test 2-naprslina u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika 6.93 %, test 3-pohabani bokovi zubi zupčastog para 0.44 %, test 4-svi slučajevi nadgledanih oštećenja 11.22 %.

7.5. ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 1

Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 14 obeležja koja predstavljaju značajna obeležja odnosno redukovani set obeležja. Značaj varijable (obeležja) je veoma korisna informacija u analizi glavnih komponenata. Tabela 7-1 prikazuje redukovani set obeležja kao i njihov opis dobijenih na osnovu PCA analize ulaznog seta obeležja.

Obeležje	Opis
HS	Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika
HSC	Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika
HSC_P_LSC	Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
HSC_M_LSC	Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
LS_P_HS	Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LSC	Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
LS	Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika
LS_M_HS	Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
CHI	Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „ HSC_M_LSC“ i „ HSC_P_LSC“
PK_TSA	Peak parametar (vršna vrednost) vremenski osrednjenog signala
2xGMF	Amplituda drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
OLACC	Nivo sumarnog ubrzanja [g] u frekventnom opsegu 10 Hz – 20 kHz
PP_TSA	Peak to peak parametar vremenski osrednjenog signala
PK_SIR	Peak parametar (vršna vrednost) sirovog vremenskog signala

TABELA 7-5. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 1

Analizirajući obeležja u slučaju Test 1- oštećenja zupčanika u obliku okrznutog jednog zuba pogonskog zupčanika kroz tri nivoa okrznuća vidljivo je da su obeležja koja su u određenoj korelaciji sa Cepstrumom sirovog signala odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika (prvih devet obeležja po značaju) su najznačajnija a nakon toga obeležja koja su u korelaciji sa vremenski osrednjenim signalom.

7.6. ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 2

Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 15 obeležja koja predstavljaju značajna obeležja odnosno redukovani set obeležja. Značaj varijable (obeležja) je veoma korisna informacija

u analizi glavnih komponenata. Tabela 7-2 prikazuje redukovani set obeležja kao i njihov opis dobijenih na osnovu PCA analize ulaznog seta obeležja.

Obeležje	Opis
LS_M_HS	Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LS	Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika
HSC_M_LSC	Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
LS_P_HS	Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LSC	Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
HSC	Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika
HS	Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika
HSC_P_LSC	Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
PK_SIR	Peak parametar (vršna vrednost) sirovog vremenskog signala
CHI	Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“.
2xGMF	Amplituda drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
3xGMF	Amplituda trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
2xEGMF	Energija sadržana oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
1xGMF	Amplituda prvog harmonika frekvencije uzupčavanja
OLACC	Nivo sumarnog ubrzanja [g] u frekventnom opsegu 10 Hz – 20 kHz

TABELA 7-6. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 2

Analizirajući obeležja u slučaju Test 2-oštećenja zupčanika u obliku naprsline u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika kroz četiri nivoa naprsline vidljivo je da su obeležja koja su u određenoj korelaciji sa Cepstrumom sirovog signala odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika (prvih osam obeležja po značaju) su najznačajnija a nakon toga obeležja koja su u korelaciji sa obeležjima sirovim signalom kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. Bitno je napomenuti da u slučaju ove vrste oštećenja nisu se pojavila značajna obeležja koja koriste vremenski osrednjen signal koji se smatra visoko pogodan u ocjeni stanja zupčastih parova.

7.7. ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 3

Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 15 obeležja koja predstavljaju značajna obeležja odnosno redukovani set obeležja. Značaj varijable (obeležja) je veoma korisna informacija u analizi glavnih komponenata. Tabela 7-3 prikazuje redukovani set obeležja kao i njihov opis dobijenih na osnovu PCA analize ulaznog seta obeležja.

Obeležje	Opis
HSC_P_LSC	Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog

	zupčanika
LS_P_HS	Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
HS	Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika
HSC	Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika
HSC_M_LSC	Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
KURT_AK	Kurtosis parametar izveden iz autokorelacijske funkcije sirovog vremenskog signala (AutoCorrelation)
LS	Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika
LSC	Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
LS_M_HS	Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
3xMF	Faktor modulacije oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
3xGMF	Amplituda trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
2xMF	Faktor modulacije oko drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
1xGMF	Amplituda prvog harmonika frekvencije uzupčavanja
CHI	Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“
PK_TSA	Peak parametar (vršna vrednost) vremenski osrednjenog signala

TABELA 7-7. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 3

Analizirajući obeležja u slučaju Test 3-oštećenja zupčanika u obliku pohabanih bokova oba zupčanika zupčastog para kroz tri nivoa pohabanosti vidljivo je da su obeležja koja su u određenoj korelaciji sa Cepstrumom sirovog signala odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika (prvih osam obeležja po značaju, izuzev KURT_AK) su najznačajnija a nakon toga obeležja koja su u korelaciji sa obeležjima sirovog signala kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. U slučaju ove vrste oštećenja značajna obeležja koja koriste vremenski osrednjen signal koji se smatra visoko pogodan u ocjeni stanja zupčastih parova su na zadnjem mjestu. Drugi stepen značajnosti zauzimaju obeležja koja se odnose na faktore modulacije oko drugog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja kao i amplitude prvog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja.

7.8. ANALIZA REDUKOVANIH OBELEŽJA ZA TEST 4

Kao relevantna obeležja izabrano je prvih 16 obeležja koja predstavljaju značajna obeležja odnosno redukovani set obeležja. Značaj varijable (obeležja) je veoma korisna informacija u analizi glavnih komponenata. Tabela 7-4 prikazuje redukovani set obeležja kao i njihov opis dobijenih na osnovu PCA analize ulaznog seta obeležja.

Obeležje	Opis
LS_M_HS	Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
LS	Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika
LS_P_HS	Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika
HS	Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika
HSC	Odnos amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika

HSC_M_LSC	Razlika odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
HSC_P_LSC	Suma odnosa amplitude rahmonika pogonskog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) pogonskog zupčanika i odnosa amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
LSC	Odnos amplitude rahmonika gonjenog zupčanika i amplitude rahmonika neoštećenog (novog) gonjenog zupčanika
OLACC	Nivo sumarnog ubrzanja [g] u frekventnom opsegu od 10 Hz do 20 kHz
CHI	Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“.
3xEGMF	Energija sadržana oko trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja
PP_SIR	Peak to peak parametar sirovog vremenskog signala
2xGMF	Amplituda drugog harmonika frekvencije uzupčavanja
1xEGMF	Energija sadržana oko prvog harmonika frekvencije uzupčavanja
PK_SIR	Peak parametar (vršna vrednost) sirovog vremenskog signala
OLRMS	Srednja kvadratna vrednost brzine vibracija [mm/s] signala u frekventnom opsegu 10Hz – 1 kHz

TABELA 7-8. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize

Analizirajući obeležja u slučaju Test 4-oštećenja zupčanika u obliku svih prethodno izvedenih testova nad modelom zupčastog prenosnika, odnosno sa svim tipovima oštećenja i njihovim pojedinačnim nivoima vidljivo je da su obeležja koja su u određenoj korelaciji sa Cepstrumom sirovog signala odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika (prvih osam obeležja po značaju) su najznačajnija a nakon toga obeležja koja su u korelaciji sa obeležjima sirovog signala kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. Drugi stepen značajnosti zauzimaju obeležja koja se odnose na nivo sumarnog ubrzanja u frekventnom opsegu od 10 Hz do 20 kHz, energiju sadržanu oko prvog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja, peak to peak parametar sirovog vremenskog signala kao i amplitude drugog harmonika frekvencije uzupčavanja.

