

Univerzitet u Novom Sadu
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin



**Automatizovani dijagnostički modeli i
njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema**

**Automated diagnostic models and their influence
on the reliability of technical systems**

- Doktorska disertacija –

**Kandidat:
Mr Božo Ilić**

Zrenjanin, 2015. god.

Univerzitet u Novom Sadu
Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin



**Automatizovani dijagnostički modeli i
njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema**

**Automated diagnostic models and their influence
on the reliability of technical systems**

- Doktorska disertacija –

Mentor:
Prof. dr Živoslav Adamović

Kandidat:
Mr Božo Ilić

Zrenjanin, 2015. god.

Zahvalnica

Posebno se zahvaljujem mom mentoru prof. dr Živoslavu Adamoviću koji je svojim dobronamernim sugestijama i primedbama doprineo podizanju naučnog i stilskeg nivoa disertacije.

Takođe, zahvaljujem se članovima komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije prof. dr Miroslavu Lambiću, prof. dr Branku Škoriću, prof. dr Draganu D. Milanoviću i prof. dr Slavici Prvulović na pomoći pri izradi disertacije.

Zahvalnost dugujem i mom profesoru † dr Dobrivoju Menjiću, koji mi je bio mentor prilikom izrade diplomskog rada i magistarske teze, koji me je uveo u tajne pisanja naučno-istraživakih radova.

Takođe, zahvalnost dugujem mojim roditeljima ocu † Milovanu, majki Radojki, kao i sestri Živki na pomoći i podršci, tokom sveukupnog obrazovanja.

I na kraju, veliko hvala moj supruzi Vesni i kćerkama Katarini i Mariji na razumevanju tokom izrade ove disertacije.

Univerzitet u Novom Sadu

Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

Ključna dokumentacijska informacija

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Mr Božo Ilić
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	Prof. dr Živoslav Adamović, redovni profesor
Naslov rada: NR	Automatizovani dijagnostički modeli i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema
Jezik publikacije: JP	Srpski
Jezik izvoda: JI	Srpski / Engleski
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	AP Vojvodina
Godina: GO	2015
Izdavač: IZ	Autorski reprint
Mesto i adresa: MA	Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Đure Đakovića b.b., Zrenjanin, Republika Srbija
Fizički opis rada: FO	9 / 283 / 109 / 32/ 206 / 0
Naučna oblast: NO	Industrijsko inženjerstvo, Automatika, Mehatronika, Elektroenergetika, Informatika
Naučna disciplina: ND	Upravljanje razvojem - Tehnologija održavanja
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	Automatizovana dijagnostika, tehnički sistemi, raspoloživost, pouzdanost, troškovi održavanja
UDK	
Čuva se: ČU	U biblioteci Tehničkog fakulteta "Mihajlo Pupin" Zrenjanin
Važna napomena: VN	-

<p>Izvod: IZ</p>	<p>Osnovni cilj ove doktorske disertacije bio je da se razvije novi automatizovani dijagnostički model. Zatim da se praktičnom primenom tog modela (na konkretnom primeru automatizovane dijagnostike vitalnih komponenti tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije) tehnno-ekonomskom analizom potvrdi glavna hipoteza disertacije: „Automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji (bazirana na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija) doprinosi porastu nivou pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća“.</p>
<p>Datum prihvatanja teme od strane NN veća: DP</p>	<p>20.06.2012. god.</p>
<p>Datum odbrane: DO</p>	
<p>Članovi komisije: (ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status) KO</p>	<p>Predsednik: Prof. dr Miroslav Lambić, red. prof., uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 1997., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin; Član 1: Prof. dr Branko Škorić, red. prof., uža naučna oblast: Tehnologija oblikovanja površina, 2011., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad; Član 2: Prof. dr Dragan D. Milanović, red. prof., uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 2011., Mašinski fakultet, Beograd; Član 3: Prof. dr Slavica Prvulović, van. prof., uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 2012., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin.; i Mentor: Prof. dr Živoslav Adamović, red. prof., uža naučna oblast: Industrijsko inženjerstvo, 1995., Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin.</p>

University of Novi Sad

Technical faculty "Mihajlo Pupin" Zrenjanin

Key word documentation

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	Ph.D. Dissertation
Author: AU	Bozo Ilic, M.Sc.
Mentor: MN	Zivoslav Adamovic, Ph.D., full time professor
Title: TI	Automated diagnostic models and their influence on the reliability of technical systems
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	English / Serbian
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	AP Vojvodina
Publication year: PY	2015
Publisher: PU	The author's reprint
Publication place: PP	Technical Faculty "Mihajlo Pupin", Djure Djakovića b.b., Zrenjanin, Serbia
Physical description: PD	9 / 283 / 109 / 32 / 206 / 0
Scientific field SF	Industrial Engineering, Automation, Mechatronics, Electrical Engineering, Computer Science
Scientific discipline SD	Management development – Maintenance Technology
Subject, Key words SKW	Automated Diagnosis, technical systems, availability, reliability, maintenance costs
UC	
Holding data: HD	In the library of Technical faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin
Note: N	-

<p>Abstract: AB</p>	<p>The main objective of this doctoral thesis was to develop a new automated diagnostic model. Then with the practical usage of this model (in particular case of automated diagnostics vital components of technical systems in real operating conditions of different industries) with techno-economic analysis to confirm the main hypothesis of the dissertation: “Automated diagnostics of technical systems in the industry (based on the use of computers and other modern information and communication technologies) contributes to the increase levels of reliability and availability of these systems, as well as the reduction of total costs and more economical management of the company”.</p>
<p>Accepted on Scientific Board on: AS</p>	<p>20.06.2015</p>
<p>Defended: DE</p>	
<p>Thesis defend board: (Title/Name and Surname/Degree/ /Faculty) DB</p>	<p>President: Ph.D. Lambic Miroslav, full time professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin; Member 1: Ph.D. Branko Skoric, full time professor, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad; Member 2: Ph.D. Dragan D. Milanovic, full time professor, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade; Member 3: Ph.D. Slavica Prvulovic, associated professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin; Menthor: Ph.D. Zivoslav Adamovic, full time professor, Technical Faculty “Mihajlo Pupin”, Zrenjanin.</p>

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Pregled dosadašnjih istraživanja.....	3
3.	Metodološki koncept istraživanja.....	8
3.1	Problem istraživanja.....	8
3.2	Predmet istraživanja.....	8
3.3	Cilj istraživanja	9
3.4	Hipoteze istraživanja.....	9
3.5	Metode istraživanja.....	10
3.6	Naučna i društvena opravdanost istraživanja.....	11
3.7	Organizacija istraživanja.....	13
4.	Teorijska istraživanja	16
4.1	Održavanje tehničkih sistema	16
4.1.1	Korektivno održavanje.....	18
4.1.2	Klasično preventivno održavanje.....	19
4.1.3	Održavanje prema stanju.....	19
4.1.4	Održavanje prema pouzdanosti.....	20
4.1.5	Totalno održavanje.....	21
4.1.6	Održavanje na bazi rizika.....	21
4.1.7	Totalno dijagnostičko održavanje	21
4.1.8	Samoodržavanje.....	22
4.2	Definisanje vremena potrebnih za proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema... ..	22
4.3	Raspoloživost tehničkih sistema	26
4.4	Pouzdanost tehničkih sistema	28
4.4.1	Pokazatelji pouzdanosti	29
4.4.2	Faktori koji utiču na pouzdanost.....	31
4.4.3	Otkazi tehničkih sistema	32
4.5	Pogodnost održavanja (popravljivost)	35
4.6	Tehnička dijagnostika	36
4.6.1	Zadaci dijagnostičkih kontrola tehničkog sistema.....	38
4.6.2	Osnovne dijagnostičke metode	41
4.6.2.1	Subjektivne dijagnostičke metode	42
4.6.2.2	Objektivne dijagnostičke metode.....	43
4.6.3	Vrste merenja fizičkih veličina u savremenim sistemima nadzora i upravljanja.....	44
4.6.4	Sistemi nadzora sa integrisanim funkcijama zaštite i dijagnostike.....	45
4.6.5	On-line i off-line dijagnostika.....	47
4.6.6	Neprekidna i povremena dijagnostika	48
4.7	Teleautomatizacija tehničkih sistema u industriji.....	49
4.7.1	Daljinsko vođenje	50
4.7.2	Daljinsko održavanje	50
4.7.2.1	Daljinska dijagnostika (teledijagnostika).....	51
4.7.2.2	Daljinsko preventivno održavanje (teleservis)	53
4.7.2.3	Daljinske popravke (teleremont)	53
4.8	Automatizovana dijagnostika.....	54

4.8.1	Automatizacija dijagnostičkog procesa	54
4.8.2	SCADA sistemi sa mogućnostima automatizovane dijagnostike	56
4.8.2.1	Elementi SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike.....	58
4.8.2.2	Arhitektura SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike.....	64
4.8.3	Industrijske mreže u SCADA sistemima sa mogućnostima automatizovane dijagnostike	64
4.8.3.1	Tipovi industrijskih mreža (magistrala).....	66
4.8.3.2	Hijerarhijski nivoi industrijskih mreža	69
4.8.3.3	OPC (OLE for Process Control) standard.....	75
4.8.3.4	Medijumi za prenos podataka	75
4.8.3.5	Mrežni kablovi.....	75
4.8.3.6	Tipovi računarskih mreža prema veličini prostora koji obuhvataju	77
4.8.3.7	Tipovi mreža prema pravu pristupu.....	80
4.8.3.8	Bežične mreže.....	80
4.8.4	Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka ...	84
4.8.4.1	Primena ekspertskih sistema prilikom donošenja dijagnostičkih odluka	85
4.8.4.2	Primena neuronskih mreža prilikom donošenja dijagnostičkih odluka	88
4.8.4.3	Primena hibridnih sistema prilikom donošenja dijagnostičkih odluka.....	89
4.8.4.4	Primena softverskih agenata prilikom donošenja dijagnostičkih odluka.....	90
4.8.4.5	Primena interaktivnih Web uputstava prilikom donošenja dijagnostičkih odluka .	90
4.8.4.6	Primena fazi logike prilikom donošenja dijagnostičkih odluka.....	90
4.9	Primeri automatizovane dijagnostike u praksi	91
4.9.1	Automatizovani dijagnostički sistemi u elektranama	91
4.9.2	SCADA sistem tračnih transportera na površinskom kopu „Drmno“ sa mogućnostima dijagnostike	92
4.9.3	Sistem daljinskog nadzora bagera.....	93
4.9.4	SCADA sistem naftnih bušotina sa mogućnostima automatizovane dijagnostike	95
4.9.5	SCADA sistem katodne zaštite gasovoda sa mogućnostima automatizovane dijagnostike	95
4.9.6	Sistem nadzora savremenih električnih instalacija sa mogućnostima automatizovane dijagnostike.....	97
4.9.7	Sistemi neprekidnog nadzora mašina realizovani pomoću OneproD MVX merno akvizicionih sistema.....	98
4.9.8	Računarom upravljani vibrodijagnostički sistem u TE Gacko	99
4.9.9	Nadzorno-upravljački sistem tehnološke linije konvertora US Steel Srebja u Smederevu.....	100
4.9.10	Dijagnostika stanja ležajeva mašina pomoću bežičnih senzorskih mreža	101
5.	Empirijsko-eksperimentalna istraživanja	103
5.1	Razvoj novog automatizovanog dijagnostičkog modela	103
5.1.1	Donošenje odluke o potrebi uvođenja automatizovane dijagnostike.....	104
5.1.2	Predlog sopstvene metodologije projektovanja automatizovanih dijagnostičkih modela.....	104
5.1.3	Izbor tehničkih sistema koji će se kontrolisati primenom razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela.....	106
5.1.4	Proučavanje karakteristika tehničkih sistema	107
5.1.4.1	Proučavanje karakteristika asinhronih motora.....	108
5.1.4.2	Proučavanje karakteristika ležajeva mašina	113

5.1.5	Proučavanje pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola	125
5.1.5.1	Izbor konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole	126
5.1.5.2	Izbor dijagnostičke opreme pogodne za dijagnostičke kontrole.....	127
5.1.5.3	Povećanje nivoa znanja dijagnostičara iz oblasti opšte i konkretne dijagnostike.	127
5.1.6	Izbor dijagnostičkih parametara.....	127
5.1.6.1	Izbor temperature kao prvog dijagnostičkog parametra	129
5.1.6.2	Izbor vibracija kao drugog dijagnostičkog parametra	130
5.1.6.3	Izbor struje kao trećeg dijagnostičkog parametra	131
5.1.7	Izbor dijagnostičkih metoda.....	131
5.1.7.1	Izbor metode termografije kao prve dijagnostičke metode	131
5.1.7.2	Izbor metode analize frekvencijskog spektra vibracija kao druge dijagnostičke metode.....	132
5.1.7.3	Izbor metode analize frekvencijskog spektra struje statora motora kao treće dijagnostičke metode	132
5.1.8	Izbor dijagnostičke opreme.....	132
5.1.9	Izbor optimalne strategije provođenja dijagnostičkih kontrola	133
5.1.10	Određivanje graničnih vrednosti (granica otkaza) dijagnostičkih parametara	134
5.1.11	Izbor optimalne arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela	136
5.1.11.1	Izbor optimalnog načina merenja i pretvaranja fizičkih veličina	142
5.1.11.2	Izbor optimalnog načina prenosa podataka	142
5.1.11.3	Izbor optimalnog načina prikupljanja podataka.....	143
5.1.11.4	Izbor optimalnih metoda obrade podataka.....	146
5.1.11.5	Izbor optimalnog načina donošenja dijagnostičkih odluka.....	150
5.1.12	Predlog sopstvenog modela održavanja prema stanju baziranog na korišćenju novog automatizovanog dijagnostičkog modela.....	150
5.1.13	Razrada dijagnostičkih metoda	153
5.1.13.1	Razrada metode termografije.....	153
5.1.13.2	Razrada metode analize frekvencijskog spektra vibracija	165
5.1.13.3	Razrada metode analize frekvencijskog spektra struje statora motora	175
5.1.14	Predlog mera za zaštitu od smetnji pri radu automatizovanih dijagnostičkih modela uzrokovanih lutajućim strujama	192
5.1.15	Provera tehničke opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela	196
5.1.16	Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela	197
5.2	Rezultati dijagnostičkih kontrola mašina dobijenih praktičnom primenom novog modela u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije	198
5.3	Rezultati dijagnostičkih kontrola elektroenergetskih postrojenja dobijenih praktičnom primenom novog modela u realnim pogonskim uslovima	206
5.4	Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih necentriranosti spojenih mašina dobijenih primenom novog modela u laboratorijskim uslovima	213
5.5	Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih primenom novog modela u laboratorijskim uslovima	218
5.6	Razvoj sopstvenog modela za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema.....	224
5.6.1	Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem empirijskih podataka	224

5.6.2	Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem analitičkih (teorijskih) relacija.....	226
5.6.3	Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem simulacione Monte Karlo metode .	229
5.6.4	Razvoj sopstvenog modela za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema u programu za tabelarnu obradu podataka	230
6.	Rezultati istraživanja.....	234
6.1	Ključni rezultati istraživanja	235
6.1.1	Dokazivanje tačnosti prve pomoćne hipoteze.....	235
6.1.2	Dokazivanje tačnosti druge pomoćne hipoteze.....	243
6.1.3	Dokazivanje tačnosti treće pomoćne hipoteze	247
6.1.3.1	Ukupni troškovi investiranja u praktičnu primenu novog automatizovanog dijagnostičkog modela	248
6.1.3.2	Godišnja neto ušteda od praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja	249
6.1.3.3	Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela	254
6.1.4	Dokazivanje tačnosti glavne hipoteze.....	255
6.2	Poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima sličnih istraživanja	255
6.3	Uticaj automatizovanih dijagnostičkih modela na pouzdanost tehničkih sistema.....	257
6.4	Tačnost statističke obrade podataka.....	258
6.5	Tačnost dijagnostičkih odluka donesenih primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela	258
6.6	Prednosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela u odnosu na klasičnu dijagnostiku	260
6.7	Ograničenja novog automatizovanog dijagnostičkog modela	261
6.8	Mogućnosti modifikacije novog automatizovanog dijagnostičkog modela	261
6.9	Tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti.....	262
7.	Zaključak.....	264
7.1	Dokazivanje glavne hipoteze	264
7.2	Naučni doprinos disertacije.....	267
7.3	Pitanja koja disertacija „otvara“	270
8.	Predlozi za nastavak daljih istraživanja	271
9.	Literatura.....	272

1. Uvod

Zbog potrebe da preduzeća obezbede veću konkurentnost na svetskom tržištu, odnosno veću produktivnost i bolji kvalitet proizvoda, tehnički sistemi u industriji se stalno usavršavaju i sve su kompleksniji. Pri tome njihovu osnovnu strukturu čine mehaničke, hidrauličke, pneumatske, električne i elektronske komponente. Otkazi kod ovako složenih sistema dovode do prekida funkcionisanja celine (zbog neblagovremenog uočavanja promene radnih parametara i parametara stanja) i smanjenja efikasnosti, uz značajno povećavanje direktnih i indirektnih troškova održavanja. Stoga je poslednjih godina, svest o neophodnosti održavanja tehničkih sistema i njihovog unapređenja sve prisutnija i sve više se obraća pažnja na ovu oblast. Razlozi su mnogobrojni, ali pre svega zbog bezbednosti i zdravlja zaposlenih, zaštite okoline, kao i naravno povećanja sveukupnog profita kroz optimalno upravljanje troškovima održavanja.

Osnovni cilj održavanja opreme je skraćanje vremena u zastoju, odnosno povećanje nivoa pouzdanosti tehničkih sistema. U prošlosti su se koncepcije održavanja tehničkih sistema, uglavnom, zasnivale na preventivnim, unapred strogo utvrđenim periodičnim aktivnostima održavanja. Ako se analiziraju svetski trendovi u oblasti održavanja, može se izvesti zaključak da se globalna strategija menja i prilagođava onoj koja je vezana za rad opreme bez otkaza. Umesto koncepcije klasičnog preventivnog održavanja baziranog na fiksnim intervalima provođenja aktivnosti održavanja, sve više se primenjuje koncepcija održavanja prema stanju, koja se bazira na dijagnostičkim kontrolama vitalnih komponenti tehničkih sistema, koje omogućavaju detekciju neispravnosti u početnoj fazi nastanka, čime se stvaraju uslovi da se preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu. Na taj način se može bezbediti rad tehničkih sistema bez ili sa vrlo malo zastoja i to planskih, jer zastoja, a naročito neplanskih (otkazi), mogu prouzrokovati velike troškove, pored toga mogu dovesti i do dodatnih oštećenja drugih delova sistema koja mogu ugroziti sigurnost ljudi.

Savremene koncepcije održavanja baziraju se na metodama fleksibilnog preventivnog održavanja. Ovakve koncepcije ne mogu se provesti bez korišćenja dijagnostičkih metoda baziranih na primeni računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Nagli razvoj računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija omogućio je njihovu primenu skoro u svim sferama ljudske delatnosti, pa i u održavanju tehničkih sistema u industriji, što je dovelo do pojave niza novih tehničkih rešenja u dijagnostici stanja tehničkih sistema i automatizacije dijagnostičkog procesa.

Zbog toga su tokom izrade ove disertacije sprovedena istraživanja koja su imala za cilj da provere da li se pomoću računarom upravljano dijagnostičkog procesa, može ostvariti značajniji doprinos daljem unapređenju održavanja tehničkih sistema u industriji, odnosno da li se primenom računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija u automatizovanim dijagnostičkim kontrolama vitalnih komponenti tehničkih sistema može doprineti porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

Radi potpunijeg sagledavanja ove kompleksne problematike u početnim poglavljima disertacije prikazani su rezultati teorijskih istraživanja u kojima su pregledno i sistematično razmotreni osnovni pojmovi vezani za koncepcije održavanja tehničkih sistema (korektivno održavanje, klasično preventivno održavanje, održavanje prema stanju, održavanje prema pouzdanosti itd.), raspoloživost i pouzdanost tehničkih sistema, vrste i uzroke otkaza tehničkih sistema i automatizovanu dijagnostiku. Naglašena je razlika između zaštite i dijagnostike. Zaštita je osnova za dijagnostiku, a bez dijagnostike podaci dobijeni merenjem su ograničenog značaja.

Značajan deo poglavlja teorijskih istraživanja posvećen je suštinskim pojmovima vezanim za automatizovanu dijagnostiku, pri čemu su korišćena najnovija saznanja iz oblasti dijagnostike i informaciono komunikacionih tehnologija. Dat je prikaz hardverskih i softverskih koncepcija automatizovane dijagnostike, koje su danas u upotrebi kod nas i u svetu. Razmotrena je primena automatizovane dijagnostike u okviru SCADA sistema. Takođe, su detaljno prezentovani i obrazloženi SCADA sistemi, posebno je obrađen SCADA softver koji predstavlja moćan alat za vizuelizaciju proizvodnih procesa. Zatim, su razmotrene mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije, kao što su: ekspertske sistemi, sistemi fazi logike, neuronske mreže, mobilni agenti i sl., prilikom donošenja

dijagnostičkih odluka. Sve ovo je pomoglo da se razvije optimalni novi automatizovani dijagnostički model, koji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema.

U cilju provere postavljenih hipoteza razvijen je novi automatizovani dijagnostički model, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, pomoću koga su izvršene dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije. Na osnovu tehno-ekonomske analize podataka dobijenih od službi održavanja o aktivnostima održavanja u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi automatizovani dijagnostički model i u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi automatizovani dijagnostički model, utvrđeno je da ovaj model doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema u industriji, kao i smanjenju troškova održavanja.

Zatim je izvršeno poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima sličnih istraživanja, uz utvrđivanje njihovih međusobnih sličnosti i razlika. Potom, su sagledane mogućnosti praktične primene ovog modela uz sve njegove prednosti i ograničenja, kao i mogućnosti njegove modifikacije.

U disertaciji su predočene tendencije razvoja dijagnostičkih kontrola baziranih na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Opšti trend razvoja automatizovane dijagnostike usmeren je na korišćenje računara sa savremenom hardverskom i softverskom podrškom. Softverska podrška podrazumeva primenu metoda veštačke inteligencije, kao što su: ekspertski sistemi, sistemi fazi logike, neronske mreže, softverski agenti, interaktivna Web uputstva itd.

Problematika koja je istraživana tokom izrade ove disertaciji po svojoj prirodi je kompleksna, povezana sa nizom pojava i procesa, gde se prepliće više naučnih oblasti, kao što su: industrijsko inženjerstvo, mašinstvo, elektrotehnika, mehatronika, automatika, informaciono-komunikacione tehnologije i sl., što joj daje multidisciplinarni karakter.

Značaj ove disertacije ogleda se u tome što je ukazala na tendencije razvoja i značaj korišćenja računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija u automatizovanim dijagnostičkim kontrolama vitalnih komponenti tehničkih sistema u procesu eksploatacije u cilju povećanja nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, kao i smanjenja ukupnih troškova i ekonomičnijeg poslovanja preduzeća.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Korišćenjem savremene domaće i međunarodne literature u disertaciji je sveobuhvatno, sistematično i korektno prikazano stanje, odnosno dat pregled stavova i dosadašnjih rezultata u oblasti istraživanja.

U nastavku je dat pregled objavljenih, u svetu i kod nas, radova, projekata, monografija, disertacija i sl., u kojima je razmatrana problematika automatizovane dijagnostike i pouzdanosti tehničkih sistema. Ovi radovi su dati u popisu literature, koja je korišćena, i navedeni su pod rednim brojevima [21,22,28-34,36-45,48-67,119-135,139-149,152,153,156,159,165-167,172,182,188,191,193,195-206].

U radu „A scale invariant algorithm for the automatic diagnosis of rotor bar failures in induction motors“ ("Skaliranje invarijantnog algoritma za automatsku detekciju otkaza šipki rotora asinhronih motora") (Antonino-Daviu, J., Aviyente, S., Strangas, E., Riera-Guasp, M., IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 27-30.06.2011. pp. 496 – 501) je navedeno da su se razvojem pouzdanih algoritama za automatsku detekciju slomljenih šipki rotora asinhronih motora bavili mnogi istraživači prethodnih decenija. Iako su se konvencionalni pristupi dijagnostici na bazi praćenja stacionarnog stanja dobro pokazali za određene industrijske primene, oni nisu pogodni u slučajevima kada mašina ne radi u idealnim stacionarnim uslovima (npr. Kada postoje oscilacije momenta opterećenja, pojava debalansa, buke itd.). Zbog ove činjenice, uvedena je alternativna prelazna metoda bazirana na primeni alata za vremensko-frekvencijsku dekompoziciju (razlaganje). Ona je pokazala zadovoljavajuće rezultate, čak i u slučajevima u kojima konvencionalna metoda ne funkcioniše ispravno. Ipak, potreba za ekspertima koji bi kvalitetno tumačili (interpretirali) tako dobijene vremensko-frekvencijske krive na osnovu kojih bi se utvrdio uzrok otkaza, kao i nedostatak automatizacije dijagnostičkog procesa, često primenu prenosivih uređaja za praćenje stanja asinhronih motora čine teško mogućom. U ovom radu je predložen novi algoritam za automatsku detekciju otkaza šipki rotora. On uzima kao osnovu elementarne signale dobijene diskretnom talasnom transformacijom pri pokretanju motora, koji sadrže osnovne informacije vezane za otkaz. Ovi signali se dalje obrađuju stvaranjem 2-D slike, koja sadrži karakteristična obeležja u obliku slova L – uzorke vezane za analizirani otkaz. Nakon primene skalarne transformacije dobija se razmera - invarijantni sadržaj matrice. Završna korelacija između ovih matrica omogućava da se prati stanje mašine. Rezultati ispitivanja pokazali su pouzdanost algoritma i uopšte njegovu sposobnost da automatski detektuje otkaze različitih delova pri različitim opterećenjima mašina [33].

U radu „Fault Detection of Linear Bearings in Brushless AC Linear Motors by Vibration Analysis“ (Detekcija otkaza linearnih ležajeva trofaznih asinhronih motora analizom vibracija) (Bianchini, C., Immovilli, F., Cocconcelli, M., Rubini, R., Bellini, A., IEEE Transactions on Industrial Electronics, May 2011, Vol. 58, No 5, pp. 1684 – 1694) je konstatovano da se električni linearni motori sve više koriste u industrijskoj automatizaciji, jer omogućavaju direktan pogon sa vrlo visokim dinamičkim performansama, visokom pouzdanošću i visokom fleksibilnošću u prenosu energije. Pokretni deo motora je povezan sa fiksnim delom preko linearnih ležajeva. Kao i u mnogim drugim električnim mašinama, ležajevi predstavljaju jedan od najugroženijih delova, jer su podložni habanju i kontaminaciji. U slučaju linearnih kotrljajnih ležajeva, ovaj problem je izraženiji ako se šina ne može lako u potpunosti da zatvori i zaštiti od kontaminacije iz životne sredine, nego kod kotrljajnih ležajeva. Ovaj rad prikazuje dijagnostičku metodu baziranu na analizi vibracija kojom se identifikuje signal, koji se odnosi na određeni uzrok otkaza [43].

U radu „An Enhanced Diagnostic Scheme for Bearing Condition Monitoring“ ("Poboljšani model praćenja stanja ležajeva") (Jie Liu, Wang, W., Golnaraghi, F., IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Feb. 2010, Vol. 59, No 2, pp.309 – 321) je navedeno da se kotrljajni ležajevi široko primenjuju u različitim mehaničkim i električnim postrojenjima, zbog toga je u industriji veoma važno pouzdano praćenje stanja ležajeva u realnom vremenu, u cilju detekcije otkaza ležajeva u početnom fazi, radi sprečavanja degradacije performansi mašina i otkaza. Cilj ovog rada je da se razvije poboljšani model dijagnostike ležajeva. Ovaj model se sastoji od modula klasifikacije i predviđanja (prognoziranja). Neurofazi (NF) klasifikator je predložen za efikasnu integraciju dobrih strana nekoliko tehnika obrade signala za kvalitetniju ocenu stanja ležajeva. Višestepeni NF predskazatelj služi za predviđanje budućeg stanja ležajeva kako bi se dodatno poboljšala pouzdanost dijagnostičkih odluka. Efikasnost ovog poboljšanog modela dijagnostike verifikovana je eksperimentalnim ispitivanjima pri različitim stanjima ležajeva [122].

U radu „Diagnosis tool for motor condition monitoring“ ("Dijagnostički uređaj za praćenje stanja motora") (Ilonen, J., Kamarainen, J. K., Lindh, T., Ahola, J., Kalviainen, H., Partanen, J., IEEE Transactions on Industry Applications, 18.07.2005., Vol. 41, No 4, pp. 963 – 971) je navedeno da u savremenim industrijskim sredinama postoji povećana potreba za automatskim praćenjem stanja motora. Pouzdanim praćenjem stanja, otkazi kao što su mehanički otkazi ležajeva motora mogu se detektovati u ranim fazama i dalja oštećenja sistema se mogu sprečiti. Uspešno praćenje stanja je složen i specifičan problem, ali opšti (generički) uređaj bi bio korisan u preliminarnoj analizi novih signala i verifikaciji (proveri) poznatih teorija. Opšti (generički) uređaj za praćenje stanja je uveden u ovom radu. Uređaj se zasniva na diskriminatornim energetske funkcijama koje otkrivaju diskriminativne frekvencije-domene regija gde se otkazi mogu identifikovati (prepoznati). Uređaj je primenjen za detekciju otkaza ležajeva asinhronog motora i uspeo je da pronađe karakteristične frekvencije koje omogućavaju preciznu detekciju otkaza ležajeva [119].

U radu „Incipient bearing fault detection for three-phase Brushless DC motor drive using ANFIS“ ("Detekcija otkaza ležaja u početnoj fazi elektromotornog pogona trofaznog asinhronog i motora jednosmerne struje pomoću ANFIS") (Abu-Rub, H., Moin Ahmed, S., Iqbal, A., Toliyat, H.A., Rahimian, M.M., IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, 5-8 Sept. 2011, pp. 620 – 625) je navedeno da je detekcija otkaza u početnoj fazi električnih mašina važan zadatak i zahteva inteligentan dijagnostički pristup. Vršena su opsežna istraživanja u području automatizovane dijagnostike. Između nekoliko uzroka otkaza električnih mašina najčešći je mehanički otkaz ležaja. Zato je u ovom radu prikazana dijagnostička tehnika za detekciju otkaza ležaja u početnoj fazi trofaznog asinhronog i motora jednosmerne. U dijagnostičke svrhe se koristi prilagodljivi Neuro-Fuzzy Interfejs sistem. Predloženi pristup omogućava preciznu ocenu stanja ležaja uz minimalan napor. Predložena tehnika je proverena (verifikovana) korišćenjem simulacionog pristupa. Simulacija se obavlja pomoću Matlab/Simulink-a, čiji je kompletan model prikazan u radu [29].

U radu „Automating power system fault diagnosis through multi-agent system technology“ ("Automatizovana dijagnostika elektroenergetskih sistema pomoću multi-agent sistema tehnologija") (McArthur, S.D.J., Davidson, E.M., Hossack, J.A., McDonald, J.R., 37th International Conference on Proceedings of the Annual Hawaii, 5-8 Jan. 2004, pp. 8) je navedeno da je dijagnostika u elektroenergetskom sistemu dugotrajan i složen zadatak. SCADA sistemi, digitalni snimači otkaza, putujući talasi lokatora otkaza i ostali uređaji za praćenje se koriste da obaveste inženjera u službi održavanja, o problemu i otkazu. Opsežna istraživanja autora dovela su do zaključka da postoje dva problema koji se moraju prevazići. Prvo, prikupljanje podataka i analiza aktivnosti su neizvodljivi u pogledu vremena. Drugo, količina podataka koja se dobija čini da je inženjer preopterećen s mnoštvom podataka za tumačenje (interpretiranje). U ovom radu je opisan multi-agent sistem, u kombinaciji s inteligentnim sistemima, koji se može koristiti za automatizaciju dijagnostičkog procesa. Multi-agent sistem, baziran na znanju i model baziran na razmišljanju (rezonovanju) se koriste da automatski tumače (interpretiraju) podatke SCADA sistema iz evidencije (zapisa) otkaza. U ovom radu je opisan dizajn multi-agent sistema i razmotrene mogućnosti njegovog korišćenja, kao sredstva za pružanje podrške inženjerima prilikom odlučivanja, u pogledu pravovremene i sažete dijagnostičke informacije prilagođene da zadovolji njihove zahteve [141].

U radu "On-line Detection and Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults Using Spectral Analyses of Stator Current" („On-line dijagnostika rotora asinhronih motora analizom spektra struje statora“) (Rastko Fišer, Henrik Lavrič, 5th International Symposium „Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering“, Doctoral School of Energy and Geotechnology Kuressaare, Estonia, January 14 – 19, 2008) je prikazan sistem za on-line dijagnostiku asinhronih motora. On omogućava detekciju otkaza šipki rotora u ranoj fazi nastanka. Metoda se zasniva na analizi frekvencijskog spektra struje statora, snimanje se može izvoditi bez ometanja normalnog rada motora. Zato je metoda potpuno nerazarajuća i lako primenljiva u industrijskim sredinama. Predstavljeni dijagnostički sistem je primenjen na šest motora (1.200 kW i 2.000 kW), koji se koriste u pumpama za vodosnabdevanje u termoelektrani, u cilju povećanja pouzdanosti rada indukcionog motora u procesu eksploatacije i smanjenja troškova održavanja. Konfiguraciji hardvera i softvera je objašnjena detaljno, kao i rezultati merenja u periodu od godinu dana [61].

U studiji "Remote on-line machine condition monitoring system" („Sistem za daljinsku on-line dijagnostiku mašina“) Min-Chun Pan, Po-Ching Li, Yong-Ren Cheng, Measurement, Vol. 41, No 8, October 2008, pp. 912-921) je prikazana realizacija sistema za daljinsku dijagnostiku mašina, baziranog na arhitekturi razvijenoj u C++ Builder (BCB) softverskom razvojnom okruženju i Internetu kao komunikacionom mediju (TCP/IP). Prikazan je kompletan ciklus dijagnostike uključujući akviziciju podataka, obradu podataka, karakteristiku ekstrakcije, prepoznavanje oblika korišćenjem veštačkih neuronskih mreža i on-line video nadzor. Implementiran je sistem za daljinsku dijagnostiku mašine u cilju prediktivnog održavanja. U slučaju više tehničkih sistema na različitim lokacijama, može se realizovati dijagnostički centar za njihovu dijagnostiku [147].

U radu "Remote control and monitoring of an induction motor" („Daljinsko upravljanje i dijagnostika asinhronog motora) (Antonelli, A., Boccaletti, C., Duni, G., Fabbri, G., Proceedings of COMADEM, the 20th International Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Faro, Portugal, 2007.) prikazana je realizacija sistema za upravljanje i dijagnostiku udaljenog asinhronog motora. Sistem je zasnovan na web tehnologijama. Jezgro sistema, predstavlja PC server. Sastoji se od Internet konekcije, e-pošte klijenta, kao i softvera koji omogućava razmenu podataka sa elektronskim interfejsom. Elektronski interfejs se sastoji od dva glavna dela: aktuatora i analogno-digitalnog konvertora. Softver na serveru upravlja e-poštom klijenta i razmenjuje informacije između servera i elektronskog interfejsa. Njegov zadatak se sastoji u upravljanju Internet konekcijom, analizi primljene e-pošte, generisanju i slanju odgovora u vidu e-mail poruka, upravljanju komandama koje se šalju aktuatoru signala, kao i skladištenju podataka o aktivnostima sistema i detektovanim temperaturama. Razmena podataka i informacija koje se dešavaju između komponenti, odnosno klijenta, servera i udaljene opreme, smešta se u bazu podataka. Sistem je razvijen sa Microsoft Visual Studio 6.0, a permanentna Internet konekcija je realizovana korišćenjem UMTS-a. Prototip sistema je testiran i dao je pozitivne rezultate [31].

U doktorskoj disertaciji „Detekcija otkaza tipa slomljene šipke kod asinhronih motora primenom metoda računarske inteligencije“ (Matić, D., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.) dat je prikaz realizacije sistema za detekciju otkaza slomljene šipke rotora kod asinhronih motora, primenom metode vektora podrške na osnovu analize fazne struje motora u stacionarnom stanju, koja je trenutno jedna od najpopularnijih metoda. Otkazi na rotoru zauzimaju oko 10% od ukupnog broja otkaza. Objašnjena je Bajesova teorija odlučivanja koja predstavlja teorijsku osnovu u problematici prepoznavanja uzoraka i uspešnoj klasifikaciji. Dat je prikaz različitih metoda za izdvajanje odgovarajućih obeležja koja služe za prepoznavanje otkaza slomljene šipke rotora kao i prikaz realizacije različitih tipova klasifikatora koji služe za poređenje sa realizovanim sistemom [140].

U radu „Automatizacija termovizijskog postupka u monitoringu i dijagnostici elemenata prenosne mreže“ (Žarković, M., Stojković, Z., Infoteh-Jahorina Vol. 11, mart 2012.) su predstavljene mogućnosti automatizacije termografskih dijagnostičkih kontrola korišćenjem fazi logike kao metode veštačke inteligencije. Nakon izvršenih termografskih snimanja, temperature pregrevanja i osobine elementa korišćeni su u fazi logici za donošenje odluke o potrebnom remontu elementa. U radu su prikazani rezultati koje generiše fazi logika koja je razvijena primenom programskog paketa Matlab. Cilj rada je povećanje pouzdanosti donesenih dijagnostičkih odluka primenom fazi logike [206].

U radu "Automatizirano ispitivanje velikih asinkronih strojeva za termoelektrane" (Drago Ban, Peto savjetovanje CIGRE, Cavtat, 04. - 08. studenoga 2001. pp. 101-109.) su opisani postupci i prikazani rezultati automatizovanih ispitivanja visokonaponskih asinhronih motora velikih snaga. U procesu prikupljanja i obrade podataka korišćeni su trofazni analizator snage, desktop računar na kome je instaliran komercijalni programski paket TestPoint. Zbog ograničenih instaliranih snaga ispitnih stanica poseban problem predstavljaju ispitivanja velikih motora, bez obzira da li se radi o automatizovanom ili tzv. klasičnom načinu ispitivanja. Da bi se proces ispitivanja optimizirao izvršena je automatizacija ispitivanja, koja je obuhvatila: automatizaciju upravljanja elektromotornim pogonom, automatizaciju procesa prikupljanja podataka i automatizaciju procesa obrade podataka. Automatizacija upravljanja elektromotornim pogonom podrazumeva automatsko podešavanje radne tačke motora tokom snimanja karakteristika. Ovo je ujedno najsloženiji i najskuplji zahvat u procesu automatizacije. Automatizacija procesa prikupljanja podataka je izvršena pomoću specijalnih instrumenata (trofaznih analizatora snage) kojima se daljinski upravlja pomoću računara. Upravljanje računarom je potrebno zbog automatizacije

procesa obrade podataka, tj. izračunavanja karakterističnih veličina i, na osnovu toga, brze izrade protokola ispitivanja [38].

Rad "Dijagnostika vibracionog stanja hidroturbina primenom koncepata veštačke inteligencije" (Šaranović Ivan, Novak Jauković, Infoteh-Jahorina, Vol. 2, Ref. C-11, pp. 215-218, March 2002) prikazuje primenu metoda veštačke inteligencije za ocenu vibracionog stanja hidroturbina. Ocena se vrši na osnovu merenja relativnih vibracija vratila u zoni kućišta turbinskog ležaja i na osnovu definisanih područja radnih stanja koje daje proizvođač hidroturbina. Na osnovu ovih podataka i znanja eksperata realizovan je ekspertski sistem TURBO na bazi razvojnog okruženja - razvojne ljuške BEST (Based Expert System Toolkit). Da bi se pravovremeno otkrili uzroci koji dovode do poremećaja posmatraju se određene dinamičke veličine, kao što su: apsolutne vibracije, relativne vibracije vratila, pulsacije pritisaka i aksijalne sile u različitim režimima rada hidroturbine. Na osnovu ovih dinamičkih veličina i ocenjuje se opšte dinamičko stanje hidroturbine u periodičnim vremenskim razmacima [191].

U radu „Mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije u automatizaciji vibrodijagnostičkih metoda“ (Zuber Ninoslav, Ličen Hotimir, Tehnička dijagnostika, 2011, vol. 10, br. 2, str. 9-16) prikazano je istraživanje mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije u postupcima automatizacije vibrodijagnostičkih metoda. Dat je prikaz postojećih tehnika veštačke inteligencije sa kratkim opisom i načinom njihovog korišćenja. Eksperimentalna verifikacija je izvedena na podacima dobijenim sa probnog stola na kome je izvršeno snimanje vibracija na rotirajućoj mašini sa oštećenim ležajevima. Nekoliko tipova oštećenja kotrljajnih ležajeva u kombinaciji sa četiri nivoa debalansa je testirano. Kao ulazni podaci za klasifikaciju oštećenja korišćena su skalarna obeležja vibracionog signala iz vremenskog i frekvencijskog domena. Nekoliko arhitektura višeslojnih perceptronskih neuronskih mreža je korišćeno [202].

U radu "Dijagnostički centar i opšti principi informacionih tehnologija u daljinskom nadzoru i dijagnostici stanja opreme u elektroenergetici" (Dragan Kovačević, Nikola Miladinović, Saša Milić, Vladimir Polužanski, Jelena Kožićić, Infoteh-Jahorina, Vol. 10, Ref. D-17, pp. 354-357, March 2011.) je navedeno da dijagnostički centar omogućava da se na osnovu uvida u veliki broj tehničkih parametara izvedu tehno-ekonomske analize koje su od interesa za tržište, planira proizvodnja, pravilnije upravlja resursima, definišu i planiraju periodi remonta, ostvari uvid u stanje opreme i pogona u realnom vremenu, detektuju otkazi u početnoj fazi nastanka, spreče ili smanje posledice otkaza, analiziraju uzroci otkaza, izvrši optimizacija upravljanja opremom, provede održavanje prema stanju itd. Dijagnostički centar ima i mnogo šire mogućnosti, kao što su: da prati i kompletne proizvodne cikluse električne energije, kao što je stanje pojedinih resursa (npr. dotok vode u hidroelektranama, količina uglja u termoelektranama, stanje transportnih ciklusa i dr.) [127].

U radu "Primena GSM/GPRS komunikacije u sistemima upravljanja i daljinskog nadzora" (Timčenko, V., Pernić, G., Vučurević, V., Dimitrijević, M., 15. Telekomunikacioni forum TELFOR, Beograd, 2007.) realizovan je SCADA sistem upravljanja i daljinskog nadzora nivoa voda u akumulacijama i dovodnim drenažnim kanalima reke Dunav, HE "Đerdap I" i HE "Đerdap II" u cilju zaštite priobalja od uticaja uspora. Komunikacija i prenos podataka u okviru ovog sistema su ostvareni preko GPRS tehnologije. Ukazano je da se primenom Internet tehnologija u kombinaciji sa GPRS tehnologijom obezbeđuje jednostavno prosleđivanje informacija, upravljanje pojedinim delovima sistema i efikasnije korišćenje sistema u gotovo svim vremenskim i geografskim uslovima [193].

U doktorskoj disertaciji "Daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema" (Vanja Voskresenski, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, 2011) razmotrene su mogućnosti korišćenja novih informaciono-telekomunikacionih tehnologija za daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara tehničkih sistema u cilju preduzimanja aktivnosti održavanja na osnovu rezultata praćenja. Današnja praksa relativno kratkih perioda aktivnosti održavanja pri unapred teško predvidivim otkazima je zahtevna u smislu angažovanja ljudstva i troškova održavanja. Pomoću sistema tehničke dijagnostike i uz primenu savremenih tehnologija daljinskog prenosa podataka u budućnosti se može ostvariti značajniji doprinos daljem unapređivanju rada udaljenih tehničkih sistema [195].

Na osnovu detaljno proučene relevantne domaće i međunarodne literature može se zaključiti da je većina istraživanja vezanih za automatizovanu dijagnostiku, usmerena na izbor odgovarajuće hardverske i softverske konfiguracije i sl. U istraživanjima su razmatrani najoptimalniji načini prenosa podatka,

moгуćnosti primene metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka, mogućnosti daljinske dijagnostike odnosno upotrebe Interneta i bežičnih GSM/GPRS mobilnih mreža, koji omogućavaju dijagnostiku tehničkih sistema koji se mogu nalaziti na sasvim drugom kraju sveta. Najčešće se dosadašnja istraživanja odnose na daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara, koje je našlo svoju široku primenu u praksi, najpre u postrojenjima vodosnabdevanja, gasovoda, naftovoda, elektrana, elektrodistributivnih mreža, zatim kod uređaja energetske elektronike, telekomunikacionih sistema (npr. optičkih kablova), zatim kod transportnih sistema (železničkog saobraćaja, autoindustrije) koji su po svojoj prirodi prostorno razdeljeni sistemi, kao i medicini (medicinska teledijagnostika).

Takođe, na osnovu proučene relevantne literature autor ove disertacije je zaključio da se rezultati dosadašnjih istraživanja uglavnom odnose na usku praktičnu primenu neke od metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka, a da ne postoje ili su vrlo retka istraživanja koja se odnose na projektovanje (razvoj) automatizovanog dijagnostičkog modela koji obuhvata više dijagnostičkih metoda i koji je opšte (široko) primenljiv u okviru koncepcije održavanja prema stanju. Takođe, autor ove disertacije je zaključio da problematika uticaja automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na pouzdanost i raspoloživost tih sistema, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća nije dovoljno istražena, jer su dosadašnja istraživanja i literaturni izvori vezani za ovu problematiku retki i nepotpuni, kao i da se ovoj problematici ne pridaje značajna pažnja u praksi. Zbog toga su tokom izrade ove disertacije sprovedena istraživanja koja su imala za cilj da se razvije široko primenljiv automatizovani dijagnostički model, koji obuhvata tri dijagnostičke metode (metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora motora) i utvrdi njegov uticaj na pouzdanost i raspoloživost tehničkih sistema tokom njihove eksploatacije, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća, jer su ubrzanim razvojem hardverskih i softverskih rešenja, stvoreni uslovi za pronalaženje novih mogućnosti praktične primene automatizovane dijagnostike.

Uzimajući u obzir dosadašnja istraživanja, "Metodološki koncept istraživanja" koji je predstavljen u narednom poglavlju opravdava istraživanje problematike uticaja automatizovane dijagnostike na pouzdanost tehničkih sistema.

3. Metodološki koncept istraživanja

3.1 Problem istraživanja

Na osnovu društvenog i naučnog značaja ove problematike može se konstatovati da je problem istraživanja u ovoj disertaciji bio da se ispita uticaj automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na nivo pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća. Problem je po svojoj prirodi kompleksan, povezan sa nizom pojava i procesa, u nauci, privredi, društvu, njihovim međusobnim odnosima i sl., pa samim tim zahteva znanja iz većeg broja različitih naučnih oblasti, kao što su: industrijsko inženjerstvo, mašinstvo, elektrotehnika, mehatronika, automatika, informaciono-komunikacione tehnologije i sl., što mu daje multidisciplinarni karakter.

3.2 Predmet istraživanja

Polazeći od navedenog problema može se reći da je predmet ovog istraživanja značaj automatizovane dijagnostike i njen uticaj na pouzdanost i raspoloživost tehničkih sistema, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća. Ako se navedeni predmet istraživanja detaljnije razmotri onda su predmet ovog istraživanja: automatizovana dijagnostika, pouzdanost i raspoloživost tehničkih sistema, otkazi tehničkih sistema, dijagnostičke metode termografije, spektralne analize vibracija, spektralne analize struje statora itd.

Predmet istraživanja su i klizni i kotrljajni ležajevi mašina, specifičnost konstrukcije i složeni uslovi rada utiču na to da se u ležajevima razvijaju različiti tribološki procesi i različite vrste oštećenja. Oštećenja ležajeva mogu biti: mehanička (adhezivno i abrazivno habanje, habanje usled zamora materijala i sl.), hemijska, termička, biološka i sl. Uzroci oštećenja ležajeva mašina su različiti: neadekvatno podmazivanje, prisustvo kontaminanata u mazivu, nesaosnost vratila pogonske i radne mašine, neuravnoteženost rotacionih delova, statički i dinamički ekscentricitet, preopterećenje, proticanje lutajućih struja kroz ležajeve itd.

Kod automatizovane dijagnostike dijagnostički parametri, odnosno fizičke veličine iz kojih se mogu dobiti najpouzdanije informacije o stanju tehničkog sistema (npr. temperatura, vibracije, struja statora i sl.) se neprekidno mere (prate), odnosno pomoću odgovarajućih senzora (npr. termografskih kamera, senzora vibracija, strujnih mernih transformatora i sl.) pretvaraju u standardne signale pogodne za prenos i dalju obradu. Zatim, se u takvom obliku odvede u računar gde se uz pomoć metoda veštačke inteligencije, kao što su ekspertske sistemi, sistemi fazi logike, neuronske mreže, hibridni sistemi itd., upoređuju sa željenim vrednostima. Na osnovu veličine odstupanja stvarnih od željenih vrednosti dijagnostičkih parametara ocenjuje se stanje (stepen neispravnosti) tehničkog sistema i na osnovu toga donosi dijagnostička odluka o daljim aktivnostima održavanja (o nastavku ili zaustavljanju rada pogona).

U slučaju potpuno automatizovanog dijagnostičkog procesa svim navedenim poslovima upravlja računar, a u slučaju da proces nije u potpunosti automatizovan neke od tih poslova delimično ili u potpunosti obavlja čovek, kao što je to vrlo često ocena stanja tehničkog sistema i donošenje dijagnostičkih odluka. Računar predstavlja glavni deo automatizovanog dijagnostičkog procesa, on upravlja celokupnim procesom, što znači da bez računara praktično nema automatizacije dijagnostičkog procesa.

Prilikom prikupljanja podataka treba voditi računa u kom obliku će se ti podaci prenositi (analognom ili digitalnom), kao i kojim medijem (metalnim provodnikom, optičkim vlaknima ili vazduhom). Ako se podaci prenose kroz okruženje u kome postoji opasnost od elektromagnetnih smetnji, uzrokovanih lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima itd., onda se preporučuje da se na mestu prikupljanja izvrši delimična obrada podataka, odnosno da se izvrši pretvaranje signala iz analognog u digitalni oblik i da se u takvom obliku pomoću optičkih kablova prenesu do mesta na kome će se izvršiti njihova dalja obrada. Da bi se na osnovu prikupljenih podataka mogla izvršiti ocena stanja tehničkog sistema, često je potrebno izvršiti obradu tih podataka. Upravo je to deo dijagnostičkog procesa u kome se računari najviše i najduže primenjuju i u kome je moguć visok nivo automatizacije. Poslednjih godina razvijene su različite metode za obradu podataka, koje se koriste u dijagnostičke svrhe, kao što su: metoda analize

frekvencijskog spektra, metoda korelacije, metoda usrednjavanja signala, metoda trenda itd. Metodom analize frekvencijskog spektra, primenom Fourierove transformacije, se pomoću spektralnih analizatora ili kartica za akviziciju podataka DAQ (Data AcQuisition) ugrađenih u računar, vrši pretvaranje signala iz vremenskog u frekvencijski domen. Obrada podataka može se vršiti pomoću vlastitih programa napisanih u nekom od programskih jezika za vizuelno programiranje Visual Basic, C++, Delphi, Matlab, TestPoint (za analizu frekvencijskog spektra struje statora) itd. Međutim, u nekim slučajevima povoljnije je koristiti gotove programske pakete, kao što su npr. TermaCAM Research za obradu termografskih slika, OneproD XPR za analizu frekvencijskog spektra vibracija. Takođe, za donošenje dijagnostičkih odluka metodom analize frekvencijskog spektra struje statora može se koristiti programski paket Motormonitor itd.

3.3 Cilj istraživanja

Osnovni cilj istraživanja realizovanih tokom izrade ove doktorske disertacije bio je da se ispita da li automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

Da bi se ostvario postavljeni cilj, odnosno da bi se dokazala tačnost pomoćnih, a preko njih i glavne hipoteze, na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja, razvijen je novi automatizovani dijagnostički model, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Ovaj model obuhvata korišćenje tri dijagnostičke metode: metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora.

Zatim, je u empirijsko-eksperimentalnom delu disertacije izvršena praktična primena tog modela na konkretnom primeru dijagnostičkih kontrola vitalnih komponenti tehničkih sistema (ležajeva mašina, asinhronih motora, električnih spojeva itd.) u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji).

Na osnovu tehno-ekonomske analize statističkih empirijskih podataka dobijenih od službi održavanja o aktivnostima održavanja na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model (od 20.12.2010. god. do 20.12.2012. god) i u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model (od 21.12.2012. god. do 21.12.2014. god), utvrđeno je da ovaj model doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

3.4 Hipoteze istraživanja

Na osnovu razmotrenog problema, predmeta i cilja istraživanja, postavljena je glavna hipoteza ovog naučno-istraživačkog rada, koja glasi:

„Automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji, bazirana na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća“.

Pored glavne postavljene su i sledeće pomoćne hipoteze:

1. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju broja otkaza i produženju srednjeg vremena između otkaza *MTBF*, a time i porastu nivoa pouzdanosti tih sistema.
2. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi produženju srednjeg vremena između održavanja *MTBM* i skraćanju srednjeg vremena u zastoju *MDT*, a time i porastu nivoa raspoloživosti tih sistema.
3. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju troškova održavanja (smanjenju troškova za radnu snagu (smanjenju broja i obima aktivnosti korektivnog i preventivnog održavanja), smanjenju troškova uzrokovanih zastojima proizvodnog procesa, smanjenju potrošnje rezervnih delova i

maziva itd.), a time i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća, čime se obezbeđuje ekonomska opravdanost investiranja u praktičnu primenu ovog modela.

3.5 Metode istraživanja

U istraživanju sprovedenom tokom izrade ove disertacije korišćene su sledeće naučno-istraživačke metode:

- metoda analize, korišćena je u početnoj fazi istraživanja, gde je predmet istraživanja razložen na delove kako bi se na osnovu toga i drugih činjenica mogao razviti novi automatizovani dijagnostički model;
- metoda sinteze, korišćena je u završnom delu istraživanja odnosno pri analizi rezultata istraživanja i donošenju zaključku, gde su na jezgrovit način istaknuti ključni rezultati istraživanja;
- metoda deskripcije, korišćena je za opisivanje relevantnih saznanja i rezultata do kojih se došlo istraživanjem razmatrane problematike, kao i za opisivanje korišćene dijagnostičke opreme, sprovedenih dijagnostičkih postupaka i sl.;
- komparativna metoda, korišćena je za međusobno poređenje, odnosno utvrđivanje sličnosti i razlika između već realizovanih automatizovanih dijagnostičkih modela u cilju projektovanja najpodesnijeg i najefikasnijeg novog automatizovanog dijagnostičkog modela;
- metoda indukcije, korišćena je da bi se iz velikog broja poznatih primera uspešne praktične primene različitih automatizovanih dijagnostičkih modela izabrali oni koji su najznačajniji za izvlačenje opštih zaključaka o automatizovanoj dijagnostici;
- metoda modelovanja, korišćena je prilikom razvoja (projektovanja) novog automatizovanog dijagnostičkog modela,
- eksperimentalna dijagnostička metoda termografije, korišćena je za detekciju otkaza tehničkih sistema u ranoj fazi nastanka, koji se manifestuju odstupanjem njihove temperature od normalne radne temperature, zasniva se na analizi termografskih slika dobijenih pomoću termografskih kamera;
- eksperimentalna dijagnostička metoda analize spektra vibracija, korišćena je za detekciju otkaza složenih tehničkih sistema u ranoj fazi nastanka, koji se manifestuju povećanim vibracijama, bazira se na činjenici da svaki tip oštećenja uzrokuje vibracije tačno određene frekvencije, a amplituda tih vibracija proporcionalna je stepenu (veličini) oštećenja;
- eksperimentalna dijagnostička metoda analize spektra struje statora, bazira se na činjenici da svaka neispravnost elektromotora, uzrokuje u frekvencijskom spektru struje statora porast tačno određene frekvencijske komponente, analizom tog spektra moguće je doći do zaključaka o tipu i stepenu neispravnosti elektromotora;
- statistička metoda uzorka, korišćena je za prikupljanje podataka o aktivnostima održavanja na validnom uzorku vitalnih komponenti tehničkih sistema, koji su obrađivani takođe statističkim metodama.

U istraživanjima realizovanim tokom izrade ove disertacije primenjivane su i sledeće naučno-istraživačke tehnike:

- tehnika naučnog posmatranja, korišćena je za objektivno, potpuno i precizno prikupljanje statističkih podataka u cilju provere postavljenih hipoteza;
- tehnika naučnog predviđanja, korišćena je da se predvide tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti.

3.6 Naučna i društvena opravdanost istraživanja

Nagli razvoj računarskog hardvera i softvera, omogućio je da istraživanja vezana za nove pristupe održavanju tehničkih sistema, bazirane na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija za dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti tehničkih sistema, postanu aktuelna i naučno opravdana, jer rezultati takvih istraživanja mogu doprineti da se postignu pozitivni efekti u pogledu: povećanja nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenja troškova održavanja, a time i smanjenja ukupnih troškova i ekonomičnijeg poslovanja preduzeća. Pored toga ovakva istraživanja mogu doprineti smanjenju opasnosti po ljude i okolinu, unapređenju energetske efikasnosti (smanjenju gubitaka energije), smanjenju zagađenja životne sredine, smanjenju škarta u proizvodnji, optimalnijem planiranju aktivnosti održavanja itd.

Problematika koja je istraživana tokom izrade ove disertacije je veoma aktuelna i zaokuplja sve veću pažnju naučne i stručne javnosti. Istraživanje realizovano tokom izrade ove doktorske disertacije imalo je teorijsko-empirijski karakter i zasnovano je na aktuelnoj problematici u naučnoj oblasti Industrijsko inženjerstvo i naučnoj disciplini Upravljanje razvojem - Tehnologija održavanja i trebalo je da pruži odgovore na pitanja vezana za mogućnosti i efekte primene automatizovane dijagnostike u održavanju tehničkih sistema u industriji.

Istraživanja sprovedena tokom izrade ove doktorske disertacije pokazala su svu kompleksnost i značaj razmatranja problematike uticaja automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na nivo pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća, čime je ostvaren konkretan doprinos istraživanjima u oblasti automatizovane dijagnostike i održavanja tehničkih sistema.

Naučni doprinos istraživanja koja su sprovedena tokom izrade ove disertacije ogleda se u dobijenim rezultatima istraživanja, koji su potvrdili tačnost postavljenih hipoteza i predstavljaju značajan naučni doprinos, koji se ogleda u sledećem:

- predložen je novi pristup dijagnostici stanja tehničkih sistema, odnosno razvijen je novi automatizovani dijagnostički model za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, koji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća, što je potvrđeno praktičnom primenom tog modela na konkretnom primeru praćenja stanja tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji);
- izvršena je komparativna analiza, odnosno utvrđene su sličnosti i razlike između već realizovanih automatizovanih dijagnostičkih modela u cilju razvoja (projektovanja) što ekonomičnijeg i efikasnijeg novog automatizovanog dijagnostičkog modela;
- predložene su mere za sprečavanje smetnji prilikom rada automatizovanih dijagnostičkih modela (odnosno smetnji pri radu računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija) uzrokovanih lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima i sl.,
- razvijen je sopstveni algoritam za donošenje dijagnostičkih poruka primenom fazi logike, kao metode veštačke inteligencije;
- razvijen je sopstveni model za proračun pokazatelja pouzdanosti kompleksnih tehničkih sistema, proračun pokazatelja pouzdanosti vršen je korišćenjem analitičkih i empirijskih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode;
- rezultati dobijeni primenom razvijenog novog modela upoređeni su rezultatima sličnih istraživanja;
- navedene su prednosti i ograničenja razvijenog novog modela;
- predočene su mogućnosti praktične primene razvijenog novog modela;

- naučnim predviđanjem predočene su tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti, koja bi na najefikasniji i najekonomičniji način omogućila praćenje stanja kompleksnih tehničkih sistema;
- prezentovana su brojna istraživanja u području automatizovane dijagnostike, publikovana u časopisima i na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja;
- ova disertacija predstavlja koristan literaturni izvor za buduća istraživanja u području automatizovane dijagnostike itd.

Originalnost ove doktorske disertacije proizilazi iz činjenice da je na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja razvijen originalni automatizovani dijagnostički model i da se zatim, empirijsko-eksperimentalnim istraživanjima i vrlo studioznom analizom rezultata istraživanja, došlo do originalnih zaključaka i novih saznanja, odnosno dokaza da automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u različitim granama industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji) doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

U disertaciji je ostvareno povezivanje teorije sa praksom, uspostavljanjem veze između teorijski razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela i njegove praktične primene u realnim pogonskim uslovima. Posebnu vrednost u ovoj disertaciji imaju rezultati empirijsko-eksperimentalnih istraživanja koja su sprovedena na pažljivo odabranom validnom aproksimativnom uzorku vitalnih komponenti tehničkih sistema.

Rezultati istraživanja do kojih se došlo tokom izrade ove disertacije pokazuju da ova doktorska disertacija predstavlja značajan naučni doprinos u području teorije i prakse (rešavanja konkretnih praktičnih problema) održavanja tehničkih sistema, koji su valorizovani objavljivanjem tih rezultata u odgovarajućim publikacijama.

Privredni doprinos istraživanja koja su sprovedena tokom izrade ove disertaciji ogleda se u dobijenim rezultatima istraživanja, koji predstavljaju značajan doprinos praksi, odnosno rešavanju konkretnih praktičnih problema u oblasti održavanja tehničkih sistema.

Sa naučnog aspekta značajna je i mogućnost praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela. Postavljeni ciljevi i hipoteze su dokazani na konkretnom primeru praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji), čime je dokazana mogućnost njegove veoma široke praktične primene.

Ovaj model je posebno pogodan za dijagnostiku stanja kritičnih mašina gde se proces proizvodnje ne sme prekidati, jer svaki prekid procesa, a posebno neplanski može uzrokovati velike troškove, kao i opasnosti po ljude i okolinu.

Objektivno, svestrano i potpuno sagledane su sve mogućnosti praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u različitim granama industrije, uzimajući u obzir sve njegove prednosti i ograničenja. Što može doprineti unapređenju postojeće prakse održavanja tehničkih sistema, u cilju postizanja veće efikasnosti održavanja. Pored toga, očekuje se da će neposredna primena saznanja stečenih ovim istraživanjima doprineti da se u industriji naše zemlje primenjuju svetski standardi i prate trendovi u oblasti održavanja tehničkih sistema.

Teorijski doprinos ove doktorske disertacije ogleda se u tome što je prikupljanjem i proučavanjem relevantne domaće i međunarodne literature izvršena sinteza brojnih saznanja do kojih su došli eminentni stručnjaci u ovoj oblasti. Tako da ova disertacija predstavlja i značajan prilog literaturi, jer je veoma mali broj radova koji se bave ovom problematikom. Ova disertacija može predstavljati koristan literaturni izvor za dalja istraživanja u oblasti održavanja tehničkih sistema kod nas i u svetu, naročito za stručnjake koji žele projektovati automatizovane dijagnostičke modele bazirane na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Deo rezultata istraživanja dobijenih izradom ove disertacije prezentovan je u monografijama i radovima koji su publikovani u časopisima i na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja.

Društveni doprinos ovih istraživanja ogleda se u njihovoj široj društvenoj aktuelnosti i značaju, jer napredak nauke i tehnike značajno utiču na ekonomski i ukupni društveni razvoj i progres. Ovakva istraživanja doprinose smanjenju troškova održavanja, a time i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju naših preduzeća, čime se konkurentnost industrije i privrede naše zemlje može podići na viši nivo. Takođe, ovakva istraživanja doprinose smanjenju opasnosti po ljude i okolinu, unapređenju energetske efikasnosti (smanjenju potrošnje energije) i zaštiti životne sredine, smanjenju škarta u proizvodnji itd.

3.7 Organizacija istraživanja

Da bi ostvario postavljeni cilj, autor ove disertacije, je istraživanje realizovao kroz više faza.

U **prvoj fazi (teorijskih) istraživanja**, autor ove disertacije uočio je problem, formulisao ga i sagledao njegovu težinu, a zatim se angažovao na višegodišnjem prikupljanju i proučavanju literaturne građe, da bi izvršio analizu trenutnog stanja u oblasti istraživanja: industrijskog inženjerstva, mašinstva, elektrotehnike, mehatronike, automatike, informacionih tehnologija, ekonomske racionalizacije i ostalih naučnih disciplina potrebnih za projektovanje savremenih automatizovanih dijagnostičkih modela.

U **drugoj fazi istraživanja**, koja se sastoji od četiri podfaze, su sprovedena empirijsko-eksperimentalna istraživanja.

U prvoj podfazi autor je na osnovu rezultata prve faze istraživanja (na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja) razvio (projektovao) novi automatizovani dijagnostički model (izvršio izbor dijagnostičkih parametara, metoda i opreme, utvrdio kriterijume za ocenu stanja tehničkih sistema itd.), baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, koji treba da doprinese porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema u industriji, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća. Ovaj model obuhvata korišćenje tri dijagnostičke metode: metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora. Pri tome je korišćena savremena dijagnostička oprema, kao što su: računari sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom, termografske kamere, senzori vibracija, spektralni analizatori, strujni merni transformatori, koaksijalni kablovi, kablovi sa upređenim paricama, optički kablovi itd. Model je prilagođen postojećem stanju nivoa održavanja u preduzećima naše zemlje.

U drugoj podfazi je zbog složenosti i obima istraživanja realizovanih tokom izrade ove disertacije izvršen izbor stručnih saradnika u ovom naučno-istraživačkom projektu od inženjera i tehničara koji rade na održavanju, koji su upoznati sa sadržajem istraživanja, dijagnostičkom opremom i softverskim aplikacijama i sl., koji će se koristiti tokom istraživanja. Obuka osoblja za realizaciju istraživanja je obavljena nakon što je razvijen (projektovan) novi model.

U trećoj podfazi istraživanja izvršena je nabavka dijagnostičke opreme (računara sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom, senzora, instrumenata, kablova itd.), njena ugradnja, instaliranje softvera i puštanje u pogon razvijenog (projektovanog) novog modela u preduzeću za obradu i preradu drveta "Omega profeks" iz Loznice, preduzeću bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i preduzeća obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice.

U četvrtoj podfazi istraživanja, izvršeno je: sprovođenje aktivnosti održavanja praktičnom primenom razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela i vođenje evidencije o aktivnostima održavanja. Radi provere hipotetičkog okvira disertacije, izvršena je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela na konkretnom primeru praćenja stanja vitalnih komponenti složenih tehničkih sistema (ležajeva mašina, asinhronih motora, električnih spojeva itd.) u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji).

Dijagnostičke kontrole su bile fokusirane na vitalne komponente tehničkih sistema, zbog toga što su iskustva pokazala da one najbolje odražavaju (oslikavaju) stanje u kome se tehnički sistemi nalaze. U istraživanjima se posmatralo da li vitalne komponente tehničkih sistema (ležajevi, asinhroni motori, priključne stezaljke i sl.) obavljaju svoju funkciju i obezbeđuju potreban rad tehničkih sistema (mašina), odnosno razmatrana je njihova pouzdanost i raspoloživost.

Empirijsko-eksperimentalni deo istraživanja je sproveden u sledećim preduzećima naše zemlje: u preduzeću za obradu i preradu drveta "Omega profeks" iz Loznice, zatim u preduzeću bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i u preduzeću obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice. Jedan deo empirijsko-eksperimentalnih istraživanja obavljen je u laboratorijskim uslovima.

Empirijsko-eksperimentalni deo istraživanja koji je sproveden u vremenskom intervalu od dve godine (od 21.12.2012 god. do 21.12.2014 god.) bio je dovoljan da se prikupe svi relevantni empirijski podaci. Za dobijanje preciznijih podataka potreban je što duži vremenski interval.

U preduzeću za obradu i preradu drveta "Omega profeks" iz Loznice, primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti složenih mašina građenih od elektronskih, električnih, elektromehaničkih i mehaničkih komponenti, kao što su: CNC mašine za kompjutersko rezbarenje i graviranje, koje služe za rezbarenje i graviranje drveta, medijapana, iverice, plastike, šper ploče i drugih materijala; CNC glodalice; CNC Tiplerice, koje tipluju drvo, ivericu i sl., odnosno buše rupe na drvetu i iverici za police, šarke i sl.; Automatske bušilice, koje služe za vertikalno i horizontalno bušenje; Mašine za automatsko rezanje daščica; Prese za furniranje, koje služe za presovanje furnira; Kanterice, koje služe za lepljenje trake na ivericu, medijapan i sl.; Giljotine za rezanje furnira, koje služe za rezanje furnira dužina 3000 mm; Mašine za odvojeno rezanje sa kružnom pilom za proizvodnju stolarije; Mašine za izradu greda itd.

Primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole mašina u industrijskim pogonima preduzeća bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i preduzeća obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice. Mašine koje su kontrolisane primenom razvijenog novog modela su: elektromotorni pogoni cirkulacionih pumpi, ventilatori svežeg vazduha i ventilatori dimnih gasova u toplani, motori mlinova za ugallj, pogoni tračnih transporterata itd.

Pored toga primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole aparata elektroenergetskih postrojenja Elektroprivrede Srbije (EPS-a).

U trećoj fazi (analiza rezultata) istraživanja, je primenom navedene naučno-istraživačke metodologije izvršeno:

- prikupljanje i obrada relevantnih podataka koji su omogućili potvrdu postavljenih hipoteza;
- analiziranje prikupljenih i obrađenih rezultata istraživanja;
- izdvajanje ključnih rezultata istraživanja, koji su potvrdili hipotetički okvir istraživanja - proveru postavljenih hipoteza;
- poređenje sa rezultatima sličnih istraživanja itd.

Tokom empirijsko-eksperimentalnog dela istraživanja službe održavanja su vodile evidencije (prikupljeni su podaci) o aktivnostima održavanja velikog broja tehničkih sistema u industriji.

Relevantni statistički empirijski podaci dobijeni od službi održavanja o aktivnostima održavanja (broju preventivnih i korektivnih aktivnosti održavanja, vremenu u zastoju, vremenu u radu, uzroku otkaza i sl.) na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema uneseni su u odgovarajuće tabele, na osnovu kojih je primenom razvijenog novog modela izvršen proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model (od 20.12.2010. godine do 20.12.2012. godine) i u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model (od 21.12.2012. godine do 21.12.2014. godine). Proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema vršen je korišćenjem razvijenog novog modela u programu za tabelarnu obradu podataka Microsoft Exel, na osnovu sakupljenih empirijskih podataka. Proračun pokazatelja pouzdanosti vršen je korišćenjem analitičkih i empirijskih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode.

Nakon toga izvršena je tehno-ekonomska analiza dobijenih i obrađenih statističkih podataka o aktivnostima održavanja validnog uzorka tehničkih sistema, što je poslužilo za analiziranje efekata praktične primene razvijenog novog modela, odnosno za proveru hipotetičkog okvira istraživanja. Analizirani su i praćeni statistički podaci koji ukazuju kod kojih tehničkih sistema i zbog kojih komponenti

češće dolazi do pojave otkaza. Poređeni su tehnički sistemi koji su bili približno istih karakteristika i koji su radili u približno istim uslovima. Statistička obrada prikupljenih podataka o aktivnostima održavanja vršena je na desktop računaru.

Potom je izvršeno poređenje rezultata dobijenih istraživanjem tokom izrade ove disertacije sa rezultatima sličnih istraživanja. Zatim su uočene prednosti i ograničenja razvijenog novog modela, kao i mogućnosti njegove modifikacije. Takođe, su uočene tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti.

Na kraju je izveden zaključak i dat predlog daljih istraživanja.

U četvroj fazi istraživanja izvršeno je pisanje konačnog oblika doktorske disertacije.

Utvrđivanjem ovakve organizacije jasno je određen pravac istraživanja, koja su sprovedena prema navedenoj naučno-istraživačkoj metodologiji.

4. Teorijska istraživanja

4.1 Održavanje tehničkih sistema

Održavanje (engl. maintenance) tehničkih sistema predstavlja skup svih tehničkih i administrativnih postupaka koji se tokom veka trajanja preduzimaju na tehničkim sistemima s ciljem sprečavanja pojave otkaza, kao i vraćanja sistema po pojavi otkaza ponovo u stanje u radu, u što kraćem vremenu i sa što manjim troškovima, u datim uslovima okoline i organizacije rada. Karakteriše se određenim odnosima između pojedinih postupaka održavanja i vremena u kojima se ti postupci provode¹ [1,2].

Sistem održavanja tehničkih sistema može da se realizuje na više načina, u više međusobno različitih varijanti. Pojedine varijante, odnosno rešenja mogu da se razlikuju u nizu detalja, ali i u osnovnim, za sistem bitnim obeležjima. Ovo se pre svega odnosi na koncepciju, tehnologiju i organizaciju održavanja [1].

Pod pojmom koncepcija (metodologija) održavanja podrazumeva se njegovo obeležje, koje utiče na opšti kvalitet sistema održavanja, odnosno podrazumeva se princip na osnovu koga se donose odluke o vremenu u kojem treba da se provedu postupci održavanja i načinu provođenja postupaka održavanja. Potreba za povećanom produktivnošću i sigurnošću postrojenja, a pri tome smanjenim troškovima održavanja, dovela je do povećanog interesa za koncepcije održavanja tehničkih sistema² [1,2].

Ako se uzme u obzir da se otkazi tehničkih sistema mogu pojaviti u najgore moguće vreme, odnosno kada se najviše žuri sa ispunjenjem plana proizvodnje i kada je mogućnost prodaje i cena proizvoda na tržištu dobra, onda je veoma jasno kolika je uloga i značaj održavanja. Ciljevi održavanja zalaze i u sferu ekonomije poslovanja, iskazuju se u obliku racionalizacije i načelno su merljivi. Zbog svega toga, savremena nauka sve više izučava proces održavanja i podiže ga na viši nivo značaja u privredi i društvu [1,2].

Ciljevi bilo koje koncepcije održavanja su [1,2]:

1. Eliminisanje otkaza. Česta je situacija da havarijski otkaz uzrokuje značajna prateća oštećenja na sistemu, čime se značajno povećavaju troškovi popravke. Potpuno eliminisanje otkaza nije moguće sprečiti, ali se njihov broj može značajno smanjiti, sistematičnim pristupom održavanju.
2. Ostvarivanje mogućnosti predviđanja i tačnog planiranja potreba za održavanjem. Ovo uključuje minimiziranje zaliha (inventara) rezervnih delova i značajno smanjenje prekovremenog rada. U idealnim slučajevima, popravke sistema se planiraju za periode planskih zastoja postrojenja.
3. Povećanje pogonske spremnosti postrojenja, tako što bi se značajno smanjila mogućnost pojave otkaza tokom rada, kao i održavanje operativnog kapaciteta sistema smanjenjem perioda zastoja kritičnih delova sistema. U idealnom slučaju, radno stanje svih delova sistema bi trebalo biti poznato i dokumentovano.
4. Obezbeđenje predvidivog i razumnog radnog vremena za osoblje angažovano na održavanju.

U literaturi se spominju različite koncepcije (metodologije) održavanja tehničkih sistema, slika 4.1., kao što su³ [1-4]:

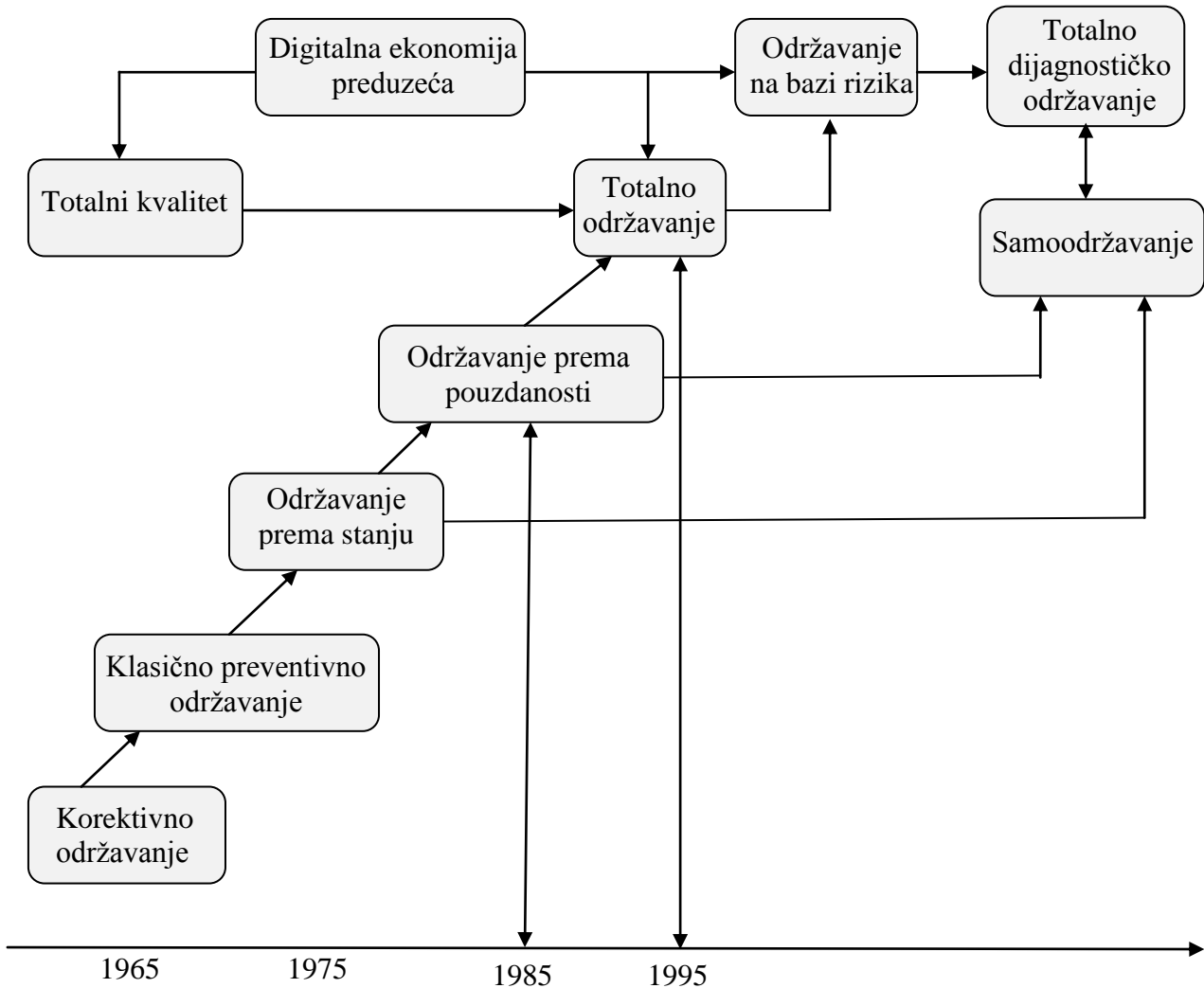
1. Korektivno održavanje.

¹ Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

² Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana: Pouzdano održavanje termoelektrana, hidroelektrana, solarnih elektrana, vetroelektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku – Adam institut, Smederevo, 2014.

³ Adamović, Ž., Ilić, B., Bursać, Ž., Vibrodijagnostičko održavanje mašina i postrojenja: Nova metodologija održavanja mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.

2. Klasično preventivno održavanje.
3. Održavanje prema stanju.
4. Održavanje prema pouzdanosti.
5. Totalno održavanje.
6. Održavanje na bazi rizika.
7. Totalno dijagnostičko održavanje.
8. Samoodržavanje itd.



Slika 4.1. Konceptije (metodologije) održavanja tehničkih sistema⁴ [1-4]

Pored ovih pojedini autori i kompanije spominju i druge konceptije (metodologije) održavanja, koje se u suštini odnose na preventivno održavanje. Obično im daju posebne nazive kako bi se pokazala originalnost pristupa. Takođe, većina ovih konceptija održavanja predviđa primenu metoda tehničke dijagnostike. Svaka od navedenih konceptija održavanja ima svoje prednosti i mane, koje se pre svega ogledaju u odnosu sredstava uloženi u njihovu implementaciju i vremena povratka istih [1-3].

Aktivnosti korektivnog održavanja se najčešće provode neplanski (tj. bez prethodno kreiranog plana) i urgentno, nakon pojave otkaza. Dok se aktivnosti ostalih konceptija održavanja provode planski, pre pojave otkaza, pa se često ove konceptije održavanja nazivaju planskim održavanjem [1-2].

Ne postoji konceptija održavanja čijom primenom se u potpunosti mogu predvideti, detektovati ili otkloniti poremećaji, degradacioni procesi i uslovi koji mogu dovesti do delimičnog ili potpunog

⁴ Adamović, Ž., Otić, G., Ilić, B., Proaktivno održavanje mašina i postrojenja, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.

narušavanja predviđene funkcije sistema. Međutim, adekvatnim održavanjem svi napred pomenuti uticaji mogu se svesti na najmanju moguću meru, za zadate uslove eksploatacije [1,2].

Što je koncepcija održavanja savremenija to je intenzitet otkaza manji, pa zbog toga pri izboru treba težiti primeni savremenijih koncepcija održavanja [1,2].

Prilikom izbora koncepcije održavanja, učestalosti i načina provođenja dijagnostičkih kontrola mašina potrebno je voditi računa o [1,2]:

- značaju tih mašina za odvijanje procesa, jer od toga zavisi koje parametre treba kontrolisati i da li dijagnostičke kontrole treba provoditi neprekidno ili povremeno itd.
- konstrukcionim karakteristikama tih mašina, jer od toga zavisi npr. koji će se tip senzora koristiti za kontrolu vibracija.

Mašine u pogonu se, uzimajući u obzir njihov značaj na održavanje procesa proizvodnje, mogu podeliti u tri grupe⁵ [1,2]:

1. Kritične mašine, su mašine koje su apsolutno značajne za odvijanje procesa proizvodnje, jer njihov zastoj znači zaustavljanje čitavog procesa proizvodnje (npr. turbine u elektrani). U cilju održavanja produktivnosti pogona, havarija i zaustavljanje kritičnih mašina se ne smeju dozvoliti. Iz tog razloga kritične mašine moraju imati sistem neprekidnog nadzora određenih fizičkih veličina (npr. vibracija) sa funkcijama zaštite i vibrodijagnostike.

2. Glavne mašine, su mašine koje su veoma značajne za odvijanje procesa proizvodnje, jer njihov zastoj ne uzrokuje zaustavljanje čitavog procesa proizvodnje pošto imaju svoju rezervu (redundantnu mašinu) koja ih može trenutno ili dovoljno brzo zameniti, npr. generatori električne energije na radarskim stanicama centara za kontrolu letova. Glavne mašine moraju imati sistem neprekidnog nadzora određenih fizičkih veličina (npr. vibracija) sa funkcijom zaštite koji neprekidno meri nivo vibracija i u slučaju prekoračenja alarmnih vrednosti aktivira relej za isključenje pogona. Osim neprekidnog nadzora vibracija sa funkcijom zaštite, vibracije na glavnim mašinama se moraju analizirati alatima vibrodijagnostike. Ova analiza se može izvesti povremenim on-line nadzorom vibracija, npr. primenom dvokanalnog prenosivog analizatora vibracija sa naprednim vibrodijagnostičkim alatima za analizu vibracija u vremenskom i frekvencijskom domenu.

3. Mašine za održavanje procesa proizvodnje (mašine opšte namene), su mašine koje nisu značajne za odvijanje procesa proizvodnje, jer ako dođe do njihovog zastoja ne dolazi i do prekida procesa proizvodnje, pa ne moraju imati svoju rezervu. To je najveći broj mašina u pogonu, kao što su: elektromotori, pumpe, ventilatori itd. Mašine za održavanje procesa proizvodnje se podvrgavaju povremenom on-line nadzoru i analizi vibracija npr. primenom prenosivih analizatora vibracija.

4.1.1 Korektivno održavanje

Korektivno održavanje (engl. Corrective Maintenance) predstavlja skup aktivnosti, koje se preduzimaju tek nakon pojave otkaza, sa ciljem da se sastavni deo i/ili sistem iz stanja u otkazu vrati u stanje u radu, u što kraćem vremenu i sa što nižim troškovima⁶ [1-3].

U većini slučajeva aktivnosti korektivnog održavanja se provode urgentno i bez planiranja, jer se i sami otkazi dešavaju neplanirano, a vrlo često u najnepovoljnijem trenutku. Iz svega navedenog, generalno se može reći da korektivno održavanje nije preporučljivo primenjivati kod složenih i skupih tehničkih sistema, gde otkazi mogu uzrokovati duge zastoje, visoke troškove održavanja i ugrožavanje tehnoloških procesa, ljudi i okoline. U takvim slučajevima treba primenjivati savremenije koncepcije održavanja.

Bez obzira na navedene nedostatke ova koncepcija održavanja, se ne može u potpunosti izbaciti iz primene, jer je u nekim situacijama neizbežna. Primer su postrojenja u kojima je angažovan veliki broj

⁵Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

⁶Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana: Pouzdano održavanje termoelektrana, hidroelektrana, solarnih elektrana, vetroelektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku – Adam institut, Smederevo, 2014.

istih mašina, čija popravka ili zamena nije skupa, kada se pojavi otkaz jedne mašine, angažuje se druga, pri čemu se proizvodnja ne zaustavlja. Zbog toga korektivno održavanje treba da bude samo mali deo savremenog programa održavanja, pošto u nekim situacijama ima svrhe primenjivati ovu koncepciju održavanja. Obim aktivnosti korektivnog održavanja, odnosno vreme trajanja otklanjanja otkaza zavisi od stepena oštećenja, obučenosti ljudstva i raspoloživosti rezervne opreme. Obim aktivnosti korektivnog održavanja, koje je potrebno preduzeti, prvenstveno zavisi od toga da li je oprema u prethodnom periodu eksploatacije bila obuhvaćena preventivnim održavanjem ili ne i, ako jeste, da li je održavanje bilo adekvatno. Ukoliko oprema uopšte nije bila održavana, otkazi su najčešće nepopravljivi, odnosno otklanjaju se ugradnjom nove opreme.

4.1.2 Klasično preventivno održavanje

Klasično preventivno održavanje PM (engl. Preventive Maintenance) predstavlja skup aktivnosti koje se preduzimaju sa ciljem da se spreči ili odloži pojava otkaza, odnosno da se sastavni deo i/ili sistem zadrži u radno sposobnom stanju što duže vremena. Bazira se na izvođenju aktivnosti održavanja na sistemu prema unapred utvrđenim intervalima, na čiju dužinu ne utiče stvarno stanje sistema. Specifičnost klasičnog preventivnog održavanja je u tome što se izvodi bez obzira na stanje opreme, što dovodi do nepotrebnih troškova, iziskuje redovne zastoje postrojenja i veći broj radne snage, što otvara mogućnosti pojave otkaza zbog ljudske greške [1-3].

Iako je ova koncepcija održavanja značajno bolja od prethodne, ona je vrlo skupa zato što se često zamenjuju delovi koji su u dobrom stanju (ispravni delovi) i zato što intenzivne aktivnosti održavanja produžavaju vreme zastoja sistema. Kod klasičnog preventivnog održavanja, potrebni postupci (propisane aktivnosti) održavanja se provode u zadatim vremenskim intervalima u cilju prevencije otkaza (pre nego što dođe do pojave otkaza), a kod korektivnog održavanja pošto se otkaz već pojavi.

4.1.3 Održavanje prema stanju

Održavanje prema stanju CBM (engl. Condition Based Maintenance) se naziva i prediktivno održavanje PdM (engl. Predictive Maintenance).

Održavanje prema stanju se provodi tako što se periodično prema unapred utvrđenim vremenskim intervalima ili neprekidno, nezavisno od stanja sistema, vrše dijagnostičke kontrole sistema u realnom procesu eksploatacije, a zatim se na osnovu rezultata tih kontrola (u zavisnosti od utvrđenog stanja) donose odluke o neophodnom roku i obimu planskih aktivnosti održavanja. Prilikom svake dijagnostičke kontrole tehničkog sistema treba obavezno odlučiti da li sistem ostaje i dalje u procesu eksploataciji, da li je za popravku ili mora biti izbačen iz dalje upotrebe. Na taj način se omogućava permanentno planiranje aktivnosti održavanja (zamena ili popravka delova sistema), koje je bazirano na stvarnom tehničkom stanju sistema, čime se produžava vreme u kojem sistem radi dobro i istovremeno eliminišu nepotrebni zastoji. Osnovni zadatak održavanje prema stanju je da se detektuje otkaz sistema u ranoj (početnoj) fazi nastanka i preduzmu mere da se spreči njegova pojava [1-3].

Održavanje prema stanju je planirana aktivnost održavanja na osnovu stvarnih potreba, čiji je cilj eliminisati nepotrebne popravke, sprečiti katastrofalne otkaze i redukovati negativni uticaj zahvata održavanja na profitabilnost proizvodnih pogona. To je najpovoljnija i najekonomičnija koncepcija održavanja, jer omogućava praćenje stanja mašina u pogonu (u radu), popravak sumnjivih delova pre nego što dođe do otkaza, a popravke se izvode samo onda kada je to zaista neophodno. Održavanje prema stanju ne samo da pomaže radnicima službe održavanja pogona da izbegnu mogućnost katastrofalnih oštećenja, nego pruža i dodatnu prednost pravovremenog osiguranja rezervnih delova, pripreme potrebne radne snage i planiranja drugih popravki za vreme planiranog zastoja⁷ [95].

Osnovna prednost održavanja prema stanju opreme na različitim sistemima je veća pogonska spremnost zbog veće pouzdanosti opreme. Vremenski trend razvoja otkaza kod sistema se može pažljivo

⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Poređenje energetske efikasnosti električnih i drugih automobila, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.

pratiti i na osnovu toga planirati održavanje, a u skladu sa planskim zastojima. Popravka sistema koji je otkazao tokom rada može da bude i do deset puta skuplja nego predviđena, planska popravka iste. Sledeća korist od održavanja prema stanju su smanjeni troškovi za rezervne delove i radnu snagu⁸ [87]. Održavanje prema stanju smanjuje i verovatnoću pojave havarijskog otkaza mašine, čime se unapređuje i zaštita na radu. Postoje brojni primeri povreda na radu, sa smrtnim ishodom, zbog iznenadnih otkaza mašina⁹ [1-3].

Održavanje prema stanju može biti [1]:

- sa povremenom kontrolom parametara, kada se dijagnostičke kontrole vrše posle propisanog vremena rada ili posle intervencije na tehničkom sistemu i
- sa neprekidnom (kontinualnom) kontrolom parametara, kada je dijagnostička oprema konstruktivno ugrađena u složeni sistem koji se dijagnostikuje.

Održavanje prema stanju, u odnosu na ostale koncepcije održavanja, uglavnom zavisi od mogućnosti da se prikupi, obradi i analizira veliki broj informacija i podataka. Zbog toga je potrebno formirati baze podataka uz primenu savremenih računara, koji će se posebno organizovati u okviru pripreme održavanja [1].

Modernizacijom i razvojem dijagnostičke opreme bazirane na mikroprocesorima i računarskim sistemima, te razvojem informacionih sistema moguće je održavanje opreme bazirati na podacima o stvarnom stanju opreme, umesto na statističkim procenama o preostalom životnom veku ili učestalosti otkaza [1].

Proaktivno održavanje PM (engl. Proactive Maintenance) se može definisati kao nadogradnja održavanja prema stanju koje uključuje utvrđivanje uzroka zbog kojih je tehnički sistem u otkazu. Suština proaktivnog održavanja bazira se na utvrđivanju osnovnog uzroka otkaza, odnosno utvrđivanju mehanizama koji su doveli do pojave otkaza na tehničkom sistemu, nakon čega se preduzimaju proaktivne aktivnosti radi sprečavanja ponovne pojave tih uzroka otkaza ili značajnijeg smanjenja njihovog negativnog dejstva [2].

4.1.4 Održavanje prema pouzdanosti

Održavanje prema pouzdanosti RCM (Reliability Centered Maintenance) se bazira na prikupljanju, obradi i analizi podataka o nivou pouzdanosti sastavnih delova sistema i predlogu aktivnosti održavanja koje treba preduzeti kada nivo pouzdanosti padne ispod dozvoljenih granica. U ovom slučaju preventivne aktivnosti održavanje se provode isključivo na osnovu informacija o pouzdanosti, tj. na osnovu raspodele vremena rada do pojave otkaza za posmatrani sistem, odnosno njegov sastavni deo.

Osnovni prilaz održavanja prema pouzdanosti svodi se na to da se na sastavnim delovima sistema ne preduzimaju aktivnosti održavanja sve, dok se njihov nivo pouzdanosti nalazi u dozvoljenim granicama, a ako dođe do odstupanja, preduzimaju se mere za povećanje njihovog nivoa pouzdanosti [1-4].

Primena koncepcije održavanja prema pouzdanosti, koje se bazira na obradi statističkih podataka u toku celog perioda eksploatacije, pretpostavlja široku primenu računara. Pri tome se računar koristi ne samo kao sredstvo operativne obrade podataka, nego i kao aktivna karika, koja upravlja tehničkom eksploatacijom sistema uz optimalne troškove. Najsloženiji zadatak kod ovog održavanja jeste operativna ocena pouzdanosti sastavnih delova i/ili sistema u eksploataciji. Potreba za rešenjem ovog zadatka proističe iz neophodnosti upravljanja kvalitetom proizvodnje i popravke sastavnih delova i/ili sistema, određivanja efektivnosti obavljenih aktivnosti u eksploataciji [1-4].

Održavanje prema pouzdanosti je koncepcija održavanja koja počiva na poznavanju karakteristika pouzdanosti, na bazi kojih se stalno, tokom rada sistema vrše prognoze budućih stanja, odnosno predviđa pojava otkaza. Donose se odluke o postupcima preventivnog održavanja koje treba provesti u određenim

⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Poređenje energetske efikasnosti i troškova održavanja električnih i drugih automobila, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 4, Beograd, 2014, pp. 15-23.

⁹ Adamović, Ž., Ilić, B., Bursać, Ž., Vibrodijagnostičko održavanje mašina i postrojenja: Nova metodologija održavanja mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.

trenucima vremena, kako bi se sprečila iznenadna pojava otkaza, a time i odgovarajući zastoji i dodatni troškovi [1].

4.1.5 Totalno održavanje

Suština totalnog održavanje je da se odgovornost za održavanje prenese na sektor proizvodnje, a služba održavanja postaje savetodavno telo zaduženo za edukaciju, konsultacije, provođenje generalnih remonta i slično. Jedan od najcenjenijih stručnjaka za totalno održavanje dr. Tokutaro Suzuki je svojevremeno izjavio: „Konceptija totalnog održavanje je da radnik mora održavati svoju mašinu. Održavanje koje provodi sektor proizvodnje je osnova totalnog održavanja. Stručnjaci održavanja mogu vršiti periodične preglede i obavljati generalne remonte“¹⁰ [1-4, 18].

Iskustva u primeni totalnog održavanja govore da uspeh primene najviše zavisi od nivoa industrijske kulture radnika. Tamo gde je industrijska kultura radnika visoka totalno održavanje daje izvanredne rezultate. Međutim, ako je industrijska kultura radnika niska rezultati su katastrofalni.

4.1.6 Održavanje na bazi rizika

Održavanje na bazi rizika RBM (Risk Based Maintenance) pored praćenja stanja same mašine razmatra i značenje potencijalnog otkaza mašine, odnosno razmatraju se posledice samog otkaza [1-4].

Da bi se objasnila konceptija održavanja na bazi rizika potrebno je definisati pojam ne samo održavanja nego i pojam rizika [1-4].

Rizik je kvantitativni i kvalitativni opis opasnosti, tj. mera opasnosti ili nivo opasnosti. Pošto je otkaz neke komponente u suštini statistički proces (verovatnoća pojave), rizik je adekvatna veličina koja može da posluži kao orijentir za donošenje odluka o aktivnostima održavanja. Upravljanje rizikom stoga ima bitnu ulogu u održavanju tehničkih sistema [1-4]. Privredni rizici su prisutni u svakom preduzeću, pa samim tim i u svakom proizvodnom procesu. Njihovo ocenjivanje i uzimanje u obzir u svakom slučaju nije novo. Ono je neophodno za život svakog preduzeća, ko ne proceni korektno privredne ili tehničke rizike, rizikuje njegov opstanak.

Evidentno je da je za određivanje potreba održavanja pored posledica bitna i verovatnoća pojave otkaza. Za određenu komponentu mogu posledice biti izuzetno velike, ali ukoliko je verovatnoća pojave ovog događaja veoma mala, onda je rizik otkaza ove komponente manji od otkaza neke druge komponente sa manjim posledicama, ali većom verovatnoćom pojave. Može se primetiti da je potreba za održavanjem jedne komponente kvantifikovana rizikom: što je veći rizik to je veća potreba za održavanjem.

4.1.7 Totalno dijagnostičko održavanje

Ukoliko se rizik pojave otkaza može smanjiti na prihvatljivu meru negom, nadzorom, obukom i pravilnim postupcima korisnika onda je potrebno projektovati i propisati te procedure. Ako postoje parametri čijim se merenjem može pratiti degradacija elemenata proizvodnog sistema, radi iskorišćenja rezerve pouzdanosti i ukoliko se ta rešenja primenjuju u svetskoj praksi onda se problem svodi na izbor dijagnostičkih metoda i propisivanje procedura [1-3].

U velikom broju slučajeva neželjena pojava otkaza se može otkloniti periodičnim merenjima, nadzorom, obukom korisnika i održavalaca i pravilnom eksploatacijom. To je dokazano jeftin i efikasan način predupređivanja pojave otkaza, pa ga treba koristiti uvek kada je to logično i isplativo. Ovi postupci su neophodni kada se radi o neprihvatljivim vrstama otkaza koje ne možemo predvideti, pa je najkorisnije tražiti rane znake pojave otkaza i/ili eliminisati neispravne elemente iz procesa funkcionisanja pre početka njegovog odvijanja da ne bi prouzrokovali veće štete [1-3].

¹⁰ Adamović, Ž., Totalno održavanje, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

4.1.8 Samoodržavanje

Pod pojmom samoodržavanje podrazumeva se održavanje visokoautomatizovanih proizvodnih linija i fabrika ("fabrika bez ljudi") koncipiranih na visokoj integraciji programa i opreme pod zajedničkim upravljačkim sistemom uz učešće transportnih uređaja, robota, senzora i dr.¹¹ [1-3, 12].

4.2 Definisane vremena potrebnih za proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema

Životni ciklus nekog tehničkog sistema može se posmatrati kroz dva perioda:

- Period stvaranja tehničkog sistema, koji obuhvata:
 - period projektovanja tehničkog sistema i
 - period proizvodnje tehničkog sistema
- Period eksploatacije tehničkog sistema (sa održavanjem, modernizacijom i otpisom), je period u kome sistem radi prema nameni za koju je projektovan.

Period eksploatacije tehničkog sistema t se računa od početka korišćenja pa sve do trenutka njegovog povlačenja iz upotrebe, računa se po obrascu:

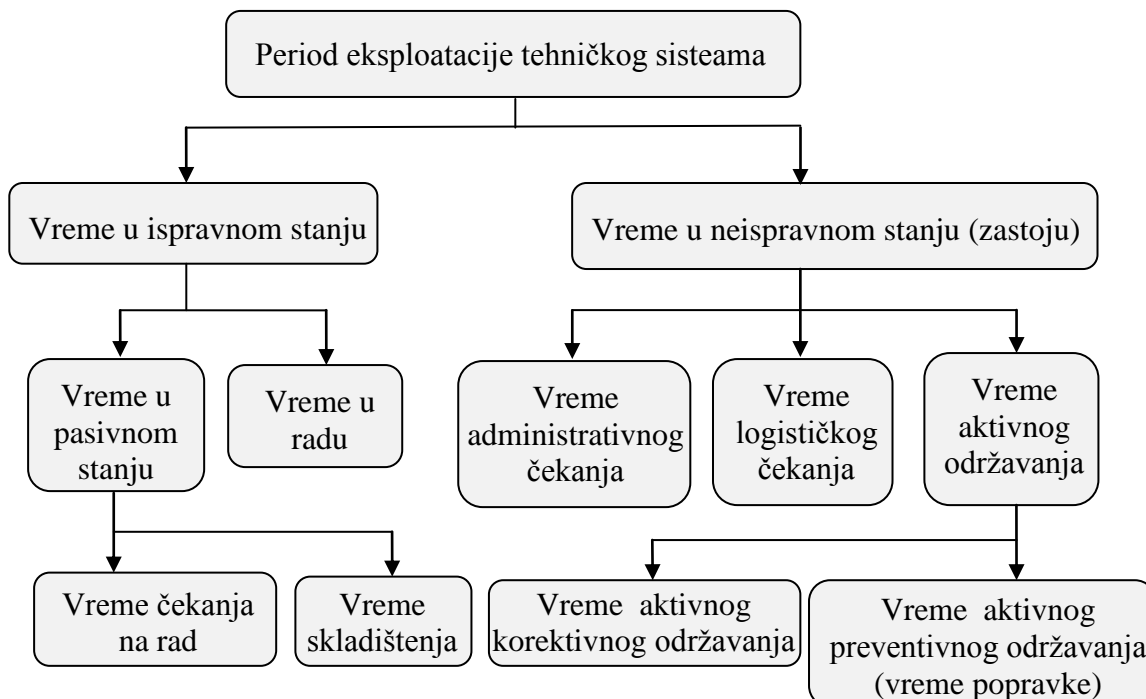
$$t = t_i + t_z, \text{ h} \quad (4.1)$$

gde je:

t_i - vreme u ispravnom (operativnom) stanju –raspoloživo vreme

t_z - vreme u neispravnom (neoperativnom) stanju – neraspoloživo vreme, tj. vreme u zastoju

Na slici 4.2. prikazana je klasifikacija vremena potrebnih za proračun pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema.



Slika 4.2. Klasifikacija vremena potrebnih za proračun pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema

¹¹ Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Paunjorić, P., Teledijagnostika mašina, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.

1. Srednje vreme u ispravnom (operativnom) stanju – srednje raspoloživo vreme \bar{t}_i , obuhvata srednje vreme u radu \bar{t}_r i srednje vreme u pasivnom stanju \bar{t}_{ps} , računa se po obrascu:

$$\bar{t}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ii} = \bar{t}_r + \bar{t}_{ps}, \text{ h} \quad (4.2)$$

gde je:

t_{ii} - i -to vreme u ispravnom stanju

n - broj segmenata vremena u ispravnom stanju u posmatranom vremenskom intervalu

a) Srednje vreme u radu \bar{t}_r , **tj. srednje vreme između održavanja MTBM (Mean Time Between Maintenance)** predstavlja srednje vreme u toku koga je tehnički sistem u radu, tj. srednje vreme između zastoja - svih postupaka održavanja (korektivnih i preventivnih). U načelu približno je jednako srednjem vremenu između otkaza $MTBF$, mada su moguća izvesna odstupanja zbog preventivnih aktivnosti održavanja, kombinovanih otkaza itd. Računa se po obrascu:

$$\bar{t}_r = MTBM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri}, \text{ h} \quad (4.3)$$

gde je:

t_{ri} - i -to vreme u radu sistema između zastoja

n - broj segmenata vremena kada je sistem u radu

Srednje vreme u radu $MTBM$ predstavlja osnovu za izračunavanje operativne raspoloživosti.

Srednje vreme između otkaza (korektivnih održavanja) $MTBF$ (Mean Time Between Failure), naziva se i očekivano vreme bezotkaznog rada, predstavlja prosečno vreme u radu sistema između otkaza (korektivnih održavanja) u određenom periodu eksploatacionog veka i u principu je promenljiva veličina u različitim fazama eksploatacionog veka. Ono daje orijentacionu vrednost vremena rada sistema u kojem verovatno neće doći do pojave otkaza, iako je takav podatak upotrebljiv za sistem u opštem smislu, a ne za odabrani period eksploatacionog veka. Stvarno srednje vreme između otkaza $MTBF$ je uobičajeno nešto kraće od onog koje specificira proizvođač mašine, uglavnom zbog toga što mašine obično rade u uslovima lošijim od idealnih za pojedinu specificiranu klasu mašina (npr. rad pri preopterećenju, upotreba ležajeva, zaptivača i ostalih komponenti koje se razlikuju od zahtevanih po normama proizvođača, necentriranost pri spajanju, pojava debalansa rotacionog dela mašine itd.). Ako su kod tehničkog sistema koji se ispituje poznata vremena u radu između otkaza $t_{riko1}, t_{riko2}, \dots, t_{rikon}$, onda se empirijsko srednje vreme između otkaza (korektivnih održavanja) može izračunati kao aritmetička sredina vremena u radu između otkaza¹² [1]:

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{riko i}, \text{ h} \quad (4.4)$$

gde je :

$t_{riko i}$ - i -to vreme u radu sistema između otkaza (korektivnih održavanja)

n - broj segmenata vremena u radu sistema između otkaza (korektivnih održavanja)

Srednje vreme između otkaza $MTBF$ predstavlja jedan od najznačajnijih pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema.

¹² Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

b) Srednje vreme u pasivnom stanju $\overline{t_{ps}}$, predstavlja srednje vreme u toku koga je sistem spreman za rad, ali se to od njega ne zahteva. Ovo vreme obuhvata srednje vreme čekanja na rad (slobodno vreme) $\overline{t_c}$ i srednje vreme skladištenja $\overline{t_s}$, računa se po obrascu [165]:

$$\overline{t_{ps}} = \overline{t_c} + \overline{t_s}, \text{ h} \quad (4.5)$$

Srednje vreme čekanja na rad (slobodno vreme) $\overline{t_c} = MRT$ (Mean Redens Time), predstavlja srednje vreme u toku koga tehnički sistem čeka na rad pri čemu se podrazumeva da je u ispravnom (operativnom) stanju.

Srednje vreme skladištenja $\overline{t_s}$, predstavlja srednje vreme u toku koga se sistem nalazi u skladištu kao rezervni deo, pri čemu se podrazumeva da je u ispravnom (operativnom) stanju.

2. Srednje vreme u neispravnom (neoperativnom) stanju - srednje neraspoloživo vreme tj. srednje vreme u zastoju $\overline{t_z} = MDT$ (Mean Down Time), predstavlja srednje vreme koje protekne od trenutka kada dođe do prekida rada sistema zbog aktivnosti održavanja (preventivnih i korektivnih) njegovih komponenti pa do trenutka ponovnog uspostavljanja normalnog rada (projektovane funkcije) sistema. Obuhvata srednje vreme aktivnog održavanja (korektivnog i preventivnog) $\overline{t_{ao}}$, srednje vreme administrativnog čekanja $\overline{t_{ad}}$ i srednje vreme logističkog čekanja $\overline{t_{lo}}$, računa se po obrascu:

$$\overline{t_z} = MDT = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{zj} = \overline{t_{ao}} + \overline{t_{ad}} + \overline{t_{lo}}, \text{ h} \quad (4.6)$$

gde je:

t_{zj} - j-to vreme u zastoju

m - broj zastoja

a) Srednje vreme aktivnog održavanja $\overline{t_{ao}} = \overline{M}$ (Mean Maintenance Active Repair), predstavlja srednje vreme u toku koga se provode aktivnosti vezane za popravku sistema. Ovo vreme obuhvata samo vreme aktivnog rada na održavanju pri čemu se ne uzimaju u obzir vreme administrativnog i vreme logističkog čekanja. Ovo vreme obuhvata srednje vreme aktivnog korektivnog održavanja $\overline{t_{ako}}$ i srednje vreme aktivnog preventivnog održavanja $\overline{t_{apo}}$, računa se po obrascu:

$$\overline{t_{ao}} = \overline{M} = \overline{t_{ako}} + \overline{t_{apo}}, \text{ h} \quad (4.7)$$

Srednje vreme aktivnog korektivnog održavanja $\overline{t_{ako}}$, tj. srednje vreme popravke $MTTR$ (Mean Time To Repair), predstavlja srednje vreme samo aktivnog rada na održavanju koje je potrebno da se neki sistem, koji je otkazao, popravi ili zameni, računa se po obrascu:

$$\overline{t_{ako}} = MTTR = \frac{1}{m} \sum_{i=j}^m t_{akoj}, \text{ h} \quad (4.8)$$

gde je:

t_{akoj} - j-to vreme aktivnog korektivnog održavanja (vreme popravke)

m - broj segmenata vremena aktivnog korektivnog održavanja (vremena popravki)

Popravka, predstavlja aktivnost koja se provodi radi dovođenja sistema u funkciju nakon nastanka otkaza.

Srednje vreme popravke $MTTR$ se koristi kao pokazatelj pogodnosti održavanja (popravljivosti) tehničkog sistema.

Srednje vreme aktivnog preventivnog održavanja $\overline{t_{apo}}$, predstavlja srednje vreme samo aktivnog rada na održavanju koje je potrebno da se provedu aktivnosti preventivnog održavanja.

b) Srednje vreme administrativnog (organizacijskog) čekanja $\overline{t_{ad}}$, predstavlja srednje vreme koje nastaje zbog realizacije organizacijskih postupaka u procesu planiranja, organizovanja i rukovođenja procesom održavanja tehničkog sistema. Obuhvata vreme koje protekne kako u obavljanju neophodnih administrativnih aktivnosti (npr. izdavanje naloga za popravku, vreme primopredaje tehničkog sistema između korisnika i službe održavanja, vreme za informacije i odluke o stanju tehničkog sistema i raspoloživim resursima, vreme za operativnu pripremu održavanja itd.), tako i u administrativnim propustima pre i u toku izvršenja popravke.

Ovo vreme obuhvata srednje vreme administrativnog čekanja korektivnog održavanja $\overline{t_{adko}}$ i srednje vreme administrativnog čekanja preventivnog održavanja $\overline{t_{adpo}}$:

$$\overline{t_{ad}} = \overline{t_{adko}} + \overline{t_{adpo}}, \text{ h} \quad (4.9)$$

c) Srednje vreme logističkog čekanja $\overline{t_{loc}}$, predstavlja meru odstupanja realnog sistema održavanja od nekog idealnog sistema održavanja koji bi obezbedio sve potrebne resurse na svakom mestu i u svakom trenutku. U realnim uslovima nije moguće obezbediti sve potrebne resurse za održavanje i zbog toga se javlja vreme logističkog čekanja. Obuhvata vreme koje protekne u čekanju rezervnih delova, radioničke opreme, energije, prostora za održavanje, transportu tehničkog sistema do mesta za održavanje i nazad ili dolasku ljudstva za održavanje do tehničkog sistema kada se konstatuje otkaz itd..

Ovo vreme obuhvata srednje vreme logističkog čekanja korektivnog održavanja $\overline{t_{loko}}$ i srednje vreme logističkog čekanja preventivnog održavanja $\overline{t_{lopo}}$:

$$\overline{t_{lo}} = \overline{t_{loko}} + \overline{t_{lopo}}, \text{ h} \quad (4.10)$$

3. Srednje vreme u zastoju $\overline{t_z}$, obuhvata srednje vreme korektivnog održavanja, tj. srednje vreme u otkazu $\overline{t_{ko}}$ i srednje vreme preventivnog održavanja $\overline{t_{po}}$:

$$\overline{t_z} = MDT = \overline{t_{ko}} + \overline{t_{po}} = \overline{t_{ako}} + \overline{t_{adko}} + \overline{t_{loko}} + \overline{t_{apo}} + \overline{t_{adpo}} + \overline{t_{lopo}}, \text{ h} \quad (4.11)$$

a) Srednje vreme korektivnog održavanja, tj. srednje vreme u otkazu $\overline{t_{ko}}$, predstavlja srednje vreme koje protekne od trenutka kada dođe do prekida rada sistema zbog otkaza njegovih komponenti, pa do trenutka ponovnog uspostavljanja normalnog rada (projektovane funkcije) sistema. Ovo vreme se sastoji od srednjeg vremena aktivnog korektivnog održavanja $\overline{t_{ako}}$, srednjeg vremena administrativnog čekanja korektivnog održavanja $\overline{t_{adko}}$ i srednjeg vremena logističkog čekanja korektivnog održavanja $\overline{t_{loko}}$. Obuhvata vreme: detekcije otkaza, prijave otkaza, odlaska u pogon, lokalizacije otkaza, analize otkaza, identifikacije uzroka otkaza, uzimanja rezervnih delova, popravke ili zamene komponenti koje su otkazale i ponovnog puštanja sistema u rad. Računa se po obrascu:

$$\overline{t_{ko}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{koj}, \text{ h} \quad (4.12)$$

gde je:

t_{koj} - j-to vreme korektivnog održavanja

m - broj korektivnih održavanja

b) Srednje vreme preventivnog održavanja sistema $\overline{t_{po}}$, predstavlja srednje vreme koje protekne od trenutka kada dođe do prekida rada sistema zbog preventivnog održavanja njegovih komponenti, pa do trenutka ponovnog uspostavljanja normalnog rada (projektovane funkcije) sistema. Ovo vreme se sastoji

od srednjeg vremena aktivnog preventivnog održavanja $\overline{t_{apo}}$, srednjeg vremena administrativnog čekanja preventivnog održavanja $\overline{t_{adpo}}$ i srednjeg vremena logističkog čekanja preventivnog održavanja $\overline{t_{lopo}}$. Obuhvata vreme: vizuelnog pregleda, kontrole, čišćenja, podmazivanja, rastavljanja, sastavljanja, uzimanja rezervnih delova, zamene delova, podešavanja, provere itd. Računa se po obrascu:

$$\overline{t_{po}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{poj}, \text{ h} \quad (4.13)$$

gde je:

t_{poj} - j -to vreme preventivnog održavanja

m - broj preventivnih održavanja

4.3 Raspoloživost tehničkih sistema

Raspoloživost ili dostupnost se može definisati na više načina u zavisnosti od posmatranih segmenata vremena: vremena u ispravnom stanju, vremena u radu, vremena u zastoju i dubine analize obuhvaćenog vremena.

Raspoloživost $A(t)$ (engl. availability) tehničkog sistema, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ (sposoban) da uspešno obavi funkciju (zadatak) za koju je namenjen, kada se koristi pod određenim uslovima [1].

Raspoloživost tehničkog sistema, predstavlja verovatnoću da ćemo imati tehnički sistem na raspolaganju, kada nam zatreba u posmatranom vremenskom intervalu, dovoljno dugo da se desi nekoliko epizoda otkaza i popravki.

Raspoloživost se može definisati i kao vremenski interval u posmatranom vremenskom intervalu (najčešće godinu dana) u kome će tehnički sistem biti sposoban da obavi funkciju za koju je namenjen, kada se koristi pod određenim uslovima.

Vremena se izražavaju u časovima h, a raspoloživost u postocima %. Raspoloživost sistema zavisi od odnosa vremena koje sistem provede u radu i u zastoju (otkazu).

U zavisnosti od toga preko kojih se segmenata vremena izražava, razlikuje se¹³ [1]:

- Operativna raspoloživost $A_o(t)$ (engl. operation availability), je raspoloživost koja se određuje tokom eksploatacije.
- Sopstvena (unutrašnja, inherentna) raspoloživost $A_i(t)$ (engl. inherent availability), je raspoloživost koju određuje proizvođač, predstavlja predviđenu raspoloživost determinisanu dizajnom komponente, materijalima ili procesom proizvodnje.
- Ostvarena (dostignuta) raspoloživost $A_d(t)$ (engl. achieved availability).

Operativna raspoloživost $A_o(t)$ (engl. operation availability) tehničkog sistema predstavlja verovatnoću da će sistem u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ da uspešno obavi funkciju za koju je namenjen, kada se koristi u realnim uslovima eksploatacije pri provođenju svih aktivnosti održavanja. Ona zavisi od svojstva tehničkog sistema, zastupljenih koncepcija održavanja i organizacijskih postupaka u sistemu održavanja. Uzima u obzir srednje vreme aktivnog korektivnog i srednje vreme aktivnog preventivnog održavanja, ali i srednje vreme administrativnog čekanja aktivnog i korektivnog održavanja i srednje vreme logističkog čekanja aktivnog i korektivnog održavanja. Sa stanovišta korisnika operativna raspoloživost se može izračunati preko srednjeg vremena u toku koga je tehnički sistem bio u radu $\overline{t_r} = MTBM$ i srednjeg vremena u toku koga je sistem bio u zastoju $\overline{t_z} = MDT$, kao¹⁴ [165]:

¹³ Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

¹⁴ Ramović, R.: Pouzdanost sistema: elektronskih, telekomunikacionih i informacionih, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2005.

$$A_o(t) = \frac{\overline{t_r}}{t_r + t_z} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{zj}} \cdot 100 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \cdot 100\% \quad (4.14)$$

Sopstvena (unutrašnja, inherentna) raspoloživost $A_i(t)$ (engl. inherent availability) tehničkog sistema predstavlja verovatnoću da će sistem u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ da uspešno obavi funkciju za koju je namenjen, kada se koristi u realnim uslovima eksploatacije i idealne podrške pri otklanjanju stanja „u otkazu“. Ona je unutrašnje svojstvo tehničkog sistema i uzima u obzir samo srednje vreme aktivnog korektivnog održavanja pri čemu se podrazumeva idealna podrška pri otklanjanju stanja u otkazu, što znači da ne uzima u obzir srednje vreme administrativnog čekanja korektivnog održavanja i srednje vreme logističkog čekanja korektivnog održavanja. Sopstvena raspoloživost se razlikuje od operativne raspoloživosti po tome što uzima u obzir srednje vreme u toku koga je tehnički sistem bio u radu između otkaza $\overline{t_{riko}} = MTBF$ i srednje vreme aktivnog korektivnog održavanja (srednje vreme popravke) $\overline{t_{ako}} = MTTR$, računa po obrascu [1,165]:

$$A_i(t) = \frac{\overline{t_{riko}}}{t_{riko} + t_{ako}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{riko i}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{riko i} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{ako j}} \cdot 100 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

Iz ove definicije se vidi da sopstvena raspoloživost obuhvata samo one vremenske intervale koji su direktno uslovljeni tehničkim sistemom koji se analizira, isključujući elemente koji predstavljaju rezultat logističkog podrške i administrativnog čekanja. To znači da je sopstvena raspoloživost karakteristika sistema održavanja samog tehničkog sistema i da je uslovljena njegovim svojstvima pouzdanosti, konstrukcijskim i drugim osobinama.

Sopstvena raspoloživost, kao svojstvo konstruktivne pogodnosti sistema za održavanje, obično se analizira u skladu sa eksponencijalnim zakonom raspodele vremena rada između otkaza, odnosno intenzitetom otkaza: $\lambda(t) = 1/MTBF$ (otkaza/h) i intenzitetom popravki: $\mu = 1/MTTR$ (broj poravki/vreme trajanja popravki).

Povećanje nivoa sopstvene raspoloživosti $A_i(t)$ tehničkog sistema može se ostvariti na dva načina [1, 165]:

- produženjem srednjeg vremena između otkaza $MTBF$, odnosno povećanjem nivoa pouzdanosti, što se postiže povećanjem kvaliteta delova sistema, i/ili
- skraćanjem srednjeg vremena popravke delova sistema $MTTR$.

I jedno i drugo zahteva dodatna materijalna ulaganja, pa je potrebna analiza isplativosti oba pristupa, tj. optimizacija sa stanovišta troškova, odnosno ekonomske isplativosti.

Sopstvena raspoloživost $A_i(t)$ je veća ili jednaka od operativne raspoloživosti $A_o(t)$ tehničkog sistema, često je veća zbog uticaja proizvodnog procesa i uslova korišćenja na nju.

Operativnom raspoloživošću $A_o(t)$ se više služi korisnik tehničkih sistema, a sopstvenom $A_i(t)$ proizvođač tehničkih sistema.

Ostvarena (dostignuta) raspoloživost $A_a(t)$ (engl. achieved availability) tehničkog sistema predstavlja verovatnoću da će sistem u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ da uspešno obavi funkciju za koju je namenjen, kada se koristi u realnim uslovima eksploatacije i idealne podrške pri provođenju aktivnosti održavanja (korektivnih i preventivnih). Ona zavisi od svojstava tehničkog sistema, ali i od zastupljenih koncepcija održavanja, jer uzima u obzir srednje vreme aktivnog korektivnog i srednje vreme aktivnog preventivnog održavanja, ali ne uzima u obzir srednje vreme administrativnog čekanja i srednje vreme logističkog čekanja. Ostvarena raspoloživost $A_a(t)$ ima širi smisao od sopstvene raspoloživosti $A_i(t)$, jer pored srednjeg vremena aktivnog korektivnog održavanja $\overline{t_{ako}} = MTTR$ uzima u

obzir i srednje vreme aktivnog preventivnog održavanja $\overline{t_{apo}}$, tj. uzima u obzir srednje vreme aktivnog održavanja (korektivnog i preventivnog) $\overline{t_{ao}} = \overline{M} = \overline{t_{ako}} + \overline{t_{apo}} = \overline{MTTR} + \overline{t_{apo}}$. Računa se po obrascu [13]:

$$A_a(t) = \frac{\overline{t_r}}{\overline{t_r} + \overline{t_{ao}}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{aoj}} \cdot 100 = \frac{MTBM}{MTBM + M} \cdot 100\% \quad (4.16)$$

4.4 Pouzdanost tehničkih sistema

Pouzdanost je veoma složen pojam i predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika tehničkih sistema. Tehnički sistemi podložni su otkazima, važno je da se zna koliko dugo mogu da rade a da ne otkazu, i da se projektuju tako da što manje otkazuju, a ako i otkazu, da ih je moguće za što kraće vreme i što jednostavnije popraviti.

Teorija pouzdanosti kao naučna disciplina bavi se proučavanjem zakonitosti kojih se treba pridržavati pri projektovanju, konstrukciji, ispitivanju, proizvodnji i eksploataciji tehničkih sistema kako bi oni imali maksimalan radni vek, a time i maksimalan radni učinak. Teorija pouzdanosti izučava zakonitosti i procese nastajanja otkaza tehničkih sistema i njihovih sastavnih delova, te načine otklanjanja tih otkaza. Cilj teorije pouzdanosti nije da intenzitet otkaza svede na nulu, već da ustanovi uticaj otkaza pojedinih sastavnih delova na funkcionalnost sistema u celini, te da se preduzmu potrebne i pravovremene mere za obezbeđenje zahtevanog nivoa pouzdanosti. Cilj teorije pouzdanosti je razrada metoda proračuna i obezbeđenja pouzdanosti¹⁵ [13].

Posmatrano sa stanovišta uverenosti da će tehnički sistemi biti u stanju da ispravno rade potrebno vreme, njihova pouzdanost predstavlja značajan faktor gotovosti za obavljanje funkcije cilja. Pouzdanost je izuzetno važna, naročito kada su u pitanju tehnički sistemi od čijeg ispravnog rada zavisi bezbednost i životi ljudi, ili čiji bi otkaz uzrokovao velike materijalne štete.

Nivo pouzdanosti ima direktan uticaj na održavanje sistema, posebno na troškove održavanja, ali i na troškove projektovanja i proizvodnje, zbog čega se pouzdanosti mora posvetiti pažnja u svim fazama životnog ciklusa tehničkih sistema (pri projektovanju, proizvodnji i eksploataciji).

Razvijene zemlje posvećuju izuzetnu pažnju pouzdanosti i pogodnosti održavanja, tako da postoje brojni standardi i preporuke koje moraju da zadovolje sastavni delovi i sistemi. Da bi se obezbedili potrebni podaci za određivanje karakteristika pouzdanosti uređaja i sistema održavanja, neophodno je da postoji adekvatan informacioni sistem za prikupljanje i obradu podataka (sa dokumentima, tokovima dokumenata i softverskom podrškom), projektovan sa stanovišta teorije pouzdanosti i teorije održavanja [13].

Pouzdanost tehničkih sistema teba posmatrati u toku ukupnog radnog veka tehničkog sistema i izostanak adekvatnog razmatranja pouzdanosti može imati velike posledice izražene kroz ogromne finansijske troškove i usporeni tehnološki razvoj.

Pouzdanost najčešće karakteriše sisteme kod kojih su čak i trenutni periodi neispravnog rada neprihvatljivi, ili koje je nemoguće popraviti. Vremenski intervali pri razmatranju pouzdanosti su ponekad veoma dugi, recimo deset godina, a u nekim drugim slučajevima veoma kratki, npr. svega nekoliko sati.

Pouzdanost kao pojam može se definisati na više načina. Pouzdanost tehničkog sistema je mera o tome koliko često je moguće očekivati njegove otkaze u određenim uslovima eksploatacije. Pouzdan je onaj tehnički sistem koji će uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je namenjen (predviđen).

Pouzdanost $R(t)$ (engl. reliability) tehničkog sistema, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je namenjen (da će ispravno raditi) pod određenim uslovima

¹⁵ Adamović, Ž., Stanković, N., Savić, B., Pouzdanost mašina i postrojenja, Stylos art, Novi Sad, 2011.

u posmatranom vremenskom intervalu, pod pretpostavkom da je radio ispravno na početku tog vremenskog intervala [1].

Pouzdanost tehničkog sistema je verovatnoća, na određenom nivou poverenja, da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je predviđen, unutar projektovanih granica performansi, u toku projektovanog vremena trajanja zadatka, kada se koristi na propisani način i u svrhu za koju je namenjen, pod projektovanim nivoima opterećenja, uzimajući u obzir i prethodno vreme korišćenja sistema [1].

Prvi pojam definicije pouzdanost je **verovatnoća**, što znači da pouzdanost poprima numeričke vrednosti od 0 do 1. Često se pouzdanost izražava u procentima radi jednostavnijeg opisivanja (od 0 do 100%). Ovako izražena pouzdanost, omogućava upoređivanje nivoa pouzdanosti različitih tehničkih sistema [1,13].

Drugi pojam definicije jeste **vreme**. Vreme je izuzetno važno za pouzdanost. Sa produženjem vremena trajanja zadatka pouzdanost se smanjuje. U opštem slučaju, pouzdanost zavisi i od prethodnog vremena korišćenja sistema.

Performanse su treći pojam i upućuju na svrhu za koju je komponenta ili sistem napravljen [1].

Četvrti pojam definicije pouzdanosti su **radni (operativni) uslovi**, koji uključuju način korišćenja i okruženje u kome se dati sistem nalazi. Sistemu se zadaju tehnički zahtevi s obzirom, na radne uslove, kao na primer: nivoi električnih opterećenja, temperatura, vlažnost, vibracije, udari itd. To znači da isti sistem sa istom namenom u različitim radnim uslovima ima, u principu, različitu pouzdanost [1].

Pouzdanost se može definisati i preko drugih veličina, osim vremena. Npr., pouzdanost u civilnom vazduhoplovstvu se definiše kao procenat letova koji nisu otkazani ili nije došlo do kašnjenja zbog tehničkih problema [13,165].

Veoma bitna karakteristika koja se odnosi na pouzdanost jeste **bezbednost**. Često se i bezbednost definiše kao verovatnoća da se neće dogoditi otkaz sistema koji dovodi do ugrožavanja života ljudi. U okviru pouzdanosti analiziraju se svi otkazi i efekti otkaza te određuje verovatnoća otkaza, što znači da pouzdanost šire i sveobuhvatnije razmatra problematiku otkaza, a bezbednost uže i to samo one otkaze koji utiču na sigurnost ljudi [1].