7.9. ANALIZA OBELEŽJA ZA VIBRODIJAGNOSTIKU ZUPČASTIH PAROVA DOBIVENIH PREDLOŽENIM PRISTUPOM

Na osnovu sveukupne analize redukovanog seta obeležja i nadgledanih vrsta oštećenja zupčastog para razmatranih u ovom radu može se zaključiti da su najuniverzalnija obeležja u vibrodijagnostici zupčastih parova sledeća obeležja:

1. LS - Amplituda prvog rahmonika gonjenog zupčanika,
2. HS - Amplituda prvog rahmonika pogonskog zupčanika,
3. LS_M_HS - Razlika amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika,
4. LS_P_HS - Suma amplituda rahmonika gonjenog i pogonskog zupčanika,
5. CHI - Cepstrum indikator stanja zupčastog para (Cepstrum Health Indicator) dobiven iz odnosa „HSC_M_LSC“ i „HSC_P_LSC“,
6. 1xGMF, 2xGMF, 3xGMF - Amplituda prvog, drugog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja,

7. 1xEGMF, 2xEGMF, 3xEGMF - Energija sadržana oko prvog, drugog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja.

Bitno je napomenuti da u toku eksperimentalnog dela na ispitnom mernom stolu analizom merenja konstantno je bila prisutna poremećajna sila u obliku modulacije na broju obrtaja neoštećenog gonjenog zupčanika. Poreklo modulacije se nije moglo utvrditi u datim uslovima iako su provedena merenja s ciljem eliminacije krivog vratila gonjenog zupčanika kao i eliminacije krivo montiranog zupčanika na gonjeno vratilo. Imajući u vidu značajnost amplitude prvog harmonika gonjenog zupčanika u prikazanoj analizi može se zaključiti da je navedena pojava mogla nepovoljno uticati na rezultate merenja i analize te da bi zaključci bili pouzdaniji bez prisustva navedene poremećajne sile.

8 ZAKLJUČAK

Osnovna motivacija za istraživanja koja su sprovedena u okviru ove disertacije je kompleksnost dijagnostike oštećenja zupčatih parova, posebno kompleksnost dijagnostike oštećenja u njihovoj ranoj fazi nastanka ali isto tako i praćenja njihovog razvoja. Zupčasti parovi kao kompleksni sastavni elementi zupčastih prenosnika su nerazdvojni sklopovi rotirajućih mašina. Poželjno je efikasno pratiti nastanak i razvoj oštećenja zupčastih parova i time izbeći havarije što bi za posledicu dovelo do visokih troškova i povećanih rizika. Praćenje stanja zupčastog para a sami tim i zupčastog prenosnika gotovo uvek se odnosi na vibrodijagnostiku koja se u suštini bavi ocenom stanja funkcionalnosti mašina i detekcijom ili identifikacijom oštećenja koristeći vanjske vibracije kao indikator stanja. U praćenju stanja koriste se različiti „indikator stanja“ u zavisnosti od tipa prisutnog oštećenja. Poznato je da vibracije emitovane od strane mašine sadrže detaljne informacije o njenom stanju. Razlog je jednostavan, vibracije nastaju od sila koje generišu same komponente mašine. Prisustvo oštećenja proizvodi promene u normalnim delovanjima sila u interakciji, a što se odražava u promeni vrlo često nivoa vibracija a gotovo uvek i sadržaja. Istraživanja u navedenoj oblasti se konstantno provode, što je dovelo do razvoja nekoliko tehnika, danas uspostavljenih za detekciju ili identifikaciju različitih tipova oštećenja zupčastih parova. Međutim, postoje tipovi oštećenja zupčastih parova u kojima primena analize signala vibracija nije dala dobre rezultate, odnosno analizom signala vibracija je nemoguće identifikovati određene tipove oštećenja, pogotovu u njihovoj ranoj fazi nastanka.

Teorije prepoznavanja i klasifikacije (klasterizacije) uzoraka su postali ključni faktori u dijagnostici oštećenja rotirajućih mašina. Neke metode klasifikacije s ciljem nadgledanja stanja opreme koriste odnos između tipa oštećenja i seta obeležja koje je izdvojeno iz prikupljenih signala bez uspostavljanja eksplicitnih modela. Trenutno je veštačka neuronska mreža najpopularnija metoda u ovom domenu. U ovom radu je korištena veštačka inteligencija, odnosno višeslojna perceptronska neuronska mreža (MLP) i samoorganizovane mape obeležja (SOM) uz primenu statističke procedure bazirane na analizi glavnih komponentata (PCA) s ciljem redukovanja broja obeležja a u svrhu pouzdanije dijagnostike oštećenja zupčastog para koristeći signale vibracija prikupljene na kućištu zupčastog prenosnika. Prednosti primene veštačkih neuronskih mreža leže u činjenici njihovog uspešnog korišćenja u donošenju zaključaka na bazi posmatranja. Ova

osobina je veoma pogodna kod primene na kompleksne skupove podataka ili zadataka gdje bi „ručna“ obrada bila nepraktična i nedovoljno tačna. Veštačka neuronska mreža daje dobre rezultate u slučajevima kompleksnih nelinearnih problema bez iskustva i specifičnog znanja o realnom sistemu i ima mogućnost efikasne klasifikacije sa brzim odzivom nakon treniranja. S druge strane odnos između oštećenja zupčastog para i reprezentativnog obeležja baziranog na signalu vibracija je gotovo uvek nelinearan što čini veštačku neuronsku mrežu veoma pogodnom metodom u dijagnostici oštećenja. Iz navedenih razloga su u okviru ovog rada:

- kao alati metode veštačke inteligencije, korištene nenadgledane i nadgledane višeslojne neuronske mreže,
- korištene standardne tehnike postprocesiranja signala u vremenskom i frekventnom domenu u svrhu praktične primene inteligentnih metoda dijagnostike stanja zupčastog prenosiča nezavisno od proizvođača merne opreme za snimanje i analizu vibracija,
- korištena karakteristična obeležja signala dobijena postprocesiranjem kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu imajući u vidu karakteristična obeležja za dijagnostiku zupčastih parova,
- korištena statistička procedura bazirana na analizi glavnih komponenata s ciljem redukovanja dimenzionalnosti obeležja a time i pouzdanijoj klasifikaciji.

Jedan od ciljeva ovog rada bio je i razvoj pouzdanih vibrodijagnostičkih metoda i tehnika za identifikaciju prisutnih različitih kako tipova oštećenja tako i njihovog nivoa, pogotovu nivoa u njihovoj početnoj fazi nastanka. S ciljem provjere tačnosti neuronskih mreža za detekciju razmatranih tipova i nivoa oštećenja zupčastog para odnosno da bi se proverila ispravnost odabira predloženih obeležja signala, projektovan je i izrađen probni sto (model zupčastog prenosiča) na kojem su izvedena sva merenja koja odgovaraju svim razmatranim kombinacijama oštećenja (tri tipa oštećenja zupčastog para uz tri nivoa oštećenja za okrnut zub, oštećenja pohabanih bokova zubi zupčanika uz tri nivoa pohabanosti, te četiri nivoa oštećenja u obliku naprsline u korenu zuba pogonskog zupčanika).

Testirane su različite konfiguracije nenadgledanih i nadgledanih neuronskih mreža za svaki od testova. Broj izlaznih neurona je definisan brojem izlaznih klasa, svaka od mreža ima jedan skriveni sloj pri čemu je broj neurona u njemu, zajedno sa tipovima aktivacionih funkcija, parametar koji se varira u cilju dobijanja mreže sa najmanjom greškom klasifikacije. Iako svi testovi koji su prikazani ovim radom odgovaraju poznatim izlaznim stanjima zupčastog para (tj. poznati su tipovi i nivoi uvedenih odnosno prisutnih oštećenja), korišćene su i nenadgledane samoorganizovane Kohonenove mreže s obzirom da iste poseduju mogućnost detekcije klastera koji odgovara novonastalom oštećenju na zupčastom paru. Za svaki od testova primenjena je statistička procedura analize glavnih komponenata u cilju redukovanja dimenzionalnosti obeležja/promenljivih s ciljem poboljšanja efikasnosti kako nadgledanih tako i nenadgledanih neuronskih mreža.