Procenu rizika nastanka neželjenog događaja moguće je posmatrati kroz teoriju pouzdanosti. Pouzdanost predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je namenjen, odnosno da će raditi ispravno, u posmatranom vremenskom intervalu, dok rizik predstavlja verovatnoću da će nastupiti otkaz tog sistema u tom vremenskom periodu. U tom smislu rizik se može interpretirati i kao gubitak pouzdanosti.

Najčešće postavljana pitanja vezana za pouzdanost, odnosno za gubitak pouzdanosti su [13]:

- hoće li sistem raditi bez otkaza kada je to potrebno,
- hoće li sistem raditi dovoljno dugo da uspešno obavi funkciju za koju je namenjen,
- mogu li se nastali otkazi otkloniti nekim tehničkim merama,
- koje opasnosti, odnosno rizike mogu uzrokovati pojave otkaza i
- koje su posledice nastanka otkaza i mogućih opasnosti koji iz njega proizlaze.

Visoka pouzdanost se može postići ugradnjom kvalitetnih komponenti u sistem. Međutim, bez obzira na veoma malu verovatnoću pojave defekta, ako nakon pojave defekta sistem ne može da nastavi sa radom, takav sistem ipak nije otporan na defekte.

4.4.1 Pokazatelji pouzdanosti

Pouzdanost je složena karakteristika, i predstavlja pokazatelj kvaliteta, a kao pokazatelj pouzdanosti najčešće se koristi srednje vreme između otkaza *MTBF*, koje predstavlja jedan od najznačajnijih pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema. Produženjem srednjeg vremena između otkaza *MTBF* raste i nivo pouzdanosti tehničkih sistema. Ali ovo vreme ne pruža sve potrebne informacije o datom sistemu.

Sistem može imati raspoloživost od 99% i opet pretrpeti katastrofu ili stotinu malih otkaza, koji na kraju kao rezultat daju istu raspoloživost od 99%. Međutim, iako srednje vreme između otkaza *MTBF* ne ukazuje na težinu otkaza, ono ipak daje koristan rezultat, a to su vremenski intervali u otkazu odnosno zastoja u radu, koji se mogu smatrati kao referentni za raspoloživost. Koristi se kod popravljivih sistema, odnosno sistema koji se obnavljaju popravkom [1,165].

Jedan od najznačajnijih pokazatelja pouzdanosti je i intenzitet (učestalost, frekvencija) otkaza $\lambda(t)$, koji se definiše kao broj otkaza tehničkog sistema u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$, obično u periodu od godinu dana. Povećanjem intenziteta otkaza smanjuje se nivo pouzdanosti tehničkog sistema. Pouzdanost se u praksi često iskazuje preko intenziteta otkaza.

Jedan od najčešće korišćenih pokazatelja pouzdanosti sistema je njegova raspoloživost. Raspoloživost $R(t)$ kao pokazatelj pouzdanosti, prvenstveno zavisi od broja otkaza (pouzdanosti) i vremena potrebnog za njihovo otklanjanje. Raspoloživost sistema ne zavisi samo od toga koliko često je sistem u stanju otkaza već i od toga koliko brzo može biti popravljen (zavisi od vremena potrebnog da se otkazi otklone). Najčešće korišćena mera raspoloživosti je očekivani vremenski interval u kome je sistem na raspolaganju da korektno izvrši svoje funkcije, tj. količnik vremena u kome je sistem bio ispravan i ukupnog vremena njegovog životnog veka. Raspoloživost se koristi kao cilj projektovanja kada je osnovna uloga sistema obezbediti njegove usluge što je češće moguće. Pošto se radi o popravljivim sistemima, raspoloživost predstavlja jedan od važnijih pokazatelja kvaliteta. Raspoloživost je pokazatelj kvaliteta, izgrađenosti i kvaliteta sistema s jedne strane, te organizacije, obučenosti i uigranosti osoblja koje upravlja i održava sistem sa druge strane. Što je sistem kvalitetniji i izgrađeniji to će njegova raspoloživost biti veća i povećavaće će se poboljšanjem aktivnosti na njegovom održavanju. Održavanjem se smanjuje verovatnoća nastanka otkaza, a dobrom organizacijom, obučenošću i uigranošću osoblja koje upravlja i održava sistem smanjuje se intenzitet otkaza i prosečno vreme popravke [165].

Bitno je razumeti razliku između pouzdanosti i raspoloživosti.

Raspoloživost tehničkog sistema predstavlja verovatnoću da će on u bilo kom trenutku vremena biti raspoloživ (sposoban) da uspešno obavi funkciju (zadatak) za koju je namenjen, kada se koristi pod određenim uslovima, što podrazumeva mogućnost brze popravke, odnosno dobru logističku podršku (raspoloživ alat, opremu, rezervne delove i obučeno osoblje).

Pouzdanost je verovatnoća, na određenom nivou poverenja, da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju (zadatak) za koju je predviđen, unutar projektovanih granica performansi.

Za razliku od pouzdanosti koja zavisi od vremenskog intervala, raspoloživost zavisi od jednog vremenskog trenutka. S obzirom da pouzdanost predstavlja verovatnoću da će sistem obaviti zadatak koji je započet, a raspoloživost predstavlja verovatnoću da će sistem biti spreman da obavi zadatak to ove karakteristike imaju veliki značaj za tehničke sisteme u industriji. Zbog njihovog značaja od tehničkih sistema u industriji se zahteva visok nivo pouzdanosti i raspoloživosti u što dužem vremenu eksploatacije.

Raspoloživost zavisi od pouzdanosti i popravljivosti (vremena da se deo opreme, koji je u otkazu, vrati u stanje u radu), ali obrnuto ne važi. U drugu ruku, pouzdanost i popravljivost su nezavisni jedno od drugog. Primer za to je da se može imati mašina koja ima visoku raspoloživost iako joj je pouzdanost niska, tj. ako traži malo vremena da se popravi. Ili, može se imati mašina sa niskom raspoloživošću, iako joj je pouzdanost visoka, u slučaju da je vreme popravke dugo [1].

Mnogi sistemi u toku svog životnog veka više puta otkazuju i popravljaju se. Tehnički sistem može biti visoko raspoloživ, a da u isto vreme nije pouzdan, sve dok su intervali u kojima je sistem u otkazu kratki.

Poznavanje pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema omogućava formiranje valjanog normativa rezervnih delova, skladištenja i zadržavanja optimalnog nivoa rezervnih delova u preduzeću. Evidentno je da je pouzdanost sistema strožiji zahtev od raspoloživosti sistema.

Do kvantitativnih podataka o pouzdanosti može se uglavnom doći na sledeća tri načina: proračunom, laboratorijski i tokom eksploatacije.

Prvi način se sastoji u utvrđivanju nivoa pouzdanosti na osnovu poznavanja pouzdanosti komponenata ili blokova, kola uređaja i predviđenih režima rada. Tako utvrđena pouzdanost je proračunata

pouzdanost. Od značaja je pri razvijanju novih tipova uređaja i sistema, kada se u fazi projektovanja uzima u obzir potrebna pouzdanost kao jedan od zahteva koji treba da ispuni projektovani uređaj.

Drugi način dobijanja podataka o pouzdanosti je laboratorijski. Postoje razne normalne i ubrzane statičke i dinamičke metode utvrđivanja pouzdanosti u laboratorijskim uslovima.

Najprirodniji način dobijanja podataka o pouzdanosti je tokom eksploatacije. Pri tome se poseban značaj mora dati načinu prikupljanja podataka i verodostojnosti prikupljenih podataka.

4.4.2 Faktori koji utiču na pouzdanost

Na pouzdanost utiče niz slučajnih faktora (veliki broj parametara, koji su promenljivi), zbog čega se teorija pouzdanosti zasniva na teoriji verovatnoće, matematičkoj statistici i drugim srodnim matematičkim disciplinama. Pouzdanost nekog sistema zavisi od principa njegovog projektovanja i proizvodnje, broja, kvaliteta i funkcionalne povezanosti komponenti koje sistem sadrži, kao i električnih, toplotnih i drugih uslova njegovog rada, uslova eksploatacije itd.

Postoje brojni faktori koji utiču na pouzdanost kao što su: kvalitet sistema, starosna struktura, način održavanja, opremljenost radionica potrebnom opremom i rezervnim delovima, uslovi radne sredine u kojoj sistem radi, obučenost rukovalaca, kvalitet dnevnih pregleda, kvalitet servisa, kvalitet goriva i maziva, kvalitet i mogućnost nabavke rezervnih delova, materijalne mogućnosti radne organizacije i stimulisano radne snage [1].

U pogledu fizičke arhitekture pouzdanost se obezbeđuje izborom najpouzdanijih komponenti, pažljivom montažom i rigoroznim testovima pre puštanja mašina u rad, pravilnim održavanjem i sl.

Veliki je broj parametara koji utiču na pouzdanost, i oni su promenljivi. Stoga je uputno koristiti statistiku, na osnovu čijih hipoteza, zaključaka, događaja i statističkih elemenata se mogu prognozirati parametri pouzdanosti.

Pouzdanost je inherentno svojstvo čija početna vrednost zavisi od niza faktora definisanih u fazi konstrukcije, kao što su [1,13]:

- izbor materijala,
- tolerancije,
- kinematske veze,
- režimi opterećenja,
- uslovi podmazivanja itd.

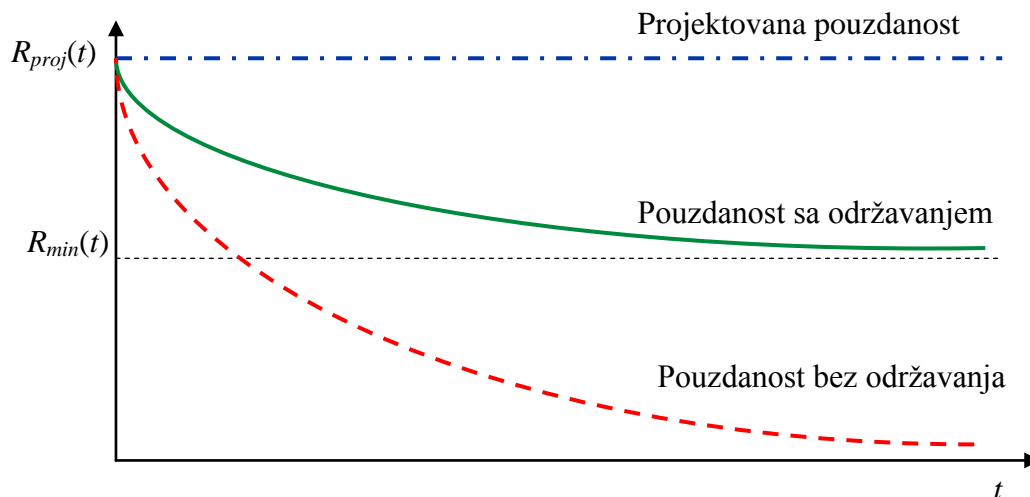
Na pouzdanost sistema utiču (pri proračunu ih treba uzeti u obzir) unutrašnji faktori (određuje ih projektant) i spoljašnji faktori (režim rada i način održavanja). Održavaoci mogu na osnovu podataka o otkazima izračunati nivo eksploatacijske pouzdanosti, te pravovremenim odlukama uticati na pouzdanost. Eksploatacijska pouzdanost se računa da bi se odredio nivo pouzdanosti kupljenog sistema i da bi se mogla uporediti sa pouzdanošću srodnih tehničkih sistema drugih proizvođača (bitno za buduće nabavke). Tokom eksploatacije opada nivo pouzdanosti elemenata i sklopova zbog trošenja i ostalih uticaja. Održavanjem se te vrednosti vraćaju unutar zahtevanog područja, čime se usporava pad nivoa pouzdanosti i produžava vek trajanja tehničkog sistema, slika 4.3.

U osnovi postoje tri načina za povišenje nivoa pouzdanosti tehničkih sistema [1]:

- predimenzionisanje,
- redundantnost i
- prateće mere.

Sva tri načina podrazumevaju veće investicione i operativne troškove pri čemu se poslednji sastoje i od troškova energije i delimično troškova održavanja.

Zbog predimenzionisanja smanjuje se opterećenje pojedinih komponenti, što za posledicu ima povišenje nivoa pouzdanosti.



Slika 4.3. Dijagrami promene pouzdanosti sa i bez održavanja

Redundantnost takođe ima pozitivan efekat na pouzdanost sistema ili komponente. U zavisnosti od vrste redundantnosti otkaz jednog elementa se može premostiti bez ili sa neznatnim uticajem na funkcionalnost sistema [13]:

- „vruća” (aktivna ili paralelna) redundantnost, je struktura u kojoj je redundantni element opterećen isto kao i radni.
- „topla” (lakše opterećena) redundantnost, je struktura u kojoj je redundantni element do otkaza radnog elementa izložen manjem opterećenju.
- „hladna” (pasivna) redundantnost, je struktura u kojoj je redundantni element do otkaza radnog elementa neopterećen.

Pratećim merama podrške i dodatnim instalacijama (klima uređaji itd.), može se takođe uticati na nivo pouzdanosti tehničkih sistema.

Kao alternativa ili dopuna tehničkim merama, operaterima, proizvođačima opreme ili dizajnerima nudi se čitav spektar ljudskih i organizacionih resursa (obuka osoblja, modifikacija radnih operacija). Različita istraživanja pokazuju da se otkazi u radu sistema u velikoj meri mogu pripisati ljudskom faktoru.

Koristi u vezi sa pouzdanošću u korelaciji su sa potrošnjom energije, ulaganjima i troškovima održavanja. Pouzdanost sistema direktno utiče na troškove životnog ciklusa. Proizvođači opreme moraju proizvoditi pouzdane sisteme i razvijati adekvatan sistem održavanja, koji će korisniku obezbediti minimalne troškove korišćenja. Zahtev za pouzdanošću sistema i komponenti nikada nije bio veći, posebno među organizacijama koje imaju za cilj viši stepen konkurentnosti na slobodnom tržištu.

4.4.3 Otkazi tehničkih sistema

U toku eksploatacije tehnički sistemi su izloženi dejstvu različitih oblika energije, kao što su: mehanička, toplotna, svetlosna, hemijska, električna energija itd., koje mogu poticati od¹⁶ [5]:

- energije okoline, uključujući i energiju koja potiče od rukovaoca i održavaoca;
- unutrašnje energije, koja potiče kako od radnih procesa tako i od rada pojedinih sastavnih delova sistema i
- potencijalne energije, koja je sakupljena u materijalima prilikom njihovog korišćenja (montažni naponi, unutrašnji naponi u odlivcima i sl.).

Delujući na tehničke sisteme navedeni oblici energije uzrokuju u njima niz neželjenih procesa, pogoršavajući njihove tehničke karakteristike. Ti procesi su povezani sa složenim fizičko-hemijskim pojavama, koje dovode do habanja, deformacija, lomova, korozije i drugih oštećenja tehničkih sistema, što

¹⁶ Adamović, Ž., Ilić, B., Savić, B. Jevtić, M., Termografija pouzdana dijagnostička metoda, Pan Book, Novi Sad, 2011.

doprinosi promeni njihovih početnih parametara i može dovesti do smanjenja ili gubitka radne sposobnosti sistema, odnosno otkaza.

U toku rada tehničkih sistema njihovi delovi su izloženi postepenom slabljenju. Ovo slabljenje se ogleda i u promeni određenih parametara, a otkaz nastaje u trenutku kada vrednost samo jednog kontrolisanog parametara dostigne svoju donju ili gornju dozvoljenu (dopuštenu) vrednost ili pređe te vrednosti. Posle otklanjanja otkaza, tehnički sistem postaje radno sposoban ili funkcionalno sposoban (ispravan).

Postoje procesi koji privremeno menjaju karakteristike tehničkih sistema u nekim dozvoljenim granicama bez progresivnog pogoršanja. Najkarakterističniji primeri takvih procesa su: elastične deformacije sastavnih delova sistema, temperaturne deformacije i dr. Međutim, postoje i procesi koji vremenom dovode do progresivnog pogoršanja tehničkih karakteristika sistema. Najkarakterističniji primeri takvih procesa su: habanje, korozija, zamor, unutrašnji napon i sl.[165].

S obzirom kojom se brzinom odvijaju procesi, koji dovode do smanjenja radne sposobnosti tehničkih sistema, se dele na¹⁷ [1, 165]:

- brzo prolazeće (vibracije, promena sila trenja, kolebanje radnih opterećenja i sl.),
- srednje prolazeće (promena temperature, habanje i sl.) i
- sporo prolazeće (preraspodela unutrašnjih napona, zaprljanje delova, trenje, korozija i sl.).

Oštećenje je promena stanja tehničkog sistema, koja još ne utiče na funkciju rada, ali može se razviti u otkaz. Oštećenje (trošenje) se, u najširem smislu, definiše kao nepoželjno odstranjenje materijala sa površine bez obzira na uzrok.

Od karaktera pojave i razvoja procesa oštećenja zavise tipovi otkaza tehničkih sistema. Svi tipovi oštećenja tehničkih sistema nisu samo posledica njihove eksploatacije, oštećenja se mogu pojaviti i kao posledica grešaka pri projektovanju i izradi tehničkih sistema ili iz nekih drugih razloga. Oštećenja tehničkih sistema mogu nastati u toku proizvodnje, skladištenja i transporta, montaže i eksploatacije [2].

Oštećenja tehničkih sistema mogu biti [1,5]:

- znatna, ako dovode do narušavanja radne sposobnosti sistema i izazivaju njegov otkaz, i
- neznatna, ako ne dovode do narušavanja radne sposobnosti sistema, neka neznatna oštećenja sistema tokom vremena mogu preći u znatna, koja mogu dovesti do otkaza tehničkog sistema.

U toku eksploatacije tehnički sistemi i njihovi sastavni delovi mogu se naći u jednom od dva osnovna stanja [1,5]:

- ispravnom stanju (stanje u radu) i
- neispravnom stanju (stanje u otkazu).

Tehnički sistem je u ispravnom stanju ako ispunjava sve zahteve ispravnosti propisane normativno-tehničkom dokumentacijom, tj. izvršava postavljenu funkciju kriterijuma.

Tehnički sistem je u neispravnom stanju ako ne ispunjava bar jedan od zahteva ispravnosti propisanih normativno-tehničkom dokumentacijom, tj. ne izvršava postavljenu funkciju kriterijuma. Da bi se izbeglo neispravno stanje tehničkog sistema preduzimaju se odgovarajuće aktivnosti održavanja [9-11,18-20].

Ovakva podela stanja, naročito kod složenih tehničkih sistema ne može se do kraja prihvatiti, jer postoje i neka druga međustanja.

Intervali vremena u kome je sistem u radu i u otkazu smenjuju se u nepravilnim i nepredvidivim razmacima. Opšta težnja je da intervali vremena u radu budu što duži, a intervali vremena u otkazu što kraći [14-16].

¹⁷ Ramović, R.: Pouzdanost sistema: elektronskih, telekomunikacionih i informacionih, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2005.

Pod otkazom se podrazumeva gubitak sposobnosti tehničkog sistema da obavlja funkciju za koju je namenjen. Otkaz jednog dela sistema ne znači istovremeno i otkaz celog sistema, ako je deo sistema na kome se dogodio otkaz perifernog značaja, ako je deo od vitalnog značaja, onda njegov otkaz znači i otkaz celog sistema. Otkaz sistema može doći kao posledica nedovoljnog kvaliteta aktivnosti održavanja, odnosno pojave neželjenih događaja [2, 9-11].

Osnovni pojmovi vezani za otkaze su: uzroci otkaza, načini na koje se manifestuju otkazi, mesta (lokacije) otkaza i načini otklanjanja otkaza¹⁸ [9-11].

Najčešći uzroci otkaza su: zamor materijala, habanje (istrošenost), propterećenje, korozija, lomovi, starenje, dugo nekorišćenje i dr. [4]

Otkazi tehničkog sistema se mogu manifestovati na više načina, kao što su: tehnički sistem ne radi, tehnički sistem radi nekvalitetno, nenormalan šum, visok nivo vibracija, visoka temperatura i sl. [1,5]

Mesta (lokacije) otkaza tehničkog sistema mogu biti različita, kao što su: kaišni prenosnici, zupčasti prenosnici, hidraulične komponente, pneumatske komponente, električna instalacija, elektronske komponente, pribor ili alat i dr. [19,20,35].

Načini otklanjanja otkaza tehničkog sistema mogu biti različiti, kao što su: čišćenje i podmazivanje, podešavanje i štelovanje, dorada rezervnog dela, zamena sastavnih delova sistema i dr. [4].

Prisilni zastoj je izvanpogonsko stanje posmatranog tehničkog sistema ostvareno ispadom ili prisilnim isključenjem. Planirani zastoj je izvanpogonsko stanje posmatranog tehničkog sistema ostvareno smišljeno planiranim isključenjem.

U slučaju konstantnog intenziteta otkaza $\lambda(t)=const.$ moguće je otkaze posmatrati kao slučajne i primeniti teoriju verovatnoće. Ovo, dalje, omogućava primenu, u praksi često jedino dostupnih, podataka o srednjem intenzitetu pojave otkaza u nekom vremenskom intervalu (npr. 10 otkaza na 100 motora u 5 godina), odnosno podataka za koje nije poznata funkcija pojave otkaza u posmatranom vremenskom intervalu.

Crtanje empirijske funkcije intenziteta otkaza, zasniva se na iskustvenim podacima (eksperimentima ili statističkim podacima o otkazima sličnih tehničkih sistema). Iskustveni podaci su dostupni kao diskretne vrednosti te je potrebno, na osnovu njih, izabrati neprekidna funkciju koja će zadovoljiti dobijene podatke. Pošto su podaci o otkazima dostupni navedeno se može učiniti suvišnim. Reč je, međutim, o mogućnosti zaključivanja o ponašanju sličnih tehničkih sistema (npr. motora) na osnovu podataka iz eksperimenta ili iz statistika, jer nisu raspoložive stvarne krive intenziteta (učestalosti) otkaza već samo ograničen niz podataka o diskretnim vremenima pojave otkaza iz kojih se može aproksimirati kontinualna funkcija.

Kod velikog broja tehničkih sistema (npr. kotrljajnih ležajeva) dijagram promene intenziteta otkaza tokom radnog veka (eksploatacije) može se predstaviti krivom koja ima oblik kade (zbog toga se i naziva kriva "kade"), slika 4.4. Na ovom dijagramu mogu se uočiti tri perioda. Obično je intenzitet otkaza visok kada tehnički sistem otpočinje svoj radni vek. Intenzitet otkaza opada posle ovog početnog perioda. Kako se tehnički sistem približava kraju radnog veka, kriva ulazi u period starenja (istrošenosti) sistema u kome intenzitet otkaza raste¹⁹ [7].

Prvi je period ranih (početnih) otkaza *a* (period uhodavanja, period prvog stavljanja sistema u rad, period učestalih stanja u otkazu, period "dečijih bolesti") je početak radnog veka u kome je intenzitet otkaza veći nego u periodu normalne eksploatacije, ali tokom vremena opada. U ovom periodu otkazi nastaju kao posledica grešaka prilikom projektovanja, konstruisanja (loše konstrukcije, loše izabranog materijala, loše površinske ili toplotne obrade i sl.), skladištenja i puštanja sistema u rad, tj. Otkazi nastali zbog "ugrađene" greške u procesu projektovanja, proizvodnje i kontrole. Obično se ovi otkazi brzo otklanjaju.

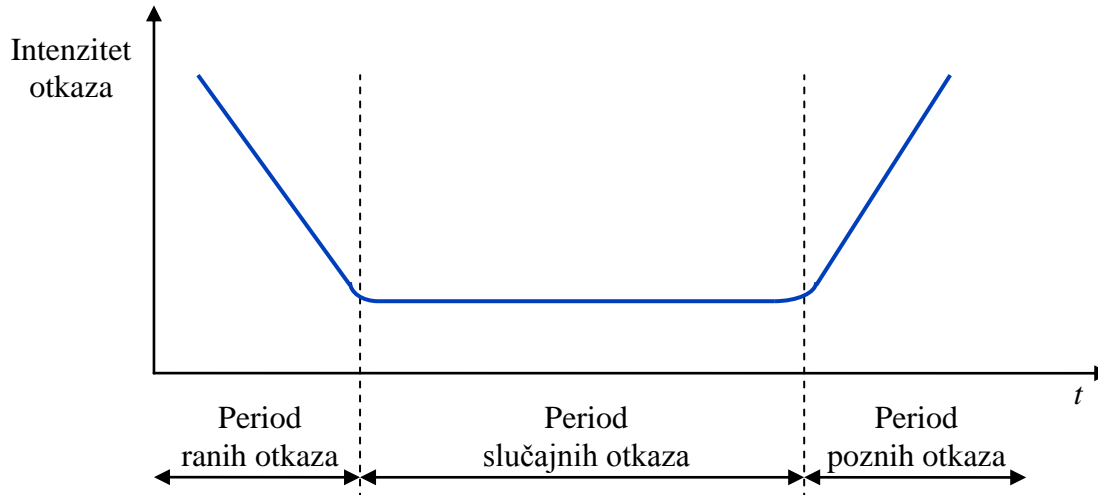
Drugi je period slučajnih otkaza *b* (period normalne eksploatacije (rada) u kome je intenzitet otkaza $\lambda(t)$ nizak i slučajni otkazi približno konstantni tokom vremena. Sistem je uhodan i izvršava zadatak

¹⁸ Adamović, Ž., Adamović, M., Tehnička dijagnostika, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.

¹⁹ Adamović, Ž., Tehnologija održavanja, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2009.

funkciju. U ovom periodu otkazi nastaju kao posledica raznih opterećenja sistema, nestabilnih konstruktivno-tehnoloških parametara, uslova okoline, rukovaoca i drugih slučajnih uticaja.

Treći je period poznih otkaza c (period starenja ili period istrošenosti, poznih grešaka) je kraj radnog veka u kome intenzitet otkaza raste i treba doneti odluku da li je sistem potrebno zameniti novim ili ga remontovati. U ovom periodu otkazi nastaju kao posledica dotrajalosti, starenja ili istrošenosti opreme (od tzv. strukturnih preopterećenja, tj. od zamora, habanja, trošenja, korozije, povećanja zračnosti i drugih oblika slabljenja osnovne strukture) i karakterišu se progresivnim ili rastućim zakonom promene intenziteta otkaza.



Slika 4.4. Dijagram promene intenziteta otkaza $\lambda(t)$ tokom radnog veka (eksploatacije) velikog broja tehničkih sistema (npr. kotrljajnih ležajeva) ima oblik kade

4.5 Pogodnost održavanja (popravljivost)

Održavanje je takođe složena karakteristika sistema, i karakteriše se **pogodnošću održavanja**, koja se definiše kao verovatnoća da će projektovani postupci održavanja biti izvedeni u zadatom vremenskom intervalu i zadatim uslovima održavanja, a kao pokazatelj popravljivosti često se koristi srednje vreme popravke *MTTR*.

Pogodnost održavanja (popravljivost) $M(t)$ (engl. Maintainability), se definiše i kao karakteristika (sposobnost) sistema da se pod utvrđenim uslovima upotrebe može zadržati u radnom stanju, ili vratiti u radno stanje definisano projektovanom funkcijom, kada se održavanje provodi pod određenim uslovima i po određenom režimu održavanja (uz upotrebu propisanih procedura i sredstava) [165].

Popravljivost je mera lakoće sa kojom sistem može biti popravljen, kad je već otkazao. Drugim rečima, popravljivost je verovatnoća da "otkazali" sistem može biti doveden u operativno stanje u posmatranom vremenskom intervalu. Proces popravljivosti obuhvata lociranje problema, fizičku popravku sistema i vraćanje sistema u njegovo operativno stanje. Popravljivost je kritična kod svih sistema, ali je posebno važna kad su ljudski životi, oprema ili sredina ugroženi dok se sistem popravlja.

Sa stanovišta održavanja bitno je poznavanje funkcije pogodnosti održavanja i u vezi s tim intenziteta popravki. Ako sa t označimo trenutak pojave otkaza kao slučajno promenljivu s funkcijom gustine $f(t)$, tada je pogodnost održavanja verovatnoća da će sistem koji je u otkazu biti za specificirano vreme doveden u stanje da može da zadovolji funkciju kriterijuma. Prema tome, pogodnost održavanja nije reprezent samo kvaliteta tehničkog sistema koji se održava, već i celokupnog sistema koji se bavi održavanjem. S obzirom da je pogodnost održavanja funkcija vremena u otkazu, to je moguće uvesti jednu novu karakteristiku sistema, intenzitet popravki, koji se definiše kao verovatnoća da će sistem biti popravljen u trenutku $t+\Delta t$, ukoliko je u trenutku t otkazao. Ovako poznavanje veličine pogodnosti održavanja i intenziteta popravki u priličnoj meri definiše stanje sistema u otkazu i proces održavanja [13].

Popravljivi sistemi su oni kod kojih se može vršiti održavanje u određenom vremenskom intervalu, pri čemu se sistem iz stanja u otkazu vraća u operativno stanje, a ukoliko se to još može brzo učiniti, efekat otkaza je znatno manji. Dakle, kod popravljivih sistema dozvoljava se vreme u zastoju, s tim što popravka pozitivno utiče na sistem. Ipak, kod nekih sistema otkaz može izazvati katastrofu u izvesnom smislu, pa

mogućnost popravke nema smisla uzimati u obzir. Kod popravljivih sistema uvodi se funkcija raspoloživosti koja ustvari, predstavlja verovatnoću da će sistem u bilo kom trenutku vremena biti sposoban da obavi funkciju za koju je namenjen, dok funkcija pouzdanosti predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem uspešno, bez otkaza, obaviti funkciju za koju je namenjen u posmatranom vremenskom intervalu, pod uslovom da je ispravno radio na početku tog vremenskog intervala. Međutim, funkcija raspoloživosti ne sadrži podatke o broju ciklusa otkaz - popravka u posmatranom vremenskom intervalu, što je vrlo bitno sa stanovišta planiranja snabdevanja rezervnim delovima i rasporeda rada ljudi koji vrše održavanje, odnosno popravku. Kod popravljivih sistema može se razmatrati i vreme popravke, vreme između otkaza, broj otkaza u nekom vremenskom intervalu itd. [165].

4.6 Tehnička dijagnostika

Pojam dijagnostika potiče od grčke reči „diagnosis“ koja označava ocenjivanje, utvrđivanje, zaključivanje ili prepoznavanje. Kao pojam, prvo se pojavio u medicini, a kasnije i u tehnici. Medicinska dijagnostika je široko poznata za razliku od tehničke dijagnostike, čiji pojam i značaj su poznati samo užem krugu tehnički obrazovanih stručnjaka, pre svega mašinske i elektrotehničke struke. Međutim, isto kao što medicinska dijagnostika podrazumeva sve postupke, koji se provode da bi se spoznala bolest pacijenta preko zapažanja i tumačenja uočenih simptoma koji upućuju na nju, tehnička dijagnostika podrazumeva postupke definisanja defekata mašina²⁰ [2]. Ono što je dijagnostika danas u medicini za kontrolu zdravlja ljudi, to je isto tehnička dijagnostika u kontroli stanja mašina.

U anglosaksonskoj terminologiji se umesto pojma „technical diagnostics“ (tehnička dijagnostika) mnogo češće koriste pojmovi „condition monitoring“ (praćenje stanja) ili „maintenance inspection“ (kontrola održavanja) [2].

Tehnička dijagnostika predstavlja skup aktivnosti i postupaka, koji se provode sa ciljem ocene (utvrđivanja) stanja tehničkog sistema, sa određenom tačnošću u određenom trenutku eksploatacije, radi donošenja odluka o daljim aktivnostima održavanja ili davanja prognoze ponašanja stanja tehničkog sistema u budućnosti. Dijagnostika predstavlja, u osnovi, proces kontrola tehničkog sistema, proučavanja rezultata kontrola i donošenja dijagnostičkih odluka (zaključaka) na osnovu rezultata tih kontrola [1-4,11]

Pod pojmom tehnička dijagnostika podrazumeva se naučno-tehnička disciplina koja se bavi neprekidnim ili povremenim praćenjem stanja nekog tehničkog sistema u procesu eksploatacije, sa ciljem procene pouzdanosti daljeg rada i predlaganja načina i obima daljih aktivnosti održavanja [5,11].

Dijagnostikom tehničkih sistema, olakšava se planiranje održavanja i popravki, čime se vreme zastoja pogona zbog zamene i popravki mašine, svodi na najmanju moguću meru. U slučajevima kada se dijagnostika kvalitetno provodi, sprečavaju se mnoga nepotrebna zaustavljanja pogona.

Osnovni zadatak praćenja dijagnostičkih parametara je detekcija otkaza na tehničkom sistemu u ranoj fazi. Ovo omogućava osoblju održavanja vreme za planiranje popravke, kao i nabavku potrebnih rezervnih delova. Sposobnost da se identifikuje otkaz i predvide mogući uzroci otkaza je korisna za kreiranje odgovarajućih servisnih aktivnosti u pravom trenutku.

Osnovni zadatak tehničke dijagnostike je da detektuje otkaz tehničkog sistema ili pojedinih njegovih delova u najranijoj mogućoj fazi nastanka, kako bi se preduzimanjem pravovremenih odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku sprečili otkazi i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu. Ovo se postiže praćenjem (merenjem) dijagnostičkih (karakterističnih) parametara i ocenom stanja tehničkog sistema u zavisnosti od toga da li se ti parametri nalaze u dozvoljenim granicama, što se utvrđuje prema određenim kriterijumima [2].

Tehnički sistemi u industriji su izloženi različitim negativnim uticajima, kao što su: mehaničke vibracije, toplota, trenje, prašina itd., i zbog toga su podložni otkazima. Neočekivana pojava otkaza i ispad

²⁰ Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana: Pouzdano održavanje termoelektrana, hidroelektrana, solarnih elektrana, vetroelektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku – Adam institut, Smederevo, 2014.

nekoj tehničkoj sustavi iz pogona može prouzrokovati visoke troškove i povećane opasnosti po ljude i okolinu.

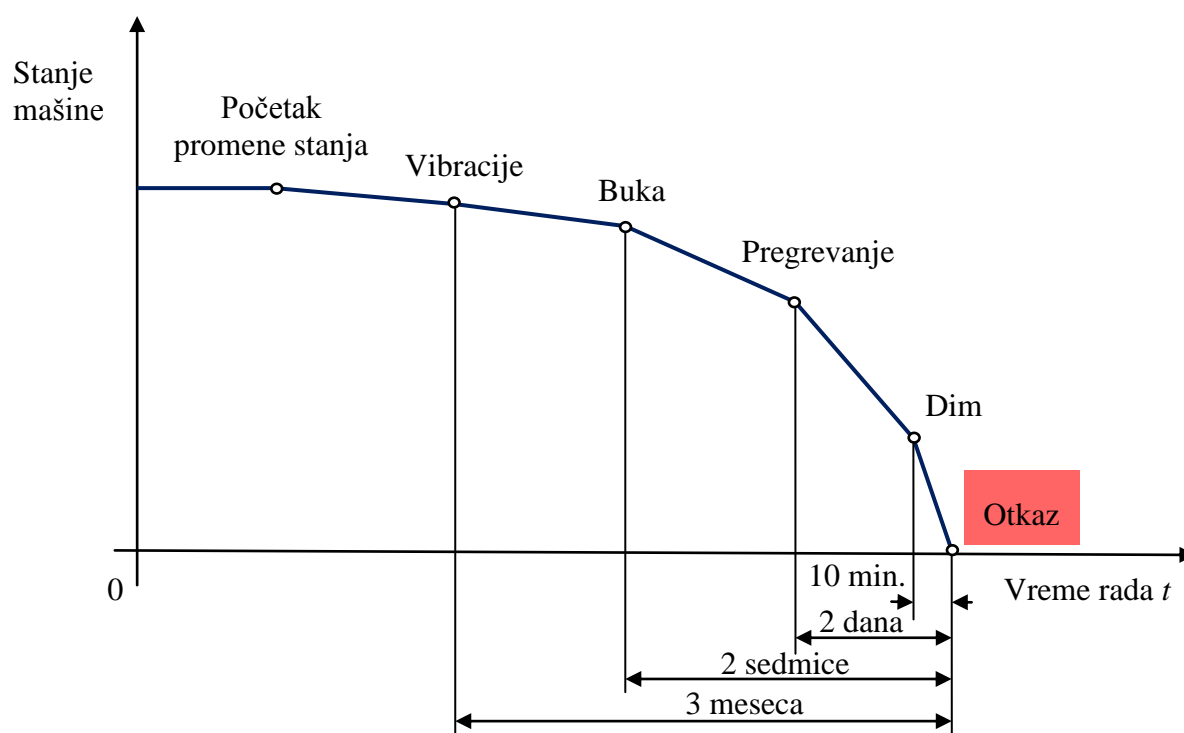
Visoki troškovi mogu nastati kako zbog neplaniranih zastoja u proizvodnji (neplaniranog zaustavljanja proizvodnog ciklusa) tako i zbog oštećenja visoko vredne opreme, zatim zbog troškova angažovanja specijalizovanih ekipa za otklanjanje otkaza, zbog neoptimalne nabavke rezervnih delova itd. Troškovi održavanja proizvodnog pogona značajno utiču na formiranje cene finalnog proizvoda.

Povećane opasnosti se javljaju zbog činjenice da havarije mašina mogu dovesti do stradanja operatera na mašini, do oštećenja ostalih komponenti na samoj mašini, pa čak i do havarije povezanih – susednih mašina.

Zbog toga je potrebno vršiti dijagnostičke kontrole mašina, koje omogućavaju detekciju otkaza u ranoj fazi, kako bi se predupredili zastoji u radu i druge negativne posledice i obezbedio siguran i pouzdan rad mašina.

Primenom adekvatnih dijagnostičkih metoda, otkazi se mogu detektovati na vreme, u ranoj (početnoj) fazi nastanka. U tom slučaju, popravke tehničkih sistema se vrše u tehnološki najpogodnijem trenutku, a planiranje aktivnosti održavanja i nabavke rezervnih delova su olakšani.

Cilj dijagnostike je identifikovanje promena u načinu rada mašine koje mogu ukazati na neki potencijalni otkaz. Prate se fizičke veličine mašine koje mogu dati ocenjivi indikator trenutne radne (operativne) sposobnosti mašine. Fizičke veličine od interesa (poput vibracija, buke, temperature) se konstantno mere, analiziraju i memorišu kako bi se mogli prepoznati trendovi u njihovom ponašanju. Na slici 4.5. je dat prikaz dijagnostike mašine neprekidnim praćenjem fizičkih veličina (vibracija, buke, temperature i sl.) na ležajevima²¹ [64].



Slika 4.5. Prikaz dijagnostike mašine neprekidnim praćenjem fizičkih veličina (vibracija, buke, temperature i sl.) na ležajevima [64]

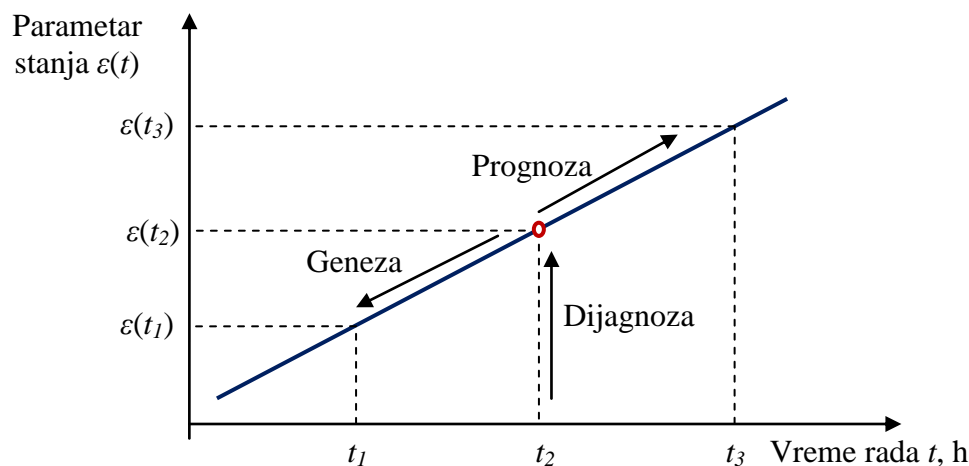
Identifikovanje pravog uzroka otkaza, planiranje popravke i eliminacija pravog uzroka otkaza u zadovoljavajućim granicama vremena je najefikasniji i najjeftiniji način održavanja tehničkih sistema.

²¹ Gašparac, I., Vražić, M., Sustav motrenja rotacijskih strojeva, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.

Ekspertiza, je ocena stanja i davanje mišljenja i preporuka za zamenu, popravku, reviziju ili revitalizaciju delova postrojenja ili mašina. Bazira se na znanjima specijalista iz pojedinih tehničkih disciplina, a na osnovu sprovedenih dijagnostičkih kontrola [2].

Primena savremenih metoda tehničke dijagnostike omogućava, slika 4.6.,:

- poznavanje stanja tehničkog sistema u prošlosti na bazi vremenske slike (istorijata) stanja sistema, to je zadatak geneze ili genetike (retrospektive) - šta je bilo.
- ocenu stanja u kome se tehnički sistem nalazi u trenutku posmatranja, to je zadatak dijagnoze ili dijagnostike - šta je sada.
- predviđanje (prognostiranje) stanja u kome će se naći tehnički sistem u nekom trenutku budućeg vremena, to je zadatak prognoze ili prognostike - šta će biti.



Slika 4.6. Osnovne mogućnosti tehničke dijagnostike

Anticipacija (prognoza) stanja tehničkog sistema je poslednja faza u primeni koncepcije održavanja prema stanju, koja daje odgovor na pitanje šta će biti sa sastavnim delom i/ili sistemom u daljem procesu eksploatacije, posle izvršene dijagnostike, s ciljem obezbeđenja potrebne efikasnosti procesa eksploatacije [1].

Dijagnostika se može izvesti na dva različita nivoa [2]:

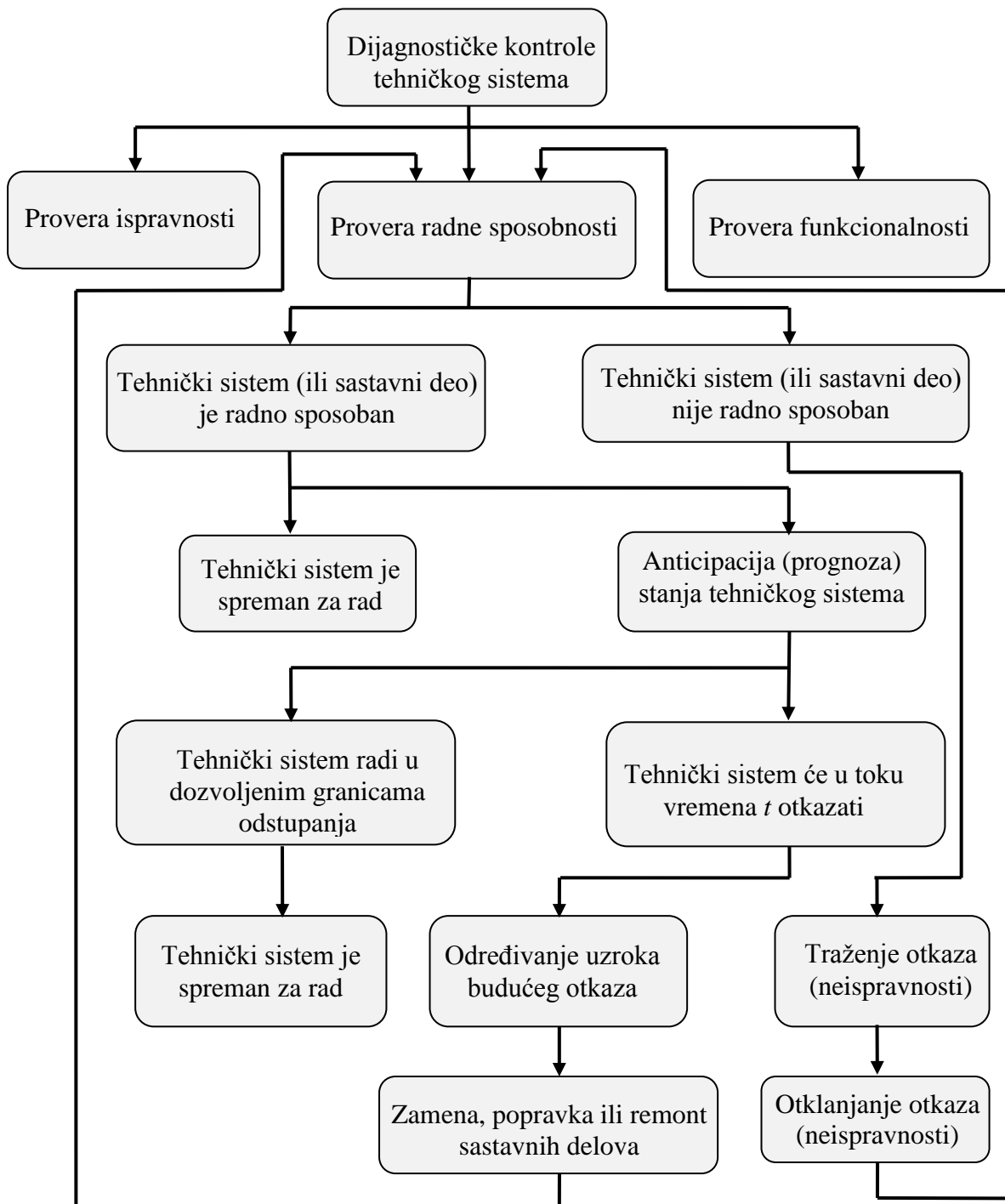
- niži nivo, podrazumeva utvrđivanje da li je sistem u otkazu i šta je u otkazu, šta treba popraviti; i
- viši nivo, osim navedenog za prethodni nivo zahteva i utvrđivanje uzroka nastanka otkaza.

4.6.1 Zadaci dijagnostičkih kontrola tehničkog sistema

Zadaci dijagnostičkih kontrola tehničkog sistema, slika 4.7., su²² [1,4,5]:

- provera ispravnosti tehničkog sistema tokom njegove izrade,
- provera radne sposobnosti tehničkog sistema tokom njegove eksploatacije, obuhvata:
 - traženje uzroka neispravnosti (otkaza),
 - utvrđivanje stepena oštećenja i
 - anticipaciju stanja tehničkog sistema (prognostiranje ponašanja stanja tehničkog sistema u budućnosti).
- provera pravilnosti funkcionisanja tehničkog sistema.

²² Adamović, Ž., Ilić, B., Savić, B. Jevtić, M., Termografija pouzdana dijagnostička metoda, Pan Book, Novi Sad, 2011.



Slika 4.7. Zadaci dijagnostičkih kontrola tehničkih sistema [1,4,5]

Dijagnostičke kontrole radi provere ispravnosti, radne sposobnosti i pravilnosti funkcionisanja, kao i traženja uzroka neispravnosti (otkaza) predstavljaju osnovne zadatke dijagnostike stanja tehničkog sistema.

1. Dijagnostičke kontrole radi provere ispravnosti tehničkog sistema

Dijagnostičke kontrole radi provere ispravnosti tehničkog sistema tokom njegove izrade omogućavaju da se sazna da li sistem ima defektne delove, koji ponekad mogu biti i posledica grešaka u montaži [2,12].

2. Dijagnostičke kontrole radi provere radne sposobnosti tehničkog sistema

Dijagnostičke kontrole radi provere radne sposobnosti tehničkog sistema omogućavaju da se utvrdi da li tehnički sistem u toku eksploatacije ostvaruje funkciju za koju je predviđen (projektovan) [2].

Radna sposobnost je stanje tehničkog sistema pri kome je on sposoban da izvrši svoju funkciju sa parametrima utvrđenim zahtevima normativno-tehničke dokumentacije, odnosno sposoban da vrši funkciju kriterijuma u određenim uslovima u toku određenog vremena realnog procesa eksploatacije [5].

Ako je stanje tehničkog sistema tako da vrednost najmanje jednog parametra, koji karakteriše sposobnost izvođenja zadate funkcije, ne odgovara zahtevima utvrđenim normativno-tehničkom dokumentacijom, sistem se smatra radno nesposobnim.

Radna sposobnost tehničkog sistema može biti obnovljena (povišena) njegovim održavanjem, a može se pokazati i da je to tehnički nemoguće ili ekonomski neopravdano. Kao pokazatelji tehničkih mogućnosti i ekonomske opravdanosti obnavljanja radne sposobnosti sistema uzimaju se troškovi vremena, rada i sredstava za održavanje i oni zavise od konstrukcionih karakteristika sistema [5].

Dijagnostičke kontrole radi provere radne sposobnosti tehničkih sistema, podrazumevaju prethodno definisane kriterijume dozvoljenog i nedozvoljenog stanja. Na osnovu tih kriterijuma, uz pomoć odgovarajućih mernih sredstava (instrumenata) ili čulnih zapažanja dijagnostičara, vrši se ocena stanja tehničkog sistema.

Danas se za automatsku kontrolu radne sposobnosti sistema proizvode specijalni automatski sistemi kontrole. Zasnovani su na pretpostavci da se stanja sistema javljaju kao determinisana, tj. da svakom stanju tehničkog sistema odgovara njegova potpuno određena spoljašnja manifestacija i, suprotno, da svakoj spoljašnjoj manifestaciji (dijagnostičkom signalu) odgovara potpuno određeno stanje tehničkog sistema [9-11].

Automatski sistem raspoznavanja otkaza mora uključivati ulazni uređaj koji prima sve parametre radnog procesa, zatim uređaj za primanje rešenja, koji upoređuje postojeću situaciju sa ranije fiksiranom i prima rešenja o prisustvu te ili druge pojave, kao i uređaj koji upravlja sistemom za raspoznavanje otkaza [21-26, 28].

a) Dijagnostičke kontrole radi traženja neispravnosti (otkaza) tehničkog sistema

Traženje neispravnosti (otkaza) predstavlja jedan je od osnovnih zadataka dijagnostike stanja tehničkih sistema, provodi se sa ciljem da ukaže na mesta i uzroke pojave neispravnosti tehničkih sistema.

Traženje neispravnosti pokazuje potrebu raščlanjivanja tehničkih sistema na klase - grupe. Broj grupa zavisi od stepena detaljnosti podele tehničkog sistema na delove. Takav način traženja uzroka neispravnosti naziva se dubinska dijagnostika. Dubinska dijagnostika se primenjuje kada neki tehnički sistem ili njegov deo pretrpi havariju ili ako se mesto otkaza ne može odmah da utvrdi. Dubinska dijagnostika se najčešće primenjuje za utvrđivanje mesta otkaza u okviru planiranih ispitivanja ili u slučaju havarije, kao i za određivanje količine i obima aktivnosti održavanja pre redovnih intervala održavanja. Pri traženju uzroka neispravnosti koji ometaju pravilno funkcionisanje tehničkih sistema, dubina dijagnostike i način raščlanjavanja tehničkog sistema u praksi mogu biti različiti [2].

b) Dijagnostičke kontrole radi utvrđivanja stepena oštećenja

Dijagnostičke kontrole radi utvrđivanja stepena oštećenja, omogućavaju da se određenim postupcima dijagnostike utvrdi koliki je stepen oštećenja nastao radom mašine. Na osnovu rezultata dijagnostičkih kontrola donose se odluke (zaključci) o daljem korišćenju mašina ili o merama održavanja [2].

Za utvrđivanje stepena oštećenja primenjuju se najčešće takvi postupci dijagnostike koji se odnose na merenje parametara koji se menjaju u zavisnosti od stepena oštećenja.

Pošto se, kada je reč o mašinama, za utvrđivanje stepena oštećenja mašina ne sme rastaviti, direktno utvrđivanje stepena oštećenja samim tim i nije moguće. Zato se stepen oštećenja mašina utvrđuje indirektno preko parametara, ili spoljnih pojava koje se menjaju u zavisnosti od stepena oštećenja. Pri tome se pretpostavlja da su stepeni oštećenja i merni parametri u direktnoj i nama poznatoj zavisnosti [2].

c) Dijagnostičke kontrole radi anticipacije (prognoze) stanja tehničkog sistema

U cilju sprečavanja gubitka radne sposobnosti tehničkog sistema moguće je na osnovu praćenja dijagnostičkih parametara prognozirati promene njegovog stanja, odnosno predvideti karakter promene radne sposobnosti u budućnosti.

Anticipacija (prognoza) stanja tehničkog sistema predstavlja predviđanje (prognoziranje) ponašanja parametara stanja sistema u budućnosti, posle izvršene dijagnostike, sa ciljem da se obezbedi potrebna efektivnost procesa eksploatacije. Rezultati anticipacije predstavljaju osnovu za donošenje odluka o neophodnom roku i obimu aktivnosti održavanja [1].

Pored prognoziranja stanja sistema u budućnosti, praćenje dijagnostičkih parametara treba generalno da obuhvati i prepoznavanje havarijskog stanja tehničkog sistema i da predstavlja "okidač" za njegovo isključenje, odnosno prelaz na bezbedan režim rada, što se postiže pomoću tzv. sistema havarijske zaštite.

Ukoliko su poznate sve veličine stohastičkog uticaja na tehničko stanje sistema, onda se uz pomoć računa verovatnoće mogu izvesti odgovarajući matematički odnosi za predviđanje preostalog vremena korišćenja delova i/ili sistema.

Za praktičnu primenu u mnogim slučajevima je svrsishodno da se ne daje samo jedna prognostička vrednost trajanja preostalog vremena korišćenja sa jednom određenom sigurnošću. Poželjno je da se daje više vrednosti trajanja preostalog vremena korišćenja, koje se mogu postići sa različitom sigurnošću (npr. 80, 90%). Korisnik mašine bi onda mogao bolje da odluči o korišćenju mašine u budućnosti.

Zadatak prognoziranja stanja radne sposobnosti u opštem slučaju sastoji se u sledećem: nakon što se dobiju rezultati dijagnoze stanja sistema treba oceniti njegovu radnu sposobnost u preostalom periodu korištenja. Za ovo se mogu koristiti dva osnovna algoritma prognoziranja:

- algoritam ekstrapolacije i
- algoritam statističke klasifikacije.

3. Dijagnostičke kontrole radi provere pravilnosti funkcionisanja tehničkog sistema

Dijagnostičke kontrole radi provere pravilnosti funkcionisanja tehničkog sistema omogućavaju otkrivanje eventualnih neispravnosti, koje se mogu pojaviti u toku eksploatacije tehničkog sistema. Odnose se na merenje parametara funkcionisanja i pogonskih parametara koji su potrebni za besprekorno funkcionisanje i ekonomičan rad mašine [2].

4.6.2 Osnovne dijagnostičke metode

U zavisnosti od toga da li se dijagnostika nekog tehničkog sistema ostvaruje samo na osnovu čulnih opažanja dijagnostičara (subjektivnih signala) ili primenom sredstava tehničke dijagnostike (pomoću mernih instrumenata), dijagnostičke metode se mogu podeliti na subjektivne i objektivne, tabela 4.1 [1,2,4].

Tabela 4.1. Osnovne dijagnostičke metode (postupci) [1,2,4]

I. SUBJEKTIVNE DIJAGNOSTIČKE METODE	
1.	Kontrole šuma
2.	Vizuelne kontrole (endoskopija, penetracija, magnetoskopija itd.)
3.	Kontrole boje
4.	Kontrole mirisa
II. OBJEKTIVNE DIJAGNOSTIČKE METODE	
a) KONTROLE RADNIH PARAMETARA	
5.	Merenje temperature (kontrola termičkog stanja)
6.	Merenje ugaone brzine i broja obrtaja
7.	Merenje pritiska
8.	Merenje protoka
9.	Merenje obrtnog momenta
10.	Merenje mehaničke snage
11.	Merenje vremena
12.	Merenje tvrdoće
b) KONTROLE PRODUKATA HABANJA I SAGOREVANJA U ULJU/MAZIVU	
13.	Spektrometrijska analiza
14.	Infracrvena fotometrija
c) GEOMETRIJSKE KONTROLE (UTVRĐIVANJE DIMENZIJA DELOVA SISTEMA)	
15.	Mehanički postupak
16.	Pneumatski postupak
17.	Optički postupak
18.	Električni postupak
d) VIBROAKUSTIČKE KONTROLE	
19.	Merenje i analiza vibracija
20.	Merenje i analiza šuma
e) KONTROLE BEZ RAZARANJA	
21.	Magnetne kontrole
22.	Penetracija
23.	Ultrazvučne kontrole
24.	Kontrole vrtložnim strujama
25.	Radiografske kontrole (rentgenske kontrole i gamagrafija)
26.	Holorografija
f) KONTROLE KOROZIJE	
27.	Aktivni postupci
28.	Pasivni postupci
g) KONTROLE ELEKTRIČNIH PARAMETARA (napon, struja, otpor itd.)	
h) OSTALE KONTROLE (opšte, lokalne, specijalne i laboratorijske)	

Pored ove u literaturi postoje i mnoge druge podele dijagnostičkih metoda.

4.6.2.1 Subjektivne dijagnostičke metode

Kod subjektivnih dijagnostičkih metoda ocena stanja tehničkog sistema se vrši na osnovu čulnih opažanja (vizuelnih, zvučnih, optičkih, mirisnih) dijagnostičara ili uz pomoć jednostavnih instrumenata.

Primena subjektivnih dijagnostičkih metoda se zasniva na heurističko-empirijskim sposobnostima dijagnostičara da ocene stanje tehničkog sistema. Obično se ne vrše nikakva merenja, pa zbog toga nema ni potrebe da se razvijaju algoritmi na osnovu kojih bi se dobijeni rezultati analizirali i donosili zaključci o stanju tehničkog sistema i odluke o daljim aktivnostima održavanja na sistemu, koje treba preduzeti. Međutim, kada se primenjuju objektivne dijagnostičke metode moraju se razviti odgovarajući algoritmi. Svaki rezultat merenja mora biti objektivno protumačen kroz zaključak o stanju tehničkog sistema. Međutim, primenom subjektivnih dijagnostičkih metoda se, na osnovu subjektivne ocene radne

sposobnosti sistema, ocenjuje njegova sposobnost za dalji rad ili se donese odluke o neophodnosti primene adekvatnih postupaka održavanja kojima bi sistem bio prilagođen za dalji rad [1,2].

Uvek kada nije potrebna primena posebnih mernih uređaja kaže se da se radi o subjektivnim dijagnostičkim metodama. Često primenjivana subjektivna dijagnostička metoda je osluškivanje kojom se na osnovu zvuka koji sistem daje u pogonu i na osnovu ispitivačevog sluha, ocenjuje njegovo tehničko stanje. Prema ovoj metodi se već decenijama ocenjuje tehničko stanje motora, menjača i njihovih sklopova. Sledeći primeri subjektivnih dijagnostičkih metoda su vizuelne ocene izduvnih gasova dizel-motora ili utvrđivanje zazora ležaja preko radijalnog pokretanja osovine [1,2].

Redovni vizuelni i zvučni pregled mašina je potrebni deo bilo koje koncepcije održavanja. U mnogim slučajevima jednostavnim vizuelnim i zvučnim pregledom moguće je otkriti probleme koji mogu ostati nezapaženi upotrebom svih ostalih dijagnostičkih metoda. Sve mašine u pogonu treba redovno vizuelno pregledavati. Informacije dobijene vizuelnim i zvučnim kontrolama povećavaju vrednost informacija dobijenih primenom ostalih dijagnostičkih metoda.

Za proširenje primene i poboljšanja polazne tačnosti subjektivnih dijagnostičkih metoda koristite se i pomoćna tehnička sredstva. Na primer, za poboljšanje mogućnosti ocenjivanja stanja mašina zvučnim kontrolama primenjuje se stetoskop. Iskusan stručnjak može pomoću stetoskopa da lokalizuje i zvuk najmanjeg intenziteta. Ovde treba naglasiti da se endoskopija primenjuje i kod objektivnih dijagnostičkih metoda, ako se slika snimi i poredi sa nekim šablonom. Ovaj primer pokazuje da se kod nekih subjektivnih dijagnostičkih metoda, primenom jednostavnih mernih uređaja, može doći do objektivnih ocena tehničkog stanja sistema. Svrstavanje različitih dijagnostičkih metoda (postupaka) u subjektivne i objektivne postupke može se, prema tome, tokom vremena menjati [2].

Prednost subjektivnih dijagnostičkih metoda je u niskim troškovima, jer ne zahtevaju korišćenje mernih uređaja, pored toga i vreme potrebno za provođenje dijagnostičkog procesa je vrlo kratko, jer se merni uređaji ne priključuju na mašinu. Nedostatak ovih metoda je što rezultati kontrola zavise od iskustva dijagnostičara i što je znatno umanjen sadržaj informacije o stvarnom tehničkom stanju sistema. Da bi se na osnovu subjektivnih postupaka tehničke dijagnostike došlo do pouzdane ocene stanja tehničkog sistema dijagnostičar mora da ima veliko iskustvo. I pored navedenih nedostataka subjektivni postupci tehničke dijagnostike se, zbog navedenih određenih prednosti, ne mogu u potpunosti izbaciti iz upotrebe [2].

4.6.2.2 Objektivne dijagnostičke metode

Kod objektivnih dijagnostičkih metoda ocena stanja tehničkog sistema se vrši uz pomoć sredstava dijagnostike (mernih instrumenata).

Objektivne dijagnostičke metode se baziraju na rezultatima merenja dijagnostičkih parametara (eksperimentima), koji predstavljaju kvalitativni i kvantitativni pokazatelj stanja tehničkog sistema [2].

Na osnovu iznetog, zaključuje se da postoji potreba da se rezultat merenja koje je izvršeno u okviru dijagnostičkih kontrola tumači s obzirom na stanje tehničkog sistema. Iz toga, zatim, treba da proizđe donošenje odluke o daljem korišćenju tehničkog sistema. Logično je da rezultat utvrđivanja ocene stanja sistema može da bude pozitivan i negativan nalaz o sposobnosti sistema za dalje izvršavanje projektovanih zadataka.

Utvrđeno (ocenjeno) stanje se načelno dokazuje u mernoj veličini. Da bi se pomoću ove merne veličine došlo do objektivne ocene stanja potrebno je da postoje i granične vrednosti kada se mašina isključuje, koje treba da se upoređuju sa mernim veličinama. Tada je moguće, bez obzira na dijagnostičarevo iskustvo doći do pravilne ocene stanja tehničkog sistema. Objektivnim dijagnostičkim metodama se daje veći značaj nego subjektivnim, jer ocena tehničkog stanja ne zavisi od dijagnostičara i jedinstvena je za više mašina. Pored toga, sadržaj informacija je veći nego kod subjektivnih dijagnostičkih metoda [2].