Test 1 - odgovara situaciji oštećenja zupčanika u obliku okrnutog jednog zuba pogonskog zupčanika kroz tri nivoa okrnuća. Finalni nivo okrnuća ustvari predstavlja oštećenje zupčanika kod kojeg nedostaje kompletan zub. Primena predloženog pristupa vibrodijagnostike ima za cilj utvrđivanje kako tipa oštećenja tako i njegovog nivoa. Za odabranu konfiguraciju mreže tačnost klasifikacije iznosi 97,42% prilikom korišćenja

kompletnog odabranog ulaznog vektora obeležja dok nakon primene PCA metode i korišćenja redukovanog seta obeležja tačnost klasifikacije iznosi 99,15%. Obeležja bazirana na Cepstrum funkciji sirovog signala, odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika su najznačajnija a nakon toga obeležja koja su u korelaciji sa vremenski osrednjenim signalom.

Test 2 - odgovara situaciji oštećenja zupčanika u obliku naprsline u korenu jednog zuba pogonskog zupčanika kroz četiri nivoa naprsline. Za odabranu konfiguraciju mreže tačnost klasifikacije iznosi 93,48% prilikom korišćenja kompletnog odabranog ulaznog vektora obeležja dok nakon primene PCA metode i korišćenja redukovanog seta obeležja tačnost klasifikacije iznosi 100%. Obeležja bazirana na Cepstrum funkciji sirovog signala, odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika su najznačajnija a nakon toga obeležja bazirana na sirovom signalu kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. Bitno je napomenuti da za ovu vrstu oštećenja nisu znatno značajna obeležja bazirana na vremenski osrednjenom signalu, koji se smatra visoko pogodan za dijagnostiku oštećenja zupčastih parova.

Test 3 - odgovara situaciji oštećenja zupčanika u obliku pohabanih bokova zuba zupčastog para kroz tri nivoa pohabanosti. Za odabranu konfiguraciju mreže tačnost klasifikacije iznosi 99,53% prilikom korišćenja kompletnog odabranog ulaznog vektora obeležja dok nakon primene PCA metode i korišćenja redukovanog seta obeležja tačnost klasifikacije iznosi 100%. Obeležja bazirana na Cepstrum funkciji sirovog signala, odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika su najznačajnija a nakon toga obeležja bazirana na sirovom signalu kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. Bitno je napomenuti da za ovu vrstu oštećenja nisu znatno značajna obeležja bazirana na vremenski osrednjenom signalu, koji se smatra visoko pogodan za dijagnostiku oštećenja zupčastih parova. Drugi stepen značajnosti zauzimaju obeležja koja se odnose na faktore modulacije oko drugog i trećeg harmonika kao i amplitude prvog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja.

Test 4 - odgovara situaciji oštećenja zupčastog para u obliku svih prethodno izvedenih testova nad modelom zupčastog prenosnika, odnosno sa svim vrstama oštećenja i njihovim pojedinačnim nivoima. Za odabranu konfiguraciju mreže tačnost klasifikacije iznosi 88,18% prilikom korišćenja kompletnog odabranog ulaznog vektora obeležja dok nakon primene PCA metode i korišćenja redukovanog seta obeležja tačnost klasifikacije iznosi 98,66%. Obeležja bazirana na Cepstrum funkciji sirovog signala, odnosno amplituda prvog rahmonika pogonskog odnosno gonjenog zupčanika su najznačajnija a nakon toga obeležja bazirana na sirovom signalu kako u vremenskom tako i u frekventnom domenu. Drugi stepen značajnosti zauzimaju obeležja koja se odnose na nivo sumarnog ubrzanja u frekventnom opsegu od 10 Hz do 20 kHz, energija sadržana oko prvog i trećeg harmonika frekvencije uzupčavanja, peak to peak parametar kao i amplitude drugog harmonika frekvencije uzupčavanja sirovog vremenskog signala. Bitno je napomenuti da za ovu vrstu oštećenja nisu znatno značajna obeležja bazirana na vremenski osrednjenom signalu, koji se smatra visoko pogodan za dijagnostiku oštećenja zupčastih parova.

Na osnovu iznešenog može se zaključiti da je PCA metoda u stanju kvalitetno izdvojiti dominantne glavne komponente (obeležja signala vibracija) koje sadrže većinu informacija koje su u korelaciji sa oštećenjima zupčastog para te iz ovog razloga klasifikacija oštećenja

zupčastih parova bazirana na veštačkim neuronskim mrežama nakon predprocesiranja metodom glavnih komponenata je pouzdanija i tačnija. Na ovaj način se redukuje dimenzionalnost obeležja i poboljšava efikasnost vibrodijagnostike oštećenja zupčastih parova.

Pravac budućih istraživanja bi obuhvatio proširenje poligona. Predloženi pristup bi se trebao testirati na zupčastim prenosnicima u industriji odnosno kompleksnim zupčastim prenosnicima u smislu širokog opsega radnih režima koji su okarakterisani velikim brojem kombinacija mogućih opterećenja kao i vrsta oštećenja zupčastog para. Isto tako potrebno je provesti detaljniju analizu predloženih najuniverzalnijih obeležja u vibrodijagnostici zupčastih parova.

9 SPISAK SLIKA

SLIKA 1-1. Arhitektura neuronske mreže.....	12
SLIKA 1-2. Pojedinačna kontrola - kao kontrola profila zuba zupčanika	19
SLIKA 1-3. Merenje širine međuzublja koristeći kuglice ili valjčice: d_p – referentni prečnik, D – prečnik kuglice ili valjčica, (a) - merenje u slučaju vanjskog ozubljenja i parnog broja zuba, (b) - merenje u slučaju vanjskog ozubljenja i neparnog broja zuba, (c) - merenje u slučaju unutrašnjeg ozubljenja i parnog broja zuba, (d) - merenje u slučaju unutrašnjeg ozubljenja i neparnog broja zuba	20
SLIKA 1-4. Primer korišćenja termovizije za lokaciju izvora toplote kod zupčastog prenosnika.....	22
SLIKA 1-5. Distribucija čestica u ulju, usvojeno i adaptirano iz [63]	28
SLIKA 1-6. Detekcija promene u signalu vibracija usled uzupčavanja zuba sa pukotinom	28
SLIKA 2-1. Različite faze sprezanja zuba[23]	32
SLIKA 2-2. Uniformno habanje po svim zubima zupčanika uz izražene frekvencije uzupčavanja i njene harmonike	34
SLIKA 2-3. Prikaz amplitudne modulacije u vremenskom domenu - pojasno filtriran signal sa zupčastog para gde gonjeni zupčanik ima 57 zuba. Razmak između kursora odgovara jednom obrtaju gonjenog zupčanika.....	35
SLIKA 2-4. Velika istrošenost podnožja zubi – levo. Pri vrhu zubi vide se utori po cijeloj površini boka a na desnoj strani bokova došlo je do plastične deformacije – desno	39
SLIKA 2-5. Nejednako „nošenje“ odnosno jedna strana zupčanika ima veću površinu preklopa.....	39
SLIKA 2-6. Početni stadij zaribavanja – levo, adhezija – desno	39
SLIKA 2-7. Erozija - levo, korozija - desno	40
SLIKA 2-8. Početno rupičenje (pitting) – levo, uznapredovalo rupičenje - desno	41
SLIKA 2-9. Početna naprslina- levo, završna naprslina - desno	41
SLIKA 2-10. Lom zuba delimičan – levo, lom kompletnog zuba - desno	41
SLIKA 3-1. Cilindrični zupčasti prenosnici: a) pravi zupci (vanjsko ozubljenje), b) pravi zupci (unutrašnje ozubljenje), c) kosi zupci (helikoidni zupci), d) strelasti zupci	43
SLIKA 3-2. Konični zupčasti prenosnici: a) pravi zupci, b) kosi zupci, c) zakrivljeni zupci	44
SLIKA 3-3. Vizuelizacija obrasca uzupčavanja dva zupčanika	47

SLIKA 3-4. Sirov signal vibracija koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja.....	48
SLIKA 3-5. Sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasnofiltriran oko frekvencije uzupčavanja.....	49
SLIKA 3-6. Sinhronizovano osrednjeni signal koji odgovara zupčastom paru sa jednim nedostajućim zubom na ulaznom zupčaniku pojasno filtriran oko frekvencije uzupčavanja i zumiran nad 4 ciklusa sprezanja zupčanika	49
SLIKA 4-1. Dijagram dijagnostike oštećenja	51
SLIKA 4-2. Način dobijanja različitih vremenskih vibracionih signala zupčastog prenosnika i njihova karakteristična obeležja, modifikovano i preuzeto iz [82]	53
SLIKA 4-3. Ekstrakcija komponente frekventnog spektra nad prvim harmonikom frekvencije uzupčavanja i energija frekventnog pojasa oko nje – snimak sa korištenog probnog stola (slučaj sa nedostajućim zupcem pogonskog zupčanika).....	57
SLIKA 4-4. Frekvencijski spektar oštećenog zupčastog para, uvećan oko frekvencije uzupčavanja i njenih bočnih pojaseva.....	57
SLIKA 4-5. Algoritam dobijanja cepstrum funkcije.....	58
SLIKA 4-6. Cepstrum funkcija snimljena na probnom stolu – slučaj sa pohabanim zupčanicima	59
SLIKA 4-7. Cepstrum funkcija snimljena na probnom stolu – slučaj sa ispravnim zupčanicima	60
SLIKA 4-8. Ekvivalentni nazivi obeležja signala	62
SLIKA 4-9. Prikaz primene STFT koristeći različite dužine otvora	65
SLIKA 5-1. Jednostavni dvodimenzionalni set podataka za ilustraciju anomalija.....	73
SLIKA 5-2. Struktura biološkog neurona.....	77
SLIKA 5-3. Model veštačkog neurona, LEVO-pojednostavljena forma i DESNO-razvijen oblik	77
SLIKA 5-4. Prikaz slojevite arhitekture veštačke neuralne mreže	79
SLIKA 5-5. Prikaz najčešće korištenih aktivacionih funkcija u okviru neuronskih mreža [119], promenljiva v predstavlja ulazni signal.	80
SLIKA 5-6. Tipovi neuronskih mreža, modifikovano i preuzeto iz [124]	83
SLIKA 5-7. Problem dimenezionalnosti, modifikovano i preuzeto iz [135]	86
SLIKA 5-8. Transformacija originalnih varijabli iz trodimenzionalnog u dvodimenzionalni prostor, modifikovano i preuzeto iz [141].	88
SLIKA 5-9. Osnovna arhitektura SOM-e. Na levoj strani je prikazan prostor izlaza dok je na desnoj strani prikazan primer ulaznog prostora. U ovom slučaju svaki vektor se sastoji od samo dve komponente.	91
SLIKA 5-10. Proces treniranja SOM-e uključuje poklapanje svakog ulaznog obrasca u mreži, identifikaciju najbližeg neurona (leva strana) i ažuriranje pozicije neurona kako bi se poboljšala reprezentacija ulaznog obrasca	91
SLIKA 5-11. Pojam susedstva u izlaznom prostoru (leva strana) prisiljava kretanje svih susednih neurona u ulaznom prostoru (desna strana).....	92
SLIKA 5-12. Prikazivanje ulaznog prostora s 45 ulaznih obrazaca i 2 neurona, greška kvantizacije je data sumom svih udaljenosti svakog ulaznog obrasca do najbližeg neurona.....	93
SLIKA 5-13. Topološka greška je data na način koliko neće puta drugi najbliži sused u ulaznom prostoru (leva strana) mapirati susedstvu neurona u izlaznom prostoru (desna strana)	93
SLIKA 5-14. Siva skala U-matrice SOM-e	95

SLIKA 5-15. Ilustracija mapiranja uz pomoć SOM-e kao i dodeljivanje boje vektoru težine u cilju vizualizacije sličnosti.....	95
SLIKA 6-1. Probni sto za analizu vibracija rotirajućih mašina sa zupčastim prenosnicima.....	97
SLIKA 6-2. Korišteni zupčanik sa oštećenjem - okrznut zub, $a = 0,25c$ mm, $b = 0,5c$ mm, $c = 1xc$	99
SLIKA 6-3. Korišteni zupčanik sa oštećenjem – naprslina u korenu zuba, (a) $5 \times 0,5$, (b) $10 \times 0,5$, (c) $15 \times 0,5$, (d) $20 \times 0,5$	100
SLIKA 6-4. Šematski prikaz dimenzija naprsline: (a) – ugao naprsline, (b) – širina zupčanika	100
SLIKA 6-5. Zupčanik sa oštećenjem – pohabani zubi, (a) - nivo 1, (b) - nivo 2, (c) – nivo 3	101
SLIKA 6-6. Laserski davač broja obrtaja i reflektujuća markica	102
SLIKA 6-7. Frekventni spektar do 5 kHz sa probnog stola sa prikazanim diskretnim frekventnim pojasevima za ocenu energije sadržane u delovima spektra	103
SLIKA 6-8. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 1 kompletnog seta obeležja mape (desno).....	110
SLIKA 6-9. Okrznut zub: individualna varijansa glavnih komponenata	113
SLIKA 6-10. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 1 redukovanog seta obeležja mape (desno)).....	115
SLIKA 6-11. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja HS, HSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC.....	115
SLIKA 6-12. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja LS, LS_M_HS, LS_P_HS, LSC.....	116
SLIKA 6-13. Komponentne ravni za test 1 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, 2xGMF, CHI, PK_TSA, PP_TSA, PK_SIR.....	117
SLIKA 6-14. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 2 kompletnog seta obeležja mape (desno).....	123
SLIKA 6-15. Naprslina u korenu zuba: individualna varijansa glavnih komponenata.....	124
SLIKA 6-16. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 2 redukovanog seta obeležja mape (desno).....	126
SLIKA 6-17. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, 1xGMF, 2xGMF, 3xGMF	127
SLIKA 6-18. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xEGMF, HS, LS, LS_M_HS	127
SLIKA 6-19. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja LS_P_HS, HSC, LSC, HSC_M_LSC.....	128
SLIKA 6-20. Komponentne ravni za test 2 redukovanog seta obeležja, obeležja HSC_P_LSC, CHI, PP_SIR	128
SLIKA 6-21. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 3 kompletnog seta obeležja mape (desno).....	133
SLIKA 6-22. Pohabanost bokova zupčastog para: individualna varijansa glavnih komponenata.....	135
SLIKA 6-23. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 3 redukovanog seta obeležja mape (desno).....	137
SLIKA 6-24. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja 1xGMF, 2xGMF, 3xGMF, 1xEGMF	137
SLIKA 6-25. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xMF, 3xMF, KURT_AK, HS.....	138

SLIKA 6-26. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja LS, LS_M_HS, LS_P_HS, HSC.....	138
SLIKA 6-27. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja LSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC, CHI.....	139
SLIKA 6-28. Komponentne ravni za test 3 redukovanog seta obeležja, obeležja PK_TSA, CF_SIR.....	139
SLIKA 6-29. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 4 kompletnog seta obeležja mape (desno).....	141
SLIKA 6-30. Svi tipovi oštećenja: individualna varijansa glavnih komponenata.....	143
SLIKA 6-31. Matrica rastojanja (levo) i topologije mape sa superponiranim projekcijama ulaznih vektora za test 4 redukovanog seta obeležja mape (desno).....	145
SLIKA 6-32. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja LS_M_HS, LS, LS_P_HS, HS.....	146
SLIKA 6-33. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja HSC, HSC_M_LSC, HSC_P_LSC, LSC.....	146
SLIKA 6-34. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja OLACC, CHI, 3xEGMF, PP_SIR.....	147
SLIKA 6-35. Komponentne ravni za test 4 redukovanog seta obeležja, obeležja 2xGMF, 1xEGMF, PK_SIR, OLRMS.....	147
SLIKA 7-1. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na kvalitet SOM matrice / mreže.....	151
SLIKA 7-2. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost obučavanja VNM.....	152
SLIKA 7-3. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost provere VNM.....	154
SLIKA 7-4. Efekat redukovanja dimenzionalnosti na učinkovitost validacije VNM.....	155