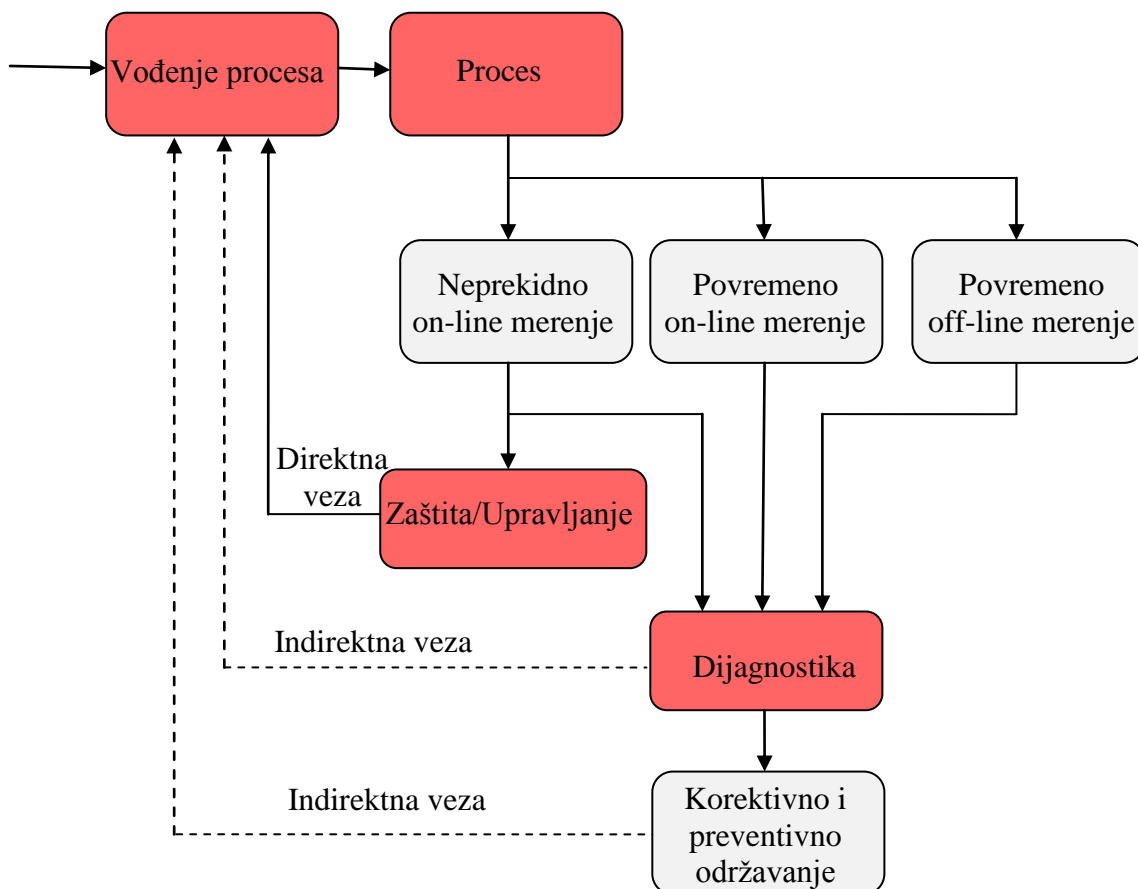
Nedostaci objektivnih dijagnostičkih metoda su visoki troškovi nabavke uređaja za dijagnostiku, kao i potrebno duže vreme za provođenje dijagnostičkog procesa i neophodnosti utvrđivanja graničnih vrednosti isključivanja mašine. Da li će primena objektivnih dijagnostičkih metoda u konkretnom slučaju biti opravdana i u ma kojoj tačnosti da se provodi, jedan je od problema optimizacije koji pri projektovanju konkretnog dijagnostičkog sistema treba rešiti [2]. Utvrđivanje stanja sistema primenom objektivnih

dijagnostičkih metoda potpuno je opravdano pod uslovom da je obezbeđeno neposredno, tačno i blagovremeno donošenje zaključaka o stanju dijagnosticiranog sistema. Na osnovu objektivno izvedene ocene stanja tehničkog sistema donosi se dijagnostička odluka, koja mora biti vrlo određena, tj. jasna i jednoznačna i ona zavisi od niza nalaza o stanju sistema, koji svaki za sebe, obično nisu jednoznačni. Pored toga, odluka mora biti pravovremena, što znači da je treba doneti veoma brzo, odnosno u najkraćem mogućem roku po završetku kontrole. Dakle, prilikom ocene stanja tehničkog sistema mora se uvažiti specifičnost celokupnog tehnološkog procesa, koji ne trpi suviše duga čekanja, koja bi mogla nastati zbog sporosti u obradi i analizi rezultata merenja i donošenju odluka o daljim aktivnostima održavanja.

4.6.3 Vrste merenja fizičkih veličina u savremenim sistemima nadzora i upravljanja

U savremenim sistemima nadzora i upravljanja (regulacije) moguće su sledeće vrste merenja fizičkih veličina, slika 4.8.²³ [64]:

- **neprekidna on-line merenja fizičkih veličina**, provode se kada je tehnički sistem u pogonu (on-line), koriste se pri nadzoru (u funkciji zaštite i u funkciji dijagnostike) i pri upravljanju (regulaciji) tehničkih sistema, izmerene (procesne) veličine direktno utiču na vođenje procesa.
- **povremena on-line merenja fizičkih veličina**, provode se kada je tehnički sistem u pogonu (on-line), koriste se samo pri dijagnostici tehničkih sistema, izmerene (procesne) veličine indirektno utiču na vođenje procesa.
- **povremena off-line merenja fizičkih veličina**, provode se kada je tehnički sistem izvan pogona (off-line) npr. u remontu, koriste se samo pri dijagnostici tehničkih sistema, izmerene (procesne) veličine indirektno utiču na vođenje procesa.



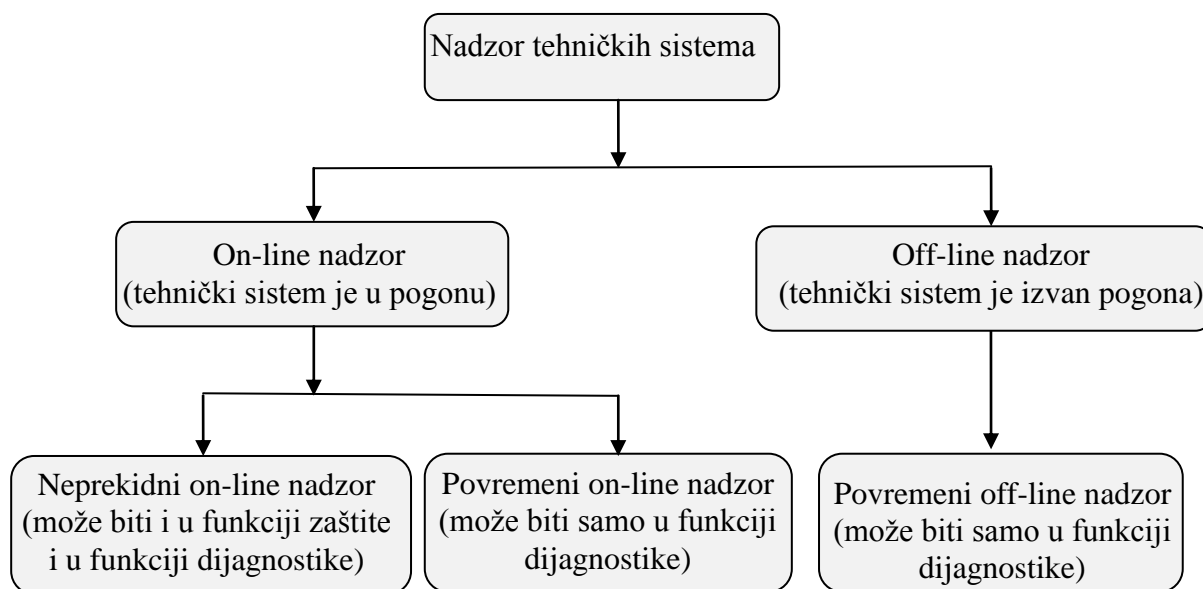
Slika 4.8. Vrste merenja fizičkih veličina u savremenim sistemima nadzora i upravljanja

²³ Gašparac, I., Vražić, M., Sustav motrenja rotacijskih strojeva, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.

4.6.4 Sistemi nadzora sa integrisanim funkcijama zaštite i dijagnostike

Nadzor tehničkih sistema, slika 4.9., može biti²⁴ [98]:

- **on-line nadzor**, provodi se kada je tehnički sistem u pogonu, postoji:
 - neprekidni on-line nadzor, koji može biti i u funkciji zaštite i u funkciji dijagnostike i
 - povremeni on-line nadzor, koji može biti samo u funkciji dijagnostike.
- **off-line nadzor**, provodi se kada je tehnički sistem izvan pogona, postoji samo povremeni off-line nadzor, koji može biti samo u funkciji dijagnostike.



Slika 4.9. Vrste nadzora tehničkih sistema

Istorijskim razvojem sistemi nadzora tehničkih sistema poprimili su dve osnovne funkcije [98]:

- primarnu (zaštitnu) funkciju, i
- sekundarnu (dijagnostičku) funkciju.

U začetima razvoja nadzor tehničkih sistema se ostvarivao praćenjem veličina presudnih za siguran rad mašina, što se svodilo na neprekidno merenje veličina i poređenje tih veličina sa dozvoljenim vrednostima. U slučaju prekoračenja dozvoljenih vrednosti, delovi i/ili tehnički sistem se automatski ili neposrednim nalogima isključuje. Na ovaj način se ostvaruje primarna (zaštitna) funkcija nadzora tehničkih sistema. Svrha zaštite je da osigura neposredno prepoznavanje i odgovor na promenu u stanju tehničkog sistema, koja može biti opasna po osoblje ili dugoročnu radnu sposobnost tog tehničkog sistema. Zaštita zahteva trajno postavljene senzore signala i bazira se na neprekidnom poređenju jednostavnih izmerenih veličina, poput ukupnog nivoa vibracija, sa unapred postavljenim dozvoljenim vrednostima. Prekoračenje bilo koje postavljene granične vrednosti može se tretirati na dva načina, dojavnim signalom za osoblje i/ili nalogom za automatski prekid rada. Zaštita obezbeđuje momentalnu (real-time) detekciju ugroženosti tehničkog sistema, s obzirom da su to sistemi neprekidnog nadzora. Vreme izvođenja korektivnih aktivnosti održavanja je nametnuto. Priroda korektivnih mera koje treba preduzeti se ne zna, s obzirom da sistem ne poseduje sposobnosti dijagnostičke analize [98].

Kasnijim naglim napretkom nauke i tehnike, posebno u području elektronike i računarstva, sistemi nadzora su vremenom proširili svoju funkciju proširivanjem seta praćenih podataka, te dodavanjem analitičkih mogućnosti za ocenu stanja (dijagnostiku). Na ovaj način se ostvaruje sekundarna

²⁴ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Predlog originalnog modela teledijagnostike i daljinskog nadzora električnih automobila, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: Vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.

(dijagnostička) funkcija nadzora tehničkih sistema. Dijagnostika se sastoji od detaljnog analitičkog praćenja kako bi se došlo do najranijih mogućih upozorenja o malim promenama stanja tehničkog sistema. Dijagnostika uključuje predviđanje trendova i detaljni pregled komponenata alatima analize frekvencijskog spektra kako bi se uočile male promene. Procesne veličine se uključuju u proces dijagnostike kako bi se mogla dati potpuna ocena ukupnog stanja. Obezbeđuje momentalnu (real-time) detekciju ugroženosti tehničkog sistema, s obzirom da su to pretežno sistemi neprekidnog nadzora. Vreme izvođenja korektivnih aktivnosti održavanja, nije nametnuto već se planira. Podaci se neprekidno ne samo mere, već se istovremeno i prosleđuju računaru na kome operater u svakom momentu ima uvid u trenutno stanje tehničkog sistema. Osim toga i priroda (vrsta) korektivnih aktivnosti održavanja se zna s obzirom da se analizom frekvencijskog spektra i vremenskog zapisa vibracija, struje itd., može utvrditi glavni uzrok otkaza. Samim tim što se zna uzrok otkaza i sami zastoji su planirani [98].

Zaštita zahteva neprekidno merenje i poređenje kako bi se ostvarilo brzo vreme odziva potrebno za zaštitu osoblja i mašina. Za dijagnostiku je potrebno omogućiti duži vremenski rok za prikupljanje podataka koji su osnova za detaljnu analizu stanja kompleksnih mašina.

Uređaji za neprekidno merenje fizičkih veličina (npr. vibracija) mogu se podeliti na zaštitne i dijagnostičke. Podela je uslovna, jer se i zaštitni uređaji mogu delimično iskoristiti u dijagnostičke svrhe i obrnuto, dijagnostički uređaji se mogu delimično koristiti u zaštitne svrhe. Osnovna namena zaštitnih uređaja je da neprekidno mere (prate) fizičke veličine (npr. vibracije) pogona, te da u momentu prekoračenja zadatah graničnih vrednosti alarmiraju (uzbunjuju, upozoravaju) ili čak isključe pogon. Osnovna namena dijagnostičkih uređaja je da neprekidno ili povremeno mere i analiziraju fizičke veličine (npr. vibracije) te da na osnovu toga detektuju oštećenja u pogonu. Savremeni dijagnostički uređaji imaju veoma velike mogućnosti, kao što su: slanje SMS poruka odgovornim osobama u slučaju pojave oštećenja, automatsko generisanje radnih naloga održavanja itd. [98].

Savremeni sistemi nadzora pored zaštitne obavljaju i dijagnostičku funkciju, što se ogleda u praćenju određenih veličina tehničkog sistema (npr. termičke slike mašine) i preduzimanju određenih aktivnosti održavanja, pre pojave otkaza, kada vrednost praćene veličine odstupi izvan dozvoljnih granica. Osnovna razlika, odnosno nedostatak, zaštitnih metoda u odnosu na dijagnostičke, je u tome što se princip rada većine zaštitnih metoda bazira na preduzimanju potrebnih aktivnosti održavanja tek nakon pojave otkaza (nedopuštenog stanja). Dok se princip rada dijagnostičkih metoda zasniva na preduzimanju aktivnosti održavanja pre pojave otkaza, odnosno na praćenju stanja i pojava koje prethode otkazu, te je na taj način moguće sprečiti ili na vreme predvideti otkaz. Posledice ovakvih mogućnosti dijagnostičkih metoda su znatne uštede, odnosno izbegavanje velikih otkaza, a time i zastoja u pogonu, kao i povećanje sigurnosti ljudi i tehničkih sistema (naročito u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom) što je od posebne važnosti [98].

Savremene tehnologije izvršile su značajan uticaj na razvoj novih modela održavanja tehničkih sistema i potrebu za nastankom savremenih sistema nadzora. Savremeni sistemi nadzora, koji pored zaštitne obavljaju i dijagnostičke funkciju, omogućavaju ne samo kontrolu veličina parametara, već i analizu i praćenje trendova ovih parametara, kao i predviđanje trenutka kada će se prevazići dozvoljeni nivo i pojaviti defekti. Savremeni sistemi nadzora mašina kao osnovu svog rada koriste vibracije i procesne parametre, koji se zatim, zavisno od potrebe, proširuju još i sa drugim veličinama. Cilj je da se praćenjem i analizom frekvencijskog spektra vibracija, struje itd., postigne potpuno automatizovana zaštita i dijagnostika rotacionih mašina u industriji. Savremeni sistem nadzora treba da ima mogućnost obuhvatanja najnovijih strategija automatizovanog praćenja stanja rotacionih mašina, alarmiranja osoblja i pobuđivanja zaštitnih releja ukoliko se ustanove bilo kakve značajne promene u datom trenutku. Sistem takođe mora ponuditi analitičke i dijagnostičke mogućnosti dovoljne za planiranje adekvatnih zahvata održavanja mnogo pre pojave katastrofalnog otkaza. Opšte smernice za projektovanje savremenih sistema nadzora su usmerene na to da u njima budu integrisane i zaštitna i dijagnostička funkcija.

Arhitektura sistema nadzora može varirati od veoma jednostavne do veoma kompleksne. U svom najjednostavnijem obliku sistem nadzora može biti izveden u formi senzora vibracija i temperature čiji se sumarni iskazi u formi naponskih ili strujnih 4-20 mA signala prosleđuju nadzornom sistemu fabrike kome je pak moguće pristupiti preko Remote Desktop-a. Ovako koncipiran sistem je isuviše jednostavan i ne

omogućava dijagnostiku stanja mašine s obzirom da manipuliše samo skalarnim, a ne i vektorskim zapisima (frekvencijskim spektrima i vremenskim zapisima) koji su potrebni za dijagnostiku stanja mašine.

S druge strane znatno kompleksiniji sistem nadzora podrazumeva neprekidni nadzor (u realnom vremenu) sa ugrađenim funkcijama zaštite i dijagnostike. Sistem vrši akviziciju kako skalarnih tako i vektorskih veličine, kako u stacionarnom režimu tako i u nestacionarnom režimu pri čemu se vrši real-time detekcija radnog režima mašine. Sistem preko lokalnog LAN-a (Local Area Network) vrši prenos signala i donetih dijagnostičkih odluka na centralni računar (server) kome je moguće pristupiti preko VPN-a (Virtual Private Network).

Karactersike savremenih sistema nadzora (sa ugrađenim funkcijama zaštite dijagnostike) su:

- Savremeni sistemi nadzora stanja mašina kao osnovu svoga rada koriste vibracije i procesne parametre, koji se zatim, zavisno od potrebe, proširuju još i sa ostalim podsistemima.
- Cilj je da se korišćenjem spektra podsistema postigne potpuno automatizovan nadzor rotacionih mašina u industriji.
- Savremeni sistemi nadzora treba da imaju mogućnost da obuhvate najnovije strategije automatizovanog nadzora stanja rotacione opreme, alarmiranja osoblja i pobuđivanja zaštitnih releja ukoliko se ustanove bilo kakve značajne promene u datom trenutku.
- Sistem nadzora takođe mora ponuditi analitičke i dijagnostičke mogućnosti dovoljne za planiranje adekvatnih zahvata održavanja mnogo pre pojave katastrofalnog otkaza.

Za uspešnu savremenih sistema nadzora potrebno je kao prvo pažljivo proceniti njegovu cenu. Osim toga od ogromne važnosti je definisati nivoe odgovornosti svakog od učesnika projekta: ko će analizirati podatke i na bazi toga formulisati dijagnostičke zaključke. Trošenje ogromnih novčanih sredstava da bi na kraju ostali zatrpani gigabajtima podataka koje niko neće / ne zna da analizira je trošenje vremena i novca koje nema nikakvog smisla niti opravdanja.

Daljinski nadzor mašina ima široku primenu u svim granama industrije zbog svojih dokazanih prednosti. Sa sve intenzivnijim trendovima globalizacije i udruživanjem u velike multinacionalne kompanije daljinski nadzor predstavlja efikasan način za optimizaciju njihovog poslovanja. Sistem daljinskog nadzora mašina se sastoji od tri glavne celine: udaljene mašine čije se stanje prati, komunikacionog kanala i centralizovane lokacije gde se podaci smeštaju i analiziraju. Iako se pod pojmom daljinski nadzora mašina najčešće podrazumeva on-line sistem nadzora, daljinski nadzor je moguće izvesti i korišćenjem prenosivih analizatora vibracija pomoću kojih operateri prikupljaju podatke sa mašine i iste prosleđuju na udaljeni server.

4.6.5 On-line i off-line dijagnostika

S obzirom na uticaj dijagnostičkih kontrola na normalan rad pogona, postoji [1]:

- on-line dijagnostika, koja se provodi kada je tehnički sistem u pogonu, može biti neprekidna i povremena dijagnostika, i
- off-line dijagnostika, koja se provodi kada tehnički sistem nije u pogonu, može biti samo povremena.

Osnovna karakteristika off-line dijagnostike je potreba za određenim zahvatima i adaptacijama na tehničkom sistemu, pa čak i demontažom tehničkog sistema iz pogona što nužno znači kraće ili duže zaustavljanje pogona. Za razliku od off-line dijagnostike on-line dijagnostika se provodi bez zaustavljanja pogona.

Iako i jedna i druga dijagnostika imaju svoje prednosti i nedostatke za praksu je svakako prihvatljivija on-line dijagnostika. Pošto se ne prekida normalan rad pogona, moguća je češća primena on-line dijagnostike, pa čak i neprekidno praćenje određenih parametara koji ukazuju na mogući otkaz, što omogućava raniju detekciju otkaza. On-line dijagnostika takođe omogućava i daljinsko praćenje stanja (daljinsku dijagnostiku) tehničkog sistema (npr. analizom spektra struje statora asinhronog motora, koju nije problem preneti na daljinu, može se doneti zaključak o stanju kaveza rotora). Danas je tendencija korišćenja on-line metoda dijagnostike, tj. metoda dijagnostike koje ne zahtevaju zaustavljanje pogona.

4.6.6 Neprekidna i povremena dijagnostika

S obzirom na dužinu vremenskog intervala u kome se provode merenja i praćenja parametara tehničkih sistema, razlikuje se [98]:

- neprekidna (permanentna) dijagnostika, koja može biti samo on-line i
- povremena (periodična) dijagnostika, koja može biti i on-line i off-line.

a) Neprekidna dijagnostika

Ukoliko se merenja izvode neprekidno, bez vremenskih prekida na tehničkom sistemu, reč je o neprekidnoj dijagnostici. Ovakva dijagnostika se realizuje u onim slučajevima gde je potrebno brzo prepoznati promene na sistemu i pravovremeno reagovati, odnosno za posebno važne i složene mašine u eksploataciji.

Neprekidna dijagnostika se može definisati kao proces neprekidnog praćenja (stalnih kontrola ili nadgledanja) rada opreme u cilju osiguranja ispravnog funkcionisanja i detekcije nenormalnosti koje najavljuju nastupajući otkaz. Pogodna je za opremu kod koje nije moguće predvideti trend trošenja, gde povremena dijagnostika (povremene kontrole) nije poželjna i gde kritičnost otkaza zahteva stalnu pažnju nad procesom ili opremom. Na osnovu izabраниh dijagnostičkih parametara kontroliše se stanje najvažnijih sklopova tehničkog sistema u procesu eksploatacije, a pojave nedozvoljenog stanja se pri tome trenutno signaliziraju [98].

Neprekidna dijagnostika se provodi stalno pomoću dijagnostičkih uređaja, koji su direktno ugrađeni u sam tehnički sistem, i koji na osnovu izabраниh dijagnostičkih parametara kontrolišu stanje najvažnijih delova tehničkog sistema (mašine) za vreme njegovog rada (u procesu eksploatacije), pri čemu nije potrebno prekidati rad pogona. Nedostatak neprekidne dijagnostike je u potrebi za većim ulaganjima u dijagnostičke uređaje, pošto svaki deo tehničkog sistema mora da ima takve uređaje, što zahteva dodatna ulaganja. Treba računati da će se neprekidna dijagnostika sa povećanjem složenosti tehničkih sistema i porastom zahteva za sigurnošću njihovog funkcionisanja, u budućnosti još više primenjivati.

Ako je tehnički omogućen direktan i neprekidan pristup mernim tačkama, odnosno neprekidno ili veoma često merenje, nakon toga unos i obrada tih podataka odgovarajućim softverskim paketom, onda se govori o [98]:

- neprekidnoj dijagnostici (neprekidnom monitoringu stanja - continuous condition monitoring),
- on-line dijagnostici (on-line monitoringu stanja - on-line condition monitoring) ili
- dijagnostici u realnom vremenu (monitoringu stanja u realnom vremenu - real-time condition monitoring).

Prihvatanje i obrada podataka kod neprekidne dijagnostike moraju biti napravljeni u dovoljno čestim intervalima koji osiguravaju pouzdanu detekciju potencijalno opasnih promena stanja kako bi se mogle izbeći opasnosti po osoblje i opremu. Vreme u kome procesna jedinica korišćena za neprekidnu dijagnostiku mora biti u stanju da odgovori na promene zavisi od tipa praćene mašine, i taj tehnički zahtev može biti deo sekunde ili nekoliko sekundi. Kao donja, najstroža granica vremena odrade alarma u literaturi se pojavljuje vreme od 100 ms. Kod neprekidne dijagnostike mašina, prikupljanje podataka o mašini provodi se neprekidno, na automatizovan način i bez potrebe za ljudskom intervencijom. Sistem neprekidne dijagnostike može se sastojati od više podsistema, od kojih je svaki zadužen za automatizovano praćenje određenog podskupa fizičkih veličina mašine [98].

Razvoj mikroprocesorske tehnologije i na njoj zasnovanog digitalnog procesiranja signala, omogućio je izgradnju neprekidnih on-line sistema dijagnostike, koji vibracijske i ostale signale obrađuju praktično u realnom vremenu.

b) Povremena dijagnostika

Za održavanje tehničkih sistema najčešće nije neophodno neprekidno praćenje merenih vrednosti, već je dovoljno povremeno praćenje parametara stanja, pošto se oštećenja razvijaju postepeno tokom vremena.

Povremena dijagnostika se provodi nakon određenog vremena rada tehničkog sistema ili nakon propisanih izvršenih radova, pri čemu je, u određenim situacijama, tehnički sistem potrebno isključiti iz pogona. Nedostatak povremene dijagnostike je u potrebi za prekidom rada mašine u određenim situacijama, a prednost je u manjoj potrebi za ugrađenim dijagnostičkim uređajima i u mogućnosti primene boljih dijagnostičkih uređaja. Povremena dijagnostika se primenjuje na manje odgovornim mašinama u eksploataciji i to u posebnim vremenskim intervalima. Povremena dijagnostika predstavlja sada, a najverovatnije i u budućnosti, glavni oblik primene dijagnostike [98].

Jedina razlika između povremene on-line i neprekidne dijagnostike je u učestalosti, odnosno frekvenciji kojom se neka merenja izvode i upoređuju. Povremena on-line merenja uglavnom uključuju merenja globalnih vrednosti kojima se dodaju rezultati obrade frekvencijskog spektra s ciljem prepoznavanja nepredvidivih odstupanja, trendovi za predviđanje razvoja oštećenja, te procesne veličine za ocenu ukupnog stanja [98].

Neprekidna dijagnostika se preporučuje za primenu tamo gde se promene na mašini razvijaju brzo, ili tamo gde su interesantni delovi mašine nepristupačni ili im nije moguće sigurno pristupiti.

Povremena dijagnostika prenosivim uređajima je efikasna za primenu kada se promene na mašini događaju sporo i kada su delovi mašine lako dostupni.

Znači, dijagnostičke kontrole se mogu provoditi povremeno ili planski u zadatim terminima, a takođe postoji mogućnost da se dijagnostički uređaji instaliraju u postrojenje, čime se dobija neprekidno praćenje dijagnostičkih parametara. Za dijagnostičke uređaje koji obavljaju povremene ili planske kontrole uobičajen je naziv off-line uređaji, dok se za fiksno instalirane uređaje koji obavljaju neprekidno praćenje dijagnostičkih parametara koristi naziv on-line uređaji. Fiksno instalirani uređaji za praćenje dijagnostičkih parametara mogu se koristiti za neprekidnu ili povremenu dijagnostiku.

4.7 Teleautomatizacija tehničkih sistema u industriji

Pod teleautomatizacijom se podrazumeva nadzor i upravljanje (rukovanje) automatizovanim tehničkim sistemima i procesima u industriji sa velike udaljenosti.

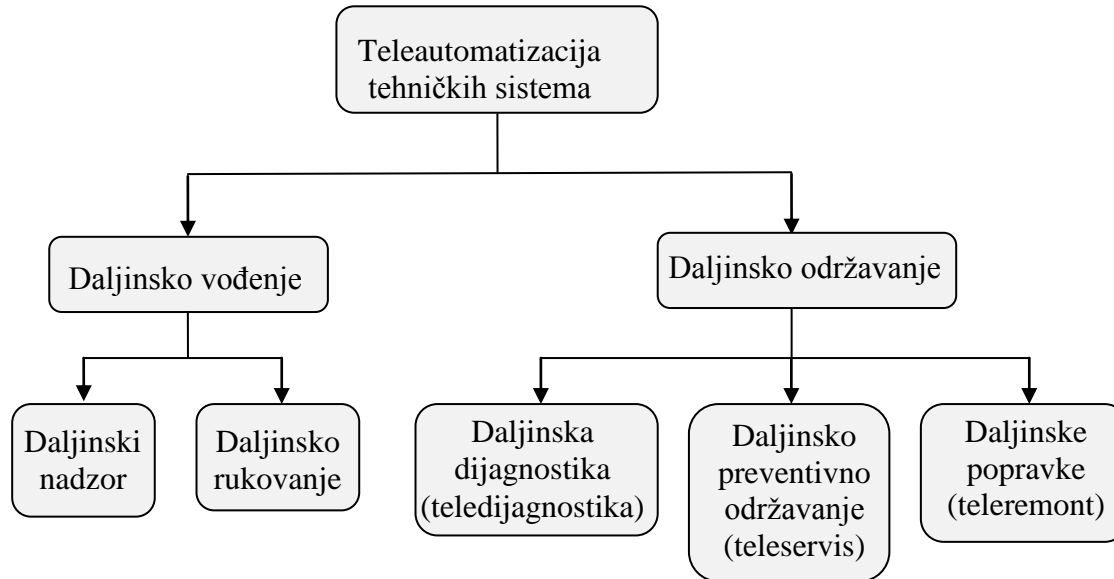
Teleautomatizacija omogućava daljinski pristup automatizovanim tehničkim sistemima u industriji. Pod daljinskim pristupom podrazumeva se pristup sa velike udaljenosti automatizovanim tehničkim sistemima u industriji pomoću postupaka za daljinski prenos podataka. Ukoliko se daljinski pristup realizuje uz pomoć web tehnologija onda je reč o teleautomatizaciji baziranoj na Internetu [1, 3, 12].

Teleatomatizacija tehničkih sistema u industriji nalazi svoju primenu u sistemima nadzora i upravljanja ili integracije u centralizovani nadzorno-upravljački sistem. Korisniku se na taj način omogućava praćenje svih smetnji i kategorizacija mogućih štetnih posledica. Svi relevantni podaci skladište se uobičajeno u bazi podataka. Naknadnom analizom tih podataka moguće je precizno utvrditi eventualne korelacije između pojedinih događaja i doneti zaključake o stanju tehničkog sistema, detekcija otkaza i njihovo brzo otklanjanje [12].

Teleautomatizacija tehničkih sistema u industriji, slika 4.10., obuhvata²⁵ [1, 3, 12]:

- daljinsko vođenje i
- daljinsko održavanje.

²⁵ Adamović, Ž., Ilić, B., Bursać, Ž., Vibrodijagnostičko održavanje mašina i postrojenja: Nova metodologija održavanja mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.



Slika 4.10. Oblasti teleautomatizacije tehničkih sistema [2]

4.7.1 Daljinsko vođenje

Pod daljinskim vođenjem podrazumeva se korišćenje računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija u cilju vođenja automatizovanih procesa u industriji sa velike udaljenosti [1, 2].

Daljinsko vođenje automatizovanih procesa obuhvata **daljinski nadzor** tehničkog sistema ne samo sa mesta odvijanja procesa, već takođe i preko mreže, npr vizuelizacijom procesa pomoću HMI (Human Machine Interface). Neprekidni nadzor automatizovanih procesa u industriji mora da prezentuje rezultate nadzora u preglednoj i izražajnoj formi, da generiše izveštaje u određenim vremenskim intervalima ili na osnovu pre definisanih događaja.

Takođe, daljinsko vođenje automatizovanih procesa obuhvata i **daljinsko rukovanje** (upravljanje) udaljenim automatizovanim procesima u industriji. Na ovaj način se aktivno učestvuje upravljanjem automatizovanim procesima, na primer postavljanjem novih zadatih vrednosti, promenom parametara sistema ili granica alarma itd. [1, 2].

4.7.2 Daljinsko održavanje

Pod daljinskim održavanjem podrazumeva se korišćenje računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija u cilju daljinskog prikupljanja informacija sa automatizovanih tehničkih sistema i procesa u industriji. Osnovni cilj daljinskog održavanja je smanjenje vremenski dugotrajnog i skupog angažovanja ljudstva na lokaciji gde je nastao otkaz [2].

Oprema koja se koristi u industrijskom okruženju, postala je sve složenija i specijalizovanija. Kao rezultat toga, potrebno je mnogo stručnog znanja ne samo vezano za proces, već i za samu opremu. Zahvaljujući Internetu, novim inteligentnim alatima za nadzor, kao i velikim brzinama industrijskih komunikacija na nivou fabrike i telekomunikacionim mrežama, proizvođači opreme danas mogu da prikupljaju i analiziraju podatke iz svih delova fabrike, imajući mogućnost za praćenje, čak i sa udaljenih, off-site lokacija. Prikupljanje, analiziranje i efikasno korišćenje statusa i operativnih informacija sa mašine mogu značajno smanjiti, pa čak i sprečiti neplanirane zastoje i omogućiti planiranje aktivnosti održavanja na osnovu realnih informacija. Sa pravim podacima dostupnim ekspertima, problem se često može daljinski rešiti. Shodno tome, vremena putovanja od strane servisera do korisnika mogu biti skraćena. Čak i ako je putovanje neizbežno, odgovarajući specijalista se šalje sa potrebnim delovima i alatima, jer je informacija sa opreme preuzeta unapred. Istovremeno, komunikacija između isporučioaca i korisnika je poboljšana. Osim toga, podaci prikupljeni od korisnika, problemi i rešenja mogu se koristiti za upravljanje budućim razvojem opreme. Na kraju, daljinsko održavanje stavlja isporučioaca opreme u poziciju da može da pruži dodatnu vrednost usluga [12].

Daljinsko održavanje obuhvata [1, 3]:

- daljinsku dijagnostiku (teledijagnostiku),
- daljinsko preventivno održavanje (teleservis) i
- daljinske velike popravke (telereмонт).

4.7.2.1 Daljinska dijagnostika (teledijagnostika)

Pojam „teledijagnostika” je izveden od reči „tele“ i „dijagnostika“. Reč „tele” je grčkog porekla i znači daleko (na daljinu), a reč „dijagnostika“ znači ocenu (praćenje) stanja, tako da teledijagnostika znači ocenu (praćenje) stanja udaljenih tehničkih sistema [1, 98].

Pod daljinskom dijagnostikom (teledijagnostikom) podrazumeva se deo tehničke dijagnostike koji koristi računare i druge savremene informaciono-komunikacione tehnologije u cilju daljinskog praćenja (utvrđivanja) stanja tehničkog sistema sa određenom tačnošću u određenom trenutku vremena. Ona se bavi svim aspektima tehničke komunikacije između prostorno udaljenih tehničkih sistema i odnosi se na tehniku prenošenja podataka na daljinu [1,3].

Daljinska dijagnostika predstavlja, već odavno, usvojen pristup u praćenju proizvodnih i radnih parametara u proizvodnim pogonima. Sistemi daljinske dijagnostike se projektuju tako da mogu da prate različite fizičke procese. Novine u ovom pristupu, zahvaljujući današnjem nivou tehnološkog razvoja, predstavljaju savremeni složeni sistemi nadzora projektovani tako da neprekidno prate proizvodne procese kontrolišući njihov rad, alarmirajući promene i vršeći arhiviranje merenih parametara u baze podataka. Ponekad se u ovakve sisteme integrišu upravljačke, dijagnostičke i zaštitne funkcije [1].

Daljinsko praćenje stanja mašine, u svojoj najjednostavnijoj formi, omogućava razmenu informacija između dva sistema koji su locirani na različitim geografskim lokacijama. Daljinsko praćenje parametara tehničkog sistema proizašlo je iz realne potrebe da omogući praćenje stanja tehničkih sistema koji su fizički udaljeni od mesta na kome je potrebno obezbediti informaciju [3].

Cilj teledijagnostike je da se sa geografski (fizički) udaljenog mesta prate dijagnostički parametri tehničkog sistema. Praćenje dijagnostičkih parametara na daljinu dozvoljava specijalisti proizvođača opreme i/ili korisniku pristup visoko tehničko-tehnološkim komponentama i sistemu. Daljinska dijagnostika se odnosi na sposobnost da se dijagnostikuje dati simptom ili problem sa distance. Umesto da serviser, koji vrši dijagnostiku, bude na licu mesta sa tehničkim sistemom, primenom daljinske dijagnostike serviser može biti fizički udaljen od tehničkog sistema. Razmena informacija se vrši žičnim ili bežičnim putem. U distribuiranim sistemima kao što su elektro distributivne mreže, industrijski cevovodi i drugi geografski udaljeni sistemi, često se javlja problem da fizički vod do njih nije raspoloživ. Premeštanje, odnosno polaganje kablova za prenos podataka nije ekonomski opravdano. U ovakvim slučajevima primenjuje se bežični prenos podataka²⁶ [98].

Najveće mogućnosti za povećanje ukupne efikasnosti primene sistema teledijagnostike leže u integraciji sa komunikacionim tehnologijama koje su dostupne ili koje se razvijaju. Mreža bežičnih senzora koja je povezana na lokalnu mrežu, a kojoj je pak moguće pristupiti preko Interneta omogućava potpunu automatizaciju u akviziciji, prenosu i memorisanju (skladištenju) podataka. Na taj način ovi podaci postaju dostupni odgovornom dijagnostičaru u bilo koje vreme pod uslovom da poseduje pristup Internetu. Dijagnostičar može da pristupi podacima sa aerodroma, kancelarije, kuće ili hotela i da analizira iste nakon čega šalje izveštaj sa ocenom stanja tehničkog sistema i predlogom eventualnih korektivnih aktivnosti održavanja [12].

Proces teledijagnostike (daljinskog praćenja dijagnostičkih parametara) tehničkih sistema se sastoji iz više faza, ito²⁷ [88]:

²⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Predlog originalnog modela teledijagnostike i daljinskog nadzora električnih automobila, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: Vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.

²⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Predlog originalnog modela teledijagnostike električnih automobila, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 4, Beograd, 2014, pp. 39-49.

- daljinskog neprekidnog praćenja izabраних dijagnostičkih parametara vitalnih komponenti tehničkih sistema,
- analize podataka u cilju uočavanja trenda (trendovanje),
- poređenja dobijenih vrednosti parametara sa poznatim ili očekivanim vrednostima,
- ranog upozorenja o mogućem nastanku otkaza,
- predikcije (predviđanja) momenta otkaza putem ekstrapolacije, nakon što se detektuje opadanje (degradacija) performansi,
- identifikacija uzroka otkaza i
- naručivanje delova i/ili planiranje aktivnosti održavanja kako bi se pravovremeno provele i tako da na vreme sprečio otkaz.

Sistem teledijagnostike (daljinskog praćenja stanja) tehničkih sistema mora da ispunjava sledeće kriterijume [88]:

- transparentnost (da pruži sliku kompletnog stanja sistema i da pravovremeno daje aktuelne informacije o stanju sistema),
- otvorenost (mogućnost integracije u druge sisteme, tj. sposobnost razmene informacija sa sistemima koji funkcionišu na drugim protokolima) i
- skalabilnost (mogućnost nadogradnje uz minimalne troškove, a da se pri tome očuva funkcionalnost sistema).

Primena daljinskog nadzora i upravljanja opremom u industriji gde su mašine raspostranjene na različitim geografski udaljenim lokacijama stvara velike mogućnosti za [12]:

- smanjenje obima putovanja na lokacije na kojima je potrebno snimiti i analizirati stanje mašina,
- brzu podršku u slučaju zastoja na udaljenom postrojenju (povećanje brzine odziva na identifikovani problem),
- automatizaciju postupaka donošenja pouzdanih zaključaka o stanju mašine iz centralizovane lokacije,
- smanjenje troškova održavanja,
- minimizacija vremena ispada sistema,
- efikasno iskorišćenje resursa itd.

Pri analizi stanja rotirajuće mašine na bazi merenja i analize vibracija, ocena trenutnog stanja mašine se najčešće vrši poređenjem sumarnog (skalar) iskaza vibracionog signala sa referentnom (alarmnom) vrednošću. Alarmne vrednosti se najčešće preuzimaju iz standarda koji nažalost najčešće nisu odgovarajući za posmatranu mašinu. Zbog toga je potrebno generisati alarmne vrednosti na bazi statističkih metoda nad setom snimljenih vrednosti koje odgovaraju mašini u poznatom stanju (najčešće nakon generalnog remonta). Za praktičnu primenu statističkih alata potreban je odgovarajući statistički uzorak koga je daleko brže i pouzdanije dobiti daljinskom neprekidnom dijagnostikom nego klasičnom lokalnom povremenom dijagnostikom. Teledijagnostika predstavlja ogroman iskorak napred u smislu mogućnosti kreiranja obimnih baza podataka (koje su još uvek nedostupne mnogim održavaocima) i preduslov stvaranja ozbiljnijih ekspertskih sistema [1].

Daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara našlo je svoju široku primenu u praksi, najpre u postrojenjima vodosnabdevanja, gasovoda, naftovoda, elektrana, elektrodistributivnih mreža, zatim kod uređaja energetske elektronike, telekomunikacionih sistema (npr. optičkih kablova), kod transportnih sistema (železničkog saobraćaja, autoindustrije) koji su po svojoj prirodi prostorno razdvojeni sistemi i medicini (medicinska teledijagnostika). Zahvaljujući primeni savremenih telekomunikacionih uređaja, obezbeđena je tačnost u prenosu informacija od udaljenih objekata do dispečerskog centra, prenos upravljačkih signala do izvršnih organa, kao i zapis svih praćenih parametara i izrada izveštaja [12].

4.7.2.2 Daljinsko preventivno održavanje (teleservis)

Daljinsko provođenje aktivnosti preventivnog održavanja ima za cilj da se zadato stanje tehničkog sistema što je moguće duže i opsežnije održi u tom stanju. Tipični zadaci daljinskog preventivnog održavanja su očitavanje lokalnih podataka i funkcije backup-ovanja [1, 3].

Teleservis (engl. teleservice) se može definisati kao razmena podataka na bazi daljinskog pristupa mestu održavanja, odnosno tehničkoj opremi (mašini, proizvodnoj liniji, računarima i sl.) u cilju detekcije otkaza, dijagnostike, održavanja, analize podataka i optimizacije [1, 3].

Teleservis je servis koji omogućava kontakt proizvođača opreme sa klijentima u vezi sa planiranjem, instalacijom i radom postrojenja, i to na jednostavan način, efikasno, brzo i sa bilo koje lokacije korišćenjem savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, u kombinaciji sa multimedijalnim alatima. Pri tome je preduslov značajno informaciono tehničko umrežavanje proizvođača opreme i korisnika [12].

Karakteristike teleservisa su [1, 3]:

- Geografska udaljenost između korisnika i proizvođača opreme, to znači da proizvođač opreme koji je prostorno udaljen od korisnika obezbeđuje uslugu.
- Korišćenje informacionih tehnologija potrebnih za obavljanje usluga u smislu obrade informacija, skladištenja i komunikacije.
- Industrijski servis, usluge su u oblasti industrijskih usluga (održavanja, dijagnostike, nadzora itd.).

Prednosti daljinskog održavanja su očigledne, kao što je efikasnija podrška proizvođača korisnicima opreme korišćenjem savremenih informacionih tehnologija u cilju neprekidnog nadzora rada opreme. Kao rezultat toga, proizvodne aktivnosti mogu biti integrisane i praćene u mnogim regionima i zemljama. Pored toga, informacije o produktivnosti, dijagnostika, kao i obuka za rad sa opremom mogu se deliti između različitih lokacija i partnera. Daljinski nadzor, dijagnostika i operacije koje omogućavaju isporučiocu ekspertske usluge da blagovremeno dobiju “zdravstveno stanje” opreme blagovremeno, mogu da skrate srednje vreme popravke i u velikoj meri da smanje troškove usluga na licu mesta [12].

Korišćenje teleservisa može se proširiti na različite aplikacije (puštanje u rad, daljinsko održavanje i nadzor, naručivanje rezervnih delova, praćenje stanja, kontrola procesa, optimizacija procesa, daljinsko programiranje, ažuriranje upravljačkog softvera itd.) [12].

4.7.2.3 Daljinske popravke (telereмонт)

U slučaju otkaza pomoću metoda daljinske popravke tehnički sistem se vraća u željeno stanje, tj. uspostavlja se normalan režim rada tehničkog sistema bez intervencije sa lica mesta ili se sprovođenjem odgovarajućih mera, odlaže vreme do popravke na mestu gde je nastao otkaz [1].

Pored update-ovanja sistema za određene podsisteme, kao što su npr. komunikacioni sistemi, regulatori itd., daljinske popravke obuhvataju i izradu pogodnih rutina za ponovno pokretanje postrojenja u slučaju ispada sistema, kao i algoritama u slučajevima havarijskog otkaza delova sistema [12].

4.8 Automatizovana dijagnostika

Pod automatizovanom dijagnostikom podrazumeva se deo tehničke dijagnostike u kome računar upravlja celokupnim dijagnostičkim procesom.

4.8.1 Automatizacija dijagnostičkog procesa

Da bi dijagnostički proces mogao uspešno da obavi postavljeni zadatak potrebno je da ispunjava zahteve u pogledu²⁸ [94]:

- pouzdanosti, što znači da signal koji se analizira mora da sadrži informacije iz kojih se pouzdano može dijagnostikovati otkaz,
- jednostavnosti, dijagnostički proces ne sme ometati normalan rad pogona niti zahtevati ugradnju dodatnih senzora ili mernih instrumenata na nedostupna mesta,
- cene, po mogućnosti za dijagnostičke parametre treba izabrati veličine koje se već koriste za zaštitu i upravljanje pogonom i
- mogućnosti automatizacije procesa bez potrebe za operaterom.

Dijagnostika nekog tehničkog sistema je veoma složen i zahtevan proces, koji se sastoji od više faza, koje se mogu manje ili više razlikovati u zavisnosti od konkretnog slučaja, kao što su²⁹ [84]:

- merenje i pretvaranje dijagnostičkih parametara,
- prenos podataka,
- prikupljanje podataka,
- obrada podataka,
- memorisanje (skladištenje) prikupljenih i obrađenih podataka,
- promena parametara posmatranog tehničkog sistema,
- donošenje dijagnostičkih odluka (zaključaka) i
- izrada izveštaja (protokola).

Da bi se dobila informacija o dijagnostičkom parametru (merenoj veličini) potrebno je u toku dijagnostičkog procesa izvršiti jedno ili više pretvaranja tog parametra. Način prikupljanja podataka o dijagnostičkom parametru važno je ispravno odabrati kako bi informacija o tom parametru nakon procesa prikupljanja bila što bliža stvarnoj. Obrada podataka je deo dijagnostičkog procesa, gde se informacija o dijagnostičkom parametru preračunava i/ili kombinuje sa drugim dijagnostičkim parametrima da bi se dobili željeni podaci o stanju sistema koji se posmatra. Takođe, skladištenje prikupljenih i obrađenih podataka spada u dijagnostički proces. Ponekad je potrebno promeniti dijagnostičke parametre posmatranog tehničkog sistema, kako bi se utvrdila zakonitost njihove promene u zavisnosti od promene stanja tog sistema. Postupak promene dijagnostičkih parametara posmatranog sistema tako postaje deo dijagnostičkog procesa. U dijagnostički proces spada i donošenje dijagnostičkih odluka i izrada izveštaja (protokola) [94].

Pojedine faze dijagnostičkog procesa često mogu biti vrlo složene, a za uspešnu dijagnostiku vrlo je važno da se sve faze kvalitetno provedu. Zbog toga je potrebno raditi na automatizaciji dijagnostičkog procesa. U slučaju potpuno automatizovanog dijagnostičkog procesa svim navedenim poslovima upravlja računar, a u slučaju da proces nije u potpunosti automatizovan, neke od tih poslova delimično ili u potpunosti obavlja čovek, kao što je to je vrlo često upravo ocena stanja tehničkog sistema i donošenje

²⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

²⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Blaženović, R., Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost: automatizovana dijagnostika postrojenja obnovljivih izvora energije, povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema automatizovanom dijagnostikom, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.

dijagnostičkih odluka na osnovu prikupljenih i obrađenih podataka ili upravljanje postupkom merenja. Upravljanje računarom je potrebno pre svega zbog automatizacije procesa prikupljanja i obrade podataka (izračunavanja karakterističnih veličina), promene parametara posmatranog sistema i izrade izveštaja (protokola)³⁰ [2,81,84,94].

U tipičnim dijagnostičkim kontrolama složenih tehničkih sistema, u pogonskim uslovima u kojima se meri puno veličina (npr. temperatura, vibracije, struja statora), ako se provode na klasičan način, mora učestvovati više ispitivača što zbog očitavanja instrumenata, što zbog upravljanja samim ispitivanjem. Ako dijagnostički proces obuhvata praćenje većeg broja dijagnostičkih parametara (mernih veličina) ili se jedan dijagnostički parametar (merna veličina) vrlo često prati (meri), način provođenja dijagnostičkog procesa može postati vrlo složen, a i vremenski može dugo trajati. Zbog toga je potrebno optimizirati sve postupke dijagnostičkih kontrola složenih tehničkih sistema kako bi sam postupak trajao što kraće. U takvim slučajevima provodi se automatizacija dijagnostičkog procesa, najviše zbog obrade podataka koja je vrlo složena, ako se radi na klasičan način. Složenost izvedbe automatizacije varira zavisno od vrste dijagnostičkih kontrola, broja dijagnostičkih (merenih) veličina, ali i od korišćenih instrumenata [81,84,94].

Delovi automatizovanog dijagnostičkog procesa su: senzori, komunikacioni sistemi, računar sa hardverom za memorisanje (skladištenje) podataka i softverskom podrškom za obradu podataka, oprema za automatizovano prikupljanje podataka i promenu dijagnostičkih parametara itd.

Pod automatizacijom dijagnostičkog procesa podrazumeva se računarom upravljani celokupni dijagnostički proces. Automatizacija dijagnostičkog procesa obuhvata niz postupaka i aktivnosti kojima se upravljanje dijagnostičkim procesom pojednostavljuje i vremenski skraćuje. Korišćenje računara olakšava dijagnostički proces zbog složenosti postupaka, kao i vrlo često velikog broja podataka i parametara koje treba uzeti u razmatranje. Tako automatizacija dijagnostičkog procesa omogućava tehničkim licima mnogo pogodnije provođenje dijagnostičkog procesa, a time i donošenje dijagnostičkih odluka. Zahvaljujući tome, dijagnostika sa računarskom podrškom postaje veoma aktuelna u savremenim industrijskim pogonima [94].

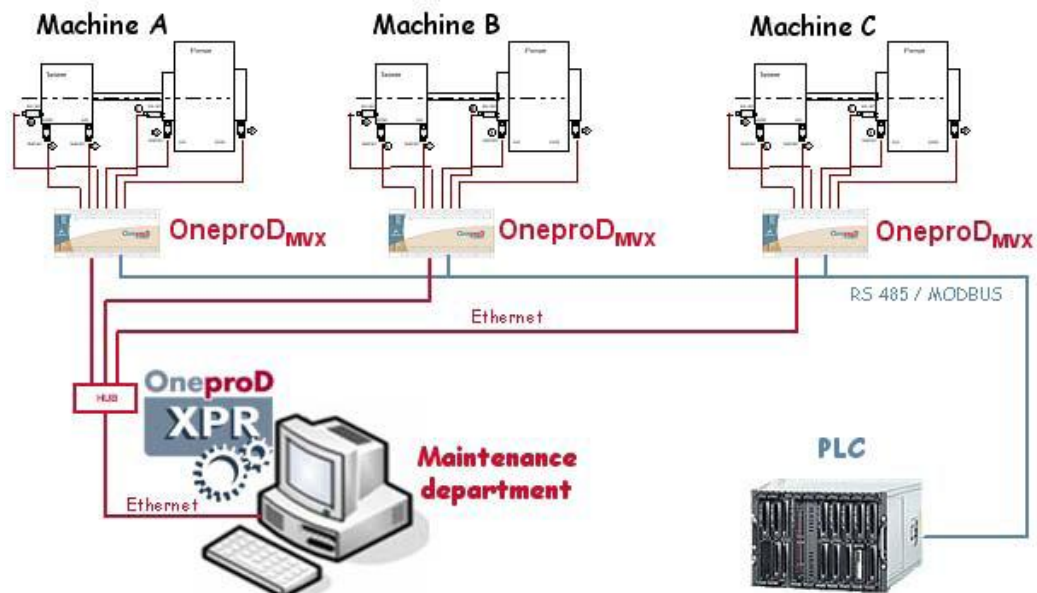
Primer računarom upravljanih dijagnostičkih procesa u industrijskom pogonu prikazan je na slici 4.11., gde je sistem lokalnog neprekidnog nadzora vibracija (u funkciji dijagnostike i u funkciji zaštite) više mašina realizovan pomoću OneproD MVX višekanalnog merno akvizicionog sistema podržanog OneproD XPR V3 ekspertskim dijagnostičkim softverom. Komunikacija OneproD MVX merno akvizicionog sistema sa kontrolnim računarom se ostvaruje preko Ethernet-a, a komunikacija OneproD MVX mernog sistema sa PLC-om se ostvaruje preko RS-485 interfejsa [3,143].

Automatizacija je po definiciji primena „automata” za provođenje nekog procesa. Reč automat je grčkog porekla i označava uređaj koji sam od sebe obavlja neki proces. Čovek nije potpuno isključen iz procesa, ali je njegova uloga svedena na najmanju moguću meru, tj. samo na pokretanje, nadzor i zaustavljanje procesa. Automatizacija, dakle, bitno pojednostavljuje određeni proces i oslobađa ljude od prevelike umešanosti u taj proces [3,94].

Dijagnostika složenih sistema zahteva primenu sofisticirane opreme i softvera za različite parametre, koje treba zapažati, definisati i objasniti. Sa snažnim razvojem računarski podržane merne tehnike pružile su se nove mogućnosti, kao što su [2]:

- digitalna obrada signala, koja izdvaja u milisekundama izražajna dijagnostička obeležja,
- pomoću multivarijantnih sistema za odlučivanje može se na osnovu više obeležja doći do generalnog zaključka,
- računari na kojima je instaliran dijagnostički softver mogu da prikupljaju, upoređuju i upravljaju velikim količinama podataka itd.

³⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, M., Savić, B., Automatizovani dijagnostički sistemi komunikacionih uređaja, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.



Slika 4.11. Računom upravljani dijagnostički proces u industrijskom pogonu - sistem lokalnog neprekidnog nadzora vibracija više mašina³¹ [3,143]

Ovaj napredak stvara mogućnosti za efikasnije praćenje i prognozu promene stanja, povezivanje računara u informacione sisteme (npr. Internet), prostorno razdvajanje tehničkog sistema koji se prati i eksperata koji u slučaju pojave greške ocenjuju njen značaj itd. [2].

Obučavanje dijagnostičkih modela sa više promenljivih zahteva obimna merenja na tehničkim sistemima različitog stanja ili računarsku simulaciju obeležja (parametara) za različita stanja. U cilju redukcije merenja može se uneti a priori znanje o uslovljenosti oštećenja tehničkog sistema koji se dijagnostikuje umetanjem pravila. Time se približava modelima sa veštačkom inteligencijom. Za ovaj postupak na raspolaganju su odgovarajući softveri. Kao dijagnostički modeli koriste se klasifikatori ili neuronske mreže za koje postoji veliki broj razvijenih softvera [1].

Teorija raspoznavanja stanja sistema u tehničkoj dijagnostici obično se koristi matematičkim aparatom, kao što su: statističke metode (npr. metoda Bajesa), metričke metode (npr. prostorne karakteristike), logičke metode (npr. dijagnostičke parametre i dijagnostičke krive) itd., da bi se definisalo i prepoznalo stanje tehničkog sistema [1].

Bajesova metoda koristi verovatnoću pojavljivanja određenog stanja, na osnovu čega se prave algoritmi i rešenja za model mašine. Danas postoje koncepti dijagnostike koji koriste teoriju skupova i topologiju. Pri tome se svaka mašina definiše hijerarhijskom strukturom, koja je nešto proširena u odnosu na teoriju pouzdanosti, i obuhvata: mašinu, sastavni deo mašine (zapreminski), površinu i liniju. Takođe se definišu i nivoi dijagnoze, od inteligentnog do primitivnog, kao što su: samoodržavanje (pristup koji će biti realizovan u "fabriци bez ljudi"), praćenje stanja mašine i njeno zaustavljanje kada parametri stanja dostignu predkritični nivo, indikacija delova "u otkazu", indikacija gubitka funkcije tehničkog sistema i signalizacija koja označava da se negde na mašini pojavio otkaz [1].

4.8.2 SCADA sistemi sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

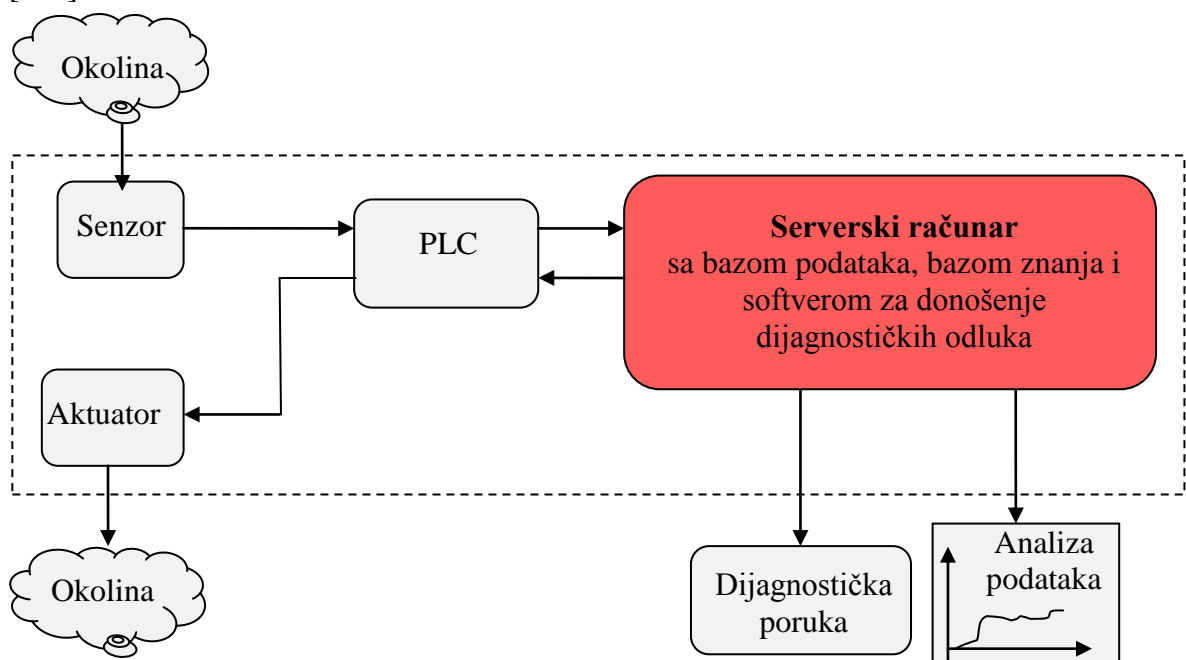
U novije vreme često se nadzor i upravljanje tehničkim sistemima vrše pomoću računara. Da bi se to uspešno realizovalo u pogone se ugrađuju različiti senzori, kao što su senzori: vibracija, temperature, brzine, položaja, napona, indukcije, fluksa i slično, čiji se signali koriste za nadzor i upravljanje. Tendencije razvoja savremene automatizovane dijagnostike usmerene su na to da se veličine i oprema koja se koriste za nadzor i upravljanje u SCADA sistemima, istovremeno koriste i u dijagnostičke svrhe, na taj način se izbegava potreba za ugradnjom novih senzora i druge dijagnostičke opreme. Savremeni sistemi

³¹ Ličen, H., Zuber, N., Proaktivno održavanje hidroturbinske opreme primenom 01db-Metravib OneproD koncepta, Tehnička dijagnostika, Vol. 7, No 1, Beograd, 2008. pp. 13-20.

neprekidne dijagnostike konstruisani su tako da se mogu povezivati sa SCADA sistemima i telefonskim centralama, čime su stvorene mogućnosti za daljinsko izveštavanje o defektima postrojenja, npr. putem SMS-poruka mobilne telefonije. Obavljaju se istraživanja i radi se na razvoju uređaja za automatizovanu dijagnostiku postrojenja i povezivanje sistema neprekidne dijagnostike sa softverskim paketima za kreiranje radnih naloga održavanja.

Pod SCADA sistemom se najčešće podrazumeva računarom vođen nadzorno-upravljački sistem, koji služi za nadzor i upravljanje celokupanim tehnološkim procesom u realnom vremenu sa velike udaljenosti. SCADA sistemi predstavljaju veoma moćnu hardversku i softversku konfiguraciju, koja ima širok spektar mogućnosti, kao što su: nadzor, upravljanje, akvizicija podataka, alarmiranje, vizuelizacija procesa, prikazivanje procesa u realnom vremenu (engl. real time-u), praćenje više procesa istovremeno sa jednog mesta itd. SCADA je skraćenica od Supervisory Control And Data Acquisition, što znači nadzor (praćenje parametara), upravljanje (podešavanje parametara) i akvizicija (prikupljanje) podataka³² [85].

U raznim oblastima industrije obavljaju se različiti tehnološki procesi (proizvodnja automobila, sokova, elektronskih uređaja, naftnih derivata, čelika, vode za piće itd.). Da bi se ti procesi realizovali neophodno je vršiti određeno upravljanje prijemnicima električne energije, odnosno vršiti njihovo uključivanje/isključivanje, regulaciju snage, regulaciju broja obrtaja itd. Algoritmi upravljanja su diktirani tehnološkim procesom. Određene operacije upravljanja treba da se izvrše kada se steknu određeni uslovi, npr.: kada protekne određeno vreme, kada procesna veličina (temperatura, nivo, pritisak itd.) dostigne određenu vrednost itd. Da bi se utvrdilo da li su stečeni ti uslovi potrebno je meriti određene veličine. Savremena rešenja upravljanja, na bazi merenja veličina iz tehnološkog procesa, koncipirana su tako da se za merenje koriste senzori koji pretvaraju neelektrične veličine u električne signale, sika 4.12. Ti električni (naponski ili strujni) signali se dovode na PLC-ove (Programabilne logičke kontrolere) u kojima se vrše određena poređenja i u kojima se može ostvariti upravljačka logika. Sa PLC-ova se zatim izdaju upravljačke akcije ka aktuatorima (uključenje/isključenje prijemnika ili podešavanje napona na prijemniku), ili im se zadaju referentne vrednosti veličina čiju regulaciju vrši lokalni regulator u aktuatoru³³ [162].



Slika 4.12. Princip rada SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

Periferijske računarske jedinice (PLC-ove) na koje su povezani senzori i aktuatori iz tehnološkog procesa komuniciraju sa centralnim (serverskim) nadzornim računarom. Sa jedne strane komunikacione mreže priključen je centralni računar, a sa druge strane PLC-ovi. Centralni računar ima ulogu prikupljanja i

³² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Ašonja, A., Automatizovani dijagnostički sistemi gasovoda, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

³³ Radaković, Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademski misao, Beograd, 2008.

prikaza informacija na jednom mestu, njihovog arhiviranja i zadavanja instrukcija PLC-ovima. Prenos informacija u jednom i drugom smeru između centralnog računara i PLC-ova se vrši računarskim komunikacionim putem, dok je veza između PLC-ova i senzora i aktuatora najčešće klasična električna veza. Instrukcije koje se od centralnog računara prenose ka PLC-ovima su često komande za obavljanje određene kompleksnije operacije. Na osnovu primljene komande da obave neku operaciju ili da ostvare zadatu vrednost neke procesne veličine, PLC-ovi sprovedu niz pojedinačnih komandi ka aktuatorima, kontrolišući preko senzora odvijanje operacije. Komande od centralnog računara ka PLC-ovima se mogu generisati automatski, na bazi algoritma i programa koji se izvršava na centralnom računaru, ali je češći slučaj da njih zadaje operater sistema, preko alfanumeričke tastature, a na bazi informacija prikupljenih iz procesa (preko PLC-ova) prikazanih na centralnom računaru SCADA sistema. Pored navedenog centralni računar u SCADA sistemima sa mogućnošću automatizovane dijagnostike ima ulogu obrade podataka u svrhu dijagnostike, kao i donošenja dijagnostičkih odluka primenom metoda veštačke inteligencije.

Kod nadzorno-upravljačkih sistema koji rade u realnom vremenu vreme koje je potrebno za očitavanje, obradu podataka i generisanje upravljačkih signala zanemarljivo je kratko u odnosu na vreme potrebno da dođe do značajnije promene veličina koje se nadziru ili upravljaju. To znači da sistem može da reaguje pod svim radnim uslovima pravilno i pravovremeno na sve događaje koji nastupe. Prikupljanje podataka se može vršiti u određenim vremenskim intervalima, ali može biti i inicirano nekim događajem, npr. promenom nekog od parametara izvan zadatih granica. Podaci se prvo privremeno smeštaju na sistem (karticu) za akviziciju podataka DAS i tek onda se prenose radi izračunavanja na računar.

Komunikacionu mrežu čine ruteri i svičevi, kao i kablovski sistemi sastavljeni od optičkih i/ili bakarnih kablova, odnosno radio veza (satelitskih/zemaljskih). Optički kablovi su idealni za realizaciju SCADA mreže, jer obezbeđuju potpunu zaštitu od elektromagnetnih zračenja koja mogu dovesti do prenosa pogrešnih informacija. Savremeni SCADA sistemi su zasnovani na otvorenim standardima i većina proizvođača je usvojila TCP/IP protokol i Ethernet tehnologiju. Kod serijske komunikacije najčešće se koriste protokoli Profibus, Modbus ili slični, mada se u poslednje vreme sve više koristi TCP/IP, prvenstveno zbog ekspanzije Interneta. Moderni SCADA sistemi kombinuju različite komunikacione medijume i topologije u cilju formiranja snažnog u informatičkom pogledu SCADA sistema.

Uvođenjem SCADA sistema za praćenje tehnološkog procesa snižavaju se troškovi rada tehnološkog procesa i povećava se sigurnost rada. Kada se SCADA sistem jednom uvede u tehnološki proces, on omogućava nadgradnju mnogih dodatnih funkcija, dalji razvoj i unapređenje. Iako cena komercijalnih SCADA sistema više ne predstavlja veliki finansijski izdatak, nije smisleno provođenje i osavremenjavanje manje zahtevnih tehnoloških procesa.

SCADA sistemi imaju veoma veliku primenu u različitim oblastima, svuda gde je neophodno nadgledati i upravljati velikim skupom procesa. Primeri primene su u elektroenergetskim sistemima, vodoprivredi, industriji, rudarstvu, saobraćaju itd. Mogu se upotrebiti od npr. jednostavnog nadzora temperature, vlažnosti vazduha, pritiska, do npr. veoma kompleksnog nadzora i upravljanja proizvodnim procesima u fabrikama ili saobraćajem na železnici [85].

4.8.2.1 Elementi SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

SCADA sistemi sa mogućnostima automatizovane dijagnostike obuhvataju širok spektar opreme, podsistema i tehničkih rešenja koji omogućavaju prikupljanje i obradu podataka o procesima (udaljenim sistemima) i reagovanje na adekvatan način. Upravljanje procesima, u opštem slučaju, može biti automatsko ili inicirano od strane operatera. Pored nadzora u funkciji zaštite vrši se i nadzor u funkciji dijagnostike.

SCADA sistemi sa mogućnostima automatizovane dijagnostike pripadaju klasi složenih hijerarhijskih sistema koji se sastoje od više funkcionalno povezanih celina, kao što su³⁴ [142]:

- merna oprema i izvršni organi (senzori i aktuatori),

³⁴ Mercurio, A., Di Giorgio, A., Cioci, P., Open-Source Implementation of Monitoring and Controlling Services for EMS/SCADA Systems by Means of Web Services— IEC 61850 and IEC 61970 Standards, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No 3, 2009, pp. 1148-1153.

- udaljeni U/I moduli,
- udaljene stanice,
- sistem za komunikaciju i
- centralna stanica.

1. Merna oprema i izvršni organi (senzori i aktuatori)

Merna oprema i izvršni organi (senzori i aktuatori) obuhvataju skup opreme instalirane na tehnološkom procesu koji SCADA sistem nadgleda i kojim upravlja. Merna oprema obuhvata različite senzore koji fizičke veličine (silu, temperaturu, relativnu vlažnost, dužinu, broj obrtaja, brzinu, nivo, intenzitet svetlosti i dr.) pretvaraju u električne veličine. Pomoću njih se dobijaju informacije o funkcionisanju procesa, na osnovu kojih se može uticati na poboljšanje proizvodnog procesa. Kao takav, senzor predstavlja jedan deo veze između fizičkog sveta i električnih uređaja. Drugi deo ove veze predstavljaju aktuatori (eng. actuators), koji pretvaraju električni signal u fizičku pojavu. Aktuatori (izvršni organi) su uređaji koji provode odgovarajuće korekcije i upravljačke akcije. Ulazne fizičke veličine mogu da budu sila, temperatura, dužina, brzina, nivo pH, intenzitet svetlosti itd. Izlazni signali mogu da upravljaju ventilima, relejima, svetiljkama, zvučnim sirenama, motorima itd.

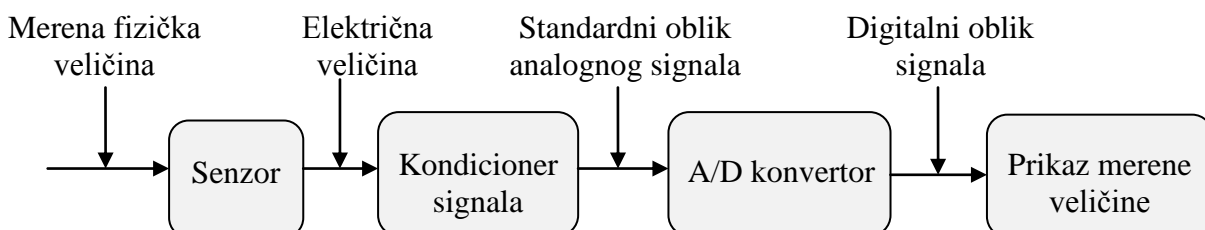
a) Senzori

U stručnoj literaturi postoje različita tumačenja senzora, tako se za jedan isti uređaj mogu naći različiti nazivi kao što su: senzor, senzorski sistem, pretvarač (davač), merni pretvarač, transmiter itd. Iako se često koriste kao sinonimi, ovi pojmovi ipak imaju različito značenje.

Senzor (engl. sensor) je uređaj koji pretvara fizičku veličinu od interesa (merenu veličinu) najčešće neelektričnu (temperaturu, pritisak, vibracije, nivo tečnosti, protok fluida, silu, relativnu vlažnost, dužinu, broj obrtaja, brzinu, ubrzanje, intenzitet svetlosti, pomeraj, vibracije, struju itd.) u električni signal (napon, struju, promenu otpora (npr. temperaturu u promenu otpora) itd.) pogodan za prenos i dalju obradu, odnosno pretvara bilo koji oblik energije u električnu energiju.

Često se pod uticajem merene veličine menja neka električna veličina senzora (napon, struja, napelektisanje, otpornost ili kapacitivnost), koja se na različite načine pomoću mernih kola pretvara u električni signal, odnosno napon ili struju, čija je vrednost proporcionalna merenoj veličini. Tipičan primer je otporni senzor temperature, gde se na izlazu mernog mosta dobija napon proporcionalan merenoj temperaturi. Senzor ne bi trebao da bude osetljiv na spoljašnje uticaje iz okruženju (temperaturu, vlažnost, vibracije, elektromagnetno zračenje itd.), niti bi on trebao da ima bilo kakav uticaj na merenu veličinu, što je u praksi teško ostvarivo.

Bitno je napomenuti da senzori ne funkcionišu samostalno, već su uvek deo većeg sistema (senzorskog sistema) koji se može sastojati od jednog ili više senzora, kondicionera signala, A/D konvertora, mikroprocesora, memorijskih kola i sl., slika 4.13. Senzori se često nazivaju i primarnim elementima, jer se prilikom merenja veličine kojom je potrebno upravljati nalaze na prvom mestu u merno-upravljačkom lancu. Senzori ostvaruju vezu između realnog sveta sa jedne i električnih uređaja sa druge strane, pretvarajući fizičke fenomene iz realnog sveta u električne signale koje zatim prihvata kondicionir signala, a potom i A/D konvertor.



Slika 4.13. Blok dijagram tipičnog savremenog senzorskog sistema

Kondicioneri signala. - Izlazni opseg pune skale senzora može biti naponski ili strujni signal male amplitude, mala promena otpornosti, impuls promenljive širine ili veličine, naizmenični signal promenljive frekvencije ili faze. S druge strane, ulazni opsezi sistema za upravljanje nekim procesom, kao i ulazi A/D

konvertora uglavnom su standardni (npr. 0-5 V). Zbog toga je radi bilo kakve dalje analogne ili digitalne obrade, potrebno izvršiti odgovarajuće operacije nad signalom koji dolazi sa senzora. Znači, usled dejstva merene veličine senzor daje električni signal koji je često potrebno pretvoriti u oblik koji je prihvatljiv od strane A/D konvertora koji konvertuje primljeni signal u željeni digitalni format. U tu svrhu razvijena je čitava klasa elektronskih sklopova koji se nazivaju kondicioneri signala. Kondicioneri signala prihvataju električni signal sa senzora iz tehnološkog procesa i pretvaraju ga u standardni signal koji može biti analogni naponski signal od 0-5 V, analogni strujni od 4-20 mA (ili od 0-20 mA), pogodan za sistem (karticu) za akviziciju podataka DAS (A/D konvertor), industrijski računar, PLC ili neki drugi merni sistem. Elektronska komponenta koja se najčešće koristi za izgradnju kondicionera signala je operacioni pojačavač. Kondicioneri signala (engl. signal conditioning) obavljaju sledeće funkcije: pojačanje ili slabljenje signala, pomeranje naponskih nivoa, električnu (galvansku) izolaciju između senzora i mernog sistema (čime se vrši eliminacija struja izjednačenja potencijala različitih uzemljenja), linearizaciju, filtriranje, strujno ili naponsko pobuđivanje senzora (neki od senzora za korektan rad zahtevaju strujne ili naponske pobudne signale), različite vrste kompenzacije (npr. ofseta), baferovanje - uzorkovanje i zadržavanje (sample and hold), prigušenje (engl. damping), pretvaranje signala u standardni oblik itd. Npr., ako se signal sa senzora menja toliko brzo da ga A/D konvertor ne može obrađivati potreban je prilagodni stepen koji vrši uzorkovanje i zadržavanje (sample and hold) mernog signala dok se konverzija ne završi. Ili npr. ako senzor daje promene napona 0,025 mV, a A/D konvertor može da prepozna promene napona od 2,44 mV potrebno je izvršiti prilagođavanje pojačanjem $100\times$ da bi merni signal bio u opsegu osetljivosti A/D konvertora.

A/D konvertor. - Nakon kondicionera sledi A/D (analogno-digitalni) konvertor koji vrši konverziju analognih u digitalne signale za potrebe dalje obrade (procesiranja), analize i memorisanja od strane računara i preduzimanja povratno-upravljačkih akcija. Računar razume samo digitalne signale te se stoga koriste A/D konvertori za konverziju analognih u digitalne signale. Tako dobijeni digitalni signal može se obrađivati na mikrokontroleru, prikazivati na displeju ili koristiti za dalje upravljanje nekim procesom. Znači, akvizicija podataka se obično bavi konverzijom analognih u digitalne signale, koji su pogodni za dalju obradu. Nakon akvizicije podataka isti se kontrolišu sa drugim podacima, filtriraju, redukuju sa ciljem da se iz njih izvuče tražena informacija. Podaci se mogu dalje analizirati, vizuelno prikazivati na raznim tipovima displeja ili na osnovu njih iscrtavati željeni dijagrami. Informacije o parametrima tehnološkog procesa kao što su temperatura, struja, napon, pritisak, brzina itd., se prikupljaju, obrađuju, prikazuju i shodno njima preduzimaju akcije.

Kabliranje se odnosi na fizičko povezivanje senzora sa kondicionerom signala i/ili A/D konvertorom. Kada je kondicioner signala i/ili A/D konvertor udaljen od računara tada se kabliranjem ostvaruje fizička veza između njih i host-a. Kabliranje je po dimenzijama najveća fizička komponenta, i podložna je efektima spoljašnjeg šuma, a posebno uticaju smetnji od industrijskih postrojenja. Standardni komunikacioni interfejsi računara su: paralelni port i serijski interfejs RS-232 i RS-485.

Senzori mogu biti digitalni i analogni. U slučaju digitalnih senzora, digitalna informacija o merenoj veličini se obično prenosi do mikroprocesorskog sistema u čijem jezgru su mikrokontroler ili DSP procesor. Mikroprocesorski sistem dalje šalje informacije ka računaru gde se podaci obrađuju, skladište i prezentuju. U slučaju analognih senzora, merno-akvizicioni lanac je praktično identičan. Razlika je što mikroprocesorski sistem sadrži i A/D konvertor ili se upotrebljavaju mikrokontroleri ili DSP procesori sa integrisanim A/D konvertorom. A/D konvertor je neophodan za pretvaranje analognog signala senzora u digitalni oblik.

Ulazak mikroprocesorske tehnologije u proizvodnju senzora omogućio je veću funkcionalnost, kao što je mogućnost ugradnje inteligentne i digitalne komunikacije u senzore. Tradicionalno, izlazi iz senzora su analogni signali, a njihovo pretvaranje u digitalni oblik je donelo bitne prednosti za korisnike. Npr. digitalni senzori su mnogo otporniji na električne šumove i mogu znatno da uproste svoje šeme povezivanja.

d) Aktuatori (actuators)

Aktuatori (actuators) su uređaji koji generišu akciju (npr. pomeraj) na račun energije koja im se dovede na ulaz. Oni pretvaraju električne ili fluidne ulaze u mehaničke izlaze, kao što su položaj, sila, ugao

ili moment, čime ostvaruju povratni uticaj na proces. Aktiviranje aktuatora se ostvaruje standardnim strujnim (4-20 mA) ili naponskim signalom (0-10 V, 24 V). Aktuatori se sastoje od mehaničkog uređaja (ventila, klapni itd.) kojim se menja izvršna veličina i pogonskog uređaja (solenoida, servomotora-električnog, pneumatskog ili hidrauličkog). Postoje:

- elektromehanički aktuatori, kao što su: DC motori, AC motori, koračni motori, linearni motori, elektromagneti, tranzistorska i tiristorska pojačala itd.;
- aktuatori koji koriste snagu fluida, kao što su: hidraulički (ventili, pumpe, motori itd.) i pneumatski (regulacijski ventili, zasuni, motori i sl.) itd.;
- alternativni aktuatori, kao što su: inteligentni, mikroaktuatori (piezoelektrični, magnetostriktivni, elektrohemijski, termalni, memorijskometalni i sl.) itd.

2. Udaljeni U/I (ulazno/izlazni) moduli

Udaljeni U/I (ulazno/izlazni) moduli su instalirani na pojedinačnim elementima opreme i predstavljaju vezu između perifernih elemenata i računarskog sistema, koja se ostvaruje odgovarajućim sistemom komunikacija.

3. Udaljene stanice

Udaljene stanice su nezavisni mikroprocesorski uređaji koji obezbeđuju komunikaciju između merne opreme i aktuatora sa jedne strane i centralne stanice sa druge strane. Podaci sa merne opreme se prenose ka centralnoj stanici, a iz centralne stanice se prenose upravljačke komande ka aktuatorima. Udaljena stanica nadzire i stanje procesne opreme i signalizira odgovarajuće alarme. Udaljene stanice su obično programabilni logički kontroleri PLC-ovi, koji poseduju aplikativni softver, mikroprocesor i komponente za kontrolu aktiviranja nekog uređaja. PLC-ovi su specijalizovani računari čiji operativni sistem omogućava da se jednostavno i u realnom vremenu obavi akvizicija velikog broja podataka, njihova osnovna obrada i prenos rezultata obrade na aktuator [5].

4. Sistem za komunikaciju

Sistem za komunikaciju obezbeđuje prenos informacija između udaljenih stanica i centralne stanice. Komunikacija između udaljenih stanica i centralne stanice, kao i između samih centralnih stanica, odvija se preko komunikacionog medijuma u zavisnosti od mogućnosti i zahteva korisnika.

5. Centralna stanica

Centralna stanica ima važnu ulogu u sistemima daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA sistemima). SCADA sistemi mogu da budu veoma razučeni (i prostorno i u pogledu broja PLC-ova koje obuhvataju), tako da je neophodno postojanje jednog mesta sa koga se čitav proces može nadgledati i njime upravljati. Potrebno je, dakle, nadgledanje parametara procesa i preduzimanje određenih operacija - zadavanje komandi ili parametara pojedinim PLC-ovima.

Centralna stanica predstavlja centralno mesto SCADA sistema, koje je obično opremljeno snažnim centralnim (serverskim) računarom (sa udvojenom računarskom konfiguracijom - radnim i rezervnim računarom) na kome se realizuje nadzor (u funkciji zaštite i u funkciji dijagnostike) i upravljanje procesom. Centralna stanica je opremljena i nizom korisničkih računara preko kojih se podaci prate i eventualno menjaju ili sinoptik tablom (velikom preglednom tablom na kojoj se prikazuju najvažniji parametri procesa).

Na centralnom računaru SCADA sistema instaliran je SCADA softver. SCADA softver vrši vizuelizaciju podataka u oblik koji je pogodan za rad operatera i ako je potrebno šalje upravljačke zadatke aktuatorima (izvršnim organima) koji ih izvršavaju i utiču na rad sistema. Kod manjih sistema celokupan SCADA softver se nalazi na jednom računaru, dok kod većih sistema može da se nalazi na više računara. SCADA softver najčešće podatke o sistemu prezentuje grafički. To znači da operater može videti šematsku prezentaciju fabrike i sistemske veličine kao što su nivo, struja motora, protok i slično.

Serverski računar predstavlja centralno mesto gde se vrši memorisanje podataka (arhiviranje parametara procesa i izdatih komandi). Na centralnom (serverskom) računaru se nalazi komunikacioni

softver, softver za baze podataka i baze znanja, aplikativni i softver za vizuelizaciju tj. za grafičko prikazivanje podataka o procesu. Na centralnom računaru se može izvršiti i softver “ekspertskeg sistema” (izvršavanje kompleksnih optimizacionih i sličnih algoritama, prikazivanje njihovih izvršenja ili čak direktno slanje komandi ili parametara prema PLC-ovima). Serverski računari su podržani aplikacijom tipa MMI (engl. Man Machine Interface) koja omogućava interaktivan dijalog operatera sa računarom za konkretan sistem nadzora i upravljanja.

Osnovu za donošenje odluka i upravljanje na ovom nivou čine podaci koji se prikupljaju sa udaljenih stanica i to periodično, inicirano određenim događajima ili na zahtev operatera. Svi podaci se čuvaju u bazi podataka odakle se radi njihova prezentacija i generisanje upravljačkih akcija. Na centralnom računaru se definišu i prenose referentni signali, zadaju se recepture, sinhronizuju funkcije pojedinih podsistema, određuju reakcije na pojedine alarme, optimiziraju algoritmi itd. Jedna od osnovnih karakteristika SCADA sistema je centralizacija najprioritetnijih funkcija na nadzorno upravljačkoj jedinici. Naime, programska podrška u udaljenim stanicama osigurava akviziciju podataka i lokalno upravljanje procesom do nivoa koji se zadaje sa centralne stanice, ali se iniciranje svih kontrolnih funkcija i krajnja verifikacija njihovog izvršenja vrši u centralnoj stanici³⁵ [67].

Na centralnom računaru SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike pored navedenog nalazi se baza znanja i softver za donošenje dijagnostičkih odluka (baziran na primeni metoda veštačke inteligencije, kao što su espertske sistemi, sistemi fazi logike, neuronske mreže itd.), koji daje dijagnostičke poruke o aktivnostima održavanja koje je potrebno preduzeti na kontrolisanom tehničkom sistemu.

SCADA softver predstavlja moćan alat za vizuelizaciju proizvodnih procesa. SCADA softver vrši osnovne funkcije upravljanja, nadzora i akvizicije podataka kao i dodatne funkcije (npr. komunikacije, generisanja izveštaja, štampanja i dr.). SCADA softver radi u okruženju nekog od standardnih operativnih sistema (Windows, NTa ili Unix-a). Izuzetno je pogodno ako je softver projektovan tako da omogućiti direktnu razmenu podataka između SCADA softvera i drugih standardnih aplikacija tipa Excell, Access i slično. Na ovaj način se zapravo proširuju mogućnosti SCADA softvera, tako što se za prikaz i obradu podataka koristi ona vrsta programa koja je profesionalno razvijena i najbolje odgovara željenoj vrsti primene. Operateri mogu da kreiraju detaljne izveštaje u listama, npr. u Excel-u, koji sadrže dobijene i izračunate real-time i historical podatke. SCADA sadrži i set funkcija za programske jezike C, C++, Visual C++ i Visual BASIC, koje omogućavaju pristup čitanju i upisivanju podataka u bilo koji segment sistema. SCADA sistemi podržavaju funkcije koje omogućavaju operaterima da pristupe podacima pomoću standardnih industrijskih protokola za razmenu podataka kao što su DDE i ODBC SQL³⁶ [55].

Danas veliki broj proizvođača razvija SCADA softver, ali svi oni imaju u osnovi istu arhitekturu. Na slici 4.14. je prikazana arhitektura SCADA softvera, odnosno podsistemi SCADA softvera i njihovi međusobni odnosi³⁷ [195].

Kao što se vidi sa slike 4.15. SCADA softver se sastoji od više podsistema, kao što su:

1. Podsystem za definisanje ulaznih i izlaznih veličina. - Kada je specificiran ceo sistem, razvoj SCADA softvera počinje kreiranjem baze podataka fizičkih veličina koje se žele pratiti i obrađivati. Da bi se to ostvarilo neophodno je da se sastavi spisak svih ulazno/izlaznih veličina, da im se dodele simbolička imena i adrese u čvoru. Utvrđuju se tipovi signala (digitalni ili analogni), njihove granične vrednosti (gornja i donja), merne jedinice, brzina kojom treba da se skeniraju, da li da se promene njihovih vrednosti prikazuju grafički ili da se arhiviraju. Ulazne veličine predstavljaju vrednosti izmerenih fizičkih veličina iz procesa, a izlazne veličine vrednosti koje se šalju ka aktuatorima.

³⁵ Goble, W. M., Control Systems Safety Evolution and Reliability, 2009.

³⁶ Davidson, E. M., McArthur, S. D. J., McDonald, J. R., Cumming, T., Watt, I., Applying multi-agent system technology in practice: automated management and analysis of SCADA and digital fault recorder data, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No 2, 2006, pp. 559-567.

³⁷ Voskresenski, V., Daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, doktorska disertacija, Tehnički fakultet “Mihajlo Pupin” Zrenjanin, 2011.

2. Podsystem za alarme. – Ovaj podsystem služi za definisanje i prikazivanje alarmnih stanja tokom tehnološkog procesa. Alarmna stanja mogu predstavljati nedozvoljenu ili kritičnu vrednost veličine, kao i nedozvoljenu akciju ili komandu operatera. Razlikuju se dve osnovne vrste alarma: korisnički definisani i sistemski. Prvi se definišu radi prikazivanja stanja procesa i procesnih podataka, dok je namena drugih prikazivanje nekih posebnih stanja samih uređaja (PLC-a ili HMI uređaja), koja su pre definisana.

3. Podsystem za prikaz grafike. – Ovaj podsystem služi za izradu grafičkog interfejsa i povezivanje sa veličinama. Uporedo sa definisanjem veličina koje čine bazu podataka, osmišljava se izgled grafičkih prikaza podataka pomoću kojih će se vršiti nadzor nad radom sistema. Grafika prikazuje stanje postrojenja u obliku koji je najpregledniji za operatera kako bi on mogao pravovremeno da reaguje na promenu stanja sistema. Pored prikaza stanja sistema grafički podsystem treba da omogući i izvršavanje neke akcije od strane operatera. U većini sistema omogućeno je pisanje makroa u VBA (Visual Basic for Application) programskom jeziku koji se odlikuje jednostavnom sintaksom.

4. Podsystem za prikaz trendova. – Ovaj podsystem služi za prikazivanje poslednje promene vrednosti veličina (trendova u realnom vremenu) i istorijata promene vrednosti veličina u toku dužeg vremenskog perioda (histograma). Dobro osmišljen podsystem za prikaz trendova omogućava i uporedni prikaz više veličina, kao i arhiviranje i štampanje dijagrama.

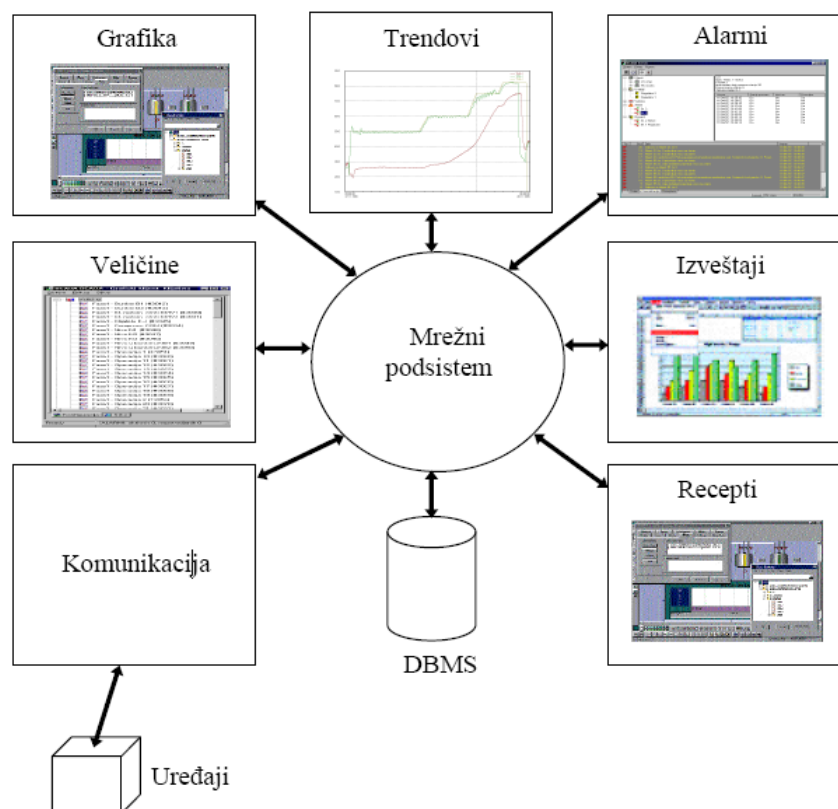
5. Podsystem za recepture. - Ovaj podsystem omogućava da se definišu parametri tehnološkog procesa ("recipe").

6. Podsystem za izveštaje. - Ovaj podsystem omogućava da se jedan deo podataka pamti i da se na osnovu njih formiraju različite vrste izveštaja (npr. generisanje batch report-a nakon završetka tehnološkog procesa).

7. Podsystem za događaje. - Ovaj podsystem omogućava matematičke ili logičke operacije nad podacima čija istinosa vrednost ukazuje na nastanak događaja. Kao rezultat detekcije događaja sistem izvršava odgovarajuću komandu. Ovaj podsystem određuje repertoar dozvoljenih operacija i komandi.

8. Podsystem za pristup bazama podataka. - Ovaj podsystem omogućava trajno čuvanje i pregled podataka u relacionim bazama podataka.

9. Mrežni podsystem. - Ovaj podsystem omogućava povezivanje ostalih podsystema SCADA softvera u jednu celinu.



Slika 4.14 Podsystemi SCADA softvera i njihovi međusobni odnosi [95]

Ovim se svakako ne iscrpljuju mogućnosti prikazivanja informacija pomoću SCADA sistema, ali je i ovo dovoljno da se sagleda koji su neophodni elementi svakog SCADA softvera. U osnovi, svi softveri ove vrste omogućavaju da se definišu promenljive u bazi.

4.8.2.2 Arhitektura SCADA sistema sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

Sistem daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA sistem) sa mogućnostima automatizovane dijagnostike može da obuhvata proces unutar jednog objekta, ili pak proces koji obuhvata šire područje, na primer distribuciju vode za piće. Arhitektura takvog SCADA sistema može biti veoma različita i zavisi od prostornog rasporeda tehnološkog procesa i zahteva tehnološkog procesa. Postoje različite arhitekture SCADA sistema, kao što su³⁸ [161]:

- centralizovani SCADA sistemi,
- distribuirani SCADA sistemi i
- WASCAD (engl. Wide Area SCADA) sistemi.

Centralizovani SCADA sistemi podrazumevaju skup mernih uređaja i opreme koji su direktno povezani sa centralnim računarom, koji prima i obrađuje informacije, radi nadzor i upravlja procesom. Klasični SCADA sistemi orijentisani su ka upravljanju automatizovanim industrijskim procesima pomoću sistema sa jednim računarom.

Distribuirani SCADA sistemi obuhvataju skup udaljenih stanica koje su lokalnom mrežom povezane sa upravljačkim centrom, odakle se realizuje nadzor i upravljanje procesima.

Složeniji SCADA sistemi (WASCAD sistemi) orijentisani su ka upravljanju geografski distribuiranim SCADA sistemima i sastoje se od nekoliko hijerarhijskih celina. WASCAD sistemi su orijentisani ka upravljanju kompleksnim poslovnim sistemima kod kojih je akcenat na hijerarhijskoj strukturi i superviziji procesa. Razmenom podataka između dva ili više nezavisnih SCADA sistema koji kontrolišu različite segmente istog tehnološkog procesa ili privrednog sistema, stiče se celovita slika o njegovom stanju.

4.8.3 Industrijske mreže u SCADA sistemima sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

Pod komunikacijom se podrazumeva razmena podataka između najmanje dva učesnika u komunikaciji, koji su međusobno povezani komunikacionim kanalom. Pod učesnicima u komunikaciji podrazumevaju se uređaji koji su sposobni da razmenjuju podatke, kao što su: PLC-ovi, centralni nadzorni računari, inteligentni senzori, aktuatori itd. Komunikacioni kanal predstavlja fizički put ili medijum kojim podaci putuju od pošiljaoca (uređaja za slanje podataka) do primaoca (uređaja za prijem podataka) u komunikacionoj mreži.

Kod komunikacionih mreža postoje dva bitna aspekta koja ih karakterišu:

- fizički elementi mreže, koji grade prenosni put za podatke (data transmission route), kao što su: komunikacioni provodnici, pojačavači (ripiteri), konektori itd., i
- protokoli (procedure), prema kojima se komunikacija odvija.

Prenos podataka kroz mrežu se odvija u skladu sa skupom dogovorenih pravila, koja se nazivaju protokoli, a ponekad i standardi (što nije ispravno). To je slično kao kod komunikacije među ljudima, gde se ta pravila nazivaju jezik. Mrežni protokol je dakle „jezik” kojim dva uređaja moraju međusobno da „razgovaraju” da bi razumeli jedan drugog. Protokol je skup pravila i standarda koji određuju način razmene podataka između hardverskih i softverskih komponenti u mreži. Da bi bilo koji uređaj bio priključen na mrežu on mora da “poznaje” dati protokol mreže. Primena protokola zavisi u velikoj meri od tipa mreže. Svaki mrežni protokol obično poseduje funkcije koje se kombinuju sa funkcijama ostalih

³⁸ Queiroz, C., Mahmood, A., Tari, Z., SCADA Sim—A Framework for Building SCADA Simulations, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No 4, 2011, pp. 589-597.

mrežnih protokola da bi komunikacija na mreži bila omogućena. Na primer TCP/IP je protokol za današnji Internet, kao i OSI model, zasnovan je na prenosu podataka po slojevima. Ethernet predstavlja najčešći protokol za umrežavanje³⁹ [56].

Komunikaciona mreža može biti sastavljena od više podmreža (engl. subnet) koje se mogu razlikovati po jednoj ili više osobina (brzini prenosa podataka, prenosnim medijumima, protokolima itd.). Za njihovo povezivanje u jedinstvenu mrežu koriste se posebni uređaji za prilagođavanje (konvertori).

Osnovni parametri komunikacionih mreža su⁴⁰ [162]:

- Bzina prenosa podataka, koja predstavlja broj prenetih bita u sekundi.
- Medijumi za prenos, su ustvari fizički prenosni putevi (optički kablovi, koaksijalni kablovi, kablovi sa upredenim i neupredenim paricama, etar (radio prenos) itd.).
- Udaljenost između učesnika u komunikaciji, koja može biti od nekoliko metara do nekoliko hiljada kilometara (maksimalna dužina komunikacione mreže je po pravilu određena usvojenim prenosnim medijumom i brzinom prenosa podataka).
- Broj učesnika u komunikaciji, koji može biti od minimalno dva do više hiljada (zavisi od tipa i karakteristika komunikacione mreže).
- Topologija mreže, je uobičajeni termin za strukturu prenosnog puta. Komunikacioni partneri su međusobno povezani pomoću komunikacione mreže, koja može biti različite strukture. Najjednostavnija struktura je kada postoje samo dva komunikaciona partnera i naziva se point to point struktura. Ako postoji više komunikacionih partnera, koriste se različite strukture (topologije), kao što su: magistrala, prsten i zvezda itd.
- Način pristupa komunikacionoj mreži, podrazumeva pravila koja određuju kada komunikacioni partner ima pravo pristupa mreži (npr. da pošalje podatke). Najzastupljenije tehnologije pristupa mreži su: Master/Slave, Token Passing i CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection).

Programabilni kontroleri doveli su do svojevrsne revolucije u načinu proizvodnje. Oni su omogućili fleksibilnu i profitabilnu automatizaciju proizvodnih procesa. Osim direktnog upravljanja proizvodnjom, programabilni kontroleri i računarom upravljani uređaji, generišu i mnoštvo podataka. U mnogim slučajevima, podaci mogu biti vredniji od samog proizvoda. Mnogi proizvodni procesi su izrazito neefikasni. Prikupljanjem podataka o procesu i njihovom analizom može se učiniti da proces postane efikasniji, da kvalitet proizvoda bude viši, da se skрати vreme zastoja. Prvi korak u ovom pravcu jeste prikupljanje i prenos podataka. Za prenos podataka koriste se komunikacione mreže. Postoji velik broj tipova komunikacionih mreža prilagođenih specifičnim zahtevima industrijskih sistema.

Tehnički sistemi u industriji postaju sve složeniji, sa sve većim brojem senzora, aktuatora, automatizovanih mašina i uređaja. Svi ovi različiti elementi moraju biti objedinjeni u jedinstvenu funkcionalnu celinu. Klasična rešenja automatizacije nekog procesa podrazumevala su postojanje jednog elektro-ormara, od koga su ka aktuatorima i senzorima vodili spletovi kablova sa mnoštvom žica. Takvi sistemi su bili komplikovani za projektovanje i montažu, prilično skupi (zbog troškova ožičavanja (kabliranja)), a posebni problemi su nastajali pri detekciji i otklanjanju nekog otkaza upravo zbog nepreglednosti takvih sistema. Težnja da se navedeni problemi prevaziđu uslovala je razvoj i izgradnju distribuiranih (decentralizovanih) sistema upravljanja. Okosnica svakog distribuiranog sistema upravljanja su industrijske mreže, koje se još zovu i industrijske magistrale.

Mreža koju čine merni i kontrolni uređaji, komunikaciona oprema i računari naziva se industrijska mreža. Industrijske mreže imaju mnoge zajedničke osobine sa računarskim mrežama. Računarske mreže omogućavaju komunikaciju između velikog broja računara, a da pri tome računari ne moraju biti direktno, fizički povezani, svaki sa svakim. Svaki računar ima samo jednu vezu sa mrežom. Računarske mreže, takođe, omogućavaju da pojedini uređaji, kao što su štampači, budu dostupni svim računarima na mreži.

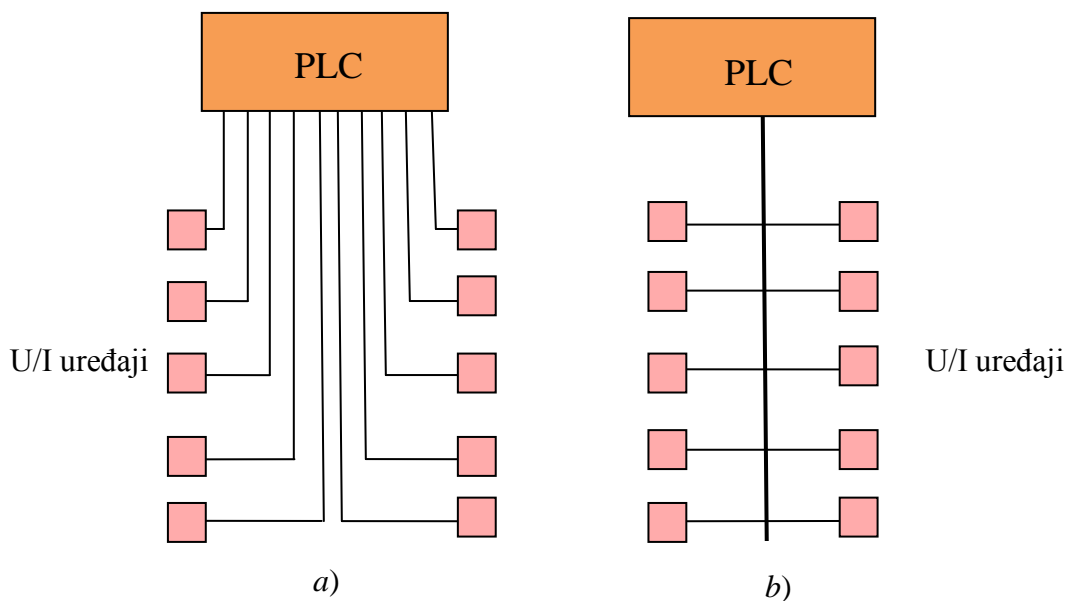
³⁹ Denić, D., Ranđelović, I., Živanović, D., Računarski merno-informacioni sistemi u industriji, Elektronski fakultet, Niš, 2005.

⁴⁰ Radaković, Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademski misao, Beograd, 2008.

Slični ciljevi se postavljaju i pred industrijske mreže, s tom razlikom da mrežni čvorovi nisu računari već industrijski U/I uređaji i kontroleri.

U suštini, industrijske magistrale zamenjuju koncept centralizovanog upravljanja, konceptom distribuiranog upravljanja. Zbog toga su industrijske magistrale mnogo više od proste zamene 4-20 mA analognog signala, pošto je početni motiv za razvoj industrijskih magistrala bila zamena postojećeg 4-20 mA analognog digitalnim signalom. Industrijske magistrala doprinose povećanju kvaliteta, smanjenju troškova i povećanju efikasnosti proizvodnje. Sve ove prednosti, u velikoj meri su posledica činjenice da se prenos informacija obavlja u digitalnom obliku. Digitalni prenos je daleko precizniji od analognog prenosa.

Prvi i najočigledniji razlog za izgradnju industrijske mreže je pojednostavljenje povezivanja velikog broja uređaja. Zamislimo jednu automatizovanu, složenu mašinu koja sadrži više stotina U/I uređaja. Ako bi se koristio klasičan pristup i svaki U/I uređaj direktno povezo sa kontrolerom mašine (slika 4.15 a)), troškovi povezivanja svih tih uređaja bili bi veliki. Takođe, kod ovakvog pristupa, često dolazi do grešaka u povezivanju, a pronalaženje i otklanjanje takvih grešaka je teško i dugotrajno. S druge strane, industrijske magistrale omogućavaju da se veliki broj uređaja (čak i do nekoliko stotina) poveže preko jedinstvene komunikacione linije (slika 4.15 b)). Šta više, u nekim slučajevima više U/I uređaja mogu posredstvom namenskih U/I blokova da dele zajednički priključak na mrežu. Treba istaći da je cena U/I uređaja koji poseduju komunikacione interfejsne neophodne za umrežavanje viša u odnosu na odgovarajuće U/I uređaje koji nemaju mogućnost komunikacije. Međutim, industrijske mreže donose uštede u ceni instalacije, ceni uloženog rada za povezivanje i kasnije održavanja i otklanjanje otkaza. Na današnjem nivou tehnologije, industrijska mreža postaje isplativo rešenje ako je broj umreženih U/I uređaja veći od 100⁴¹ [129].



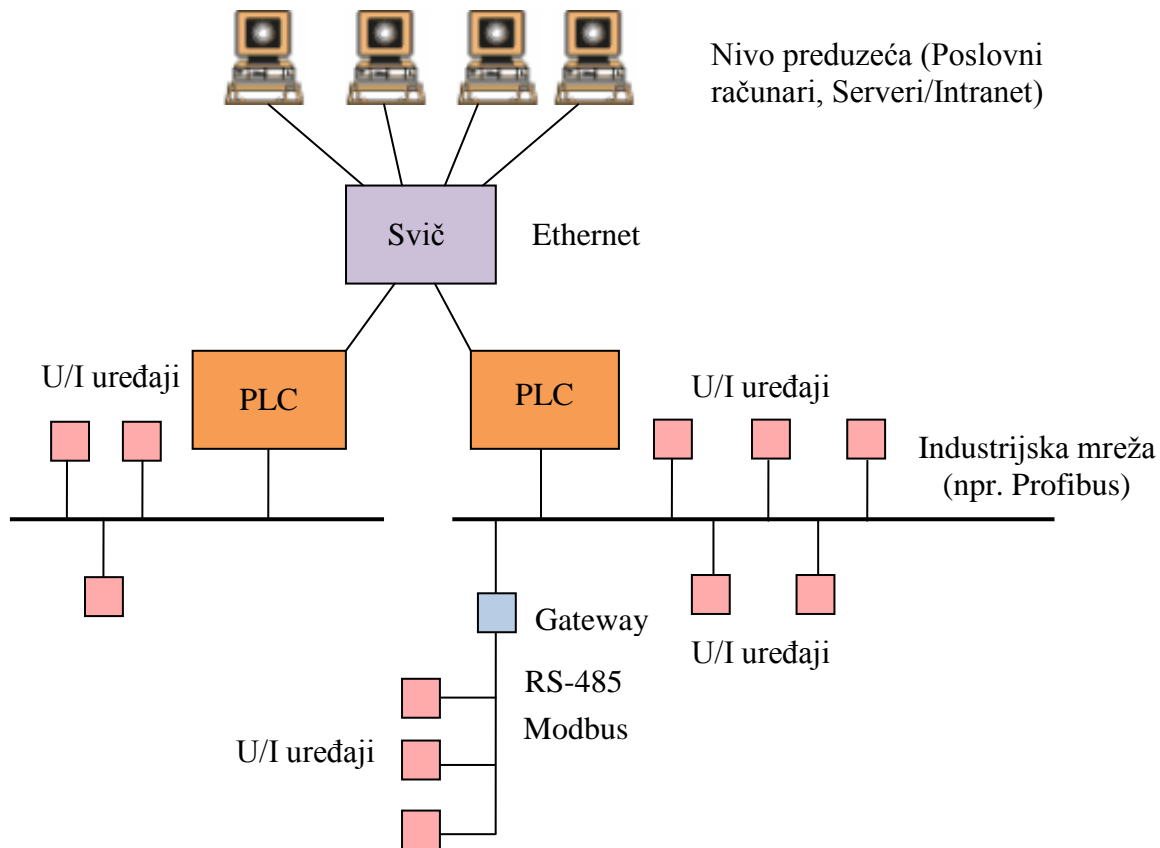
Slika 4.15. Načini povezivanja U/I uređaja sa kontrolerom mašine: a) Direktno povezivanje U/I uređaja sa kontrolerom mašine b) Povezivanje U/I uređaja sa kontrolerom mašine preko industrijske mreže (magistrale)

4.8.3.1 Tipovi industrijskih mreža (magistrala)

Industrijska preduzeća su složeni informacioni sistemi. Efikasno upravljanje zahteva prikupljanje i obradu velike količine različitih informacija, od finansija i knjigovodstva, evidencije radnog vremena do podataka o ostvarenoj proizvodnji. Izgradnjom industrijske mreže, otvara se mogućnost da proizvodni pogon postane deo jednog sveobuhvatnog informacionog sistema preduzeća. Informacije koje potiču čak i od najjednostavnijih senzora i aktuatora mogu biti od velike važnosti za praćenje procesa proizvodnje, analizu efikasnosti proizvodnje i kao takve mogu biti osnova za povećanje produktivnosti i profita. Na slici 4.16. je prikazana struktura jedne takve industrijske mreže. Okosnica ove mreže je LAN mreža (Ethernet)

⁴¹ Komunikacija u industrijskim sistemima, Elektronski fakultet Niš, 2015.

koja povezuje računare za poslovne primene i servere baze podataka sa industrijskim PC računarima i kontrolerima, koji su sa druge strane preko industrijske mreže povezani sa U/I uređajima, mašinama i automatima. Gateway uređaj se koristi za prenos podataka između dve mreže koje koriste različite protokole. On prima podatke sa jedne mreže, obrađuje ih da bi ih prilagodio formatu druge mreže i šalje ih preko te druge mreže.

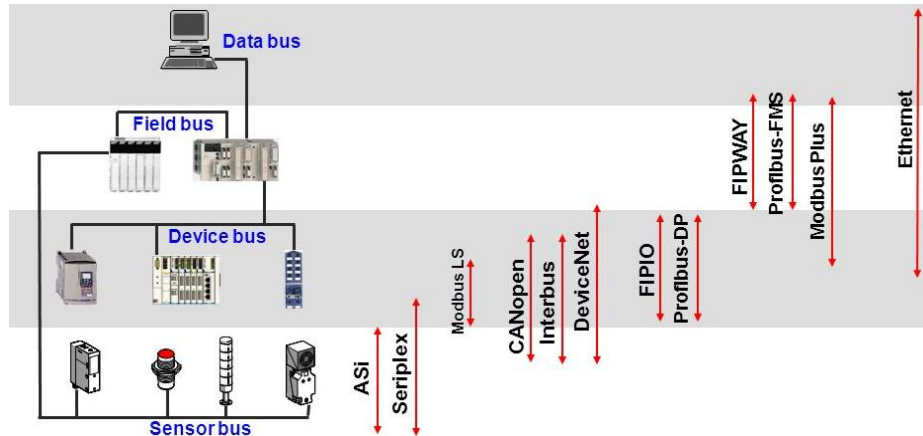


Slika 4.16. Struktura industrijske mreže

Performanse i pouzdanost automatizovanih industrijskih sistema u velikoj meri su uslovljeni karakteristikama komunikacione mreže. Komunikaciona mreža za industrijske namene mora da garantuje performanse, kao što su iskorišćenost mreže, propusni opseg i maksimalno kašnjenje u prenosu. U mnogim industrijskim postrojenjima prisutni su brojni izvori električnih šumova i smetnji (npr. motori, aparati za zavarivanje i sl.). Pod uticajem ovih smetnji, performanse komunikacione mreže mogu biti značajno degradirane (zbog pojave grešaka u prenosu informacija). Može se slobodno reći da je komunikaciona mreža najosetljivija komponenta automatizovanog industrijskog sistema. Značajan napor uložen je u razvoj protokola digitalne komunikacije za udaljene komponente. Vodeći proizvođači su radili na vlastitim protokolima što je dovelo do pojave velikog broja konkurentnih, međusobno nekompatibilnih protokola. Ideja o jedinstvenom međunarodnom komunikacionom protokolu, koji bi omogućio kompatibilnost protokola različitih proizvođača, bez potrebe za izmenom ili rekonfiguracijom sistema, nije realizovana. Ovo se može objasniti time da oblast automatskog upravljanja zahteva različitu implementaciju u različitim oblastima primene (npr. fieldbus u avio industriji je drugačiji od onog u procesnim pogonima).

U proteklih dvadesetak godina razvijen je i standardizovan veliki broj magistrala i odgovarajućih komunikacionih protokola za primenu u industriji. Ovi protokoli su razvijani u različita vremena, od strane različitih proizvođača, za različite namene. Ne postoji magistrala koja se može smatrati najboljim rešenjem, već svaka od mnoštva idustrijskih magistrala, poseduje neke specifične karakteristike koje određuju njenu oblast primene. Izbor pravog protokola zavisi od zahteva konkretne primene, ali i od faktora kao što su dostupnost uređaja koji podržavaju konkretni protokol i njihove cene. Izbor magistrale zavisi od zahteva konkretne primene, od kojih su najbitniji: maksimalno dozvoljeno vreme odziva, značaj informacija za bezbedan rad opreme, količina informacija koju treba prenositi, maksimalno rastojanje između umreženih uređaja, namena uređaja koji se povezuju, mogućnost proširenja, sigurnost itd.

Danas se u industriji koristi veliki broj standardizovanih komunikacionih mreža, tzv. industrijskih magistrala, od veoma jednostavnih, za spregu sa diskretnim U/I uređajima, do veoma složenih, koje se koriste na nivou celog proizvodnog pogona. Tako postoji više tipova industrijskih magistrala koje su u primeni, kao što su: Ethernet, Profibus PD, Profibus PA, DeviceNet, CANopen, Modbus, ASI, Interbus, ControlNet, Fieldbus Foundation itd. Na slici 4.17. naznačene su oblasti primene nekoliko najčešće korišćenih industrijskih magistrala. Treba imati na umu da magistrala nije samo komunikaciona linija, već i skup pravila, tj. protokola, kojih uređaji spregnuti magistralom moraju da se pridržavaju [118].



Slika 4.17. Tipovi industrijskih mreža (magistrala)⁴² [118]

PROFIBUS DP je komunikacioni protokol sa velikom zastupljenošću u svetskoj industriji, razvijen za automatizaciju procesa, podržava rad i sa više master kontrolera, veliku brzinu prenosa (do 12 Mbit/s) i to preko oklopljene upletene parice ili preko optičkih kablova. U aplikacijama koje se kontrolišu PLC-om najčešće se koristi Profibus.

Modbus je master/slave protokol sa half-duplex prenosom. Postoji serijska i TCP varijanta protokola.

Eternet (Ethernet) je najpopularniji protokol za realizaciju magistralnih računarskih mreža. LAN mreže u današnje vreme najčešće koriste Ethernet kao protokol za pristup mreži. Ethernet je istovremeno i tehnologija i protokol. Ethernet je protokol koji je razvijen za lokalne mreže sa dva ili više od dva računara kod kojih računari pristupaju deljivom medijumu za prenos informacija. Ethernet, je tehnologija koja je namenjena je za upravljanje komunikacijom kod topologija magistrala (bus), zvezda (star) i prsten (ring). Kada se koristi topologija tipa magistrale (bus), svi računari su povezani preko zajedničke linije.

Hronološki se Ethernet prvo odnosio na upotrebu koaksijalnih kablova (debelih i tankih) i za brzine prenosa od 10 Mb/s (standardni Ethernet). Koaksijalni kabl ima slične osobine kao i radio sistemi. Zajednički kabl na koji su povezani svi računari ima ulogu etra za komunikaciju (eng. ether, odakle se izvodi reč Ethernet). Krajevi kablova se završavaju tzv. terminatorom (koji obezbeđuje električno prilagođavanje), dok se računari priključuju na kabl posredstvom T konektora. Ethernet koristi tri vrste medijuma za prenos podataka: koaksijalne kablove (debele i tanke), upredene bakarne parice i optičke kablove. Industrijski Eternet je zasnovan na osmožičnom kabl sa upredenim paricama (UTP kabl – bez širma, STP – širmovan, FTP sa folijom ili koaksijalni - poslednja dva se retko sreću) ili optičkom kabl sa dva vlakna. Brzina prenosa informacija iznosi 100 Mbps kod brzog Eterneta (tada se koriste optički ili UTP kabl), donja granica u primeni iznosi 10 Mbps (tada se koriste optički, UTP ili STP kabl). Gigabitni Ethernet podržava brzine do 1 Gbps. Udaljenost komunikacionih partnera je 100 metara bez repitera, ako se koriste repiteri praktično ne postoje ograničenja. Optički kablovi se bez repitera mogu koristiti za rastojanja i preko 100 kilometara. Pošto se kod industrijskog Eterneta za adresiranje koristi 48 bita, praktično ne postoji ograničenje u pogledu broja komunikacionih partnera.

Računari se priključuju na mrežu posredstvom mrežnog adaptera koji je u vidu kartice ugrađen u kućište računara. Mrežna kartica NIC (Network Interface cards) predstavlja interfejs između mrežnih

⁴² Introduction aux reseaux locaux industriels, <http://slideplayer.fr/slide/502492/>, 2015

kablova i računara. Uloga mrežne kartice se sastoji u pripremi podataka iz računara za prenos mrežnim kablom ili drugim medijumom, slanje podataka ka drugim računarima, upravljanje tokom podataka između računara i kablovskog sistema, kao i prijemom podataka sa kabla i prevođenje u format razumljiv za procesor. Ethernet sloj za pristup mreži u TCP/IP terminologiji, čini skup gradivnih elemenata koji omogućavaju računaru pristup lokalnoj mreži.

Računari na mreži komuniciraju jedan sa drugim tako što šalju podatke preko kabla, direktno na fizičku adresu odredišnog računara. Kada se podaci nađu na mreži oni se zapravo šalju svim računarima u mreži. Mrežni adapteri svih računara analiziraju te podatke u cilju provere da li se odredišna adresa podataka poklapa sa njegovom MAC adresom (svaki računar na Ethernet mreži ima jedinstvenu fizičku adresu koja se naziva MAC (Media Access Control adresa - upravljanje pristupom medijumu). Ako se adrese poklapaju, mrežni adapter prosleđuje podatke računaru, u suprotnom ih odbacuje. Naime, zbog kolizije poruka može da zakasni na odredište što u nekim slučajevima može da poremeti rad sistema. Kod ovog tipa prenosa podataka, koristi se metod pristupa CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Ovim standardom se definiše višestruki pristup prenosnom medijumu proverom nosioca signala metodom detekcije sudara.

Dve osnovne kategorije industrijskih komunikacionih mreža su: magistrale uređaja (device bus) i magistrale procesa (process bus).

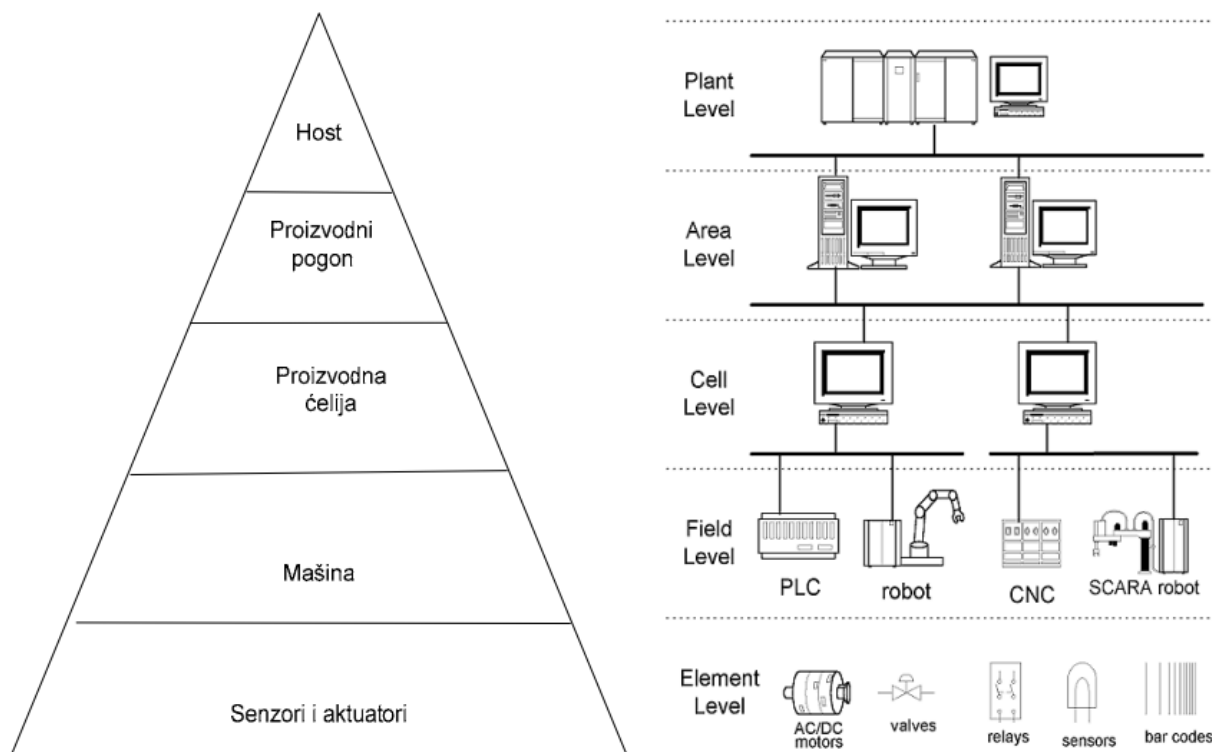
Magistrale uređaja (device bus), su posebna vrsta industrijskih magistrala namenjenih primenama u oblasti akvizicije podataka i upravljanja sensorima i aktuatorima koji su sastavni deo mašina ili proizvodnih postrojenja. Za razliku od tradicionalnih računarskih mreža, kao što je Ethernet, gde se performanse mere propusnom moći (količinom prenetih podataka u jedinici vremena) pri prenosu velikih blokova podataka, magistrale uređaja su optimizovane za razmenu kratkih informacija o statusu i upravljačkih poruka. Magistrale uređaja se koriste za prenos kratkih poruka, dužine do nekoliko desetina bajtova. Većina uređaja koji se povezuju ovim tipom magistrale su diskretni uređaji, kao što su diskretni senzori, tasteri i granični prekidači. Na magistrale uređaja mogu se sprezati i analogni uređaji, koji ne zahtevaju obimnu razmenu podataka, kao što su regulatori temperature, neki tipovi drajvera motora, termoparovi i slično. Magistrale uređaja su digitalne, bi-direkzione, multidrop, serijske komunikacione mreže koje se koriste za povezivanje izolovanih field uređaja, kao što su kontroleri, transduktori, aktuatori i senzori. Svaki field uređaj tipično poseduje ugrađen mikrokontroler, što ove uređaje čini pametnim uređajima. Pametni uređaji su u mogućnosti da samostalno obavljaju jednostavne funkcije, kao što je dijagnostika, upravljanje i bidirekciona komunikacija. Takođe, u stanju su da automatski izveštavaju o nastalim otkazima ili npr. o potrebi kalibracije. Ovi uređaji ne samo da omogućavaju pristup sa daljine, već su često sposobni da komuniciraju jedni sa drugima.

Magistrale procesa su namenjene prenosu dužih poruka (paketa), dužine do nekoliko stotina bajtova. Magistrale procesa su sporije, zato što su paketi duži. Ove magistrale se tipično koriste za prenos parametara rada kontrolerima procesa koji su u većini slučajevima analogni uređaji (mere ili upravljaju analognim veličinama). Od većine analognih uređaja ne zahteva se brzi odziv, zato što se koriste za upravljane procesima koji su po svojoj prirodi spori: protok fluida, koncentracija gasa, temperatura.

4.8.3.2 Hijerarhijski nivoi industrijskih mreža

Komunikacione mreže u industriji su veoma često složene i obično su organizovane na hijerarhijski način. Svaki hijerarhijski nivo komunikacionih mreža razlikuje se kako po svojoj funkcionalnosti, tako i po karakteristikama (obimu podataka, potrebnoj brzini prenosa podataka, učestanosti razmene podataka itd.). Zbog toga se na svakom nivou komunikacionih mreža koristi određeni tip računarske opreme i neki specifični komunikacioni mehanizmi i protokoli, tj. koriste se adekvatna standardna rešenja, koja se odlikuju hardverskim osobinama (vrstom prenosnog medijuma, od koje direktno zavise hardverske osobine, kao što je maksimalna učestanost signala koji se mogu preneti), kao i softverskim osobinama (tipom protokola i načinom pristupa mreži). Na komunikacione mreže se vezuju ne samo pojedine procesorske jedinice, već i elementi njihove distribuirane periferije, inteligentni senzori i aktuatori, lokalne

operatorske jedinice, komunikacioni procesori i drugo. Na slici 4.18. su prikazani standardni hijerarhijski nivoi industrijskih mreža⁴³ [129].



Slika 4.18. Standardni hijerarhijski nivoi industrijskih mreža [129]

Najniži nivo je vezan za sam proizvodni proces i obuhvata senzore, aktuatore i mašine. Kako se krećemo naviše, uz piramidu, primarni zadatak postaje menadžment i upravljanje proizvodnjom na visokom nivou. Ova podela nije jedinstvena i vrlo često se nivoi međusobno preklapaju dopunjujući jedan drugi u zavisnosti od konkretnih potreba svakodnevnne proizvodnje.

Nagli napredak u oblastima računarstva, računarskih mreža i mrežne opreme uslovio je promene u strukturi komunikacionih mreža. Cena umrežavanja postaje sve niža što čini ekonomičnim da i jednostavni kontroleri mašina, pa čak i senzori i aktuatori budu direktno i ravnopravno povezani na LAN zajedno sa PLC kontrolerima i računarima. U budućnosti se očekuje da će većina senzora i aktuatora biti povezana na LAN. Na taj način, pojednostavljuje se komunikacija na nivou proizvodnog pogona i olakšava funkcija prikupljanja podataka o toku proizvodnje. Takođe, u hijerarhijskoj strukturi često nivo proizvodnog pogona ne postoji, odnosno pridružen je nivou hosta. To je posledica činjenica da moć obrade miniračunara (PC mašina), koji se koriste kao kontroleri pogona, postaje sve veća, uporediva sa računarima na nivou hosta. U tabeli 4.1. su navedene karakteristike pojedinih hijerarhijskih nivoa industrijskih mreža

Tabela 4.1. Karakteristike pojedinih hijerarhijskih nivoa industrijskih mreža⁴⁴ [162]

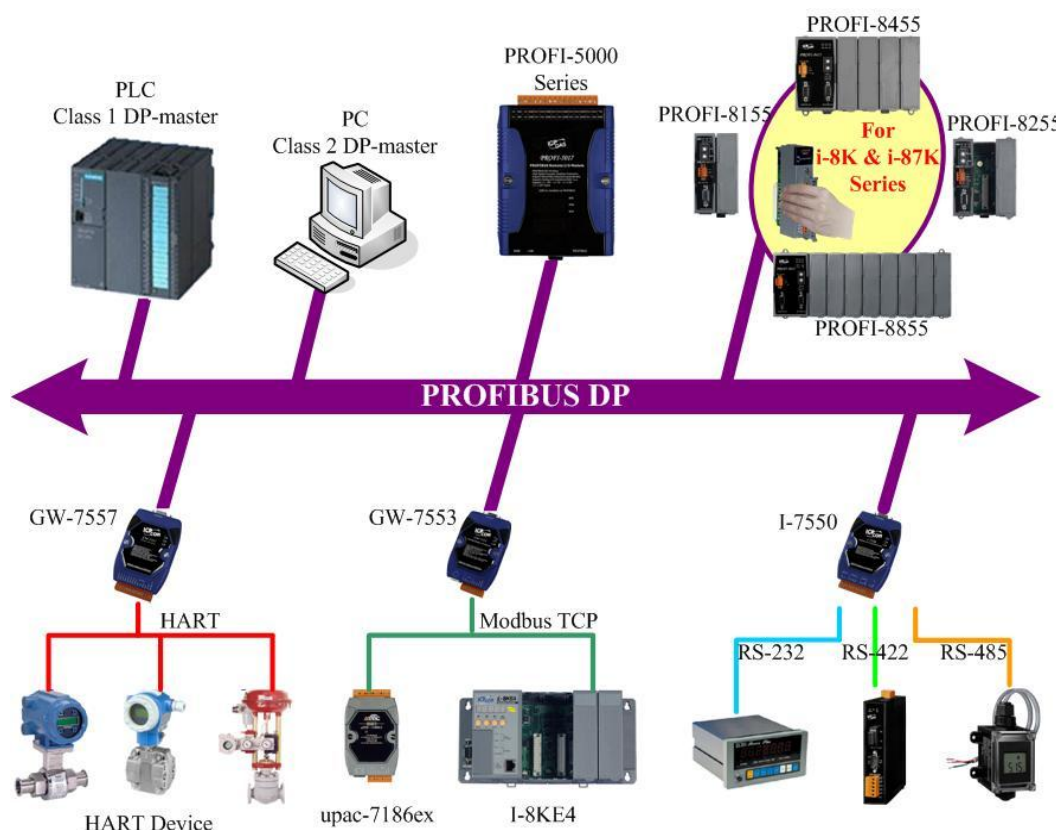
	Količina podataka (red veličine)	Vreme odziva na zahtev za podacima	Frekvencija zahteva za podacima
Nivo fabrike	Mb	min, s	dnevno, nedeljno, mesečno
Nivo proizvodnih ćelija	Kb	0,1 – 1 s	min, s
Nivo mašina	10 byte	10 - 100 ms	s, ms
Procesni nivo	Bit	1 - 10 ms	ms

⁴³ Komunikacija u industrijskim sistemima, Elektronski fakultet Niš, 2015.