10 SPISAK TABELA

TABELA 1-1. Procedure klasifikacije onečišćenja ulja.....	25
TABELA 1-2. Pregled promena - „Stari“ ISO 4406:1987 i „Novi“ ISO 4406:1999	27
TABELA 1-3. Podela broja čestica u razrede čistoće	27
TABELA 6-1. Osnovne dimenzije eksperimentalnog zupčastog para korištenog na probnom stolu.....	98
TABELA 6-2. Geometrije različitih nivoa okrnutog zuba	99
TABELA 6-3. Geometrije različitih nivoa naprsline.....	101
TABELA 6-4. Dimenzije različitih nivoa pohabanosti zupčanika izražene preko mere preko zuba.....	101
TABELA 6-5. Frekvencije uzupčavanja i njihovi harmonici	103
TABELA 6-6. Donje i gornje granice diskretnih frekventnih opsega oko harmonika frekvencija uzupčavanja	103
TABELA 6-7. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik bez oštećenja, labela “OZ0”	107
TABELA 6-8. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa prvim nivoom okrnuća zuba, labela “OZ1”	108
TABELA 6-9. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa drugim nivoom okrnuća zuba, labela “OZ2”	108
TABELA 6-10. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 1 – pogonski zupčanik sa trećim nivoom okrnuća zuba, labela “OZ3”	109
TABELA 6-11. Konfiguracija neuronske mreže testa 1 pri korišćenju kompletnog ulaznog vektora obeležja	111
TABELA 6-12. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 1 pri korišćenju kompletnog seta ulaznih obeležja.....	112
TABELA 6-13. Okrnut zub: svojstvena vrednost, individualna i zbirna-kumulativna varijansa glavnih komponenata.....	112
TABELA 6-14. Sažetak_OZK. Odabrani broj glavnih komponenata je 8. 87.4658% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.	113
TABELA 6-15. Okrnut zub: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenata.....	114

TABELA 6-16. Konfiguracija neuronske mreže testa 1 pri korišćenju redukovano­g ulaznog vektora obeležja	117
TABELA 6-17. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 1 pri korišćenju redukovano­g seta ulaznih obeležja.....	118
TABELA 6-18. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS0”.....	119
TABELA 6-19. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS5”.....	120
TABELA 6-20. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS10”.....	121
TABELA 6-21. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS15”.....	121
TABELA 6-22. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 2 – pogonski zupčanik sa prslinom u korenu zuba pogonskog zupčanika, labela “PRS20”.....	122
TABELA 6-23. Konfiguracija neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano­g ulaznog vektora obeležja	123
TABELA 6-24. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano­g seta ulaznih obeležja.....	124
TABELA 6-25. Naprslina u korenu zuba: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenata.....	124
TABELA 6-26. Sažetak_PKSK. Odabrani broj glavnih komponenata je 7. 87.3068% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.	125
TABELA 6-27. Naprslina u korenu zuba: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenata.....	126
TABELA 6-28. Konfiguracija neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano­g ulaznog vektora obeležja	129
TABELA 6-29. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 2 pri korišćenju redukovano­g seta ulaznih obeležja.....	129
TABELA 6-30. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabanni bokovi zupčastog para nivo 1, labela “H1”	130
TABELA 6-31. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabanni bokovi zupčastog para nivo 2, labela “H2”	131
TABELA 6-32. Osnovni statistički pokazatelji obeležja snimljenih signala za test 3 – pohabani bokovi zupčastog para nivo 3, labela “H3”.....	132
TABELA 6-33. Konfiguracija neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovano­g ulaznog vektora obeležja	133
TABELA 6-34. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovano­g seta ulaznih obeležja.....	134
TABELA 6-35. Pohabanost bokova zupčanika: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenata.....	134
TABELA 6-36. Sažetak_HK. Odabrani broj glavnih komponenata je 15. 99.3526% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.	135
TABELA 6-37. Pohabanost bokova zupčanika: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenata.....	136
TABELA 6-38. Konfiguracija neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovano­g ulaznog vektora obeležja	140
TABELA 6-39. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 3 pri korišćenju redukovano­g seta ulaznih obeležja.....	140

TABELA 6-40. Konfiguracija neuronske mreže testa 4 pri korišćenju kompletnog seta ulaznog vektora obeležja	141
TABELA 6-41. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 4 pri korišćenju kompletnog seta ulaznih obeležja.....	142
TABELA 6-42. Svi tipovi oštećenja: svojstvena vrednost, individualna i zbirna varijansa glavnih komponenata.....	143
TABELA 6-43. Sažetak_SVIR. Odabrani broj glavnih komponenata je 7. 86.3941% sume kvadrata je objašnjeno koristeći sve ekstraktovane komponente.	144
TABELA 6-44. Svi tipovi oštećenja: snaga modela za sva obeležja kao i njihov značaj za model glavnih komponenata.....	145
TABELA 6-45. Konfiguracija neuronske mreže testa 4 pri korišćenju redukovano seta ulaznog vektora obeležja	148
TABELA 6-46. Matrica konfuzije neuronske mreže testa 4 pri korišćenju redukovano seta ulaznih obeležja.....	149
TABELA 7-1. Efekti predloženog pristupa na smanjenje greške kvantizacije kao mere kvaliteta klasterizacije SOM	150
TABELA 7-2. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti obučavanja nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a.....	152
TABELA 7-3. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti provere kao mere testiranja konačnog rešenja s ciljem potvrde kvaliteta odabranog modela predviđanja nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a.....	153
TABELA 7-4. Efekti predloženog pristupa na procenat tačnosti validacije kao mere minimizacije suvišnog podešavanja (prilagođavanja) nadgledane neuronske mreže, odnosno MPL-a.....	155
TABELA 7-5. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 1	156
TABELA 7-6. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 2	157
TABELA 7-7. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize-Test 3	158
TABELA 7-8. Odabrana obeležja na osnovu PCA analize.....	159

11 REFERENCE

- [1] U. Kumar, System maintenance: Trends in management and technology, Handbook of Performability Engineering, Springer, 2008, pp. 773-787.
- [2] R.B. Randall, Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] A.K. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, Mechanical systems and signal processing, 20 (2006) 1483-1510.
- [4] P.D. Samuel, D.J. Pines, A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics, Journal of sound and vibration, 282 (2005) 475-508.
- [5] L. Zhao, Z. Pan, C. Shao, Q. Yang, Application of SOM neural network in fault diagnosis of wind turbine, International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), IET, 2015, pp. 1-4.
- [6] D. Wang, W.T. Peter, W. Guo, Q. Miao, Support vector data description for fusion of multiple health indicators for enhancing gearbox fault diagnosis and prognosis, Measurement Science and Technology, 22 (2010) 025102.
- [7] F. Jia, Y. Lei, J. Lin, X. Zhou, N. Lu, Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data, Mechanical Systems and Signal Processing, 72 (2016) 303-315.
- [8] X. Wen, N. Hu, J. Qiu, Pattern recognition and condition monitoring, National University of Defense Technology Press, Changsha, (1997).
- [9] K. Schweizer, P.C. Cattin, R. Brunner, B. Müller, C. Huber, J. Romkes, Automatic selection of a representative trial from multiple measurements using Principle Component Analysis, Journal of biomechanics, 45 (2012) 2306-2309.
- [10] I. Yesilyurt, The application of the conditional moments analysis to gearbox fault detection—a comparative study using the spectrogram and scalogram, NDT & E International, 37 (2004) 309-320.
- [11] T. Fakhfakh, F. Chaari, M. Haddar, Numerical and experimental analysis of a gear system with teeth defects, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25 (2005) 542-550.
- [12] J. Lin, M. Zuo, Gearbox fault diagnosis using adaptive wavelet filter, Mechanical systems and signal processing, 17 (2003) 1259-1269.
- [13] Optical oil debris monitor : Reitjes, J.; Mahon, R.; Duncan, M.D.; Tankersley, L.L.; Shultz, A.; Chen, V.C.; Kover, D.J.; Howard, P.L. Advanced Materials and Process Technology for Mechanical Failure Prevention. Proceedings of the 48th Meeting of the Mechanical Failures Prevention Group,