⁴⁴ Radaković. Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademski misao, Beograd, 2008.

1. Nivo senzora i aktuatora

Nivo senzora i aktuatora (procesni nivo) predstavlja najniži hijerarhijski nivo komunikacionih mreža u jednom industrijskom preduzeću. Na ovom nivou se vrši prenos podataka između jednostavnih senzora i aktuatora sa jedne strane i PLC-ova sa druge strane, slika 4.19. Na ovom nivou nalaze se uređaji kao što su ventili, senzori, starteri motora, regulatori temperature i drugi najrazličitiji U/I uređaji. Velika većina senzora i aktuatora su jednostavni uređaji, koji osim mogućnosti razmene on/off signala sa PLC kontrolerom ili računarom, ne poseduju druge načine za komunikaciju. Podaci prikupljeni od senzora prosleđuju se inteligentnim distribuiranim uređajima, sensorima ili kontrolerima. Razmenjuju se relativno male količine podataka pošto senzori u pogonu šalju trenutne vrednosti veličina koje mere. Frekvencija razmene podataka je visoka i ostvaruje se relativno malom brzinom. Radi se o relativno malim udaljenostima između komunikacionih partnera na nivou pogona (do 100 metara, ukoliko se koriste ripiteri do 500 metara) pri čemu je vrlo bitno da su vremena odziva vrlo kratka (ispod jedne milisekunde). Komunikacija se ostvaruje serijskom vezom (trožičnom, kada se na komunikacionu mrežu priključuju i senzori i aktuatori ili dvožičnom, kada postoje odvojeni dvožični komunikacioni putevi za senzore i aktuatora). Kao medijum za prenos koristi se kabl sa neupredenim paricama, zbog čega je maksimalna brzina prenosa informacija mala. U novije vreme, čak i u senzore i aktuatora počinju da se ugađuju specijalizovani komunikacioni interfejsi koji omogućavaju serijsku ili paralelnu komunikaciju. Serijski komunikacioni protokoli RS-232, RS-422 i RS-455, zajedno sa paralelnim komunikacionim standardom IEEE488 (GPIB) predstavljaju najčešće korišćene komunikacione protokole na nivou senzora i aktuatora.



Slika 4.19. Industrijske mreže na nivou senzora i aktuatora⁴⁵ [160]

Paralelni protokoli su brži od serijskih, ali su puno osetljiviji na elektromagnetne smetnje iz okruženja, pa nisu pogodni za prenos podataka na veće udaljenosti. Najbolji rezultati se postižu na udaljenostima do 2 metra, ali IEEE 488 protokol definiše da je ovakav prenos podataka moguć i na udaljenostima do 20 metara.

Serijski protokoli su je sporiji od paralelnih, ali su puno otporniji na elektromagnetne smetnje iz okruženja, pa su pogodni za prenos podataka na veće udaljenosti. Postoji nekoliko različitih serijskih protokola za prenos podataka, koji su po proceduri prenosa signala isti, ali se razlikuju u organizaciji

⁴⁵ Profibus (process field bus), <http://www.icpdas.com/root/product/solutions/industrial>, 2015.

prenosa podataka i izgledu interfejsa za povezivanje uređaja. Protokol RS-32 se najčešće sreće, jer je serijski interfejs RS-232 ugrađen u skoro svaki personalni računar i predstavlja osnovni protokol digitalne serijske komunikacije na kraćim rastojanjima. Protokol RS-232 po kome se vrši prenos podataka omogućava spajanje dva uređaja (računar + senzor) i prenos podataka u oba smera. Rastojanje na kome se podaci pouzdano prenose iznosi 15 m, pri maksimalnoj brzini prenosa (baud rate) od 19,2 Kb/s. Protokol RS-422 je isti kao i RS-232, samo što je spoj žica kojim se podaci prenose drugačiji. Ovaj je protokol prilagođen za prenos podataka na veće udaljenosti. U praksi se vrlo često za serijski prenos podataka na veće udaljenosti i za veće brzine, koristi serijski protokol RS-485 kojim je moguće ostvariti brzine od 100 Kb/s na udaljenostima od 1200 m. Ovaj protokol omogućava priključak više od dva uređaja (do 32). Istovremeno mogu komunicirati samo dva uređaja, tako da se ostalim dodeljuje status mirovanja, tj. prekida im se prenos podataka. Ako se s datim uređajem želi ponovo uspostaviti komunikacija mora se pokrenuti što prekida status mirovanja. Protokol RS-485 nije sadržan u standardnoj opremi personalnih računara, ali se veoma često koristi u industrijskim primenama. Zbog toga ga sadrže mnogi industrijski računari.

Vremenom, ovi komunikacioni protokoli, koji su svi tipa od-tačke-do-tačke, evoluirali su u tzv. industrijske magistrale. Industrijske magistrale omogućavaju povezivanje većeg broja uređaja na zajednički komunikacioni medijum. Kod ovakog pristupa, cena povezivanja je niža. Umesto da se svaki uređaj direktno, posebnim provodnicima povezuje sa PLC kontrolerom ili računarom, za spregu svih uređaja koristi se zajednička komunikaciona linija (magistrala). Jedna od glavnih karakteristika komunikacije na nivou senzora i aktuatora jeste zahtev da vreme prenosa podataka bude predvidljivo. Da bi se u što većoj meri skratilo vreme prenosa podataka, reprezentacija podataka mora biti kompaktna. Komunikacione mreže na ovom nivou su tipa senzorskih magistrala. To su obično mreže manjeg obima, niske cene, specijalizovane za brzi prenos diskretnih informacija. Primeri komunikacionih mreža koje se koriste na nivou senzora i aktuatora su: DeviceNet, Profibus DP, ASI, Interbus/S, Seriplex, SDS i Compobus/S.

2. Nivo mašina

Na nivou mašina (Field level) se vrši razmena podataka između PLC-ova i njihovih decentralizovanih delova (periferija) kao i inteligentnih senzora i aktuatora. Na ovom nivou se nalaze automatizovane mašine pod kojima se podrazumeva deo opreme za proizvodnju ili rukovanje proizvodima ili procesima. Primeri mašina su roboti, pokretne trake, računarski upravljani alati, tj. CNC mašine i drugo. Mašine su u direktnom kontaktu sa proizvodom. Neke prenose proizvod, a druge učestvuju u njegovoj izradi. Mašina se sastoji od većeg broja mehaničkih delova u koje su ugrađeni senzori i aktuatori preko kojih kontroler upravlja mašinom. Kontroler mašine radi po fiksnom programu koji je zapamćen u memoriji kontrolera. U toku rada, svaki od ovih uređaja generiše i podatke koji su od značaja za upravljanje proizvodnjom: brojanje proizvoda, vreme proizvodnje pojedinačnih proizvoda, vreme zastoja itd. Ovaj nivo komunikacije karakteriše nešto veća količina podataka i moguća brzina prenosa informacija po komunikacionom putu nego kod procesnog nivoa. Vremena odziva mogu da budu duža pošto se deo operacija obavlja distribuirano u lokalnim stanicama u okviru mreže. Frekvencija razmene podataka je niža nego na procesnom nivou. Udaljenost između komunikacionih partnera (uređaja) je mnogo veća (od nekoliko desetina metara do 10 km (uz korišćenje ripitera - svaki ripiter pokriva segment od 1 km). Kao medijum za prenos podataka koristi se širmovani kabl sa upredenim paricama, RS 485 serijska veza, zbog čega je moguća veća brzina prenosa informacija (gornja granica je 12 Mbps (bps-bit u sekundi), donja granica je 9,6 kbps). Protokoli za ovakve mreže su Profibus i Modbus – pored njih sreće se i Fieldbus.

3. Nivo proizvodnih ćelija

Na nivou proizvodnih ćelija (Cell (Data) level) se vrši razmena podataka između PLC-ova i između PLC-ova i nadzorno-upravljačkih računara i panela za vizuelizaciju i upravljanje procesom. Nivo proizvodnih ćelija predstavlja grupu uređaja i mašina od kojih svaka ima neku specifičnu ulogu u procesu izrade jednog ili više proizvoda. Ćelije su obično tako koncipirane da se mogu koristiti za izradu različitih tipova proizvoda iz iste familije proizvoda.

Ovaj nivo komunikacije karakteriše nešto veća količina podataka i brzina prenosa i manja frekvencija razmene. Udaljenost komunikacionih partnera je slična Field nivou. Kao protokol najčešće se

koristi industrijski Ethernet, pored toga, sreću se rešenja i sa Profibus-om ili sa kombinacijama industrijskog Eterneta i Profibus-a⁴⁶ [162].

Svaka mašina, tipično, poseduje programabilnu upravljačku jedinicu, a za komunikaciju sa nadređenim nivoom upravljama koristi neki specifični komunikacioni protokol. Mašine ne komuniciraju između sebe, već postoji kontroler ćelije koji direktno komunicira sa svakom mašinom. U suštini, kontroler ćelije integriše mašine u kooperativnu proizvodnu ćeliju. Osnovni zadaci kontrolera ćelije su da:

- Puni unapred pripremljene programe u memoriju upravljačkih jedinica mašina i uređaja (program download). Izmenom programa rada pojedinačnih mašina, ćelija se može konfigurisati za izradu novog tipa proizvoda.
- Razmenjuje upravljačke i statusne informacije sa mašinama, podešava parametre rada, prikuplja podatke o tekućem stanju proizvodnog procesa i sl.
- Koordinira rad mašina: startuje/zaustavlja mašine, postavlja mašine u određene režime rada.
- Prati performanse mašina.

U jednom proizvodnom pogonu obično postoji više proizvodnih ćelija, od kojih svaka ima svoj kontroler. Osim sa podređenim mašinama, kontroleri proizvodnih ćelija komuniciraju jedni sa drugima i sa nadređenim nivoom upravljanja.

Programabilni logički kontroler kao kontroler ćelije. - PLC-ovi se koriste za upravljanje različitim tipovima fabričkih mašina i sistema. Projektovani su za rad u nepovoljnim industrijskim uslovima. PLC-ovi funkcionišu kao modularani sistemi na koji se mogu priključiti raznovrsni ulazno/izlazni moduli. S obzirom da su namenski projektovani za industrijske primene, PLC kontroleri se lako ugrađuju u industrijske sisteme, rukovanje i programiranje PLC kontrolera je jednostavno i ukoliko ne postoje posebni zahtevi, PLC predstavlja prvi izbor za kontroler ćelije. Takođe, ako u ćeliji postoje i drugi PLC kontroleri istog tipa, za komunikaciju između glavnog i podređenih PLC kontrolera može se koristiti komunikaciona magistrala namenjena toj konkretnoj PLC familiji. Sa druge strane, u odnosu na računar, sa PLC kontrolerom je teže realizovati efikasan interfejs prema operateru. Mada, u novije vreme, sa pojavom namenskih grafičkih terminala i displeja i ova funkcija postaje dostupna i na nivou PLC kontrolera.

Računar kao kontroler ćelije. - Računari se sve češće koriste kao kontroleri proizvodnih ćelija. U poređenju sa PLC kontrolerima, računari se odlikuju većom fleksibilnošću i većim mogućnostima u pogledu obrade podataka i realizacije složenih algoritama upravljanja. Takođe, računari poseduju daleko veće mogućnosti za komunikaciju. Po pravilu, gotovo svi industrijski uređaji i mašine poseduju mogućnost komunikacije sa PC računarem, dok su samo pojedini prilagođeni za komunikaciju sa PLC kontrolerima. Problem je u tome što na nivou PLC kontrolera ne postoji jedinstveni, opšti standard za komunikaciju, već svaki proizvođač PLC kontrolera definiše svoj komunikacioni protokol koji omogućava laku spregu PLC kontrolera i modula tog proizvođača. Sa druge strane svaki PC računar poseduje barem mogućnost RS-232 komunikacije, a ugradnjom specijalizovanih kartica i pratećeg softvera lako se može prilagoditi bilo kom drugom načinu komunikacije. Za komunikaciju između računara, kao kontrolera ćelije, i mašina tipično se koristi softver koji se zove SCADA. SCADA se izvršava na centralizovanom računaru, kontroleru ćelije, i omogućava komunikaciju sa najrazličitijim tipovima uređaja i mašina. Softver je koncipiran u vidu gradivnih blokova. Programer razvija program upravljanja korišćenjem menija i ikona (vizuelno programiranje), a zatim učitava drajvere za uređaje sa kojima aplikacija treba da komunicira. Drajver je softver, namenski pisan da omogući komunikaciju sa nekim specifičnim tipom uređaja. Komunikacioni drajveri su dostupni za veliki broj uređaja.

4. Nivo proizvodnog pogona

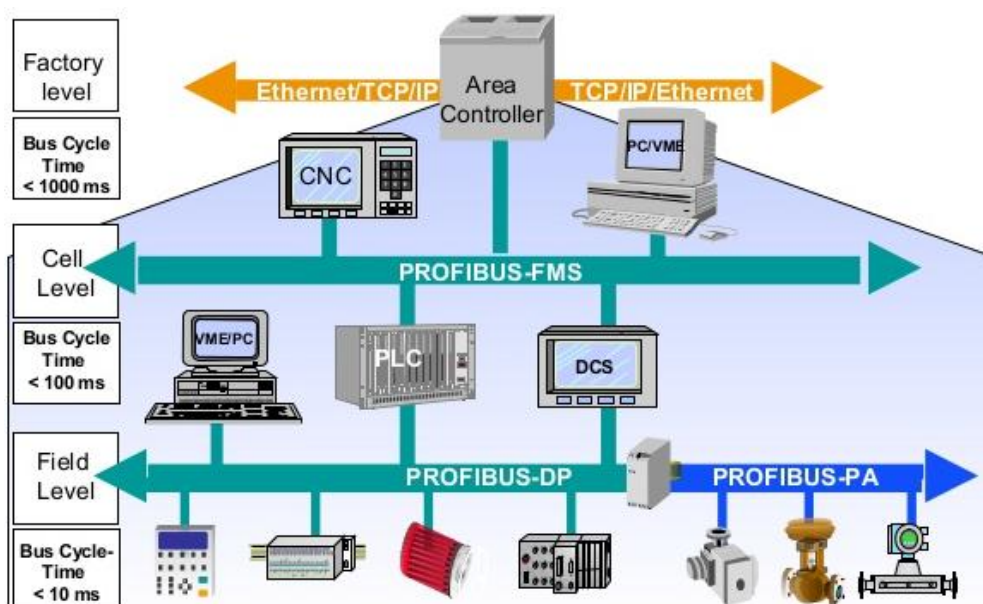
Nivo proizvodnog pogona (Area level) obuhvata jednu ili više proizvodnih ćelija (celokupno postrojenje). Kontroler proizvodnog pogona je računar koji prima instrukcije od nivoa hosta i raspoređuje zadatke proizvodnim ćelijama. Ovaj računar, takođe, komunicira sa kontrolerima drugih proizvodnih pogona u cilju sinhronizacije proizvodnje. Komunikaciona mreža na ovom nivou se karakteriše velikom

⁴⁶ Radaković, Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademski misao, Beograd, 2008.

brzinom prenosa podataka i determinističkim kašnjenjem. Količina podataka raste pošto se razmenjuje veći broj podataka između pogona, isto tako pogoni mogu da budu prostorno distancirani u okviru fabričkog kruga pa su potrebne veće dužine medijuma za povezivanje između njih, vremena odziva mogu biti duža. Pošto se radi o celokupnom pogonu, promene se ne dešavaju velikom brzinom kao na nižim nivoima (nekoliko stotina milisekundi zadovoljava potrebe ove komunikacije). Najčešće korišćene komunikacione mreže na ovom nivou su: ControlNet, Profibus FMS, Genius I/O, ARCNet, Modbus, LON, Sysmac Link i Controller Link⁴⁷ [129].

5. Nivo hosta

Nivo hosta ili nivo fabrike (informacioni nivo (Management level)) predstavlja najviši nivo u celokupnoj hijerarhiji komunikacionih mreža u okviru jednog automatizovanog preduzeća. Na ovom nivou se ostvaruje komunikaciju između menadžmenta i proizvodnog pogona, a čini ga jedan ili više računara umreženih u LAN, slika 4.20.



Slika 4.20. Industrijske mreže na nivou hosta⁴⁸ [184]

Nivo hosta je odgovaran za poslovni softver, inženjerski softver, softver za poslovnu komunikaciju i slično. Poslovni softver za primenu u industriji se naziva softver za planiranje proizvodnih resursa. Ovaj softver se koristi za unos narudžbi, evidenciju sirovina, evidenciju inventara itd. Na osnovu ovih informacija, softver se koristi za generisanje radnih naloga za proizvodnju, naručivanje sirovina i komponenti, organizovanje proizvodnje i sl. Softveri ovog tipa se sve više koriste i za planiranje i predviđanje proizvodnje. U novije vreme, nivo hosta počinje da se koristi za optimizovanje rada preduzeća. Podaci se automatski prikupljaju u proizvodnim pogonima, direktno od mašina, senzora i operatorskih terminala i prenose do nivoa hosta, gde se obrađuju, analiziraju i koriste kao bi se pronašli načini za povećanje produktivnosti na nivou celog preduzeća. Ključni problem se odnosi na prikupljanje podataka. Kvalitetnije poslovne odluke zahtevaju ažurne i aktuelne podatke o proizvodnji koji su dostupni u obliku razumljivom ljudima.

Pored velike količine podataka (baza podataka, izveštaja, dijagrama itd.), karakteristično je da se ovi podaci često prenose na veliku daljinu. Zbog toga se prenos podataka ostvaruje primenom savremenih tehnologija prenosa signala, kao što su: Internet, mobilna telefonija (GPRS) i satelitske komunikacije. GPRS se koristi i na nižim „komunikacionim nivoima“ (npr. Data nivou), u slučajevima kada nije pogodno koristiti druge oblike komunikacionih puteva. Kao primer bi se mogao navesti sistem u kome su PLC-ovi

⁴⁷ Komunikacija u industrijskim sistemima, Elektronski fakultet Niš, 2015.

⁴⁸ Smart-instruments-fieldbus-ethernet, <http://www.slideshare.net/idctechnologies/smart-instruments-fieldbus-ethernet-and-wireless>, 2015

distribuirani na velikom prostoru. Alternativa GPRS načinu komunikacije kroz etar bi bila sopstvena radio veza⁴⁹.

Instalacijom savremenog sistema upravljanja tj. integracijom informacija prikupljenih iz procesa u poslovne sisteme koji upravljaju finansijskim aspektima proizvodnih procesa ostvaruju se ogromni benefiti u poslovnom vođenju sistema.

4.8.3.3 OPC (OLE for Process Control) standard

U prošlosti, kada se u industriji prenos podataka svodio na prenos analognih signala (analognog strujnog signala 0(4)-20 mA ili analognog naponskog signala 0-10 V), nije postojao problem usklađivanja rada opreme i softvera od različitih proizvođača. Međutim, prelaskom na korišćenje digitalnih signala javlja se problem povezivanja hardvera i softvera od različitih proizvođača u jedinstven sistem, koji bi obuhvatio upravljanje kompletnom fabrikom. Da bi se ovaj problem prevazišao izrađen je otvoreni industrijski standard OPC (OLE for Process Control), baziran na tehnologijama OLE, DCOM (Distributed Component Object Model), COM (Component Object Model) i ActiveX, koji je dostupan na operativnom sistemu Microsoft Windows. Ovaj standard omogućava različitim softverskim aplikacijama da komuniciraju sa različitim uređajima, ili drugim upravljačkim i nadzornim softverima, kao i integraciju sa poslovno informacionim sistemom fabrike.

4.8.3.4 Medijumi za prenos podataka

Komunikacione mreže su nezaobilazna pojava u industrijskim procesima, zbog potrebe za distribucijom podataka, nadzorom i izvođenjem upravljačkih funkcija. Postoje različiti medijumi za prenos podataka sa tehničkog sistema koji se nalazi u proizvodnom pogonu do računara na kome se mogu analizirati. Prenos podataka se može ostvariti korišćenjem električnih, optičkih i radio signala koji se prenose preko komunikacionih medijuma, koji mogu biti žični i bežični (metalni provodnici, optička vlakna ili vazduh). Međutim, svaki od ovih medijuma ima neka ograničenja u pogledu: brzine prenosa podataka, cene, brzine uspostavljanja veze, sigurnosti podataka ili dostupnosti podataka što većem broju korisnika.

Jedan od najstarijih načina prenosa podataka je pomoću kablova, koji koriste žice za prenos podataka i informacija. Savremeni sistemi podrazumevaju korišćenje bežičnih mrežnih sistema kao konkurenciju postojećim kablovima.

4.8.3.5 Mrežni kablovi

Povezivanje kablovima je karakteristično za prostorno limitirane sisteme, kao što su procesi u okviru preduzeća (direktno ožičavanje, fieldbus mrežni sistemi, iznajmljeni fizički telefonski vod itd.). Mrežni kablovi su jedan od tri najvažnija činioca u procesu umrežavanja i kao takvi su odgovorni za prenos električnog ili svetlosnog impulsa od izvora do odredišta, odnosno od predajnika do prijemnika. Da bi bilo koja mreža funkcionisala bez ometanja mrežni kablovi moraju biti određenog tipa i kvaliteta. Nije svejedno koji kabl se postavlja i gde. Danas industrijske mreže rade sa velikim brzinama prenosa električnih impulsa i omogućavaju brzu razmenu informacija i podataka, ali su istovremeno podložne različitim spoljnim uticajima kao što su atmosfere prilike, elektromagnetna zračenja, fizička dejstva itd., koji u velikoj meri mogu uticati na kvalitet i brzinu prenosa signala kroz kablove. Većina današnjih mreža koristi tri osnovne vrste kablova, svaki sa svojim prednostima i nedostacima, kao što su:

- kablovi sa upredenim paricama - TP (Twisted pair) kablovi,
- koaksijalni kablovi (Coaxial cables) i
- optički kablovi (Fiber-optic cables).

⁴⁹ Radaković, Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademski misao, Beograd, 2008.

1. Kablovi sa upredenim paricama - TP (Twisted pair) kablovi

Kablovi sa upredenim paricama se sastoji od dve izolovane bakarne žice koje su upredene jedna oko druge. Upredanjem se poništava električni šum od susednih parica, ili ostalih izvora, kao što su motori, releji, transformatori i energetska instalacija. Ovi kablovi se koriste u Ethernet tehnologiji, za povezivanje sa mrežnom karticom računara koriste RJ-45 konektore (Register Jack) koji imaju četiri parice i koji su nešto širi od standardnih telefonskih konektora RJ-11, koji imaju dve parice. S obzirom na nivo zaštite postoje sledeće vrste kablova sa upredenim paricama:

- neoklopljeni kablovi sa upredenim paricama - UTP (Unshielded Twisted Pair) kablovi,
- oklopljeni kablovi sa upredenim paricama - STP (Shielded Twisted Pair) kablovi i
- FTP (Foil Screened Twisted Pair) kablovi.

Neoklopljeni kablovi sa upredenim paricama - UTP (Unshielded Twisted Pair) kablovi. – Ovi kablovi su relativno jeftini, imaju široku primenu i jednostavni su za rukovanje. Međutim, oni imaju i nedostatke, kao što su: brzina prenosa podataka je relativno mala (do 10 Mb/s), mogu se lako prislušivati (postoji uticaj signala sa jedne linije, na signal sa druge linije) i tako neautorizovano pristupiti podacima, osetljivi su na šumove i elektromagnetne talase itd. UTP kablovi specifikacije 10Base-T su danas najpopularniji, najjeftiniji i najčešće korišćeni kablovi za realizaciju LAN mreža opšte namene. Maksimalna dužina ovih kablova je 100 metara. Pošto većina objekata već ima instalirane ove kablove kao deo PTT infrastrukture za potrebe korišćenja telefonske linije, a prilikom njihovog instaliranja se uvek ostavlja određeni broj rezervnih žica to se one mogu iskoristiti za povezivanje uređaja i tako značajno smanjiti troškovi izgradnje mreže.

Oklopljeni kablovi sa upredenim paricama - STP (Shielded Twisted Pair) kablovi. - Ovi kablovi su manje fleksibilni od UTP kablova i poseduju veći nivo zaštite od elektromagnetnih zračenja. Pored ostalog namenjeni su za postavljanje fiksne telefonske mreže kroz zidove objekata, kablovskih kanalic, zemlju itd.). Poseduju jači spoljni omotač, otporniji su na spoljne uticaje (temperaturu, vlagu, habanje itd.). Maksimalna dužina ovih kablova je 100 metara.

FTP (Foil Screened Twisted Pair) kablovi. - Ovi kablovi su najslabiji UTP kablovima s tim što poseduju dodatni zaštitni aluminijumski omotač kao zaštitu od elektromagnetnih zračenja i visokih nivoa buke. Najčešće se koriste u proizvodnim pogonima i postrojenjima gde visoki nivoi buke prave smetnje (interferencije). FTP kabl je napravljen tako da su četiri parice potpuno obavijene tankom metalnom folijom. Ova folija svoju zaštitnu funkciju obavlja tako što zahvaljujući visokoj impedansi reflektuje spoljne, ometajuće, elektromagnetne signale na učestanostima većim od 5 MHz i tako im onemogućava prodor do samih parica. Po odnosu cena/performance u praksi su se najbolje pokazali FTP kablovi, tako da se oni najčešće i koriste.

2. Koaksijalni kablovi (Coaxial cables)

Koaksijalni kablovi se sastoje od bakarne žice u sredini, oko koje se nalazi prvo izolacija, a zatim sloj od upletenog metala - širm i, na kraju, spoljašnji zaštitni omotač. Svrha ovog oklopa je da apsorbuje elektromagnetne smetnje ili šum, i time spreči njihovo mešanje sa podacima koji se prenose. Bakarni provodnik (žica) u sredini kabla prenosi elektromagnetne signale koji predstavljaju kodirane računarske podatke. Širm ima ulogu uzemljenja i štiti provodnik od električnog šuma i preslušavanja. Daleko su skuplji od parica, teži su za rad i nefleksibilni, što povećava troškove instalacije. Korisnik mora da poseduje kablovski modem. Koaksijalni kablovi su namenjeni za maksimalne brzine do 10 Mb/s što je ujedno i glavni razlog prestanka njihovog korišćenja kada su u pitanju lokalne mreže, jer današnje lokalne mreže rade na mnogo većim brzinama. Istovremeno to ne znači da se koaksijalni kablovi ne koriste za neke druge tipove računarskih mreža.

3. Optički kablovi (Fiber-optic cables)

Kod optičkih kablova, optička vlakna prenose digitalne signale u obliku moduliranih svetlosnih impulsa, što znači da se ne koriste električni impulsi. Zahvaljujući tome moguće je ostvariti izuzetno velike brzine prenosa podataka (do 1 Gb/s) velikih količina podataka, na velike udaljenosti, skoro bez ikakvih slabljenja signala duž kabla. Udaljenosti mogu biti od nekoliko stotina metara do nekoliko stotina

kilometara što najviše zavisi od izvora svetlosti koji se koristi i od strukture optičkih vlakana. Pored toga, nisu osetljivi na elektromagnetne smetnje (interferenciju radio-prijemnika i predajnika, fluorescentnih sijalica i sl.), moguće je obezbediti visok nivo bezbednosti podataka pri prenosu, onemogućeno je prisluškivanje itd. Optičke veze osim velike brzine prenosa obezbeđuju i potrebno galvansko razdvajanje instalacija. Često se postavljaju u objektima, u slučajevima kada se predviđa veliki mrežni saobraćaj između spratnih razvoda u odnosu na centar mreže. Koriste se i u slučajevima kada LAN mreža treba da poveže više objekata, gde se sa bakarnim kablovima mogu očekivati problemi sa uzemljenjem i atmosferskim pražnjenjima. Najveći nedostaci su: visoka cena i kompleksna instalacija.

4.8.3.6 Tipovi računarskih mreža prema veličini prostora koji obuhvataju

Prema veličini prostora koji obuhvataju (geografskoj udaljenosti uređaja), postoji više tipova računarskih mreža, kao što su:

- lokalne mreže LAN (Local Area Network),
- gradske mreže MAN (Metropolitan Area Network)
- regionalne mreže - mreže šireg područja WAN (Wide Area Network) i
- Internet.

U tabeli 4.2. su navedene karakteristike pojedinih tipova računarskih mreža prema geografskoj udaljenosti uređaja⁵⁰ [135].

Tabela 4.2. Karakteristike pojedinih tipova računarskih mreža prema geografskoj udaljenosti uređaja

Udaljenost pojedinih elemenata (čvorova) mreže	Područje delovanja	Tip mreže
10 m	Soba	LAN
100 m	Zgrada	
1 km	Više zgrada	
10 km	Grad	MAN
100 km	Država	WAN
1000 km	Kontinent	
>1000 km	Planeta	Internet

1. Lokalne mreže LAN (Local Area Network)

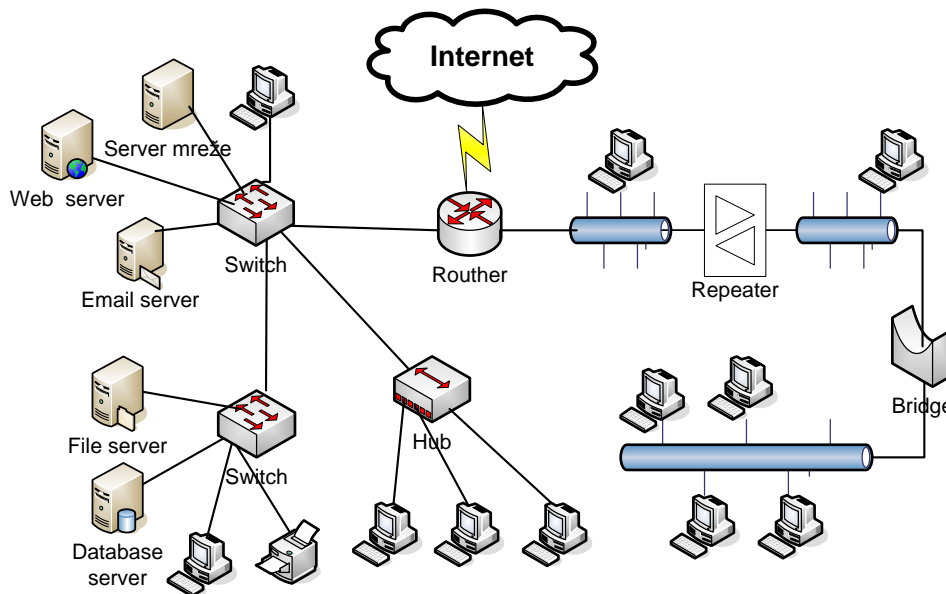
Lokalna računarska mreža predstavlja osnovni tip mreža. Ona može biti jednostavna kada su dva računara povezana kablom, ili složena kada je povezano na stotine računara i perifernih uređaja u jednoj velikoj organizaciji. Osnovno obeležje lokalne računarske mreže je to što je ona prostorno ograničena, jer omogućava međusobno povezivanje različitih uređaja na ograničenom području (npr. u jednoj prostoriji, više prostorija na istom spratu, na nekoliko spratova ili u nekoliko zgrada) koji međusobno nisu udaljeni više od stotinak metara. Računari se povezuju pomoću kablova (upredenih bakarnih parica, koaksijalnih kablova i optičkih kablova) ili bežično (wireless) putem radio-talasa, preko uređaja koji se naziva svič (switch), slika 4.21. Razmena podataka u mreži se obavlja preko TCP/IP protokola. Pošto se lokalne mreže formiraju na manjem prostoru moguće je ostvariti dosta velike brzine prenosa podataka (od 1 Mbit/s do 1 Gbit/s) [135].

Topologija definiše način kako su stvarno, fizički povezane komponente mreže (računari i ostali uređaji) odgovarajućim medijumom. Postoje tri osnovne topologije LAN mreža:

- magistrala (bus), je najjednostavnija, postoji jedna sabirnica (bus) na koju su povezani svi uređaji koja se završava sa terminatorima na oba kraja,

^{50 50} Local Area Network, <http://book.tsp.edu.rs/mod/page/view.php?id=795>, 2015

- zvezda (star) prsten, svi uređaji su povezani u jednu tačku preko koje se odvija sva komunikacija,
- prsten (ring), svi uređaji povezani u obliku prstena, to je mreža topologije magistrala čiji su krajevi spojeni.



Slika 4.21. Lokalna računarska mreža (LAN) sa vezom ka Internetu [135]

Izbor i specifikacija topologije LAN mreže zavisi od: fizičkih lokacija na kojima se nalaze korisnici sistema, količine podataka u lokalnim bazama podataka i količine potrebnog ažuriranja tih baza, od frekvencije pristupa bazama na drugim lokacijama i zahteva za komuniciranjem između dve korisničke lokacije.

a) Topologija magistrale

Topologija magistrale predstavlja najjednostavniju strukturu za umrežavanje. Kod topologije magistrale preko jednog kabla su povezani svi uređaji. Mreže topologije magistrala su jednostavne za instalaciju, lako je dodati novi mrežni uređaj, zahtevaju daleko manje kabla nego ostale topologije, ali poseduju izvesne nedostatke. Cela mreža može biti u prekidu ako negde postoji prekid na glavnom kablu, zatim teško je otkriti problem kod mreže. Takođe, zbog mogućnosti pojave kolizija, vreme potrebno za prenos poruke se ne može prethodno odrediti - nedeterministički prenos.

b) Topologija zvezde

Topologija zvezde predstavlja takav oblik strukture (arhitekture) gde su svi umreženi uređaji povezani na centralnu tačku mreže tzv. hab (hub) ili svič. Prednosti ove topologije: lako se instalira i povezuje, nema prekida u mreži pri dodavanju novog uređaja ili uklanjanja, lako je otkriti greške i zameniti delove i sl. Mane ove topologije: podložna je zagušenjima sobračaja, zahteva više kabla nego topologija magistrale, ako se hub ili switch pokvari svi čvorovi su ugašeni, mnogo je skuplja od topologije magistrala.

c) Topologija prstena

Topologija prstena se sastoji od više uređaja povezanih jedan sa drugim tako da se obrazuje zatvorena kružna putanja. Izlazna (predajna) linija jednog računara se povezuje kao ulazna (prijemna) linija sledećeg računara, tako da podaci putuju u krug i prolaze kroz svaki računar. Kada računar želi da preda poruku on je šalje na predajnu liniju preko koje se poruka prenosi do prvog sledećeg računara. Računar koji je primio poruku ispituje da li je poruka upućena njemu. Ako jeste, računar preuzima poruku, ako nije, računar prosleđuje poruku sledećem računaru. Prsten je tehnologija koja u sebi uključuje i kabliranje i topologije. Kablovi su parični (UTP, FTP varijante), ali nisu kao za Ethernet mreže.

2. Gradske mreže MAN (Metropolitan Area Network)

Gradske mreže su mreže koje pokrivaju jedan grad i/ili prigradska naselja.

3. Regionalne mreže - mreže širokog područja WAN (Wide Area Network)

Problem koji se javlja kod LAN mreža ogleda se u tome da mogu da povezuju računare i uređaje na relativno malim rastojanjima. Međutim, velike organizacije i institucije, koje imaju ekspozituru na raznim geografskim lokacijama, teže da sve lokalne mreže svojih centara povežu u jednu veliku mrežu. Regionalne mreže WAN (Wide Area Network) predstavljaju skup više povezanih LAN mreža, koje se nalaze na različitim geografskim lokacijama. Razlika između LAN-a i WAN-a je ta što je LAN ograničen na uži prostor, koji može biti i jedna prostorija, ili jedan sprat ili jedna zgrada. Otprilike, može se grubo smatrati da sve što ne izlazi iz okvira jedne zgrade predstavlja LAN. LAN je osnovna gradivna jedinica složenijih mreža. Regionalnu računarsku mrežu čini veliki broj povezanih lokalnih mreža. Što se tiče WAN-a možemo reći da tu ne postoje prostorna ograničenja. Najpoznatija WAN mreža je, naravno, Internet. Nije prostorno ograničena. Ona može da poveže računare i uređaje širom sveta. WAN tehnologija je obično point-to-point, odnosno tačka-tačka. To znači da podržava samo dva krajnja uređaja za slanje i prijem podataka, pri čemu se LAN mreže nalaze iza tih uređaja i preko njih komuniciraju. Tipično za WAN mreže je da se za prenos informacija koriste posrednici, tj. telekomunikacione usluge. Mogu da budu povezane i telefonskim linijama, radio vezom ili optičkim kablovima što zavisi od zahteva. Brzina prenosa podataka je znatno manja nego kod lokalnih mreža, a u arhitekturu mreže su uključeni posebni komunikacijski uređaji, preklopnici (eng. switch) koji služe za priključivanje računara, povezivanje udaljenih delova mreže i prenos podataka.

4. Internet

Internet predstavlja globalnu komunikacionu mrežu. Zahvaljujući otvorenoj arhitekturi i standardizovanom softveru, u novije vreme Internet nalazi sve veću primenu u prenosu podataka za potrebe industrije. Brzi razvoj i širenje Interneta otvara mogućnosti da se on, pored do sada standardnih primena za prikupljanje i razmenu informacija u poslovne i druge svrhe, iskoristi i za realizaciju sistema za nadzor i upravljanje. Ove mogućnosti postaju posebno atraktivne ako se zahteva prikupljanje mernih podataka iz većeg broja fizički značajno udaljenih mernih tačaka. Internet tehnologije imaju prednost što ne zavise od proizvođača i zato postoji manji broj interfejsa između različitih sistema i tehnologija, a samim tim smanjeni su troškovi izrade. Takođe pružaju mogućnost integracije zastarelih heterogenih sistema u jedno novo okruženje. Internet predstavlja skup različitih (LAN ili WAN) mreža međusobno povezanih tako da deluju kao jedinstvena mreža. Povezivanje se ostvaruje korišćenjem posebnih komunikacionih uređaja – usmerivača (engl. router). Posebno je interesantan pristup preko Interneta korišćenjem VPN (Virtual Private Network), koji obezbeđuje da korisnici sa udaljene lokacije ostvare zaštićen (siguran) pristup ka nekoj lokalnoj računarskoj mreži preko javne mreže⁵¹ [197].

Prenos podataka preko Interneta se ostvaruje korišćenjem standardnih komunikacionih protokola, kao što su: TCP/IP, FTP, HTTP, NNTP, SMTP i POP3. Prenos podataka preko Interneta se može ostvariti korišćenjem javne telefonske komutirane mreže PSTN (Public Switched Telephone Network) na više načina, kao što su:

- modemska veza (Dial-up),
- digitalna mreža integrisanih usluga ISDN (Integrated Services Digital Network) i
- xDSL (Digital Subscriber Line).

Osim u brzini, ova tri načina pristupa se razlikuju i po samoj tehnologiji prenosa signala. Modemska veza prenosi analogne, a ISDN i ADSL prenose digitalne signale. Analogni signal je neprekidan i vremenski i po svojoj amplitudi, dok se digitalan signal dobija korišćenjem tačno određenom kombinacijom vrednosti signala: “nula” i “jedinica”. Ukoliko pri prenosu dođe do oštećenja analognog signala zbog njegovog slabljenja, originalne informacije se ne mogu povratiti, dok je kod digitalnih signala ta rekonstrukcija veoma laka zbog postojanja samo dve moguće vrednosti.

⁵¹ Wang, W., Tse, PW., Lee, J., Remote machine maintenance system through Internet and mobile communication, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, No 7-8, 2007, pp. 783-789.

Modemska veza (Dial-up), je analogni zastareli način prenosa podataka preko Interneta korišćenjem javne telefonske mreže PSTN (Public Switched Telephone Network). Računar se, preko modema, korišćenjem telefonskih kablova povezuje na Internet. Ovaj način prenosa podataka je prilično spor (maksimalna brzina je 56 kb/s) i analogna telefonska linija se u jednom trenutku može koristiti ili za telefoniranje ili za pristup Internetu.

Digitalna mreža integriranih usluga ISDN (Integrated Services Digital Network), omogućava znatno brži prenos podataka nego modemska veza. ISDN tehnologija zasnovana je na prenosu digitalnih podataka kroz bakarne provodnike. Ona ima dva kanala koji se mogu koristiti, i svaki omogućava brzinu prenosa od 64 kb/s, dok se jedan koristi za vezu sa Internetom, drugi kanal se može koristiti za telefoniranje, ili oba kanala mogu da budu upotrebljena za pristup Internetu čime se omogućava brzina prenosa od 128 kb/s.

xDSL (Digital Subscriber Line), omogućava da se po postojećoj infrastrukturi krajnjem korisniku pruži kako pristup fiksnoj telefonskoj mreži i uslugama koje ona pruža, tako i pristup Internetu sa velikim brzinama protoka (teoretski do 8,192 Mbit/s). DSL je tehnologija koja omogućava digitalni prenos podataka kroz telefonske linije. Što se tiče prednosti DSL tehnologije to je mogućnost istovremenog korišćenja Interneta i vođenje razgovora. Zatim, nudi mnogo veće brzine u odnosu na standardnu modemsku vezu. Potreban modem obezbeđuje provajder DSL usluge. Ova tehnologija obično ima oznaku xDSL zbog toga što u zavisnosti od performansi i ostvarivih brzina postoji više vrsta DSL tehnologija: ADSL (Assymetric DSL), HDSL (High bit-rate DSL), SDSL (Symmetric DSL), MSDSL (Multirate Symmetric DSL), VDSL (Very high bit-rate DSL) i RADSL (Rate Adaptive DSL). Asimetrična digitalna pretplatnička linija ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line), omogućava istovremeni prenos računarskih podataka brzinom od nekoliko megabita po sekundi i telefoniranje (prenos govora), koristeći potpuno odvojene frekvencijske opsege. ADSL (Assymetric DSL) je asimetričan DSL, jer je brzina download-a (preuzimanja podataka) mnogo veća (obično 4 puta) nego brzina upload-a (slanja podataka). Kod ove tehnologije se polazi od činjenice da prosečan korisnik Interneta mnogo više podataka preuzime sa Interneta nego što pošalje na Internet.

4.8.3.7 Tipovi mreža prema pravu pristupu

Mreže koje se realizuju radi korišćenja od strane firme kojoj pripadaju, se nazivaju **privatne mreže** (mreže firme, banaka, aerodroma itd.) i podrazumevaju ograničen pristup. Sa druge strane, mreže koje su dostupne svim korisnicima, ali mogu zahtevati određen vid registracije ili naknade za korišćenje su **javne mreže** (npr. mobilna telefonija).

Intranet je privatna računarska mreža (najčešće vlasništvo neke kompanije) koja omogućava bezbedni pristup resursima mreže jedino ovlašćenim licima, tj. onim korisnicima koji imaju svoj korisnički nalog u toj mreži (osoblje, zaposleni itd.). Intranet radi na istom principu kao i Internet, ali tačno definiše resurse mreže, kao i koji korisnici i u kojoj meri ih mogu koristiti.

Ekstranet je privatna računarska mreža koja omogućava deljenje jednog dela informacija kompanije sa poslovnim partnerima, dobavljačima, kupcima itd. Pristup ekstranetu se takođe omogućava kroz prijavljivanje na sistem, samo onim korisnicima koji imaju odgovarajuće korisničko ime i lozinku, koji se koriste za određivanje nivoa pristupa informacijama. Glavna svrha ekstraneta je međusobno povezivanje u cilju razmene informacija.

4.8.3.8 Bežične mreže

Bežične mreže kao medijum za prenos podataka (signala) koriste vazduh (etar). Podaci se prenose elektromagnetnim talasima iz elektromagnetnog spektra (najčešće radio talasima, a u manjem obimu infracrvenim i svetlosnim talasima). Radio prenosom se mogu prenositi velike količine podataka na velike udaljenosti za veoma kratko vreme. Međutim, kako se radio talasi prostiru pravolinijski i ne prate zakrivljenost (ne savijaju se oko) Zemlje, radio (zemaljske) stanice se često moraju locirati relativno blizu jedna druge (na svakih 40 do 50 km) i moraju biti smeštene na visokim položajima kako bi se obezbedilo neometano prostiranje talasa. Takođe, prostiranje radio talasa može biti ometano pod uticajem različitih vremenskih nepriklona. Alternativno rešenje je primena satelitskih veza.

Bežične računarske mreže omogućavaju iste servise kao i žične mreže, a imaju niz prednosti u odnosu na njih, kao što su: fleksibilnost, skalabilnost, brzina protoka, jeftinija izgradnja u slučaju velikih udaljenosti, mogućnost korišćenja u slučaju postojanja nepremostivih prepreka za pružanje kablova, mogućnost korišćenja u zonama u kojima postoji opasnost od eksplozije i požara, mogućnost korišćenja u slučaju mobilnih (pokretnih) objekta sa kojih se prenose podaci. Generalno posmatrano bežična komunikacija ima prednost nad žičnom komunikacijom ukoliko se radi o sistemima koji se nalaze na nepristupačnom terenu ili su pokretni (sa promenljivim lokacijama). Bežične mreže za razliku od žičnih mreža nemaju ograničenja u smislu vezanosti za mrežne kablove i njihovu dužinu. Korisnicima je omogućeno korišćenje mrežnih resursa sa bilo kog mesta, koje je u dometu bežičnog signala. Domet bežičnog signala je jedan od dva ograničavajuća faktora ove vrste računarskih mreža.

Prema veličini prostora koji obuhvataju (geografskoj udaljenosti elemenata) bežične mreže se mogu podeliti na:

- Bežične personalne mreže WPAN (Wireless Personal Area Network),
- Bežične lokalne mreže WLAN (Wireless Local Area Network),
- Bežične gradske mreže WMAN (Wireless Metropolitan Area Network),
- Bežične regionalne mreže WWAN (Wireless Wide Area Network) itd.

U tabeli 4.3 je dato poređenje različitih vrsta bežičnih mreža (WWAN, WMAN, WLAN i WPAN) prema maksimalnoj pokrivenosti signalom, brzini prenosa podataka, tehnologiji prenosa podataka, protokolima prenosa podataka i primeni⁵² [69].

Tabela 4.3. Poređenje različitih vrsta bežičnih mreža (WWAN, WMAN, WLAN i WPAN) [69]

	WWAN	WMAN	WLAN	WPAN
Maksimalna pokrivenost signalom	km Opšta pokrivenost	km Grad	Stotinak metara Područje	Destine metara Zgrada
Brzina prenosa podatak	9,6 Kbps - 2,4 Mbps	0,5-2,4 Mbps	1-108 Mbps	0,2 – 300 Mbps
Tehnologija prenosa podataka	GSM, GPRS, 3G, UMTS	WiMAX, MBWA	Wi-Fi	Bluetooth, ZigBee, UWB
Protokoli prenosa podataka	-	IEEE 802.16/802.20	IEE 802.11	IEEE 802.15
Primena	Glas i slanje podataka	Širokopolasni prenos	Glas i podaci	Zamena u serijsku vezu/USB

Svi uređaji koji podržavaju isti protokol su međusobno kompatibilni i mogu da rade u istoj mreži.

1. Bežične personalne mreže WPAN (Wireless Personal Area Network)

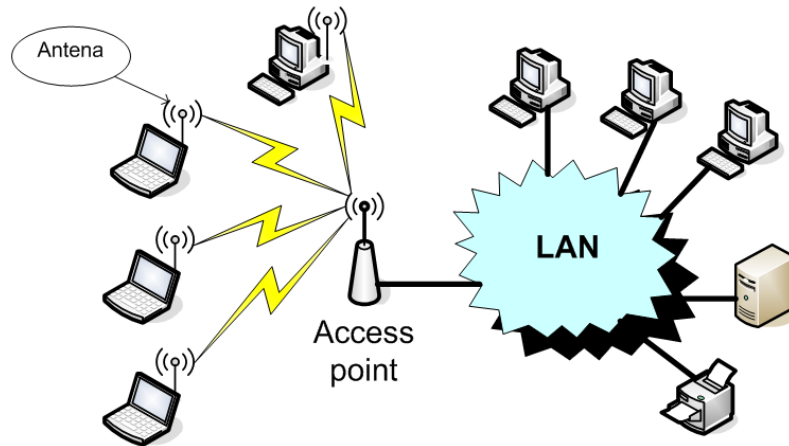
Bežične personalne mreže su mreže koje imaju ograničeno područje pokrivenosti signalom. To su pre svega mreže koje koriste infracrvene talase za komunikaciju između prvenstveno uređaja unutar prostora od nekoliko metara. Bežične personalne mreže koje se koriste u industriji su: IEEE 802.15.1 standard sa komercijalnim nazivom Bluetooth, IEEE 802.15.4 standard sa komercijalnim nazivom ZigBee i IrDA standard. Bluetooth je bežična tehnologija prenosa podataka i govora, koja je namenjena za male udaljenosti (do 10 metara). Radi na brzinama koje su i do 10 puta manje nego brzine Wi-Fi. Bluetooth tehnologije su našle široku primenu u senzorskim mrežama.

2. Bežične lokalne mreže WLAN (Wireless LAN)

Bežične lokalne mreže koriste elektromagnetne talase (radio ili infracrvene talase) za komunikaciju od jedne do druge tačke bez oslanjanja na bilo kakvu fizičku vezu. Bazirane su na IEEE 802.11 standardu, koji se naziva i Wi-Fi standard. Wi-Fi standard je prvenstveno namenjen za prenos podataka na kraćim rastojanjima, do par stotina metara. Ove mreže sadrže bežičnu pristupnu tačku (access point) kako bi se

⁵² Hill, J. L.: System architecture for wireless sensor networks, Ph. D. Dissertations, University of California, Berkeley, 2003.

omogućila veza sa svim korisnicima u području koje obuhvataju. Bežične lokalne mreže su u početku korišćene kao dodatak ili kao alternativa žičnim lokalnim mrežama u zgradama, bolnicama, aerodromima itd. WLAN su neophodne u situacijama kada, zbog arhitektonskih, geografskih ili drugih razloga, nije moguće ostvariti druge načine formiranja mreže. U tipičnoj WLAN konfiguraciji, odašiljač/prijemnik, koji se zove pristupna tačka (access point), povezuje se na žičnu mrežu sa fiksne lokacije koristeći standardan Ethernet kabl, slika 4.22. Pristupna tačka prima, obrađuje i šalje podatke između WLAN-a i žične mrežne infrastrukture. Jedna pristupna tačka može podržati malu grupu korisnika i može funkcionisati unutar raspona od tridesetak metara pa do preko stotinu metara. Ograničavajući faktor primene je relativno kraći domet veze (30–300 m) i frekvencijski opseg. Ako je potrebno premostiti veća rastojanja koriste se dodatne antene sa pojačivačima za podizanje nivoa signala⁵³ [135].



Slika 4.22. Bežičan pristup LAN-u preko Access point uređaja [135]

3. Bežične gradske mreže WMAN (Wireless MAN)

Bežične gradske mreže bazirane su na WiMAX bežičnom prenosu podataka, koji predstavlja naprednu verziju bežičnog Wi-Fi standarda. Wi-Fi bežične mreže dostižu brzine do 54 megabita u sekundi, dok WiMAX dostiže brzine do 70 megabita u sekundi. Najvažnija prednost je domet. Wi-Fi dostiže razdaljine do 30 metara, a WiMAX čak do 50 kilometara. Tako povećanje dometa je moguće zbog viših frekvencija i sposobnosti odašiljača. Naravno da se domet smanjuje s otežavajućim faktorima, kao što su npr. nepovoljni meteorološki uslovi ili brdovit teren. WiMAX je namenjen za prenos podataka većem broju korisnika na velike udaljenosti i za mreže tipa point-to-point. WiMAX je glavni konkurent ADSL-u i kablovskom pristupu Internetu, jer omogućava veće brzine, povezivanje na većim udaljenostima i jeftiniju primenu.

Stotine kompanija širom sveta već koriste bežičnu tehnologiju za velika rastojanja od po nekoliko desetina km (long-haul) i za obezbeđenje pristupa Internetu svima na jednoj lokaciji (back-haul). U oba slučaja konekcije su tipa point-to-point (po jedan primopredajnik sa obe strane veze), ili sve više prisutni point-to-multipoint (jedan primopredajnik komunicira sa centralne lokacije sa više primopredajnika u okolini). Sve do nedavno za to se koristila adaptirana bežična LAN tehnologija, kao što je Wi-Fi, koja nije projektovana za point-to-point, point-to-multipoint ili za velike udaljenosti. Ovaj pristup ima jednu baznu stanicu ili pristupnu tačku (access point), koja kontroliše komunikaciju sa svim ostalim bežičnim čvorovima i distribuiranom sistemom. U industrijskim podešavanjima teško je naći lokaciju za pristupnu tačku koja obezbeđuje komunikaciju sa svakom krajnjom tačkom. Pomeranje pristupne tačke radi povećanja pouzdanosti sa jednom krajnjom tačkom često degradira komunikaciju sa drugim krajnjim tačkama.

4. Bežične regionalne mreže WWAN (Wireless WAN)

Bežične regionalne mreže pokrivaju relativno velike geografske prostore i koriste radio talase. Ova tehnologija omogućava brzi i jeftin bežični prenos podataka sa brzinom do 45 Mb/s u point to point režimu

⁵³ Local Area Network, <http://book.tsp.edu.rs/mod/page/view.php?id=795>, 2015

prenosa na rastojanjima do 60 km. Slaba strana kao i kod svih *wireless* rešenja predstavlja činjenica da je takva veza podložna spoljnim uticajima koji mogu dovesti do anomalija u prenosu. Dobra strana je da je brzo i jeftino rešenje za povezivanje što ga čini pravim izborom u slučajevima kada ne postoje tehničke mogućnosti korištenja infrastrukture fiksne telefonije. Postoji širok spektar tehnologija koje se koriste za bežični prenos podataka na široka područja, kao što su: GSM (Global System for Mobile Communications), CDMA (Code Division Multiple Access) i TDMA (Time Division Multiple Access) tehnologijama i satelitske veze.

a) GSM (Global System for Mobile Communications)

GSM (Global System for Mobile Communications) predstavlja bežičnu mrežu organizovanu po ćelijskom principu, koja omogućava mobilnost prijemnika dok se nalazi u dometu neke od ćelija. Nadzor uređaja bežičnim putem je postojao i ranije, ali je udaljenost sa koje se moglo nadzirati bila ograničena. Sa pojavom GSM mreže stvorene su mogućnosti da se sa jednog kraja sveta mogu nadzirati uređaji na drugom kraju sveta. Kako je i sama mobilna telefonija u svojoj osnovi zapravo prenos podataka radio-putem, upotreba ovog sistema za potrebe nadzora i upravljanja se nameće sama po sebi kao jedna od mogućnosti. Pogodna je za nadgradnju nedovoljnih kapaciteta fiksne telefonske mreže za teško dostupne i nenaseljene krajeve. Takođe je pogodna za primenu u velikim gradovima zbog velike potražnje za telefonskim priključcima. U principu GSM mreža nudi sledeće vrste komunikacionih servisa⁵⁴ [193]:

1. SMS (Short Message Service), je servis za prenos paketa koji sadrže tekstualne poruke dužine do 160 karaktera. U novije vreme razvijen je i MMS servis (Multimedia Messaging Service) za prenos dužih poruka, slike i zvuka.

2. CSD (Circuit Switchd Data), je prenos podataka koji je u osnovi sličan prenosu preko standardnih žičnih ili bežičnih veza. CSD istovremeno rešava dva velika nedostatka SMS poruka: ograničenje dužine poruke i moguće kašnjenje u prenosu poruka, s obzirom na opterećenje mreže.

3. HSCSD (High Speed Circuit Switchd Data), je veoma brz prenos podataka od 14,4 Kbit/s po GSM vremenskom slotu, pri čemu se, u cilju postizanja većih brzina koriste istovremeno 2, 3 ili 4 vremenska slota na radio-interfejsu. Zahtevaju nove mobilne stanice i računarske kartice.

4. GPRS (General Packet Radio Services), je skraćenica za opšte paketne radio usluge. Dva osnovna unapređenja koja donosi ova tehnologija mobilne komunikacije su: drugačiji način prenosa podataka i povećanje brzine prenosa podataka (u GSM mreži brzina je 9,6 Kb/s, dok je u GPRS mreži minimalna prosečna brzina 56 Kb/s, a maksimalna brzina ide i do 170 Kb/s). GPRS tehnologija koristi tzv. "paketnu komutaciju" (Packed Switched) i to preko postojeće tzv. "ciklične komutacije" (Circuit Switched). Paketni prenos podataka označava da korisnici ne moraju da za prenos podataka koriste dosadašnje ugrađene modeme, već GPRS mobilni aparat može "u hodu" primiti i slati "pakete" sa informacijama, sve dok se nalazi u dometu GPRS signala. Troškovi usluge prenosa podataka su po količini prenesenih podataka, a ne po vremenu provedenom u "on-line" režimu, kao kod GSM-a.

b) Satelitske komunikacije

Satelitske komunikacije predstavljaju globalne bežične repetitorske mreže koje obezbeđuju radio talasne veze između geografski udaljenih lokacija na Zemljinoj površini. Satelitski link je radio link između predajne zemaljske stanice i prijemne zemaljske stanice preko jednog satelita, koji se nalazi u orbiti oko zemlje. Satelitski link podrazumeva jedan Up link (predajni) i jedan Down link (prijemni). Zemaljska stanica šalje signale satelitu (Up link) koji ih pojačava i prosleđuje sledećoj stanici (Down link). Ovaj tip komunikacije je izuzetno brz. Prednosti ovog načina bežičnog prenosa podataka su globalna pokrivenost i velike brzine protoka podataka i do više Mbps. Dva osnovna nedostatka satelitskih komunikacija su relativno mala propusna moć (19,2 Kb/s za jeftinije izvedbe) i veliko tzv. satelitsko kašnjenje (satellite delay) signala (zbog velikog rastojanja između satelita i zemaljske stanice), koje može stvoriti probleme ukoliko korisnik u komunikaciji želi trenutne odgovore na postavljena pitanja ili radi

⁵⁴ Timčenko, V., Pernić, G., Vučurević, V., Dimitrijević, M., Primena GSM/GPRS komunikacije u sistemima upravljanja i daljinskog nadzora, 15 Međunarodni IEEE Telekomunikcioni forum TELFOR, Beograd, novembar 2007.

iteracije koje zahtevaju trenutne odgovore. U mnogim oblastima Zemlje ovo je jedini ekonomski opravdan način prenosa podataka, pošto bi primena ostalih načina bila preskupa. Satelitske veze svoju primenu nalaze uglavnom u visokorizičnim dislociranim sistemima automatizacije kao rezerva zemaljskim bežičnim vezama radi povećanja raspoloživosti veze.

4.8.4 Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

U praksi se veoma često dešavaju situacije da se na osnovu snimljenih signala donesu pogrešni dijagnostički zaključci o stanjima mašina u industriji, a samim tim i pogrešno ocene radni potencijali mašina, i pored toga što je informacija o postojećem uzroku i stepenu oštećenja na mašinama jednoznačno sadržana u dijagnostičkom parametru. Dešavaju se situacije da se stanje mašine oceni kao nedozvoljeno (i na taj način spreči njena havarija), ali da se dijagnostičkim zaključkom pogrešno utvrdi osnovni uzrok pogoršanja tehničkog stanja (npr. povišenog nivoa vibracija). U ovakvim situacijama troškovi održavanja rastu, iako su primenjene mere održavanja prema stanju. Ovakve situacije se dešavaju zbog toga [3]:

- što često postoje višestruki tipovi otkaza na rotirajućim mašinama, čija se karakteristična vibraciona obeležja često preklapaju (superponiraju);
- što karakter i intenzitet vibracionog signala zavise od trenutnog radnog režima mašine pri identičnom stanju temašine;
- što postoje komponente susednih mašina u vibracionom signalu itd.

Da bi se izbegle gore navedene situacije moguća su dva rešenja [3]:

- angažovanje iskusnih i visokoobučениh dijagnostičara i
- primena metoda veštačke inteligencije prilikom identifikovanja svih uzroka pogoršanja tehničkog stanja mašina.

Međutim, može se desiti i da angažovanje iskusnih i visokoobučениh dijagnostičara u pojedinim situacijama nije adekvatno rešenje. S obzirom na to da nisu uvek na raspolaganju kada treba rešiti neki problem i da za njih često ne postoji zamena u periodima kada su odsutni (jer njihov broj može biti relativno mali ili da ih uopšte nema u tom poslovnom okruženju), a i kada su na raspolaganju njihove usluge mogu da budu skupe, zatim veoma često su angažovani na drugim poslovima te nemaju dovoljno vremena da se posvete konkretnom problemu. Pored toga angažovanje visokoobučениh i iskusnih dijagnostičara u određenim situacijama ne obezbeđuje da se dijagnostičke kontrole obave zadovoljavajućom brzinom i tačnošću, zbog velikog broja podataka koje treba obraditi, tako da se ne mogu preduzeti pravovremene aktivnosti održavanja koje bi sprečile otkaze i havarije.

Zbog toga što je angažovanje visokoobučениh i iskusnih dijagnostičara često problematično, preporučuje se primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka o stanjima mašina u procesnoj industriji, kao što su: ekspertski sistemi, neuronske mreže, hibridni sistemi, fazi logika itd. [3].

Metode veštačke inteligencije se široko primenjuju u svim oblastima rešavanja inženjerskih problema, pa i prilikom donošenja dijagnostičkih odluka. Veštačka inteligencija je grana računarstva, koja teži da stvori računarske programe koji su osposobljeni za učenje, rešavanje problema i pamćenje (za rešavanje kognitivnih zadataka) na način na koji to radi ljudski mozak (na način koji se može smatrati inteligentnim). Kognicija (spoznaja) je poimanje stvarnosti koje se zasniva na čovekovom iskustvu, opažanju, prepoznavanju, rasuđivanju i zaključivanju. Problem nije samo vezan za mogućnosti računara da obrađuju podatke već za mogućnosti izrade računarskih programa sa sposobnostima inteligentnog ponašanja odnosno sa sposobnostima realizacije složenih procesa ljudskog razmišljanja, što je prilično daleko od postavljenog cilja, jer funkcionisanje ljudskog razmišljanja, još uvek nije dobro poznato. Metode veštačke inteligencije moraju biti sposobne: da memorišu znanje, da primene memorisano znanje na

rešavanje konkretnih problema i da izvrše akviziciju novih znanja i njihovu adaptaciju za rešavanje novih problema⁵⁵ [191].

4.8.4.1 Primena ekspertskih sistema prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Ekspertski sistemi su jedna od najznačajnijih metoda veštačke inteligencije, to su ustvari inteligentni računarski programi koji mogu da koriste ugrađeno znanje u cilju uspešnog rešavanja problema iz neke oblasti, na način koji bi se smatrao inteligentnim kada bi iste te probleme rešavao ekspert (čovjek). Ekspertski sistem je inteligentni računarski program koji koristi znanje i postupke zaključivanja za rešavanje problema dovoljno teških da zahtevaju stručnost eksperata. Znanje čine činjenice i heuristika (iskustvo i osećaj) [11].

U svaki ekspertski sistem je na pogodan način ugrađena velika količina visokokvalitetnog znanja o problemima iz neke oblasti ljudske delatnosti. Za ekspertске sisteme je karakteristično da je ugrađeno znanje smešteno u tzv. bazu znanja, trajnu memoriju koja je razdvojena od programa koji to znanje koristi pri rešavanju problema, tzv. mehanizma zaključivanja. U kojoj će meri jedan ekspertski sistem u svom radu ispoljavati sposobnost inteligentnog rešavanja problema koji mu se zadaju, pre svega zavisi od znanja koje je u njega ugrađeno. Smatra se da najveće i najkvalitetnije znanje iz neke oblasti imaju ljudi koji su eksperti u toj oblasti, i zato se nastoji da znanje koje se ugrađuje u ekspertski sistem tokom njegovog razvoja bude po svom kvalitetu i količini u što je moguće većoj meri sličnije znanju eksperata u toj oblasti [3].