- Wakefield, Massachusetts (United States), 19–21 Apr. 1994. pp. 57–66. Vibration Institute (1994), NDT & E International, 30 (1997) 326.
- [14] R.M. N., Helical Gearbox Fault Detection Using Motor Current Signature Analysis, The University of Manchester.
- [15] J.K. Sinha, K. Elbhah, A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines, Mechanical Systems and Signal Processing, 34 (2013) 231-240.
- [16] H.R. MARTIN, F. ISMAIL, REVIEW OF GEAR DAMAGE MONITORING TECHNIQUES, International Machinery Monitoring and Diagnostic Conference, Vegas, Nevada, 1989.
- [17] C. Stander, P. Heyns, W. Schoombie, Using vibration monitoring for local fault detection on gears operating under fluctuating load conditions, Mechanical Systems and Signal Processing, 16 (2002) 1005-1024.
- [18] R. Randall, A new method of modeling gear faults, Journal of mechanical design, 104 (1982) 259-267.
- [19] G. White, Amplitude demodulation-a new tool for predictive maintenance, Sound and vibration, 25 (1991) 14-19.
- [20] W. Wang, P. McFadden, Early detection of gear failure by vibration analysis i. calculation of the time-frequency distribution, Mechanical Systems and Signal Processing, 7 (1993) 193-203.
- [21] P.D. McFadden, A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging, Mechanical Systems and Signal Processing, 1 (1987) 83-95.
- [22] P.D. McFadden, Examination of a technique for the early detection of failure in gears by signal processing of the time domain average of the meshing vibration, Mechanical Systems and Signal Processing, 1 (1987) 173-183.
- [23] Z. Ninoslav, Automation of rotating machinery failures by the means of vibration analysis, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, 2012.
- [24] R.M. Stewart, Some useful analysis techniques for gearbox diagnostics, Institute of Sound and Vibration Research, 1977.
- [25] W.J. Wang, P.D. McFadden, Early detection of gear failure by vibration analysis--ii. interpretation of the time-frequency distribution using image processing techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, 7 (1993) 205-215.
- [26] W.J. Wang, P.D. McFadden, Application of orthogonal wavelets to early gear damage detection, Mechanical Systems and Signal Processing, 9 (1995) 497-507.
- [27] N. Baydar, A. Ball, DETECTION OF GEAR DETERIORATION UNDER VARYING LOAD CONDITIONS BY USING THE INSTANTANEOUS POWER SPECTRUM, Mechanical Systems and Signal Processing, 14 (2000) 907-921.
- [28] N. Baydar, A. Ball, A COMPARATIVE STUDY OF ACOUSTIC AND VIBRATION SIGNALS IN DETECTION OF GEAR FAILURES USING WIGNER-VILLE DISTRIBUTION, Mechanical Systems and Signal Processing, 15 (2001) 1091-1107.
- [29] A.G. Starr, R.B. Rao, FAULT DETECTION ON GEARBOXES OPERATING UNDER FLUCTUATING LOAD CONDITIONS, Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, (2001) 457.
- [30] C.J. Stander, P.S. Heyns, W. Schoombie, USING VIBRATION MONITORING FOR LOCAL FAULT DETECTION ON GEARS OPERATING UNDER FLUCTUATING LOAD CONDITIONS, Mechanical Systems and Signal Processing, 16 (2002) 1005-1024.
- [31] C.J.a.H. Stander, P.S., Instantaneous Shaft Speed monitoring of gearboxes under fluctuating load conditions, Proceeding of the 15th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Birmingham UK 2-4 2002, pp. 220-230.
- [32] H.J. Decker, Crack detection for aerospace quality spur gears, DTIC Document, 2002.
- [33] H.J. Decker, Gear crack detection using tooth analysis, DTIC Document, 2002.
- [34] A.M. Noll, Cepstrum pitch determination, The journal of the acoustical society of America, 41 (1967) 293-309.

- [35] R.B. Randall, A history of cepstrum analysis and its application to mechanical problems, International Conference at Institute of Technology of Chartres, France, 2013, pp. 11-16.
- [36] R. Randall, Cepstrum analysis and gearbox fault-diagnosis, Brüel and Kjær Application Note No. 13-150, Copenhagen, 1973.
- [37] R. Randall, Cepstrum analysis and gearbox fault-diagnosis, Maintenance Management International, 3 (1982) 183-208.
- [38] M. El Badaoui, F. Guillet, J. Daniere, Contribution du cepstre d'énergie au diagnostic de réducteur complexe à engrenage, RFM Revue française de mécanique, (1999) 3-7.
- [39] M. El Badaoui, F. Guillet, J. Daniere, New applications of the real cepstrum to gear signals, including definition of a robust fault indicator, Mechanical Systems and Signal Processing, 18 (2004) 1031-1046.
- [40] Q. He, F. Kong, R. Yan, Subspace-based gearbox condition monitoring by kernel principal component analysis, Mechanical Systems and Signal Processing, 21 (2007) 1755-1772.
- [41] A. Malhi, R.X. Gao, PCA-based feature selection scheme for machine defect classification, Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 53 (2004) 1517-1525.
- [42] N. Sakthivel, B.B. Nair, M. Elangovan, V. Sugumaran, S. Saravanmurugan, Comparison of dimensionality reduction techniques for the fault diagnosis of mono block centrifugal pump using vibration signals, Engineering Science and Technology, an International Journal, 17 (2014) 30-38.
- [43] S.S. Haykin, S.S. Haykin, S.S. Haykin, S.S. Haykin, Neural networks and learning machines, Pearson Education Upper Saddle River, 2009.
- [44] R. Rojas, Neural networks: a systematic introduction, Springer Science & Business Media, 2013.
- [45] B. Sick, On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research, Mechanical Systems and Signal Processing, 16 (2002) 487-546.
- [46] D. Bailie, J. Mathew, Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks, Acoustics Australia, 22 (1994) 79-79.
- [47] P. Meesad, G.G. Yen, Pattern classification by a neurofuzzy network: application to vibration monitoring, ISA transactions, 39 (2000) 293-308.
- [48] G. Liao, T. Shi, W. Li, T. Huang, Feature selection and classification of gear faults using SOM, Advances in Neural Networks—ISNN 2005, Springer, 2005, pp. 556-560.
- [49] W. Bartelmus, R. Zimroz, Application of self-organised network for supporting condition evaluation of gearboxes, Artificial Intelligence Methods "AI-METH". Gliwice, (2004).
- [50] W. Bartelmus, R. Zimroz, H. Batra, Gearbox vibration signal pre-processing and input values choice for neural network training, Artificial Intelligence Methods, Gliwice, Poland, (2003) 5-7.
- [51] P. Czech, Classification of fault diagnosis in a gear wheel by used probabilistic neural network, fast Fourier transform and principal component analysis, Transport Problems, 2 (2007) 99-106.
- [52] J. Rafiee, F. Arvani, A. Harifi, M.H. Sadeghi, Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network, Mechanical Systems and Signal Processing, 21 (2007) 1746-1754.
- [53] B.L. P. Czech, Classification of kinds and degree of tooth gear fail by using continuous wavelet transform and MLP neural network - conception of using dates from the model and real gearbox, Diagnostyka, 2 75-82.
- [54] P. CZECH, B. ŁAZARZ, H. MADEJ, G. WOJNAR, Diagnosis of industrial gearboxes condition by vibration analysis, Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 2 (2000) 33-38.
- [55] G. Cheng, Y.-l. Cheng, L.-h. Shen, J.-b. Qiu, S. Zhang, Gear fault identification based on Hilbert-Huang transform and SOM neural network, Measurement, 46 (2013) 1137-1146.
- [56] C.Y. Yang, T.Y. Wu, Diagnostics of gear deterioration using EEMD approach and PCA process, Measurement, 61 (2015) 75-87.
- [57] C. Chan, H. Jin, K. Cheung, H. Zhang, Fault detection of systems with redundant sensors using constrained Kohonen networks, Automatica, 37 (2001) 1671-1676.
- [58] I.S. Koo, W.W. Kim, The development of reactor coolant pump vibration monitoring and a diagnostic system in the nuclear power plant, ISA transactions, 39 (2000) 309-316.

- [59] S.R. Perić, Modern methods of oil analysis in technical systems, *Vojnotehnički glasnik*, 58 (2010) 83-112.
- [60] M. Kolombo, *Ferografija–jučer i danas, Goriva i maziva*, 45 (2006) 407-412.
- [61] E.F. d.o.o., Upravljanje kvalitetom ulja u primjeni, pp. <http://energo-fluid.hr/files/ENERGO%20FLUID%20Upravljanje%20kvalitetom%20ulja%20u%20primjeni.pdf>.
- [62] H.F.S. GMBH, *Practical Contamination Management From Processing to Delivery*, 2009.
- [63] D.E. Becker, *Online monitoring of wear particles*, PRÜFTECHNIK Condition Monitoring GmbH, 2011.
- [64] A. Parey, N. Tandon, *Fault detection of spur gears using vibration monitoring*, Lambert, Saarbrücken, Germany, (2010).
- [65] W. Bartelmus, *Condition monitoring of open cast mining machinery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2006.
- [66] T. Osman, P. Velex, *Static and dynamic simulations of mild abrasive wear in wide-faced solid spur and helical gears*, *Mechanism and Machine Theory*, 45 (2010) 911-924.
- [67] J. Wojnarowski, V. Onishchenko, *Tooth wear effects on spur gear dynamics*, *Mechanism and Machine Theory*, 38 (2003) 161-178.
- [68] S. Ziaran, R. Darula, *Determination of the state of wear of high contact ratio gear sets by means of spectrum and cepstrum analysis*, *Journal of Vibration and Acoustics*, 135 (2013) 021008.
- [69] J. Mathew, J. Stecki, *Comparison of Vibration and Direct Reading Ferrographic Techniques in Application to High-Speed Gears Operating Under Steady and Varying Load Conditions*, *Wear*, 1000 (1986) 4.
- [70] J.D. Smith, *Gear noise and vibration*, CRC Press, 2003.
- [71] L.E. Alban, *Systematic analysis of gear failures*, ASM International, 1985.
- [72] S.P. Radzevich, *Dudley's handbook of practical gear design and manufacture*, CRC Press, 2012.
- [73] I. Atanasovska, D. Momčilović, *UTICA] OTKAZA ZUBACA NA BEZBEDNOST MAŠINA–ISPITIVANJE I ANALIZA THE EFFECT OF TEETH FAILURES ON MACHINE SAFETY–TESTING AND ANALYSIS*.
- [74] R. Basan, M. Franulović, M. Lengauer, B. Križan, *Rolling-sliding-contact fatigue damage of the gear tooth flanks*, *Engineering Review*, 30 (2010).
- [75] N. Baydar, A. Ball, *Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17 (2003) 787-804.
- [76] V. Starzhinskii, Y.L. Soliterman, A. Goman, S. Osipenko, *Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention*, *Journal of friction and wear*, 29 (2008) 340-353.
- [77] G. Dalpiaz, A. Rivola, R. Rubini, *Effectiveness and sensitivity of vibration processing techniques for local fault detection in gears*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14 (2000) 387-412.
- [78] P.D. McFadden, *Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and Phase Demodulation of the Meshing Vibration*, *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 108 (1986) 165-170.
- [79] S. Wu, M.J. Zuo, A. Parey, *Simulation of spur gear dynamics and estimation of fault growth*, *Journal of Sound and Vibration*, 317 (2008) 608-624.
- [80] A.S. Sait, Y.I. Sharaf-Eldeen, *A review of gearbox condition monitoring based on vibration analysis techniques diagnostics and prognostics*, *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration, Volume 5*, Springer, 2011, pp. 307-324.
- [81] T. Barszcz, R.B. Randall, *Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (2009) 1352-1365.
- [82] M. Lebold, K. McClintic, R. Campbell, C. Byington, K. Maynard, *Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics*, *Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, 2000, pp. 16.
- [83] C. Capdessus, M. Sidahmed, J. Lacoume, *Cyclostationary processes: application in gear faults early diagnosis*, *Mechanical systems and signal processing*, 14 (2000) 371-385.

-
- [84] A.G. Piersol, T.L. Paez, *Harris' Shock and Vibration Handbook*, 2010, McGrawHill Co., Ltd, (2010).
- [85] W. Wang, Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (2001) 887-903.
- [86] W. Wang, A.K. Wong, Autoregressive model-based gear fault diagnosis, *Journal of vibration and acoustics*, 124 (2002) 172-179.
- [87] P. McFadden, Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration, *Journal of vibration, acoustics, stress, and reliability in design*, 108 (1986) 165-170.
- [88] H.J. RANDALL R.B., Cepstrum analysis, in: B.K.T. Review (Ed.) No-3, 1981.
- [89] B.P. Bogert, M.J. Healy, J.W. Tukey, The quefrency analysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking, *Proceedings of the symposium on time series analysis*, chapter, 1963, pp. 209-243.
- [90] J.W. Cooley, J.W. Tukey, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Mathematics of computation*, 19 (1965) 297-301.
- [91] A.V. Oppenheim, R.W. Schafer, From frequency to quefrency: A history of the cepstrum, *Signal Processing Magazine, IEEE*, 21 (2004) 95-106.
- [92] A.V. Oppenheim, Superposition in a class of nonlinear systems, DTIC Document, 1965.
- [93] R.W. Schafer, Echo removal by discrete generalized linear filtering, DTIC Document, 1969.
- [94] A.V. Oppenheim, R.W. Schafer, *Digital signal processing*. 1975, Englewood Cliffs, New York.
- [95] R. Randall, *Cepstrum Analysis and Gearbox Fault Diagnosis*, Brüel and Kjær Application Note No. 13-150, Copenhagen, 1973.
- [96] R. Randall, Gearbox fault diagnosis using cepstrum analysis, *World Congress on the Theory of Mach and Mech*, 4th, 1975, pp. 169-174.
- [97] G. Sapy, Une Application du Traitement Numérique des Signaux au Diagnostic Vibratoire de Panne: La Détection des Ruptures d'Aubes Mobiles de Turbines, *Automatisme*, 20 (1975) 392-399.
- [98] J.-H. Lee, J. Kim, H.-J. Kim, Development of enhanced Wigner-Ville distribution function, *Mechanical systems and signal processing*, 15 (2001) 367-398.
- [99] Z. Peng, F. Chu, Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography, *Mechanical systems and signal processing*, 18 (2004) 199-221.
- [100] Y. Fuqing, Failure diagnostics using support vector machine, Doctoral thesis, (2011).
- [101] R. Isermann, Model-based fault-detection and diagnosis—status and applications, *Annual Reviews in control*, 29 (2005) 71-85.
- [102] E.B. Halim, M.S. Choudhury, S.L. Shah, M.J. Zuo, Time domain averaging across all scales: A novel method for detection of gearbox faults, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 (2008) 261-278.
- [103] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, X. Chen, New clustering algorithm-based fault diagnosis using compensation distance evaluation technique, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22 (2008) 419-435.
- [104] J. Rafiee, M. Rafiee, P. Tse, Application of mother wavelet functions for automatic gear and bearing fault diagnosis, *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 4568-4579.
- [105] F. Combet, L. Gelman, Optimal filtering of gear signals for early damage detection based on the spectral kurtosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23 (2009) 652-668.
- [106] H. Firpi, G. Vachtsevanos, Genetically programmed-based artificial features extraction applied to fault detection, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 (2008) 558-568.
- [107] V. Indira, R. Vasanthakumari, V. Sugumaran, Minimum sample size determination of vibration signals in machine learning approach to fault diagnosis using power analysis, *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 8650-8658.
- [108] Y. Lei, M.J. Zuo, Z. He, Y. Zi, A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis, *Expert Systems with Applications*, 37 (2010) 1419-1430.
-