Jedan od osnovnih razloga zbog kojih se koriste ekspertski sistemi je težnja da ekspertsko znanje iz različitih oblasti ljudske delatnosti (kao što je to npr. znanje o vibroakustičkim kontrolama) postane dostupnije kroz primenu računarskih programa. Postoje naponi i da se opšte, enciklopedijsko znanje ugradi u ekspertski sistem kao podloga za znanje iz određene oblasti. Ekspertski sistemi, ne mogu u potpunosti da zamene eksperte, naročito u pogledu kreativnosti, mogućnosti korišćenja dopunskog znanja iz srodnih oblasti i običnog zdravorazumskog znanja, kao i širine sagledavanja problema. Činjenica je, međutim da eksperti nisu uvek na raspolaganju kada treba rešiti neki problem, a i kada jesu njihove usluge mogu da budu skupe. Osim toga, ljudsko znanje se vremenom gubi pod naletom novih informacija, posebno ako se ne koristi često. Nasuprot tome, znanje jednom ugrađeno u ekspertski sistem je permanentno i postojano, i stalno je dostupno, bez obzira koliko se često koristi. Karakteristično je i to da stručnjaci često imaju teškoća u artikulaciji, objašnjavanju, dokumentovanju i prenošenju svog znanja drugim ljudima, dok su te aktivnosti kod ekspertskih sistema automatizovane i stoga vrlo lake⁵⁶ [22].

Cilj ekspertskih sistema je da umnože ekspertizu ljudi čije je vreme dragoceno. Kada se znanje eksperata koristi u ekspertskom sistemu ono može istovremeno efikasno biti na više od jednog mesta. Ekspert se oslobađa od svakodnevnih problema i može se posvetiti novim problemima i proširivanju znanja pre nego što ga prenese na druge. Omogućeno je da u svakom trenutku na raspolaganju bude celokupno znanje iz određene oblasti, tako da je zahvaljujući velikoj brzini računara iz tog znanja za kratko vreme moguće izvući zaključke [3,11].

Spoljašnji procesi koje mogu pratiti ili kontrolisati ekspertski sistemi predviđeni za rad u realnom vremenu su različiti, od industrijskih procesa, preko rada složenih medicinskih i drugih instrumenata, pa sve do autonomnog kretanja vozila na zemlji i na vodi, kao i raznih letelica u vazduhu i u svemiru. Da bi ekspertski sistemi mogli da obavljaju svoju funkciju u realnom vremenu potrebno je da preko odgovarajućih senzora stalno dobijaju informacije o promenama relevantnih veličina u spoljašnjem procesu.

Ekspertski sistemi su metoda veštačke inteligencije, koja poseduje, slika 4.23.⁵⁷ [3,11]:

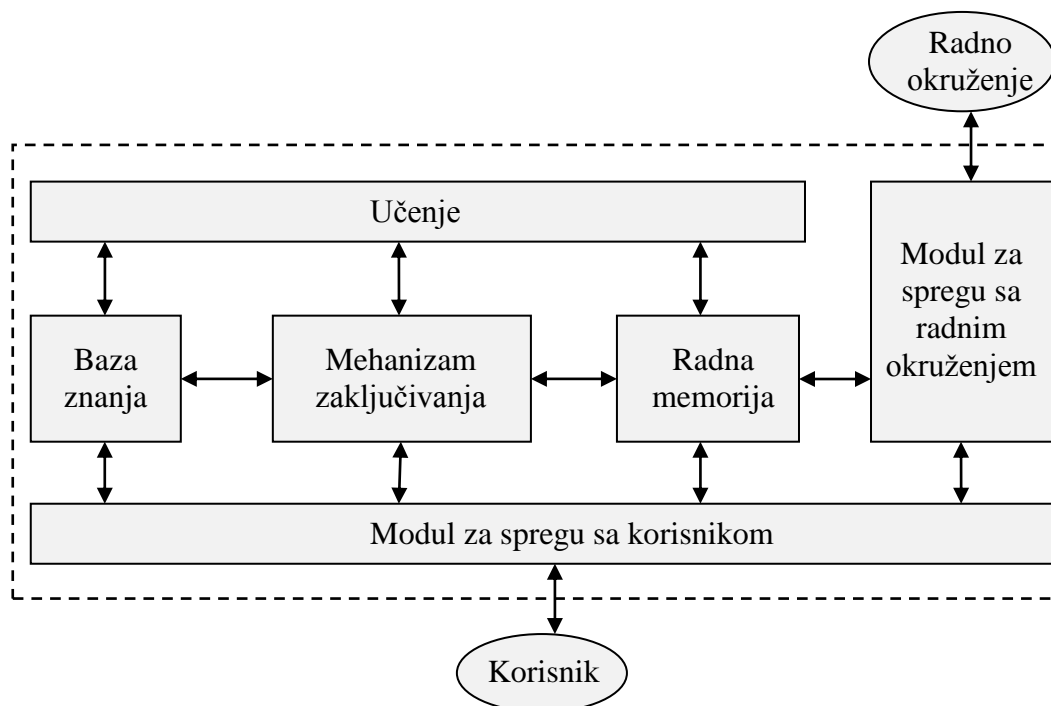
- Bazu znanja,

⁵⁵ Šaranović, I., Novak, J. Dijagnostika vibracionog stanja hidroturbina primjenom koncepata veštačke inteligencije, I Međunarodni naučno-stručni Simpozijum Infotech, Vol. 2, Ref. C-11, Jahorina, mart 2002, pp. 215-218.

⁵⁶ Adamović, Z., Expert systems for maintenance of technic systems, Manufacturing and management in 21th century, Skopje, 16-17 September, 2004.

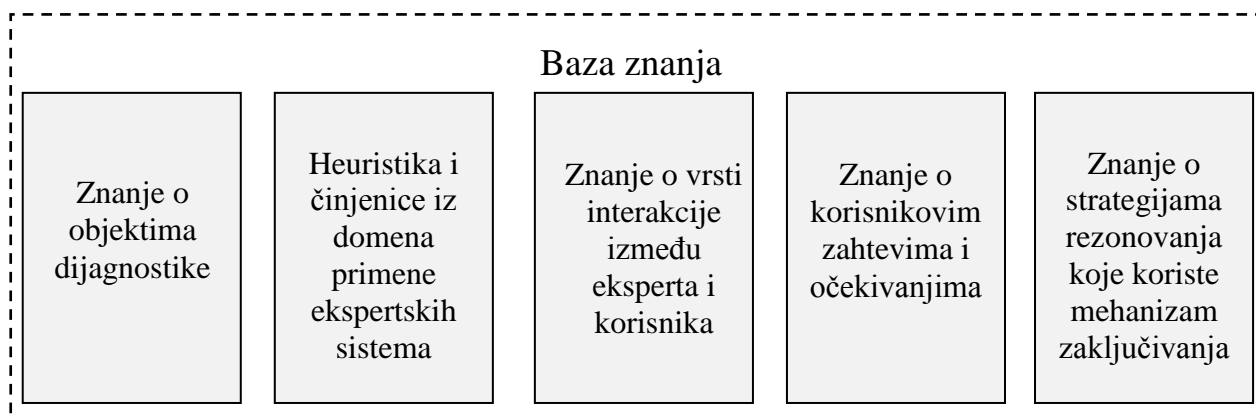
⁵⁷ Adamović, Ž., Adamović, M., Tehnička dijagnostika, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.

- Mehanizam (algoritam) zaključivanja,
- Radnu memoriju (modul za akviziciju znanja),
- Modul za spregu sa korisnikom (korisnički interfejs) i
- Modul za spregu sa radnim okruženjem.



Slika 4.23. Osnovni elementi ekspertskog sistema

Baza znanja je specijalizovana i jedinstvena za konkretan ekspertski sistem koji sadrži znanje eksperata iz određene oblasti (npr. znanje o termografskim kontrolama mašina), a koje je uneto putem sistema za prikupljanje znanja i ne menja se tokom vremena. Radi postizanja boljih performansi, u baze znanja se prikupljaju i druge vrste znanja, prikazane na slici 4.24. Radna memorija sadrži trenutne podatke, koji su promenljivi, o problemu koji se rešava. Mehanizam zaključivanja na osnovu tih promenljivih podataka i fiksnog znanja iz baze znanja rešava problem. Korisnik sa ekspertskim sistemom komunicira preko modula za spregu sa korisnikom⁵⁸ [83].



Slika 4.24. Vrste znanja koje se prikupljaju u bazu znanja [3]

Učesnici u formiranju ekspertskih sistema su: ekspert, inženjer znanja i korisnik.

⁵⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka o stanjima mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 33-40.

Ekspert je stručnjak u nekoj oblasti, koji poseduje znanje, veštine i iskustva na osnovu kojih rešava probleme iz određene oblasti, bolje i efikasnije od drugih ljudi. Na osnovu svog znanja može da prepozna najbrži način dolaska do rešenja, kao i ispravan pristup u rešavanju problema, čak i ako ne raspolaže potpunim podacima. Posедуje i neke lične osobine poput snalažljivosti i heurističkog znanja (iskustva). Heuristika obuhvata metode i tehnike rešavanja problema, učenja i otkrivanja koji su zasnovani na iskustvu. Heuristički metodi se koriste da ubrzaju proces pronalazjenja dovoljno dobrog rešenja u situacijama kada sprovođenje detaljnog istraživanja nije praktično. Primeri toga obuhvataju korišćenje raznih uopštenih pravila, informisanog nagađanja, intuicije i zdravog razuma [3].

Inženjer znanja je osoba koja prikuplja znanje, vrši izbor softvera pogodnog za rešavanje konkretnog problema, zatim formira, testira, revidira, instalira i održava ekspertski sistem. Postupak prikupljanja znanja počinje tako što inženjer znanja nastoji da od eksperta dobije heurističko znanje, zatim da to znanje kodira i ugradi u bazu znanja ekspertskog sistema koga formira. Prikupljanje znanja obično zahteva i prisustvo eksperta i prisustvo inženjera znanja. Eksperti često imaju teškoća prilikom izražavanja svog heurističkog znanja preko apstraktnih pravila. Velike teškoće postoje i prilikom integracije znanja iz više izvora. Sve to zahteva veliku veštinu i iskustvo inženjera znanja. Tokom prikupljanja znanja dolazi do eksplicitnog formalizovanja znanja od strane eksperta, što omogućava dalje produbljivanje znanja iz oblasti za koju se ekspertski sistemi formira [3].

Korisnik je osoba koja radi sa ekspertskim sistemom, unosi ulazne podatke i činjenice, zahteva objašnjenja i definiše zahteve vezane za korisnički interfejs [3,11].

Izgradanja ekspertskog sistema za tehničku dijagnostiku obavlja se na liniji komunikacije: ekspert za održavanje - inženjer znanja - računar [11].

Proces ekstrakcije, formalizacije i kodiranja znanja eksperta korišćenjem metoda i tehnika, u cilju ugradnje tog znanja u bazu znanja ekspertskog sistema koji se razvija naziva se prikupljanje (akvizicija) znanja. To je process transfera i transformacije znanja o nekoj ekspertizi, na primer, održavanju prema nivou vibracija nekog sastavnog dela mašine [11].

Ekspertski sistemi se mogu uspešno koristiti u dijagnostičkom procesu, jer su u stanju da veoma brzo, ispituju, uporede, provere veliki broj podataka i postave dijagnozu stanja mašina. Ako specijalista-dijagnostičar želi da sazna na osnovu čega je postavljena takva dijagnoza ekspertski sistemi prikazuju način na koji je to urađeno [3,11].

Ekspertski sistemi imaju sposobnost zaključivanja i objašnjavanja, mogu da objasne svoje akcije, opravdaju svoje zaključke i obezbede korisniku informacije o znanju koje poseduje.

Ekspertski sistem ima zadatak da izgradi, sačuva i primeni sva potrebna znanja visokoobučenog eksperta iz oblasti na koju je primenjen. Ovakav pristup se često koristi baš u koncepcijama održavanja prema stanju na bazi merenja i analize vibracija u situacijama kada je angažovanje visokoobučenih i iskusnih vibrodijagnostičara iz nekog razloga (najčešće finansijskog) neopravdano. Veliki broj ekspertskih sistema u ovoj oblasti je razvijen usled manjka iskusnih vibrodijagnostičara ili usled previsoke cene njihovog angažovanja, usled manjka znanja ili iskustva trenutno zaposlenih vibrodijagnostičara i usled manjka vremena potrebnog da se izvrše sve potrebne analize koje će rezultirati u preciznim i pouzdanim zaključcima [11].

Osnovni problemi koji prate formiranje ekspertskih sistema za donošenje dijagnostičkih odluka su [3]:

- Kako na najbolji način znanje predstaviti (tj. organizovati) u računaru, tako da pri rešavanju problema bude razumljivo korisniku, da ga je moguće jednostavno dopunjavati, modifikovati i verifikovati.
- Kakav mehanizam zaključivanja treba formirati da bi se omogućilo uspešno rešavanje problema (odgovor na pitanje) da bi proces zaključivanja bio razumljiv korisniku, tj. da ga je moguće pojasniti.

Oblik i karakteristike ekspertskih sistema za tehničku dijagnostiku proizilaze iz sledećih zahteva [3,11]:

- svesti na minimum verovatnoću da se ne izvrši dijagnostika stanja,
- vreme dijagnostike svesti na minimum,
- izvršiti integraciju znanja, istorijske podatke o radu mašine, znanje na bazi fizičkih zakona, znanje na bazi funkcionalnog opisa i rada sistema (mašina),
- razumevanje različitih tipova problema,
- mogućnosti širenja i održavanja baze znanja itd.

Dijagnostika stanja sistema je otežana činjenicom da je relativno mali broj komponenti koje čine sklop, podložno direktnoj kontroli performansi, jer se nalaze, po pravilu, zatvorene u odgovarajuća kućišta i ne može im se direktno pristupiti. Obično se merni senzori postavljaju u nekoliko tačaka koje su dostupne i performanse sklopa se njima mere. Cilj dijagnostike stanja sistema je da na osnovu rezultata merenja (simptoma) bliže identifikuje otkaze delova sistema, kako bi se mogli pravovremeno otkloniti [11].

Za dijagnostičku metodu je karakteristično kvalitativno rezonovanje, odnosno zaključivanje i objašnjavanje podešavanja sklopa se izvodi uz pomoć kvalitativnih koncepata, bez korišćenja složenih matematičkih iskaza kao što su recimo diferencijalne jednačine, u modelovanju dinamičkih procesa koje vezuju simptome grešaka sa uzrocima. Ovakav postupak obezbeđuje efikasno rezonovanje tipa uzrok-posledica čime se obezbeđuje efikasan dijagnostički postupak.

Postupak kvalitativnog rezonovanja se može zasnivati na modelu dubokog rezonovanja ili na modelu plitkog rezonovanja. U modelu dubokog rezonovanja se obuhvata i strukturni opis sistema. S druge strane, postoje ekspertske sistemi tzv. plitkog rezonovanja, koji lanac zaključivanja baziraju jedino na rezultatima merenja bez ulaženja u strukturu sklopa. Ekspertske sistemi bazirani na modelu dubokog rezonovanja imaju sledeće prednosti [11]:

- Dijagnostički sistem je u stanju da razmatra sve tipove grešaka. Ekspertske sistem sa modelom plitkog rezonovanja je u stanju da, putem ugrađenog heurističkog znanja, detektuje samo greške koje su ugrađene u ekspertske sistem. Ekspertske sistem sa dubokim rezonovanjem eksplicitno modeluje kompletan sistem koji se razmatra, te je prema tome u stanju da tretira svaki mogući scenario grešaka koji može da nastane u takvom sistemu.
- Dijagnostički sistem sa dubokim rezonovanjem se može, relativno lako, prenositi sa jednog na drugi tehnički sistem bez bitnih modifikacija. To je moguće zbog razdvajanja kauzalnog dela – strukturnog i dinamičkog opisa ponašanja sklopa – od dijagnostičkog procesa.
- Lakše je održavati ovakav sistem, zbog toga što se bilo kakve izmene u projektu sklopa, uzimaju u obzir jednostavnom izmenom strukturnog opisa. S druge strane, sistemi sa plitkim rezonovanjem moraju da preispitaju sve do tad korišćene heuristike, da bi se usaglasili sa izmenama u projektu.
- Dijagnostički proces je efikasniji u slučaju sistema sa dubokim rezonovanjem, jer je vreme pretraživanja obično kraće.
- Lakše je izvršiti validaciju kompletnosti i korektnosti dijagnostičkog sistema zbog modularne predstave strukturnog i dinamičkog opisa sistema.

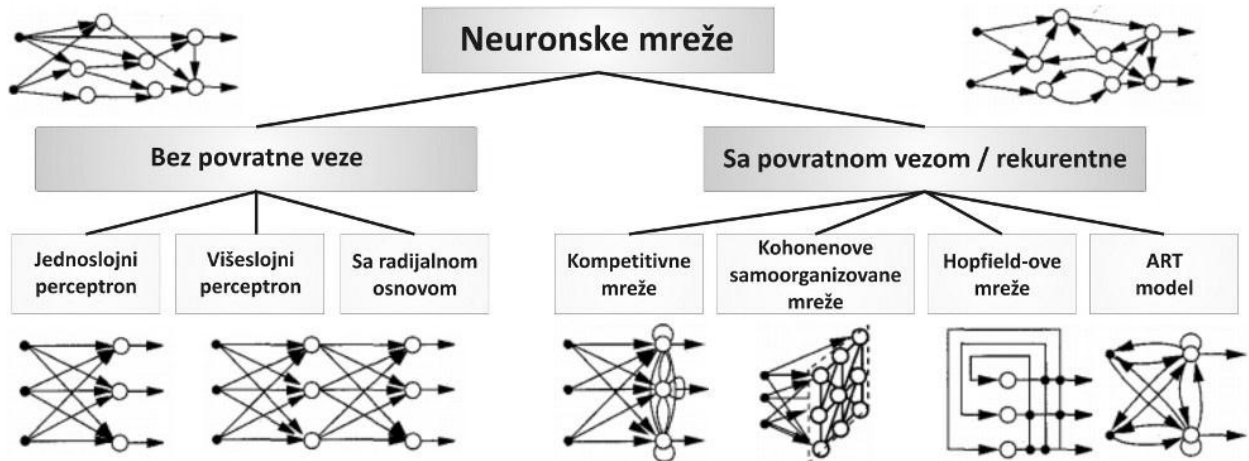
4.8.4.2 Primena neuronskih mreža prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Neuronske mreže predstavljaju jednu od najznačajnijih metoda veštačke inteligencije. Sastoje se od određenog broja međusobno povezanih čvorova koji se nazivaju veštačkim neuronima. Funkcionisanje neuronskih mreža se, u određenoj meri, može uporediti sa funkcionisanjem prirodnih (bioloških) neurona (nervnih ćelija). Međutim, između veza veštačkih i bioloških (prirodnih) neurona nema velike sličnosti, pošto način funkcionisanja ljudskog mozga još uvek nije dobro poznat. Neuronske mreže pokušavaju reprodukovati ljudsko razmišljanje modelujući (predstavljajući) veze između neurona ljudskog mozga preko veza veštačkih neurona. Neuronske mreže se mogu prikazati kao dijagrami skaliranih i usmerenih

veza u kojima su čvorovi veza neuroni, dok veze između čvorova predstavljaju veze između izlaznih i ulaznih neurona. Neuroni su povezani u slojevima između ulaza i izlaza mreže⁵⁹ [83].

S obzirom na koji način se ostvaruje povezivanje neurona, postoje dva tipa neuronskih mreža, slika 4.25. [202]:

- neuronske mreže bez povratnih veza između neurona i
- neuronske mreže sa povratnim vezama između neurona tzv. rekurentne mreže.



Slika 4.25. Tipovi neuronskih mreža⁶⁰ [202]

Neuronske mreže razvijaju strategiju donošenja dijagnostičkih odluka pomoću učenja na bazi prošlog iskustva i ne zahtevaju sveobuhvatno modelovanje sistema. Treniranje neuronske mreže se obavlja tako što se mreži predstavljaju skupovi podataka koji odgovaraju ispravnoj mašini i mašini sa otkazom. Na osnovu obučavajućeg skupa, u procesu treniranja mreže, dolazi do menjanja težina između neurona kako bi se, po završetku obučavanja, na izlazu mreže dobijale željene vrednosti. Svaki veštački neuron, prima nekoliko ulaznih signala, množi ih sa njihovim težinama i kao izlaz generiše nelinearnu vrednost. Pre dovođenja podataka na ulaz mreže, potrebno je izvršiti obradu ulaznih podataka. Ako se snimljeni podaci direktno šalju na ulaz mreže kao obučavajući skup, elementi skupa sa velikom vrednošću teže poništavanju uticaja elemenata sa manjom vrednošću. Takođe, ako se takvi podaci direktno dovode na ulaz mreže, postoji rizik da neuroni dođu u stanje zasićenja. Normalizacija podataka podrazumeva kompresovanje ulaznih podataka na određeni opseg vrednosti između npr. [-1, 1].

U okviru automatizovanih vibrodijagnostičkih postupaka, neuronske mreže se uglavnom koriste za prepoznavanje obrazaca ulaznih obeležja koji predstavljaju različite skalarnе iskaze vibracionog signala (analiziranog u vremenskom, frekvencijskom ili vremensko-frekvencijskom domenu). Postoji nekoliko arhitektura neuronskih mreža pri čemu se u automatizaciji vibrodijagnostičkih metoda najviše koriste višeslojne perceptronske mreže⁶¹ [36,202].

4.8.4.3 Primena hibridnih sistema prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Proučavanje neuronskih mreža, naročito u poslednjoj dekadi prošlog veka, trasiralo je novi pravac u razvoju ekspertskih sistema, pre svega u vidu integracije neuronskih mreža i konvencionalnih ekspertskih sistema, radi dobijanja efikasnijih sistema koji bi bili otporniji na greške i nepotpune podatke i adaptivniji za proširivanje sistema. Ovo povezivanje ekspertskih sistema i neuronskih mreža dovelo je do razvoja hibridnih sistema veštačke inteligencije, koji nalaze široku primenu za rešavanje različitih problema koje

⁵⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka o stanjima mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 33-40.

⁶⁰ Zuber, N., Ličen, H., Mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije u automatizaciji vibrodijagnostičkih metoda, Tehnička dijagnostika, No 2, Beograd, 2011.

⁶¹ Awadallah, M. A., Morcos, M. M., Automatic diagnosis and location of open-switch fault in brushless DC motor drives using wavelets and neuro-fuzzy systems, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No 1, 2006, pp. 104-111.

nameće savremeni tehnološki razvoj, kao što su zadaci praćenja i prognoze stanja mašina u budućnosti, planiranja itd [94].

4.8.4.4 Primena softverskih agenata prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Softverski agenti su programi osposobljeni za autonomno, fleksibilno, namensko delovanje i rezonovanje, s ciljem ispunjavanja jednog ili više zadataka. Oni su dizajnirani tako, da mogu da reaguju na spoljašnje uticaje iz okruženja u kojem se nalaze, kao i na akcije i ponašanje korisnika sistema. Kada se više softverskih agenata nalazi u određenom sistemu, individualni softverski agenti mogu reagovati zajedno u cilju obavljanja određenog zadatka, ili više zadataka, kao i na uticaje iz drugih spoljašnjih sistema. Softverski agenti se mogu koristiti kao ekspertske asistenti u dijagnostici, detekciji otkaza i predikciji otkaza na kompleksnim mašinama. Poslednjih godina oni privlače veliku pažnju zbog svojih inovacija naročito u oblasti distribuiranih računarskih sistema. Do sada su razvijeni mnogi softverski agenti, najviše u industrijskim sredinama. Pored svih prednosti, oni otvaraju neke nove probleme koje treba rešiti kao što su standardizacija arhitekture i osnovnih koncepcija softverskih agenata, problemi sigurnosti itd. Softverski agenti poseduju potencijal da u budućnosti značajno poboljšaju mogućnosti daljinske dijagnostike automatizovanih tehničkih sistema⁶² [141].

4.8.4.5 Primena interaktivnih Web uputstava prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Zahvaljujući naglom razvoju informaciono-komunikacionih tehnologija, računarom upravljani dijagnostički sistemi sve više evoluiraju u sisteme bazirane na korišćenju interaktivnih Web uputstava. Interaktivna Web uputstva predstavljaju sofisticiran i moćan servis koji objedinjuje skup metoda, tehnika i informacija, neophodnih u dijagnostici i održavanju tehničkih sistema. Interaktivna Web uputstva su bazirana na primeni metoda veštačke inteligenciji koje se koriste kao podrška automatizovanim dijagnostičkim kontrolama. Korisnici interaktivnog Web uputstva, posredstvom Interneta, a uz pomoć teksta, grafike, 3D modela, zvučnih i video zapisa, kao i animacija, prate stablo otkaza sa scenarijima nastupanja otkaza i dobijaju ekspertske savete o aktivnostima održavanja koje treba preduzeti.

4.8.4.6 Primena fazi logike prilikom donošenja dijagnostičkih odluka

Fazi logika (engl. fuzzy logic - rasplinuta logika) predstavlja uopštavanje klasične logike, razvijene nad teorijom rasplnutih skupova. Za razliku od klasične logike, u kojoj iskazi mogu imati vrednosti tačno i netačno, fazi logika pruža analitički aparat kojim se mogu modelovati iskazi čija istinitostna vrednost može pripadati kontinualnom prelazu od tačnog ka netačnom. Ona je matematički formalizovan način predstavljanja, koji modeluje neodređenosti u lingvistici. U teoriji klasičnih, jasnih skupova, neki određeni element ili pripada ili ne pripada nekom definisanom skupu, što znači da je pripadnost elementa skupu krajnje distinktna. Fazi skup je, u tom smislu, generalizacija klasičnog skupa, pošto se pripadnost (tj. stepen pripadnosti) elementa fazi skupu može okarakterisati brojem iz intervala [0,1]. Drugim rečima, funkcija pripadnosti (membership function) fazi skupu preslikava svaki element univerzalnog skupa u interval realnih brojeva [0,1]. Jedna od najvećih razlika između klasičnih i fazi skupova jeste u tome što klasični skupovi uvek imaju jedinstvenu funkciju pripadnosti, dok se za fazi skup može definisati beskonačno mnogo različitih funkcija pripadnosti kojima se on može opisati (sam pojam fazi (engl. fuzzy) znači nešto nejasno, zamagljeno, lepršavo i sl.). Fazi logika obezbeđuje formalnu metodologiju za predstavljanje, manipulaciju i implementaciju ljudskog heurističkog predznanja o tome kako donositi dijagnostičke odluke⁶³ [83].

⁶² McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Hossack, J. A., McDonald, J. R., Automating power system fault diagnosis through multi-agent system technology, 37th International Conference on Proceedings of the Annual Hawaii, 5-8 January 2004, pp. 8.

⁶³ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka o stanjima mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 33-40.

4.9 Primeri automatizovane dijagnostike u praksi

4.9.1 Automatizovani dijagnostički sistemi u elektranama

Formiranje automatizovanih dijagnostičkih sistema u elektranama predstavlja kvalitetno napredniji pristup u dijagnostici stanja tehničkih sistema. Automatizovani dijagnostički sistemi u elektranama doprinose da se postignu pozitivni efekti u pogledu unapređenja energetske efikasnosti, smanjenja troškova održavanja, ekonomičnijeg poslovanja itd. Oni su sposobni da prate, arhiviraju i obrađuju sve relevantne proizvodne parametre u elektranama. Automatizovani dijagnostički sistemi omogućavaju da oprema i proizvodni ciklusi u elektranama budu pod stalnim nadzorom. Radi potpunijeg uvida u rad elektrane potrebno je uzeti u obzir, mehaničke karakteristike opreme, vibracije, kao i mnoga druga merenja koja mogu da upotpune sliku o nadziranoj opremi. Ovi podaci se odnose na tehničke sisteme, koji su od značaja za proces proizvodnje.

Automatizovani dijagnostički sistemi u elektranama, čija je arhitektura prikazana na slici 4.26, se sastoje od: merne opreme, komunikacionih sistema, serverskih (centralnih) računara, klijentskih računara itd.⁶⁴ [94,127].

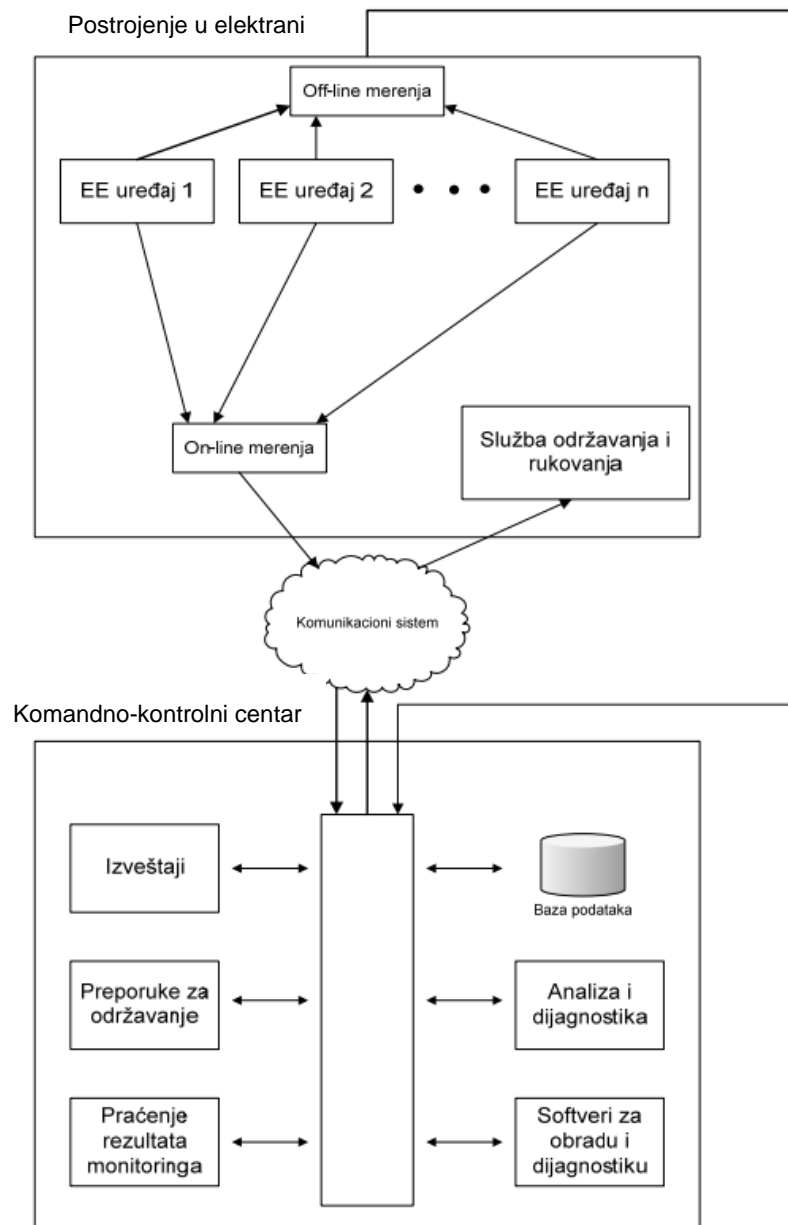
Do podataka se dolazi preko LAN-a, tako što se klijentski računar preko serverskog računara i VPN-a povezuje sa mernom opremom u elektranama. Nakon toga se očitavaju podaci u realnom vremenu i tako se stiče uvid u trenutne rezultate merenja praćenih dijagnostičkih parametara.

Serverski računar u fizičkom smislu predstavlja centralno mesto na koje pristižu podaci dobijeni off-line i on-line metodama merenjima. Na serverskom računaru je instaliran softver za akviziciju i obradu podataka, softver za bazama podataka i bazama znanja, kao i softver za donošenje dijagnostičkih odluka,

Na klijentskim računarima je instaliran softver za pregled i analizu podataka (prikaz grafika, alarma i sl.) koji su relevantni u dijagnostici stanja tehničkih sistema. Izmerene veličine se upoređuju sa specificiranim ili prethodno izmerenim veličinama (izmerenim tokom periodičnih ispitivanja ili tokom puštanja u pogon). Prilikom analize koriste se i namenski softveri drugih kompanija. Pored njih se koriste i arhiva izveštaja i razne preporuke. Centralni deo automatizovanog dijagnostičkog sistema je komandno-kontrolni centar u kome stručnjaci sa velikim iskustvom (eksperti) u dijagnostičkim kontrolama elektroenergetiske opreme na osnovu detaljne analize pristiglih i obrađenih rezultata merenja (uz pomoć računara i programskih aplikacija prilagođenih za razne vidove analize i prikaza, daju svoja ekspertska (stručna) mišljenja o stanju praćene elektroenergetske opreme u hidro i termo-elektranama (generatora, transformatora itd.)), a koja je od značaja za proizvodnju električne energije, ocenjuju njenu raspoloživost i pogonsku spremnost, daju preporuke o daljem radu ili popravkama, izrađuju izveštaje i sl.

Na osnovu uvida u veliki broj tehničkih parametara moguće je izvoditi tehno-ekonomske analize koje su od interesa za tržište, planirati proizvodnju, pravilnije upravljati resursima, definisati i planirati periode remonta, ostvariti uvid u stanje opreme i pogona u realnom vremenu, detektovati otkaze u početnoj fazi nastanka, sprečiti ili smanjiti posledice otkaza, analizirati uzroke otkaza, izvršiti optimizaciju upravljanja opremom, provesti održavanje prema stanju itd. Automatizovani dijagnostički sistemi imaju i mnogo šire mogućnosti, kao što su: praćenje kompletnog procesa proizvodnje električne energije, praćenje stanja pojedinih resursa (dotoka vode u hidroelektranama, količine uglja u termoelektranama, stanja transportnih traka itd.).

⁶⁴ Kovačević, D., Miladinović, N., Milić, S., Polužanski, V., Kožicić, J., Dijagnostički centar i opšti principi informacionih tehnologija u daljinskom nadzoru i dijagnostici stanja opreme u elektroenergetici, Infoteh, Vol. 10, Ref. D-17, Jahorina, mart 2011, pp. 354-357.



Slika 4.26. Arhitektura automatizovanih dijagnostičkih sistema u elektranama [127]

4.9.2 SCADA sistem tračnih transporterera na površinskom koku „Drmno“ sa mogućnostima dijagnostike

Nadzor i upravljanje radom tračnih transporterera vrši se daljinski iz komandno-kontrolnog centra, u kome su sve relevantne informacije za rad transporterera trenutno dostupne kvalifikovanom osoblju, tako da je moguć uvid u sve procesne veličine od interesa, kao i u stanje svih delova tračnog transporterera. Mogućnost praćenja i snimanja velikog broja signala sa tračnih transporterera na računaru koji se nalazi komandno-kontrolnom centru, kao i analiza tih signala omogućavaju detekciju otkaza delova tračnog transporterera u početnoj fazi nastanka, čime se stvaraju uslovi za brže otklanjanje otkaza, kraće vreme zastoja uzrokovanih otkazima opreme, kao i angažovanje manjeg broja zaposlenih.

Komandno-kontrolni centar je smešten u upravnoj zgradi kopa i povezan je optičkim kablom sa njemu najbližim transporterom. Tračni transportereri su na međusobnoj udaljenosti od 1500 do 2200 m i njihove trase su iskorišćene za postavljanje optičkih kablova, koji zajedno sa optičkim kablom iz komandno-kontrolnog centra i modularnim industrijskim svičevima čine Ethernet mrežu.

U okviru sistema daljinskog nadzora ugrađene su i mrežne IP (video) kamere predviđene za snimanje svih tehnološki kritičnih mesta, koje je potrebno neprekidno nadgledati iz komandno-kontrolnog centra. IP kamere daju fizički osećaj mesta i zvuka sa tehničkog sistema i mogu se opisati kao kamera i računar spojeni u jedan inteligentni uređaj koji digitalizuje i kompresuje video materijal. Ovaj način nadzora se

podržava samo u slučajevima kada je direktno vizuelno nadgledanje značajnije od prenošenja korisničkih podataka.

Sistem daljinskog nadzora i upravljanja tračnih transporterera ima tri nivoa upravljanja. Povezivanje ovih nivoa upravljanja ostvareno je korišćenjem različitih komunikacionih protokola i načina povezivanja. Povezivanje računara u komandno-kontrolnom centru, kao najvišeg nivoa i PLC-ova tračnih transporterera kao srednjeg nivoa, ostvareno je korišćenjem Ethernet TCP/IP protokola, preko optičkih kablova za prenos signala između lokacija na relativno velikoj udaljenosti (do 2,5 km). PLC-ovi na tračnom transporteru su sa sledećim nivoom (ulazno-izlaznim modulima, operaterskim panelima i frekvencijskim pretvaračima) povezani Profibus komunikacionim protokolom, realizovanim pomoću bakarnih komunikacionih kablova, jer su dužine kablova između pojedinih uređaja na ovom nivou relativno kratke (do 100 m).

U komandno-kontrolnom centru se nalazi PC računar sa tri monitora visoke rezolucije (kao što se vidi sa slike 4.27) i SCADA softverom, koji omogućava nadzor i upravljanje sistemom. Grafički interfejs omogućava operateru uvid u sve tehnološke parametre od interesa za pouzdan i bezbedan rad tračnih transporterera. Na prvom (levom na slici) monitoru prikazuje se dijagnostika svih delova tračnog transporterera. Otkaz bilo kog dela signalizira se operatoru u vidu alarmne poruke. Pozadina ikonice dela na kome se pojavi otkaz bilo koje vrste trepće crveno, a operator može da dobije više informacija klikom tastera miša na tu ikonicu. Na drugom (srednjem na slici) monitoru se prikazuje pregled senzora tračnog transporterera. Na trećem (desnom na slici) monitoru prati se rad tračnih transporterera putem mrežnih IP (video) kamera, postavljenih na svakom transporteru. Računar na kojem se izvršava upravljačko nadzorni softver je standardni PC računar sa grafičkom karticom sposobnom za prikaz na tri monitora u isto vreme. Pored upravljačkih funkcija koje su realizovane, sistem za daljinski nadzor i upravljanje ima mogućnost snimanja podataka o radu i stanju tračnih transporterera u dužem vremenskom periodu.



Slika 4.27. Izgled komandno-kontrolnog centru u kome se nalazi računar sa tri monitora⁶⁵ [121]

Operaterski paneli su postavljeni na svakom tračnom transporteru kako bi se omogućilo upravljanje i praćenje sistema u lokalu, tako da je uvid u stanje transporterera moguće ostvariti i na samom tračnom transporteru.

4.9.3 Sistem daljinskog nadzora bagera

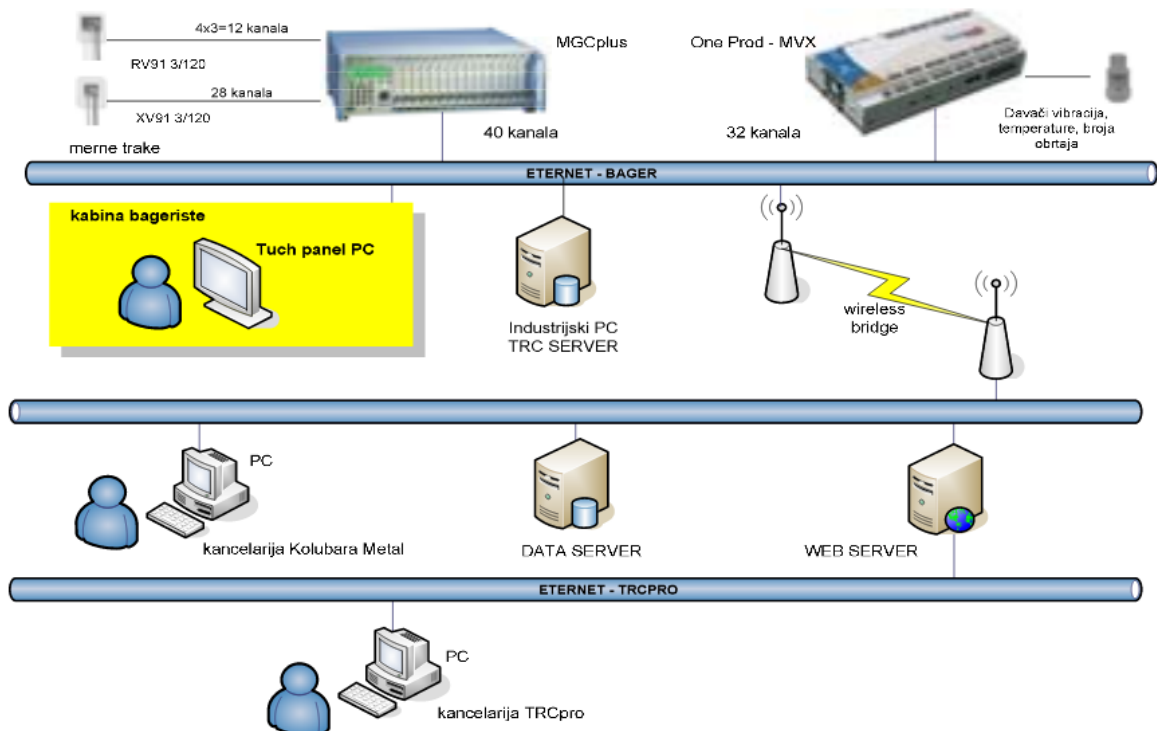
Sistem daljinskog nadzora operativnog stanja opreme je uspešno primenjen na primeru bagera SRs 1300.24/2.5 za površinski iskop uglja u rudarskom basenu Kolubara. Bager je po svojoj prirodi izuzetno kritična mašina od koje se, sa jedne strane, zahteva veoma visoka raspoloživost, a sa druge strane u toku rada trpi opterećenja u vidu kratkotrajnih dinamičkih sila koje opterećuju delove konstrukcije amplitudama znatno većim od projektovanih. Zbog toga je realizovan sistem daljinskog nadzora bagera koji osim praćenja vibracija ležajeva na svim bitnijim pogonima omogućava i praćenje naprezanja u konstrukciji, primenom mernih traka. Merna mesta na kojima se prate naprezanja u konstrukciji i vibracije ležajeva na svim bitnijim pogonima bagera, prikazana su na slici 4.28. [3,204].

⁶⁵ Jeftenić, B., Ristić, L., Bebić, M., Štatkić, S., Jevtić, D., Mihajlović, I., Rašić, N. Realizacija rada sistema tračnih transporterera sa daljinskim upravljanjem, *Integritet i vek konstrukcija*, Vol. 10, No 1, 2010, pp. 21-30.



Slika 4.28. Merna mesta na kojima se prate naprezanja u konstrukciji i vibracije ležajeva na svim bitnijim pogonima bagera [3,204]

Na slici 4.29. je prikazana šema sistema daljinskog nadzora operativnog stanja bagera. Hardversku osnovu sistema čine dva merna sistema bazirana na TCP/IP protokolu, i to OneproD MVX sistem u 32-kanalnoj varijanti i univerzalno merno pojačalo HBM MGCplus u 40-kanalnoj varijanti. Signali sa senzora ugrađenih u delove bagera prenose se na merne sisteme, a sa njih na lokalni Ethernet bagera (odnosno optičku liniju) na koga je povezan industrijski računar koji se nalazi u kabini bageriste. Lokalni Ethernet bagera je bežičnom mrežom povezan sa prvom pristupnom tačkom (engl. acces point) koja se nalazi na obodu kopa preko koje je povezan sa Data serverom, na kome je instaliran OneproD XPR softver za analizu vibracija i za real-time vibrodijagnostiku ležajeva na svim bitnijim pogonima bagera, kao i HBM Catman softver za analizu signala prikupljenih sa mernih traka. Data serveru pristupaju daljinski dva klijent računara i to jedan računar koji se nalazi u Kolubara Metalu i drugi koji se nalazi u dijagnostičkom centru TRCpro-a u Novom Sadu. Ovako izveden sistem daljinskog nadzora omogućava real-time uvid u stanje bagera kao i analizu mernih rezultata od strane: osoblja koje opslužuje bager u smeni, članova službe održavanja kopa i udaljenih vibrodijagnostičkih eksperata [3,204].

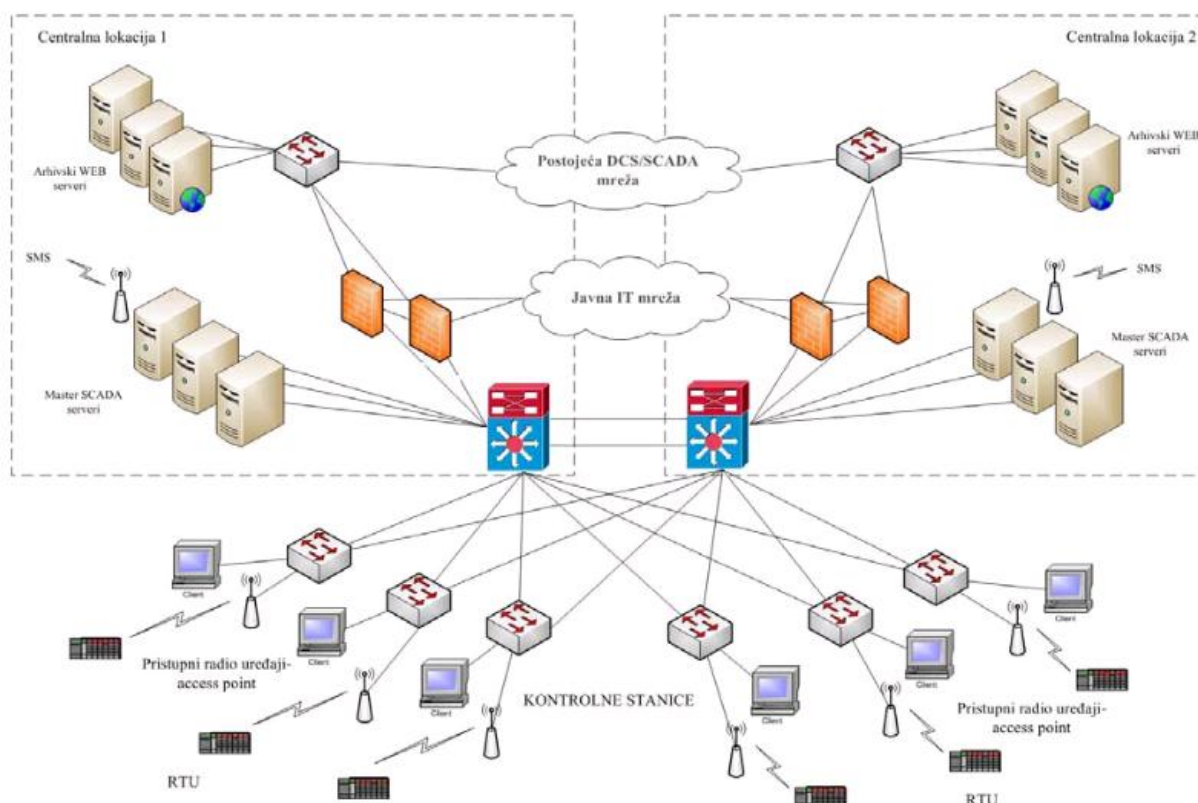


Slika 4.29. Šema sistema daljinskog nadzora operativnog stanja bagera⁶⁶ [3,204]

⁶⁶ Zuber, N., Šostakov, R., Implementacija daljinskog monitoringa mašina po stanju, Konferencija „Održavanje 2012“ Zenica, B i H, 13. - 16 juni 2012.

4.9.4 SCADA sistem naftnih bušotina sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

Za potrebe nadzora naftnih bušotina projektovan je SCADA sistem distribuirane server/klijent arhitekture, čija je arhitektura prikazana na slici 4.30. Sistem je zasnovan na IP tehnologiji uz mogućnost daljinskog pristupa podacima preko web pretraživača. U okviru sistema implementiran je i SMS servis koji nudi uslugu obaveštavanja autorizovanog osoblja o vrednostima glavnih parametara alarma sistema putem kratkih tekstualnih poruka. Projektovani sistem je organizovan tako da postoje dve centralne lokacije i nekoliko kontrolnih stanica gde su smešteni dispečerski centri, odnosno klijent stanice. S obzirom na veliku teritorijalnu razduženost, nadležnosti nad RTU uređajima su podeljene po kontrolnim stanicama. Svaka dispečerska radna stanica nadgleda određeni broj udaljenih stanica po teritorijalnoj pripadnosti.



Slika 4.30. Arhitektura SCADA sistema za nadzor naftnih bušotina⁶⁷ [53]

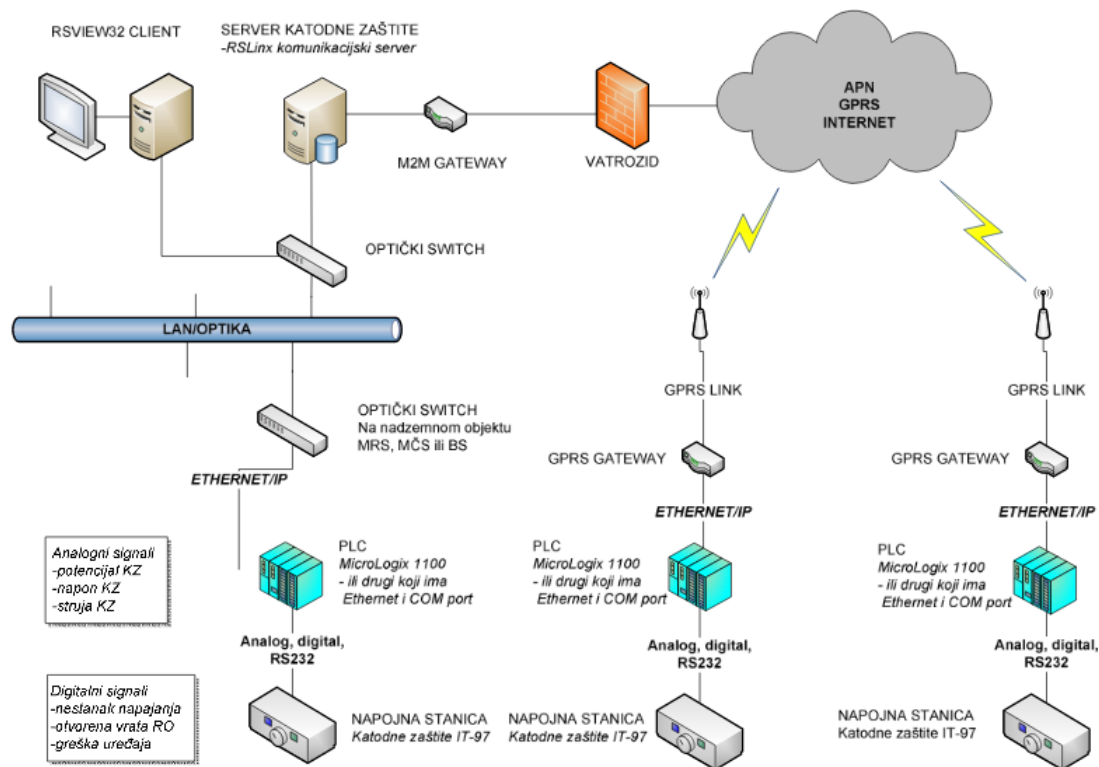
RTU uređaji, postavljeni na naftnim bušotinama, povezani su sa centralnim serverima radio linkovima i optikom. Pristupne stanice (engl. access points) smeštene su na kontrolnim stanicama. Iz kontrolnih centara postoji veza sa centralnom lokacijom preko SDH (Synchronous Digital Hierarchy) prstena. Na istim stanicama postavljeni su L3 svičevi koji su povezani na multilayer svičeve centralne stanice. Sistem se može smatrati hibridnim rešenjem u kome je centralna stanica povezana sa udaljenim stanicama-bušotinama preko SDH/PDH prstena i radio veza, odnosno optičkih kablova.

4.9.5 SCADA sistem katodne zaštite gasovoda sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

SCADA sistem katodne zaštite omogućava daljinski nadzor (praćenje parametara) i upravljanje (podešavanje parametara) napojnih stanica katodne zaštite, kao što se vidi slike 4.31. [156]. Analogni i digitalni signali sa napojnih stanica katodne zaštite prenose se na PLC-ove, koji su sa napojnim stanicama katodne zaštite povezani preko komunikacijskog RS-232 kabla⁶⁸ [85, 156].

⁶⁷ Čukić, N., Kisić, S., Mandić-Lukić, J., Bezbednost SCADA sistema, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, March 2012., pp. 396 -400

⁶⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Ašonja, A., Automatizovani dijagnostički sistemi gasovoda, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.



Slika 4.31. Blok šema sistema daljinskog nadzora i upravljanja napojnih stanica katodne zaštite⁶⁹ [156]

Podaci sa napojnih stanica bilo da dolaze preko bežične GPRS mreže bilo da dolaze preko optičke komunikacione mreže se prenose na serverski računar katodne zaštite na kome se čuvaju svi podaci, log datoteke, te snimci prelaznih pojava svih napojnih stanica katodne zaštite. Postoji više klijent računara na kojima je instaliran programski paket RSview32 Runtime koji radi u operativnom sistemu Windows XP i u kome se izvodi SCADA aplikacija i vrši vizuelizacija procesa. Tako da više osoba iz službe održavanja koje su udaljene mogu nadzirati sistem i njime upravljati. Preko celog prozora SCADA aplikacije nalazi se geografska karta sa pozicijama napojnih stanica. Izborom željene napojne stanice na levoj strani ekrana otvara se novi prozor koji prikazuje vrednosti relevantnih veličina (podataka) te napojne stanice u tom trenutku, kao što su vrednosti: izmerenog potencijala V_{IZM} , izlaznog napona U_{IZL} i izlazne struje I_{IZL} . Takođe, pritiskom na tastere Graf V_{IZM} , Graf U_{IZL} i Graf I_{IZL} moguće je videti i trendove promene pojedinih mernih veličina [97,156].

Uz ujednačenu i dovoljnu vrednost zaštitnog (katodnog-negativnog) potencijala, neprekidnost rada sistema katodne zaštite obezbeđuje skoro stopostotnu zaštitu gasovoda od korozije. Zbog toga je da bi se utvrdilo da li je rad sistema katodne zaštite kvalitetan, odnosno da bi se utvrdilo stanje (kvalitet) izolacije ukopanog čeličnog gasovoda tokom njegove eksploatacije, potrebno pratiti parametre sistema katodne zaštite, na osnovu kojih se može utvrditi da li je rad sistema katodne zaštite neprekidan i da li je obezbeđena ujednačena i dovoljna vrednost zaštitnog (negativnog) potencijala na gasovodu celo vreme rada katodne zaštite. Pored praćenja vrednosti zaštitnog (katodnog) potencijala, veoma je važno pratiti vrednosti zaštitnih struja, jer povećanje ili smanjenje zaštitnih struja bez opravdanih razloga, ukazuje na mehaničke promene na šticeonom gasovodu, bilo da se radi o fizičkim dodirima stranih metalnih konstrukcija (uzemljivača, cevovoda i sl.) sa gasovodom ili o mehaničkim oštećenjima postojećih izolacionih obloga. Primenom neke od metoda veštačke inteligencije, kao što su npr. eksperetski sistemi i neuronske mreže, postoji mogućnost da se proces donošenja dijagnostičkih odluka o stanju gasovoda potpuno automatizuje⁷⁰ [97].

⁶⁹ Pažameta, D., Pavliša, S., Daljinski nadzor i upravljanje sustavom katodne zaštite preko VPN/GPRS mreže i optičkog komunikacijskog sustava, Zagreb, 2010 pp. 23-29.

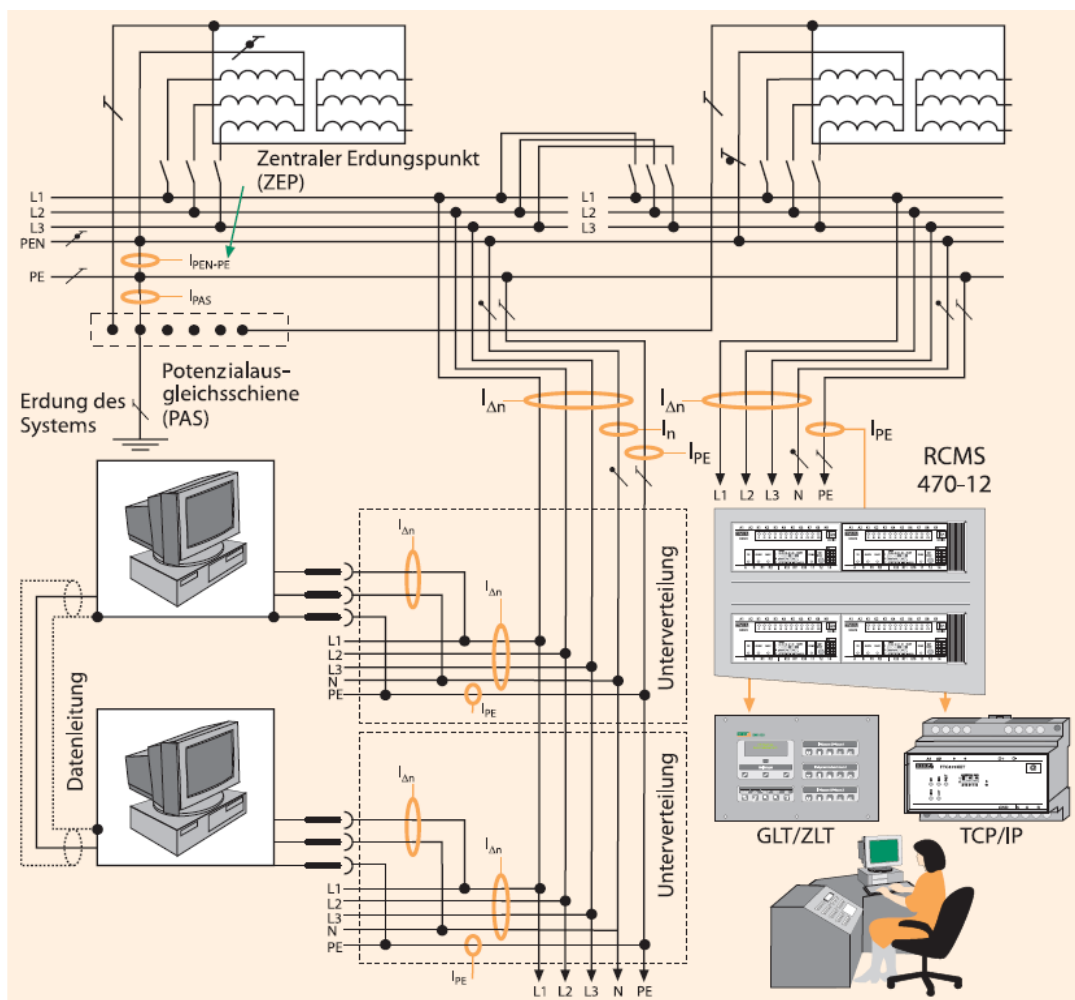
⁷⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Predlog mera za zaštitu gasovoda od korozije uzrokovane lutajućim strujama, Gas, Vol. 17, No 4, Beograd, 2012, pp. 5-11.

4.9.6 Sistem nadzora savremenih električnih instalacija sa mogućnostima automatizovane dijagnostike

U objektima sa savremenim električnim instalacijama kao što su: računarski centri, banke, osiguranja, biroi, industrijska postrojenja, medicinske ustanove i sl. ne smeju se dozvoliti neplanirani prekidi u napajanju potrošača električnom energijom. Zbog toga električne instalacije u takvim objektima moraju imati sistem neprekidnog nadzora (sa ugrađenim funkcijama zaštite i dijagnostike) koji se može realizovati pomoću monitora diferencijalne struje RCM (engl. residual current monitor).

Monitori diferencijalne struje su uređaji koji rade na principu merenja diferencijalne struje. Oni neprekidno prate diferencijalnu struju i trenutno ili sa vremenskom zadržkom, najduže 10 s, vizuelno i ako je potrebno zvučno signaliziraju, kada se prekorači podešena vrednost diferencijalne struje $I_{\Delta N}$. RCM mogu detektovati diferencijalnu struju (struju greške) reda mA, i imaju mogućnost podešavanja vrednosti struje delovanja (greške) u granicama od 1 mA do 2250 A [81].

Na slici 4.32. je prikazan primer iz prakse sistema nadzora (u funkciji zaštite i u funkciji dijagnostike) savremenih električnih instalacija u celom objektu sa jednog mesta – sa glavnog komandno-signalnog pulta PRC 1470, koji se nalazi u komandnoj sali. Na glavni komandno-signalni pult PRC 1470 se, preko RS-485 inerfejsa, može priključiti do 59 monitora diferencijalne struje. Na svaki od monitora diferencijalne struje može se priključiti do 12 strujnih mernih transformatora, što znači da ovaj sistem nadzora ima mogućnost praćenja stanja na maksimalno 708 ($=59 \times 12$) mernih mesta [81].



Slika 4.32. Primer iz prakse sistema neprekidnog nadzora (u funkciji zaštite i u funkciji dijagnostike) savremenih električnih instalacija pomoću monitora diferencijalne struje⁷¹ [81]

⁷¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, M., Savić, B., Automatizovani dijagnostički sistemi komunikacionih uređaja, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

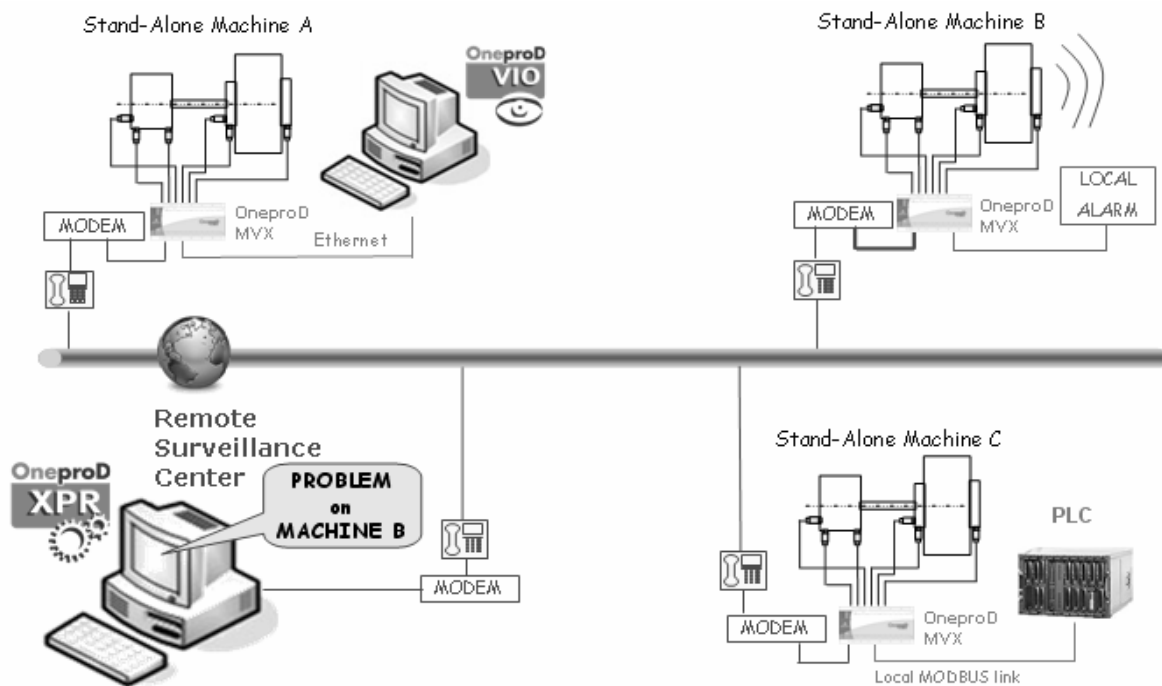
Prikazani sistem neprekidnog nadzora (sa ugrađenim funkcijama zaštite i dijagnostike) savremenih električnih instalacija omogućava detekciju i identifikaciju uzroka otkaza u početnoj fazi nastaka, čime se stvaraju uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreče ozbiljniji otkazi i havarije, a time i neplanirana isključenja delova električne instalacije i prekidi u napajanju potrošača električnom energijom.