-
- [109] D. Houser, R. Singh, D. Welbourn, R. Munro, Gear Noise Short Course, Department of mechanical engineering Ohio state university Columbus, (2002).
- [110] A. Al-Shyyab, A. Kahraman, Non-linear dynamic analysis of a multi-mesh gear train using multi-term harmonic balance method: sub-harmonic motions, *Journal of Sound and Vibration*, 279 (2005) 417-451.
- [111] D. Welbourn, Fundamental knowledge of gear noise: a survey, 1979.
- [112] W. Bartelmus, Mathematical modelling and computer simulations as an aid to gearbox diagnostics, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15 (2001) 855-871.
- [113] B.D. Forrester, Advanced vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in geared transmission systems, Swinburne University of Technology, 1996.
- [114] V. Chandola, A. Banerjee, V. Kumar, Anomaly detection for discrete sequences: A survey, *Knowledge and Data Engineering, IEEE Transactions on*, 24 (2012) 823-839.
- [115] L.H. Tsoukalas, R.E. Uhrig, Fuzzy and neural approaches in engineering, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [116] L. Fausett, Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms, and applications, (1994).
- [117] I. Aleksander, H. Morton, An introduction to neural computing, Chapman and Hall London, 1990.
- [118] H. Simon, Neural Networks: A Comprehensive Foundation, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999.
- [119] S. Haykin, N. Network, A comprehensive foundation, *Neural Networks*, 2 (2004).
- [120] S.J. Mason, Feedback theory: further properties of signal flow graphs, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, 1956.
- [121] A.I. Galushkin, Neural networks theory, Springer Science & Business Media, 2007.
- [122] C.T. Leondes, Algorithms and architectures, Academic Press, 1998.
- [123] D. Kriesel, A brief Introduction on Neural Networks, (2007).
- [124] A.K. Jain, J. Mao, K. Mohiuddin, Artificial neural networks: A tutorial, *Computer*, (1996) 31-44.
- [125] D. Hebb, (1949) The organization of behavior, Wiley, New York, 1968.
- [126] N. KOJIĆ, Application of neural network in solving of transportation problems, Ph. D. dissertation, 2012.
- [127] I.K. Fodor, A survey of dimension reduction techniques, Technical Report UCRL-ID-148494, Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [128] M. Vlachos, C. Domeniconi, D. Gunopulos, G. Kollios, N. Koudas, Non-linear dimensionality reduction techniques for classification and visualization, Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, ACM, 2002, pp. 645-651.
- [129] L. Jiang, J. Xuan, T. Shi, Feature extraction based on semi-supervised kernel Marginal Fisher analysis and its application in bearing fault diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41 (2013) 113-126.
- [130] X. Jianhui, H. Yanzhe, S. Ronghui, New fault diagnosis method for rolling bearing based on pca, Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese, IEEE, 2013, pp. 4123-4127.
- [131] X. Wan, D. Wang, P.W. Tse, G. Xu, Q. Zhang, A critical study of different dimensionality reduction methods for gear crack degradation assessment under different operating conditions, *Measurement*, 78 (2016) 138-150.
- [132] Z. Li, X. Yan, Z. Tian, C. Yuan, Z. Peng, L. Li, Blind vibration component separation and nonlinear feature extraction applied to the nonstationary vibration signals for the gearbox multi-fault diagnosis, *Measurement*, 46 (2013) 259-271.
- [133] R. Zimroz, A. Bartkowiak, Two simple multivariate procedures for monitoring planetary gearboxes in non-stationary operating conditions, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 38 (2013) 237-247.

- [134] Z. Liu, X. Zhao, M.J. Zuo, H. Xu, Feature selection for fault level diagnosis of planetary gearboxes, *Advances in Data Analysis and Classification*, 8 (2014) 377-401.
- [135] The Curse of Dimensionality
BigSnarf blog, <https://bigsnarf.wordpress.com/category/thoughts/page/4/>.
- [136] C.-h. Chen, L.-F. Pau, P.S.-p. Wang, *Handbook of pattern recognition and computer vision*, World Scientific, 2010.
- [137] I. Jolliffe, *Principal component analysis*, Wiley Online Library, 2002.
- [138] S.S. Halli, K.V. Rao, *Advanced techniques of population analysis*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [139] J. Leskovec, A. Rajaraman, J.D. Ullman, *Mining of massive datasets*, Cambridge University Press, 2014.
- [140] D.J. Bartholomew, Factor analysis for categorical data, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, (1980) 293-321.
- [141] M. Scholz, *Approaches to analyse and interpret biological profile data*, Max-Planck-Institut für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam, Doctoral Thesis, (2006).
- [142] Y.-w. Chang, Y.-c. Wang, T. Liu, Z.-j. Wang, Fault diagnosis of a mine hoist using PCA and SVM techniques, *Journal of China University of Mining and Technology*, 18 (2008) 327-331.
- [143] R. Shao, W. Hu, Y. Wang, X. Qi, The fault feature extraction and classification of gear using principal component analysis and kernel principal component analysis based on the wavelet packet transform, *Measurement*, 54 (2014) 118-132.
- [144] Z. YanPing, H. ShuHong, H. JingHong, S. Tao, L. Wei, Continuous wavelet grey moment approach for vibration analysis of rotating machinery, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20 (2006) 1202-1220.
- [145] F.K. Omar, A. Gaouda, Dynamic wavelet-based tool for gearbox diagnosis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 26 (2012) 190-204.
- [146] F. Jia, Y. Lei, J. Lin, X. Zhou, N. Lu, Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72-73 (2016) 303-315.
- [147] W. Lu, W. Jiang, G. Yuan, L. Yan, A gearbox fault diagnosis scheme based on near-field acoustic holography and spatial distribution features of sound field, *Journal of Sound and Vibration*, 332 (2013) 2593-2610.
- [148] Z. Li, Y. Jiang, C. Hu, Z. Peng, Recent progress on decoupling diagnosis of hybrid failures in gear transmission systems using vibration sensor signal: A review, *Measurement*, 90 (2016) 4-19.
- [149] Z. Yin, J. Hou, Recent advances on SVM based fault diagnosis and process monitoring in complicated industrial processes, *Neurocomputing*, 174, Part B (2016) 643-650.
- [150] G.-M. Xian, B.-Q. Zeng, An intelligent fault diagnosis method based on wavelet packer analysis and hybrid support vector machines, *Expert Systems with Applications*, 36 (2009) 12131-12136.
- [151] N. Saravanan, V.K. Siddabattuni, K. Ramachandran, A comparative study on classification of features by SVM and PSVM extracted using Morlet wavelet for fault diagnosis of spur bevel gear box, *Expert systems with applications*, 35 (2008) 1351-1366.
- [152] T. Kohonen, *Self-Organizing Maps*, Springer, 1995.
- [153] T. Kohonen, *Self-Organizing Maps*, Springer Science & Business Media, 2001.
- [154] E.O. Laumann, F.U. Pappi, *Networks of collective action: A perspective on community influence systems*, Elsevier, 2013.