Ovaj sistem omogućava [81]:

- nadzor lutajućih struja I_{PEN-PE} između zaštitno-neutralnog PEN i zaštitnog PE provodnika u trafostanici,
- lokalizaciju (pronalaženje mesta) spoja neutralnog N i zaštitnog PE provodnika u TN-S sistemu razvoda,
- nadzor lutajućih struja I_{PAS} između zaštitnog PE provodnika i sabirnice za izjednačenje potencijala PAS (nadzor PE/PAS sistema),
- nadzor struje neutralnog N provodnika I_N (nadzor prekida/preopterećenja, struje viših harmonika),
- nadzor struje zaštitnog PE provodnika I_{PE} (nadzor prekida/preopterećenja),
- nadzor diferencijalne struje I_{AN} (struje greške) uzrokovane oštećenjem izolacije provodnika,
- merenje otpora izolacija provodnika itd.

4.9.7 Sistemi neprekidnog nadzora mašina realizovani pomoću OneproD MVX merno akvizicionih sistema

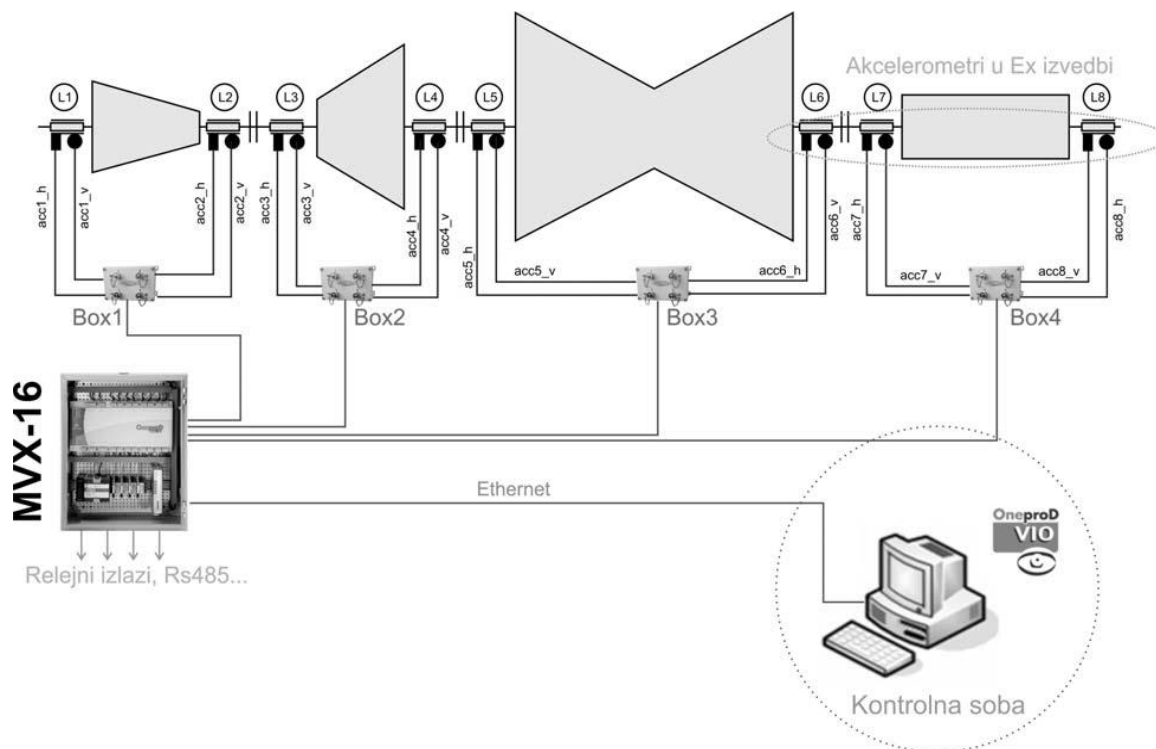
Sistem lokalnog (na licu mesta iz kontrolne sobe) i daljinskog (sa udaljenog mesta preko Interneta) neprekidnog nadzora vibracija više mašina, sa akvizicijom procesnih parametara i prikazom trenutnih vrednosti na kontrolnom računaru, realizovan pomoću OneproD MVX merno akvizicionog sistema, prikazan je na slici 4.33. [134].



Slika 4.33. Sistem lokalnog i daljinskog neprekidnog nadzora vibracija više mašina⁷² [3,134]

⁷² Ličen, H., Zuber, N., Prediktivno održavanje rotirajuće opreme na bazi merenja i analize mehaničkih vibracija, Tehnička dijagnostika, Vol. 6, No 1, Beograd, 2007, pp. 13-20.

Sistem neprekidnog nadzora vibracija na ležajevima turbine realizovan pomoću OneproD MVX merno akvizicionog sistema podržanog OneproD VIO (View) softverom, prikazan je na slici 4.34. Kao senzori brzine vibracija koristi se 16 ICP akcelometara (piezoelektrični akcelometri sa integrisanim pretpojačalima naboja), od čega je 6 senzora na poslednja 3 ležaja u Ex izvedbi. Senzori su kablovima dužine 6 metara preko priključnih kutija povezani na 16 kanalni OneproD MVX merno akvizicioni sistem, koji se nalazi u namenskom ormaru. OneproD MVX merno akvizicioni sistem je preko Ethernet-a povezan sa centralnim računarom, koji se nalazi u posebnoj kontrolnoj sobi, na kome je instaliran softver OneproD VIO za trenutni prikaz stanja na svakom mernom mestu. U slučaju pada Ethernet komunikacije, podaci se memorišu na Flash memorijsku karticu od 512 Mb, koja je sastavni deo OneproD MVX merno akvizicionog sistema [3,94,134].



Slika 4.34. Sistem neprekidnog nadzora vibracija na ležajevima turbine realizovan pomoću OneproD MVX merno akvizicionog sistema podržanog OneproD VIO (View) softverom⁷³ [3,94,134]

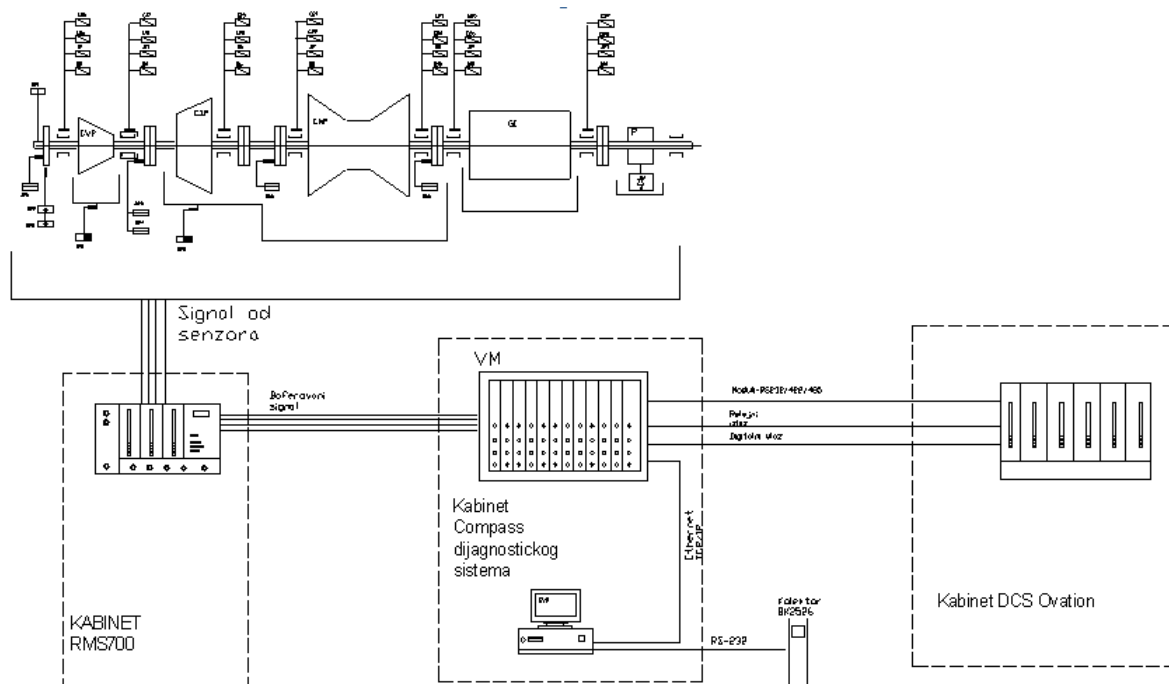
4.9.8 Računarom upravljani vibrodijagnostički sistem u TE Gacko

Jednostavniji sistem neprekidnog nadzora vibracija može se realizovati ako se prati nivo vibracija sa ugrađenim dodatnim relejima koji mogu signalizirati prekoračenje nekog unapred podešenog nivoa vibracija. Kompleksniji sistem nadzora vibracija osim praćenja nivoa vibracija na ležajevima i vratilu, prati i fazne uglove vibracija u odnosu na vratilo, a ima i dodatne mogućnosti praćenja procesnih parametara mašine. Ovakav sistem nadzora ima mogućnosti analize i kondicioniranja signala, te komunikacije sa računarom i ekspertnim sistemima, koji osim funkcije zaštite vrše dijagnostičke analize na osnovu kojih se detektuje uzrok vibracija i predlažu mere za njegovo otklanjanje. Ovo se odnosi kako na rad u stacionarnim uslovima, tako i na merenje i analizu vibracija tokom pokretanja/zaustavljanja mašine. U nastavku je prikazan kompleksniji sistem nadzora vibracija jedne od vodećih svetskih kompanija u ovoj oblasti.

COMPASS (COMputerised Predictive Analysis and Safety) je računarom upravljani vibrodijagnostički sistem, koji služi za nadzor mehaničkog stanja rotacionih mašina i predviđanje potencijalnih otkaza na mašini PFM (Potential Failure Mode), slika 4.35. Satoji se od VM monitora i CVM računarskog sistema. Funkcija VM monitora je da izvrši strategiju nadzora i implementaciju u on-line COMPASS bazu podataka. Distributivno digitalno procesiranje signala obezbeđuje analizu signala u

⁷³ Ličen, H., Zuber, N., Prediktivno održavanje rotirajuće opreme na bazi merenja i analize mehaničkih vibracija, Tehnička dijagnostika, Vol. 6, No 1, Beograd, 2007, pp. 13-20.

realnom vremenu. CVM je Intel-ov mikroprocesorski sistem baziran na SCO UNIX platformi, namenjen je za Compass aplikativne pakete i Compass-ovu bazu podataka. Za prikupljanje vibracionih i procesnih podataka u off-line COMPASS-ovu bazu služi Data Kolektor 2526/2526E. U okviru COMPASS dijagnostičkog sistema razvijen je i ekspertski sistem ADVISOR koji pored standardne baze znanja omogućava unošenje i korisničke baze znanja, sve to doprinosi razvoju automatizovane dijagnostike [3].



Slika 4.35. Šematski prikaz instaliranog COMPASS dijagnostičkog sistema u TE Gacko⁷⁴ [34]

Softverski moduli mogu obavljati širok spektar funkcija za potrebe dijagnostike, kao što su [3]: histogram mašine (real-time merenje ukupnog nivoa vibracija, paralelno sa svih senzora), prikaz trenda ukupnog nivoa vibracija, orbitalni prikaz, Bodeov i Polarni prikaz pojedinih harmonika, spektralni trend prikaz, kaskadni spektralni prikaz, trend X-Y pozicije vratila, trend vektorskog prikaza pojedinih vibracijskih komponenti, kaskadni spektralni prikaz, trend envelope spektara, trend kepstum spektra itd.

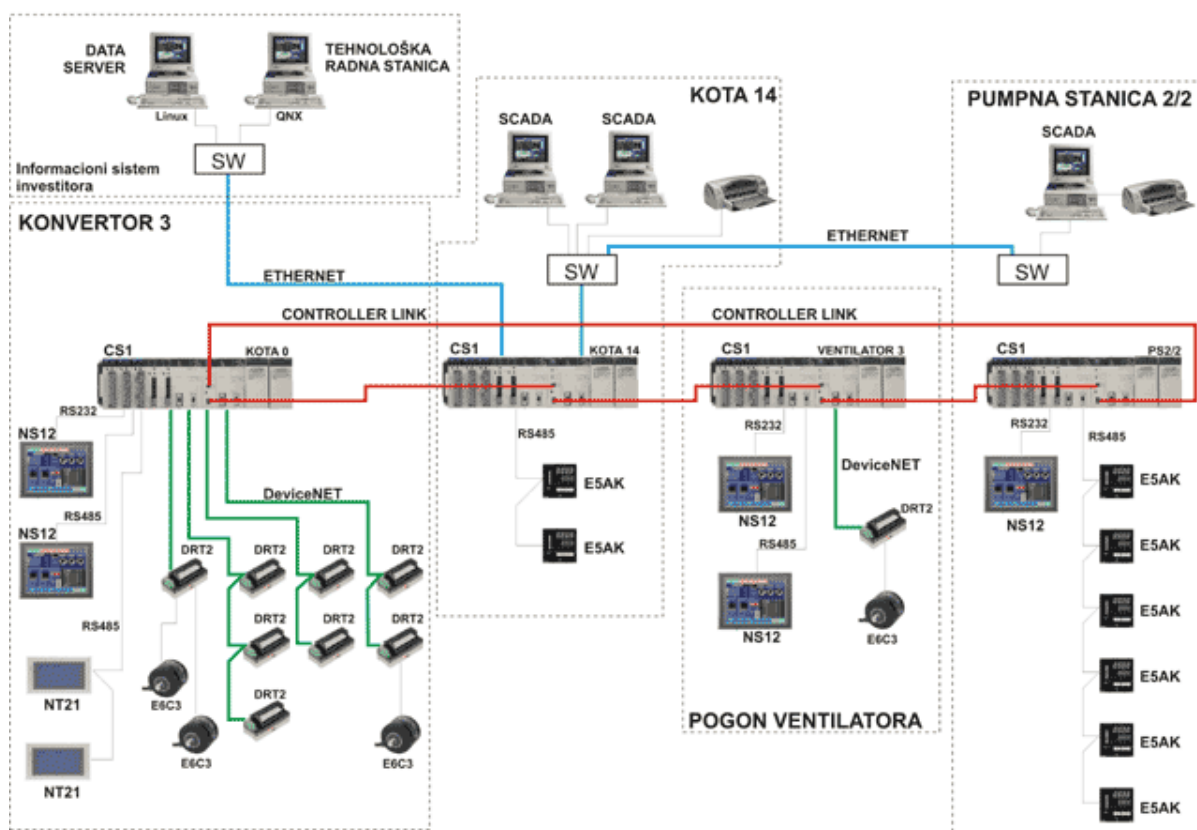
4.9.9 Nadzorno-upravljački sistem tehnološke linije konvertora US Steel Srebria u Smederevu

Proces proizvodnje čelika se odvija u konvertoru. Tečno gvožđe sa visoke peći prolazi proces odsumporavanja i u loncima se doprema u čeličanu gde se uliva u mikser. Šarža za svaku vrstu čelika se sastoji od tehnološki definisane količine tečnog gvožđa, čeličnog loma, količine kiseonika koju treba uduvati, količine nemetalnih dodataka i metalnih legura koje treba izdozirati. Nakon spravljanja čelika vrši se izlivanje šljake i čelika u lonce koji se dalje transportuju – šljaka ka odlagalištu šljake, a čelik ka odeljenju vanpećne obrade (argonizacije) i dalje ka odeljenju livenja.

SCADA softver omogućava vizualizaciju i arhiviranje svih parametara procesa (temperature, pritiska, protoka i nivoa itd.), slika 4.36. Informacije su dostupne na operatorskom touch panelu smeštenom na PLC ormanu i SCADA softveru. Dve stanice se nalaze u glavnoj komandnoj sobi konvertora 3, a treća se nalazi u komandnoj sobi pumpne stanice 2/2. PLC uređaji su međusobno umreženi industrijskom Controller Link mrežom koja je realizovana kao prsten optičkim kablom (Optical Token Ring). Za sistem distribuiranih ulaza/izlaza korišćen je CompoBusD fieldbus u svetu poznatiji kao DeviceNET. SCADA je CX-Supervisor na Windows platformi. Komunikacija na SCADA nivou je Ethernet, a medijum koji povezuje pumpnu stanicu 2/2 i glavnu komandnu sobu takođe je optički kabl. Operatorski touch paneli su sa PLC uređajima povezani serijskom vezom RS-485. Kao lokalni procesni

⁷⁴ Antunović, N., Nikšić, P., Primena i značaj nadzorno-dijagnostičkog sistema u RITE Gacko, XL naučno stručni skup: Održavanje mašina i opreme, 18-26.6.2015, pp. 304-309.

kontroleri koriste se kontroleri i sa PLC uređajima su povezani serijskom vezom RS-485. Za merenje pozicije primenjeni su apsolutni enkoderi. Primenjeni sistem ima preko 1000 ulazno-izlaznih signala i pokazuje izuzetne performanse i pouzdanost u radu u izuzetno teškim industrijskim uslovima.



Slika 4.36. Nadzorno-upravljački sistem proizvodne linije konvertora u US Steel Serbia u Smederevu⁷⁵ [148]

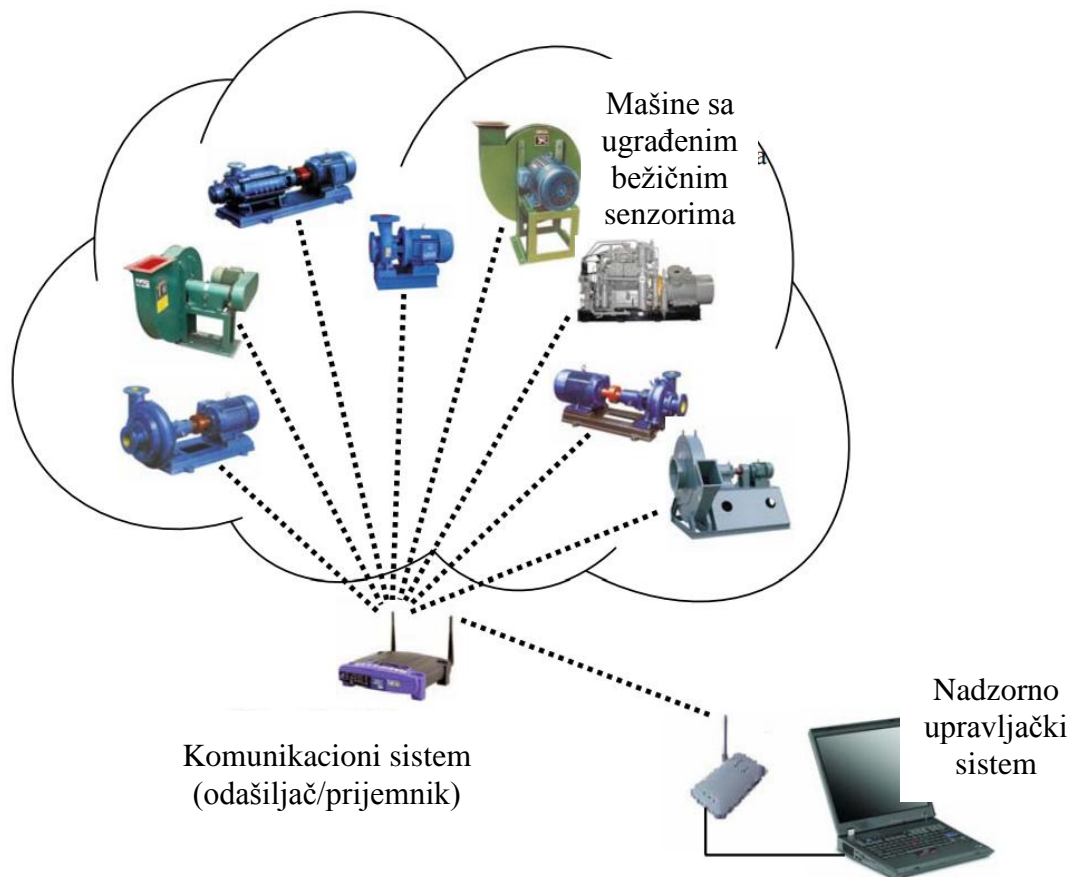
4.9.10 Dijagnostika stanja ležajeva mašina pomoću bežičnih senzorskih mreža

Jedan od načina dijagnostike stanja ležajeva mašina jeste pomoću bežičnih senzorskih mreža WSN (engl. Wireless Sensor Networks), slika 4.37., koje omogućavaju da se rezultati merenja dobijeni pomoću senzora ugrađenih u ležajevu mašina zapisuju u bazu podataka koja se zatim može pregledati i tako može pratiti trend promene stanja ležajeva tokom vremena [94,171].

Kako senzori ne bi uticali na rezultate merenja potrebno je da budu malih dimenzija. Međutim, njihove dimenzije i masa dosta zavise od dimenzija i mase baterija, koje su obrnutno proporcionalne njihovom veku trajanja. Zbog toga senzori treba da budu energetske efikasni kako bi se sprečile česte zamene baterija i smanjili troškovi dijagnostike. Pošto senzori najviše energije troše na prenos podataka radio talasima, onda je potrebno i obradu podataka provoditi na nivou senzora kako bi se produžio vek trajanja baterija⁷⁶ [47].

⁷⁵ Mikro Kontrol, Nadzorno-upravljački sistem tehnološke linije konvertora 3, u US Steel Serbia, Smederevo 2015.

⁷⁶ Callaway, E., H.: Wireless sensor networks, architectures and protocols, Auerbach Publications, A. CRC Press Company, 2004.



Slika 4.37. Dijagnostika stanja ležajeva mašina pomoću bežičnih senzorskih mreža⁷⁷ [94,171]

⁷⁷ Rumbak, S., Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi, Doktorska disertacija, Fakultet Strojstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

5. Empirijsko-eksperimentalna istraživanja

U ovom poglavlju je prikazan razvoj novog automatizovanog dijagnostičkog modela, koji treba da doprinese povećanju nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

5.1 Razvoj novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Jedan od najvažnijih zahteva u industriji jeste da se održi kontinualan proces proizvodnje, jer svaki zastoj u proizvodnji, a naročito neplanski može uzrokovati velike troškove. Zbog toga se tehnički sistemi moraju održavati kako bi zadržali funkciju za koju su projektovani. Proces održavanja reguliše se određenim pravilima, a sve u cilju postizanja zadovoljavajućeg nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, kao i obezbeđenja sigurnosti za ljude i okolinu.

Danas su tehnički sistemi (mašine i postrojenja) u industriji sve kompleksniji, produktivniji i skuplji, i od njih se zahteva visok nivo pouzdanosti odnosno minimiziranje stanja u otkazu, do gotovo potpunog eliminisanja otkaza. Zbog otkaza samo jednog dela tehničkog sistema, npr. kritične mašine, visokoproduktivne mašine i sl., može doći do zastoja cele proizvodne linije sa više mašina (ukoliko ne postoji paralelni tehnički sistem, koji obezbeđuje veću pouzdanost samom procesu, ali značajno povećava finansijska ulaganja), a time i velikih troškova, ekoloških šteta i ugrožavanja sigurnosti radnika, što je posebno izraženo u procesnoj industriji (petrohemiji, rafinerijama, proizvodnji celuloze, cementa ili šećera, topionicama i sl.). Iz tih razloga ne smeju se dozvoliti havarije i zaustavljanja kritičnih mašina, čije zaustavljanje istovremeno znači i zaustavljanje čitave proizvodnje (npr. turbine u toplani), odnosno čiji prekid u radu može uzrokovati prekid rada celokupnog pogona⁷⁸ [94].

Zbog toga je potrebno istovremeno i vrlo često ili neprekidno pratiti više dijagnostičkih parametara takvih tehničkih sistema kako bi se njihove eventualne neispravnosti otkrile u početnoj fazi nastanka i tako stvorili uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreče ozbiljniji otkazi i havarije. Ako bi se u takvim situacijama obrada i analiza rezultata merenja (podataka), kao i ocena stanja tehničkog sistema i donošenje dijagnostičkih odluka o daljim aktivnostima održavanja, vršili klasičnim (neautomatizovanim) postupcima, dijagnostičke kontrole bi mogle postati vrlo složene i vremenski dugo trajati, jer čovek u takvim situacijama najčešće nebi bio u stanju da sve te poslove obavi zadovoljavajućom brzinom i tačnošću. Da bi se to izbeglo vrši se automatizacija dijagnostičkog procesa, odnosno umesto klasičnih (neautomatizovanih) dijagnostičkih postupaka koriste se automatizovani dijagnostički modeli bazirani na primeni računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Računar predstavlja glavni deo automatizovanog dijagnostičkog procesa (modela), jer on upravlja celokupnim dijagnostičkim procesom, čime se taj proces znatno pojednostavljuje i ubrzava, tako da se izveštaji (protokoli) o sprovedenim dijagnostičkim kontrolama mogu dobiti odmah nakon sprovedenih kontrola, što praktično znači da bez računara nema automatizacije dijagnostičkog procesa.

Zbog toga je na osnovu teorijsko-empirijskih istraživanja realizovanih tokom izrade ove doktorske disertacije, razvijen novi automatizovani dijagnostički model koji ima mogućnosti široke praktične primene za dijagnostičke kontrole tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije, kao i različitih privrednih delatnosti uz eventualne modifikacije. Novi automatizovani dijagnostički model koji je razvijen i isproban (praktično realizovan) u okviru ove doktorske disertacije ima za cilj da pokaže neke prednosti koje ovaj savremeni dijagnostički model za kontrolu tehničkih sistema ima, u odnosu na klasičnu dijagnostiku.

⁷⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Blaženović, R., *Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost: automatizovana dijagnostika postrojenja obnovljivih izvora energije, povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema automatizovanim dijagnostikom*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.

5.1.1 Donošenje odluke o potrebi uvođenja automatizovane dijagnostike

Da bi se donela odluka o potrebi uvođenja automatizovane dijagnostike tehničkih sistema, potrebno je prvo uveriti poslovodne organe preduzeća da su troškovi održavanja tehničkih sistema (direktni i indirektni) previsoki i da će uvođenje automatizovane dijagnostike doprineti njihovom znatnom smanjenju, uz istovremeno povećanje nivoa pouzdanosti proizvodnih pogona u celini, odnosno potrebno je dokazati da je uvođenje automatizovane dijagnostike tehnički i ekonomski opravdano. Kao kriterijum za ocenu kvaliteta dijagnostičkih kontrola uzima se upotrebljivost rezultata dijagnostičkih kontrola i pouzdanost dijagnostičkog procesa. Ekonomski pokazatelji određeni su uložnim radom, materijalnim troškovima procesa dijagnostike i drugim troškovima.

Automatizovanu dijagnostiku treba realizovati tako da može ukazati na moguće otkaze tehničkih sistema, na ozbiljnost tih otkaza i načine na koji se oni mogu otkloniti. Za dobru organizaciju automatizovanog dijagnostičkog procesa potrebno je utvrditi njegovo mesto i položaj u sistemu održavanja. Povezanost procesa dijagnostike sa sistemom održavanja i uslovima eksploatacije je organska i logična, pošto su promene stanja tehničkih sistema uslovljene različitim eksploatacionim i proizvodnim faktorima.

Odluku o uvođenju automatizovane dijagnostike treba doneti posle konsultacija, kako sa rukovodstvom preduzeća i održavaocima tehničkih sistema, tako i sa konstruktorima tehničkih sistema i dijagnostičkih uređaja, kako bi se problem posmatrao sa više aspekata.

Prilikom donošenja odluke o uvođenju automatizovane dijagnostike treba se pridržavati određenih principa, kao što su:

- mere tehničke dijagnostike treba primenjivati samo ako su ekonomski opravdane,
- odlučiti se za takav automatizovani dijagnostički model koji će obezbediti najmanje troškove, najveće mogućnosti prilagođavanja većem broju zadataka i koji će imati minimalne zahteve u pogledu dodatnog usavršavanja osoblja koje će raditi sa njim.

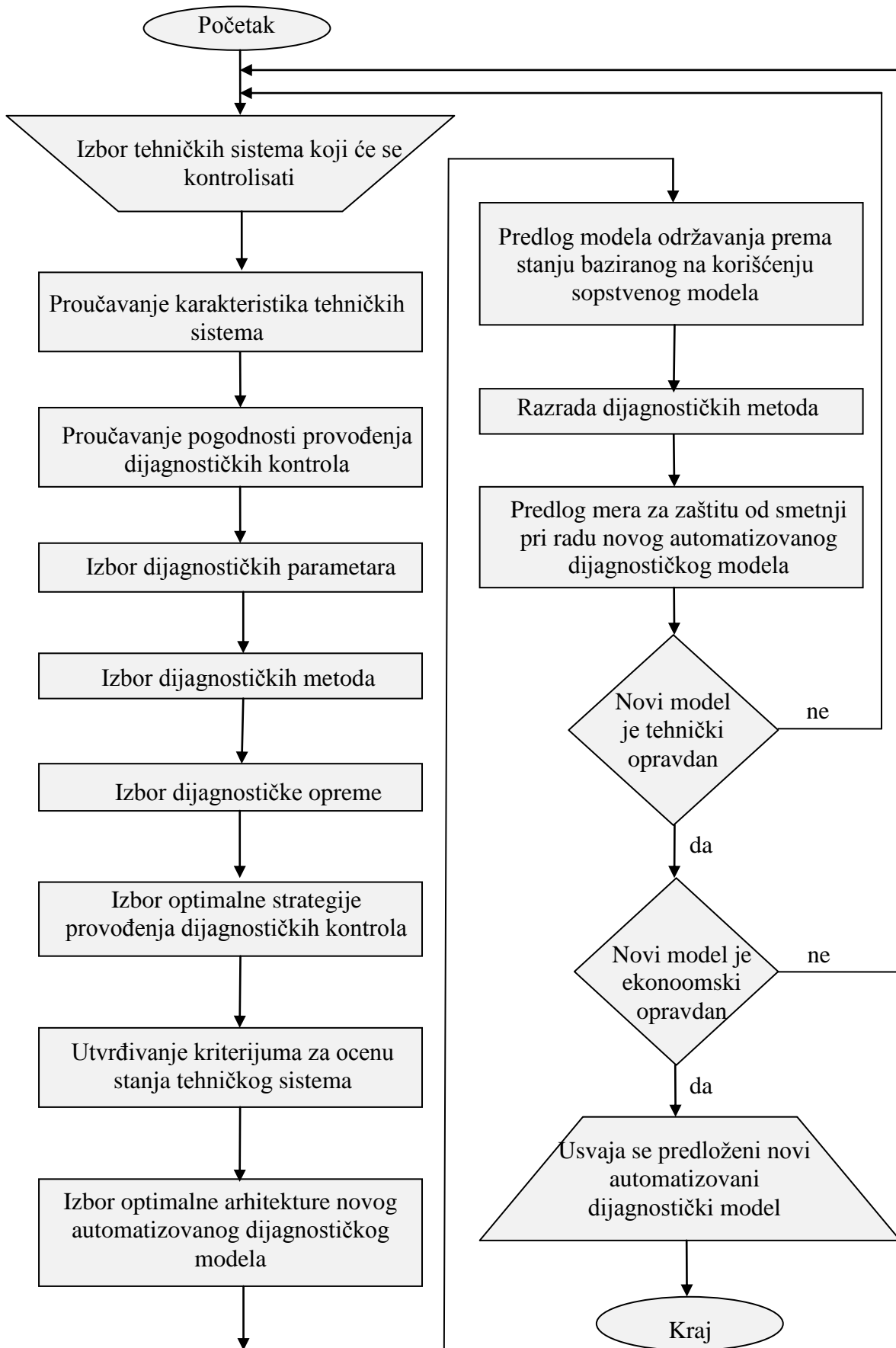
Nakon donesene odluke o potrebi uvođenja automatizovane dijagnostike pristupa se razvoju (projektovanju) novog automatizovanog dijagnostičkog modela.

5.1.2 Predlog sopstvene metodologije projektovanja automatizovanih dijagnostičkih modela

Da bi mogao da razvije (projektuje) novi automatizovani dijagnostički model autor ove disertacije je prvo predložio sopstvenu metodologiju projektovanja automatizovanih dijagnostičkih modela, prema kojoj je potom razvio (projektovao) novi automatizovani dijagnostički model.

Na slici 5.1. je prikazana predložena sopstvena metodologija projektovanja automatizovanih dijagnostičkog modela⁷⁹ [94].

⁷⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.



Slika 5.1. Predlog sopstvene metodologije projektovanja automatizovanih dijagnostičkih modela

Kao što se vidi sa slike 5.1., prema predloženoj sopstvenoj metodologiji projektovanje automatizovanih dijagnostičkih modela se realizuje kroz više koraka⁸⁰ [79,94]:

1. Izbor tehničkih sistema koji će se kontrolisati primenom razvijenog novog modela.
2. Proučavanje karakteristika tehničkih sistema, koji će se kontrolisati primenom razvijenog novog modela.
3. Proučavanje pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola.
4. Izbor dijagnostičkih parametara.
5. Izbor dijagnostičkih metoda.
6. Izbor dijagnostičke opreme.
7. Izbor optimalne strategije dijagnostičkih kontrola.
8. Utvrđivanje kriterijuma za ocenu stanja tehničkog sistema.
9. Izbor optimalne arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela.
10. Predlog modela održavanja prema stanju baziranog na korišćenju novog modela.
11. Razrada dijagnostičkih metoda.
12. Predlog mera za zaštitu od smetnji pri radu novog automatizovanog dijagnostičkog modela.
13. Provera da li je predloženi novi model tehnički opravdan (utvrđivanje mogućnosti postavljanja pravovremene i pouzdane dijagnoze).
14. Provera da li je predloženi novi model ekonomski opravdan.
15. Usvajanje predloženog novog automatizovanog dijagnostičkog modela.

Prema predloženoj sopstvenoj metodologiji izvršen je razvoj (projektovanje) novog automatizovanog dijagnostičkog modela, kroz gore navedene logički povezane korake, koji su detaljno obrazloženi u nastavku.

5.1.3 Izbor tehničkih sistema koji će se kontrolisati primenom razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Prvi korak pri razvoju novog automatizovanog dijagnostičkog modela jeste da se izvrši izbor tehničkih sistema koji će se kontrolisati ovim modelom.

S aspekta potrebe provođenja dijagnostičkih kontrola mašine se mogu svrstati u tri kategorije. U koju kategoriju će se svrstati neka mašina zavisi od:

- značaja mašine za proces proizvodnje,
- učestalosti otkaza,
- opasnosti po ljude, opremu i okolinu uzrokovanih otkazom mašine,
- troškova održavanja uzrokovanih otkazom mašine,
- snage mašine i
- rokova nabavke rezervnih delova.

U prvu kategoriju se svrstavaju mašine od vitalnog značaja za proces proizvodnje čijim zaustavljanjem se odmah zaustavlja proces proizvodnje. U drugu kategoriju se svrstavaju mašine čiji zastoj od nekoliko sati neće uzrokovati zaustavljanje proizvodnje, dok se u treću kategoriju svrstavaju mašine čiji

⁸⁰ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Razvoj modela automatizovanog dijagnostičkog sistema i njegov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 1-2, Banja Luka, 2012, pp. 20-40.

zastoj od nekoliko dana ili čak i više neće ugroziti proces proizvodnje. Npr. u termoelektrani parna turbina je mašina prve kategorije, a mlin za ugalj je mašina druge kategorije. Naime, uvek se u silosu mlevenog uglja nalazi dovoljno zaliha samlevenog uglja za loženje kotla nekoliko sati, što dozvoljava zastoj mlina za ugalj. U treću kategoriju mogu se uvrstiti npr. kompresori vazduha, ako su udvojeni (što je uobičajeno rešenje).

Očigledno da bi se neka mašinu svrstala u odgovarajuću kategoriju potrebno je dobro poznavati tehnologiju procesa proizvodnje. Vrlo je bitno da se mašine ne precenjuju i ne podcenjuju, jer ako se mašina nepotrebno svrsta u prvu kategoriju, tada se nepotrebno povećavaju troškovi i obrnuto, ako se mašina svrsta u nižu kategoriju, rizikuje se da može doći do havarije, što opet povećava troškove. Takođe, je bitno napomenuti da se u pojedinim slučajevima sve mašine mogu svrstati u dve kategorije ili čak, sve mašine svrstati u jednu kategoriju. Npr. u pumpnoj stanici koja ukupno ima 43 mašine (40 pumpi, 2 ventilatora i 1 kompresor) najčešće nema potrebe da se mašine dele u grupe.

Bitno je upozoriti na još jedan detalj. Naime, pojedine mašine nikad ne otkazuju, dok su druge sklone otkazima. U tom smislu čak se i neke mašine od vitalnog značaja mogu svrstati u drugu kategoriju ako su jako pouzdane u radu i obrnuto, neke manje značajne mašine mogu se svrstati u prvu kategoriju, ako često otkazuju.

Osim toga treba, voditi računa i o posledicama eventualnog otkaza u smislu opasnosti po ljude, opremu i okolinu, te o troškovima uzrokovanim otkazom mašine. Npr. ponekad otkaz nekog malog elektromotora snage svega 1,5 kW može dovesti do višesatnog zastoja procesa proizvodnje, što dovodi do visokih troškova uzrokovanih samim zastojem.

Takođe, treba voditi računa o snazi mašina i rokovima nabavke rezervnih delova. Naime mašine veće snage imaju i veći značaj.

Mašine prve kategorije pregledaju se u kraćim vremenskim intervalima nego mašine druge kategorije. Orijentaciono se može reći da mašine koje se svrstavaju u prvu kategoriju treba pregledati neprekidno, sedmično ili mesečno, dok mašine druge kategorije treba pregledati mesečno ili polugodišnje, a mašine treće kategorije treba pregledati godišnje ili čak nikako. U tom smislu mogu se kreirati mesečni planovi održavanja, tako da se npr. mašine prve kategorije uvrste u plan pregleda za svaki mesec u godini, mašine druge kategorije podele se na intervale pregleda od po šest meseci, a mašine treće kategorije na intervale pregleda od 12 meseci ili čak pregled mašina treće kategorije i ne planira.

Osim toga, treba voditi računa i o tome da se nad svakom mašinom, odnosno delom postrojenja, mogu obaviti dve vrste pregleda:

- pregled u pogonu (za vreme rada mašine) i
- pregled izvan pogona (na zaustavljenoj mašini).

Kada su u pitanju mašine druge i treće kategorije, obično se istovremeno obave oba pregleda (u pogonu i izvan pogona), a mašine prve kategorije kada su izvan pogona pregledaju se tokom remonta ili tokom vanrednih zastoja.

Na osnovu gore navedenog može se zaključiti da će se razvijenim novim automatizovanim dijagnostičkim modelom kontrolisati mašine prve kategorije, odnosno mašine koje su od vitalnog značaja za proces proizvodnje čijim zaustavljanjem se odmah zaustavlja proces proizvodnje, zatim mašine čiji otkaz može uzrokovati opasnosti po ljude, opremu i okolinu, kao i visoke troškove zbog zastoja u proizvodnji.

5.1.4 Proučavanje karakteristika tehničkih sistema

Sledeći korak u razvoju (projektovanju) novog automatizovanog dijagnostičkog modela je proučavanje karakteristika tehničkih sistema čije se održavanje, s obzirom na njihov značaj u proizvodnom procesu, želi unaprediti, odnosno koji će se kontrolisati primenom razvijenog novog modela. Za tehničke sisteme koji se duže vremena nalaze u eksploataciji, proučavaju se istorijski podaci o njihovom radu u toku eksploatacije, a za nove tehničke sisteme, proučavanje počinje nakon njihovog puštanja u probni rad, posrednim merenjem (kontrolom) ili pak posmatranjem.

Posebno mesto ovde pripada ulaznim podacima, odnosno tehničko-eksploatacionim faktorima koji karakterišu promene tehničkog stanja. Ispitivanja pokazuju, da u procesu eksploatacije tehničkih sistema u industriji treba upravljati sa oko 40 različitih faktora. Svi ovi faktori se mogu podeliti u tri grupe:

- pogonski uslovi sistema,
- karakteristike i svojstva materijala od kojih su napravljeni sastavni delovi sistema, kao i materijala koji se koriste u procesu eksploatacije (sirovine, ulja i sl.), i
- konstruktivno i tehnološko izvođenje sastavnih delova sistema i dr.

Na osnovu analize faktora koji utiču i određuju proces promene stanja tehničkog sistema može se zaključiti da je proučavanje istorijata promene stanja tehničkog sistema moguće sa dva aspekta:

- proučavanjem karakteristika realnih tehničkih sistema u procesu eksploatacije i
- proučavanjem mogućnosti formiranja matematičkog modela promene stanja tehničkog sistema u procesu eksploatacije.

Prvi aspekt obuhvata proučavanje karakteristika realnih tehničkih sistema u procesu eksploatacije. Što se ostvaruje prikupljanjem i obradom statističkih podataka koji omogućavaju određivanje raspodele verovatnoće mogućih stanja sistema, zakonitosti pojave otkaza pojedinih sastavnih delova i/ili sistema i troškova dijagnostike; izdvajanje mogućih tehničkih stanja sistema, tj. mogućih kombinacija otkaza sastavnih delova sistema; izučavanje funkcionisanja tehničkog sistema; izdvajanje sastavnih delova sistema i njihove međusobne veze (redne, kvaziredne, paralelne, kombinovane i sl.).

Drugi aspekt obuhvata proučavanje mogućnosti formiranja matematičkog modela promene stanja tehničkog sistema u procesu eksploatacije. Ova proučavanja pretpostavljaju određena uprošćenja, pri kojima se izdvajaju neke značajne, za tehničku dijagnostiku, karakteristike tehničkog sistema u procesu eksploatacije, a odbacuju manje značajne, odnosno realni tehnički sistem se zamenjuje nekim modelom.

Vrlo je bitno da su poznati najčešći otkazi koji se javljaju na posmatranoj mašini kako bi se na osnovu toga odabrali dijagnostički parametri i metode. Na primer, na trofaznim elektromotorima najčešći otkazi su: dotrajalost ležajeva, otkaz statora i otkaz rotora.

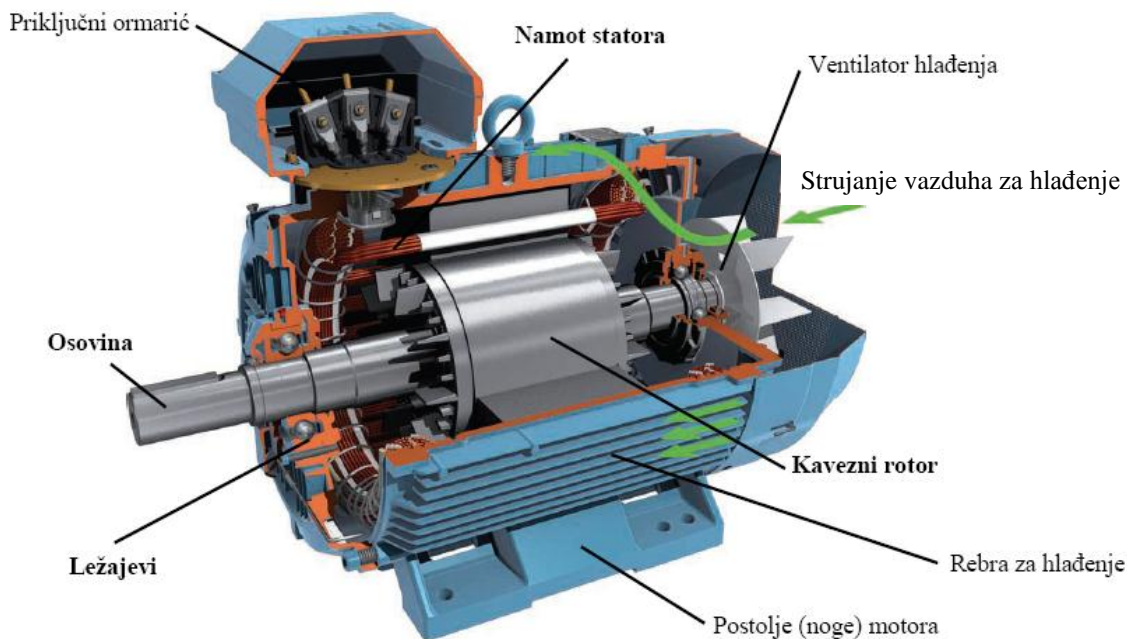
5.1.4.1 Proučavanje karakteristika asinhronih motora

Dugo vremena osnovna mana asinhronih motora, čiji su osnovni konstrukcioni delovi prikazani na slici 5.2., bila je složeno upravljanje brzinom obrtanja. Zahvaljujući intenzivnom razvoju i primeni pretvarača frekvencije, asinhroni motori su se, i po upravljačkim karakteristikama, približili jednosmernim motorima, pa se mogu koristiti i u vrlo zahtevnim pogonima. Zbog toga, kao i zbog jednostavne konstrukcije, jednostavnog održavanja i niske cene, asinhroni motori su najvažniji pogonski motori u savremenim industrijskim pogonima (ugrađeni su u 50-70% pogona u industriji). Koriste se u hemijskoj industriji, rafinerijama, elektranama, avionima, brodovima, podmornicama, automobilima, kućnim i medicinskim uređajima itd. [94].

Asinhroni motori, kao jedan od najzastupljenijih uređaja u industriji, podložni su otkazima, jer su izloženi različitim negativnim uticajima, kao što su: mehaničke vibracije, toplota, trenje, prašina itd. Zbog toga je potrebno izvršiti ranu detekciju otkaza kako bi se predupredili zastoji u radu i druge posledice. Primenom adekvatnih dijagnostičkih metoda, otkazi se mogu detektovati na vreme, u ranoj (početnoj) fazi nastanka. U tom slučaju, popravke motora se vrše u tehnološki najpogodnijem trenutku, a planiranje aktivnosti održavanja i nabavka rezervnih delova su olakšani.

Zbog značaja rane detekcije otkaza kod asinhronih motora, dijagnostika stanja asinhronih motora u svetskoj praksi je područje koje se vrlo intenzivno razvija. U literaturi se spominju različite metode pomoću kojih je moguće ustanoviti čitav niz neispravnosti asinhronih motora, analizom različitih mernih veličina u stacionarnom stanju i prelaznom režimu. Savremene metode se baziraju na savremenoj hardverskoj i softverskoj podršci. Za pouzdanu dijagnostiku neophodno je razvijati tačne algoritme obrade i posmatranja signala, kako bi se iz dobijenih podataka mogao ustanoviti uzrok neispravnosti. Zbog toga je vrlo važno poznavati ponašanje ispravnog motora u radu. Mnogi spoljni pokazatelji, poput oscilacija

kazaljki ampermetara, oscilacija brzine obrtanja ili povećanih vibracija, mogu ukazivati na nepravilnosti u radu asinhronih motora.



Slika 5.2. Osnovni konstrukcioni delovi savremenog trofaznog asinhronog kaveznog motora [94]

Metode tehničke dijagnostike asinhronih motora, zavisno od njihovog uticaja na normalan rad pogona, se dele na:

1. On-line metode tehničke dijagnostike, kao što su:
 - analiza frekvencijskog spektra linijske struje namotaja statora,
 - merenje i analiza vibracija,
 - termografska snimanja,
 - merenje rasipnih magnetnih flukseva,
 - snimanje fluktuacije brzine obrtanja,
 - posmatranje oscilovanja kazaljke ampermetra na statorskoj strani itd.
2. Off-line metode tehničke dijagnostike, kao što su:
 - analiza odziva na udarni napon,
 - merenje provodljivosti šipki i prstena,
 - primena penetranata,
 - ultrazvučna metoda itd.

1. Tipovi otkaza asinhronih motora

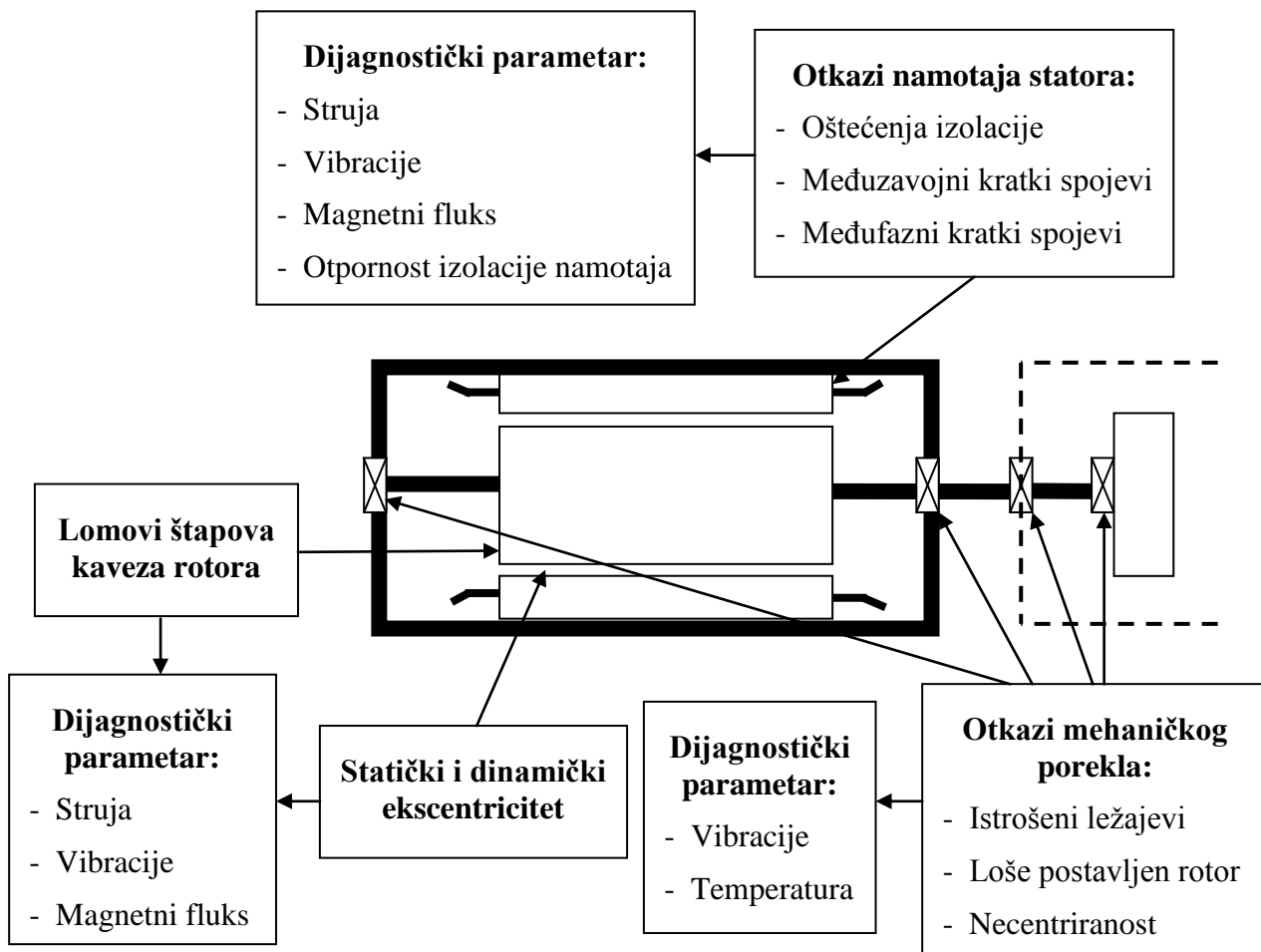
Mnogi od otkaza na asinhronim motorima se pojavljuju zbog neadekvatnog izbora motora za određeni pogon. Pri tome se misli na izbor motora nedovoljne snage ili motora sa neodgovarajućom zaštitom. U uslovima povišene temperature na primer, dobro je izabrati motor većih dimenzija od potrebnih i time smanjiti zagrevanje motora u radu.

U mnogim slučajevima je jednostavnije i jeftinije zameniti neodgovarajući motor novim, nego ulagati velika sredstva u opremu za dijagnostiku i detekciju otkaza. S druge strane, u nekim slučajevima je zbog prirode postrojenja neophodno da motor nastavi sa radom i u slučajevima manjih oštećenja ili odstupanja parametara od nazivnih. U takvim slučajevima kvalitetna dijagnostika je od izuzetne važnosti.

Da bi se pojave otkaza smanjile na najmanju moguću meru, već je u fazi izbora motora potrebno poznavati uslove u kojima će se motor nalaziti i raditi. Isto tako vrlo je važno kvalitetno izabrati veličine koje će se pratiti i koristiti u dijagnostičke svrhe.

Najčešći uzroci otkaza asinhronih motora su: pojava ekscentriciteta, nepispravnosti rotorskog kaveza, velike struje i sile pri pokretanjima, te problemi učvršćenja statorskih namotaja. Mehanički i električki gledano, u radu motora najteža su prelazna stanja. Za vreme pokretanja ili u intermitiranom radu, motor je izložen povećanim električnim, termičkim i mehaničkim naprezanjima. Upravo su to trenuci najčešćih pojava otkaza.

Pregled najčešćih otkaza koji se javljaju tokom eksploatacije asinhronih motora i mogući načini njihove detekcije prikazani su na slici 5.3.



Slika 5.3. Najčešći tipovi otkaza asinhronih motora i dijagnostički parametri kojima se mogu detektovati [94]

Istraživanja vezana za otkaze asinhronih motora omogućila su da se dođe do podataka o najčešćim tipovima otkaza kod ovih motora. Ovde su oni kategorizovani po mestu nastanka uzimajući u obzir glavne delove motora.

U tabeli 5.1. su prikazani rezultati istraživanja sprovedenih na 6.000 kaveznih asinhronih motora, koji pokazuju procentualne udele pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza asinhronih motora [94].

Tabela 5.1. Procentualni udeli pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza asinhronih motora [94]

Tip otkaza	Procentualni udeli pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza, %
Otkazi ležaja	41
Otkazi statora	37
Otkazi rotora	10
Ostali otkazi	12

U tabeli 5.2. su prikazani rezultati istraživanja koji pokazuju procentualne udele pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza asinhronih motora [79].

Tabela 5.2. Procentualni udeli pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza asinhronih motora [79]

Tip otkaza	Procentualni udeli pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza, %
Otkazi namotaja statora	26,50
Otkazi namotaja rotora	31,65
Otkazi paketa statora	9,34
Otkazi paketa rotora	13,25
Otkazi vratila i ležajeva	12,94
Ostali otkazi	6,32

Iz tabele 5.2. se vidi da procentualni udeo otkaza vratila i ležajeva u ukupnom broju otkaza asinhronog motora iznosi 12,94 %.

Iako se podaci o procentualnom udelu pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza asinhronih motora kod navedenih istraživanja manje ili više razlikuju, uočljiv je značajan udeo otkaza ležajeva u ukupnom broju otkaza asinhronih motora. Prikazani podaci ukazuju na važnost provođenja dijagnostičkih kontrola ležajeva i namotaja statora i rotora asinhronih motora.

Mehanički otkazi. - Tokom rada asinhroni motori su izloženi velikim mehaničkim naprezanjima. Delovi posebno izloženi mehaničkim naprezanjima su ležajevi, spojnice i ostali delovi prenosnog mehanizma. Neki od uobičajenih mehaničkih uzroka otkaza asinhronih motora su: istrošenost i otkazi ležajeva, mehanička neuravnoteženost, oštećenja prenosnog mehanizma, vibracije na rezonantnim frekvencijama itd.

Otkazi paketa statora. - Otkazi paketa statora javljaju se relativno retko i zabeleženi su uglavnom kod asinhronih motora velikih snaga. Problemi se pojavljuju kada između limova lameliranog jarma dođe do spoja. Takve se greške javljaju tokom proizvodnje ili prilikom ubacivanja rotora u stator. Na mestu na kome se pojavi spoj, javljaju se struje koje pojačano zagrevaju oštećeno mesto. U slučaju dovoljno velikih struja ili njihovog trajanja, oštećeno mesto se zagreva i, u ekstremnim slučajevima, može doći do otapanja materijala i njegovog oticanja u prostor namota, gde dolazi do oštećenja izolacije i kratkih spojeva. Kod manjih motora, ovakvi se otkazi češće javljaju kao posledica vibracija ili oštećenja ležajeva usled čega dolazi do zapinjanja rotora o stator. Rani pokazatelji ovih otkaza su velike vrtložne struje, lokalna zagrevanja i oštećenja izolacije provodnika.

Otkazi paketa rotora. - Zbog postojanja velikih centrifugalnih sila, velikim naprezanjima izloženi su ne samo namotaji već i paket rotora. Mala površinska oštećenja (napuknuća) mogu se vrlo brzo proširiti u slučajevima teških pogonskih režima rada. Isto tako na slabljenje materijala utiče i zagrevanje rotora. Osim centrifugalnih sila, mehanička naprezanja uzrokuju i prelazne pojave kojima je motor izložen tokom rada. U slučajevima kada dođe do pojave rezonancije između motora i sistema, mogu se pojaviti velike torzione oscilacije. Ova pojava može uzrokovati oštećenje rotora i ostalih delova povezanih na osovinu, poput spojnice. Pojave ekscentriciteta mogu takođe dovesti do oštećenja rotorskog i statorskog paketa. Rani pokazatelji ovih otkaza su povećane vibracije na ležajevima, a u novije vreme mere se i torzione oscilacije osovine.

Oštećenja izolacije namotaja statora. - Izolacija je jedan od najosetljivijih delova asinhronog motora. Pre su otkazi usled oštećenja i propadanja izolacije bili vrlo česti. Moderne metode izolovanja, kao i najnoviji izolacioni materijali, poboljšali su mehaničke i izolacione karakteristike. Rad na povišenim temperaturama, osetno skraćuje životni vek izolacije. Ipak otkazi velikih mašina nastali isključivo zbog starenja izolacije relativno su retki. Puno su češći otkazi nastali prodorom stranih materijala (ulja, metala itd.) u izolaciju. U pogonu se ponekad javljaju i oštećenja izolacije izvoda faza iz motora, koja nastaju usled vibracija. Iz tih razloga je potrebno u redovne dijagnostičke kontrole uključiti i kontrole izolacije.

Otkazi rotorskih namotaja. - Otkazi rotorskog namotaja asinhronog motora, u pogonskim uslovima, dugo vremena bili složeni za detekciju. Za to postoji više razloga. Kao prvo, u slučaju kaveznog asinhronog motora ne može se fizički pristupiti rotorskom kavezu. Osim toga, u rotorskom se namotaju indukuju struje niske frekvencije (frekvencija rotorskih struja zavisi od klizanja) koje je teško meriti. Otkazi kaveza rotora pojavljuju se posebno kod većih motora. Najčešći su razlozi visoke temperature koje se razvijaju u kavezu i velike sile kojima je rotor izložen, posebno tokom zaleta. Uzroci otkaza kod livenih rotora mogu biti u nekvalitetnoj izradi kaveza, dok kod rotora sa navarenim prstenima ponekada postoje loši spojevi šipki i prstenova. U tim slučajevima mesto greške se povećano zagreva što ga dodatno oslabljuje i na kraju dolazi do loma. Mesta najčešćih lomova upravo su spojevi prstena i šipki, kao i delovi šipki izvan rotorskog paketa koji su slobodni. Slični se otkazi mogu javiti i kao posledica malih pomaka kaveza unutar paketa, koji se javljaju zbog naizmeničnih grejanja i hlađenja rotora. U slučajevima intermitiranog rada, kada je motor izložen velikim promenama brzine ili učestalim pokretanjima, postoji opasnost nastanka otkaza usled zamora materijala. Rani pokazatelji ovih otkaza su oscilacije u brzini obrtanja, statorskoj struji i rasipnim fluksevima motora.

2. Uzroci otkaza asinhronih motora

Uzroci naprezanja mogu biti različiti, kao što su:

- radni moment,
- torzione vibracije,
- rezidualne sile nastale u procesu proizvodnje (livenja, mašinske obrade itd.),
- magnetne sile uzrokovane žlebnim rasipnim fluksom koji osciluje dvostrukom frekvencijom rotorske struje,
- magnetne sile kao posledica ekscentriciteta vazdušnog zazora,
- centrifugalne sile,
- termička naprezanja usled zagrevanja kratkospojnih prstenova,
- termička naprezanja tokom zaleta zbog potiskivanja struje (skin efekta),
- termička naprezanja nastala istezanjem šipki itd.

Otkazi asinhronih motora mogu nastati kao posledica različitih vrsta naprezanja, kao što su:

- termička naprezanja,
- elektromagnetna naprezanja,
- dinamička naprezanja,
- dodatna mehanička naprezanja itd.

Termička naprezanja. - Termička naprezanja se mogu pojaviti kada je motor zakočen, prilikom zaleta ili tokom rada. Najkritičnije je kada je motor zakočen pošto je tada odvođenje toplote najslabije. Veliki broj motora ima senzore temperature smeštene na statoru, pa se može desiti da u trenutku kada signaliziraju pregrevanje, rotorska temperatura već bude prevelika. Termička naprezanja rotora mogu biti posledica preopterećenja zbog npr.: učestalih pokretanja, zaustavljanja usled prevelikih tereta, neuspešnog zaleta zbog prirode momentne karakteristike tereta, zapinjanja rotora o statorski paket, loše ventilacije itd. Kao sledeći problem u radu motora pojavljuje se termička neuravnoteženost koja može biti posledica nejednakih zagrevanja rotorskog kaveza tokom zaleta, nejednakog odvođenja toplote, slabljenja doseda

rotorskog paketa na osovinu, lokalnih oštećenja rotorskog paketa itd. Ovi su problemi vrlo često složeni za detekciju pošto u slučajevima kada motor nije potpuno opterećen ne dolaze do izražaja.

Elektromagnetna naprezanja. - Do oštećenja rotorskog kaveza može doći i zbog elektromagnetnih naprezanja u motora koja mogu imati različite uzroke. Rotorska struja stvara ulančeni utorski fluks, koji stvara elektrodinamičke sile u motoru. Te sile su proporcionalne kvadratu struje i nastoje rastegnuti šipke rotora u utoru. Tokom zaleta struje rotora su najveće pa su i sile kojima je rotor izložen povećane. Najveća su opterećenja na spojevima šipki i prstenova. Ispitivanja su pokazala da su upravo ove sile izazvale veliki broj oštećenja. Ovakvi se problemi umanjuju različitim konstrukcijama rotorskih kaveza.

Dinamička naprezanja. - Dinamička naprezanja opterećuju rotor tokom rada i najveća su u prelaznim stanjima. Pod njima se obično misli na torziona naprezanja osovine (u prelaznim stanjima i pri udarcima mogu poprimiti i veličine 20 puta veće od nominalnih), centrifugalne sile, te ostala opterećenja koja nastaju zbog prenosa, otkaza spojnice ili zupčanika.

Dodatna mehanička naprezanja. - Dodatna mehanička naprezanja obuhvataju naprezanja koja nastaju kao posledica ostalih nepravilnosti: lošeg livanja, nedovoljno učvršćenih limova rotorskog paketa, loših doseda rotorskog paketa na osovinu, oštećenja ležajeva, u slučajevima kada rotorske šipke nisu čvrsto u žlebovima te dolazi do radijalnih pomeranja tokom rada, kada ne postoji mogućnost uzdužnog širenja šipki u toku zagrevanja.

5.1.4.2 Proučavanje karakteristika ležajeva mašina

Iznenadan, neočekivan i brz razvoj otkaza ležajeva mašina se retko dešava. Obično prva oštećenja kotrljajnih tela nastaju na površini i javljaju se konstantno u periodu od nekoliko meseci. Ako se oštećenja i otkazi ležajeva na vreme ne uoče i prepoznaju, mogu dovesti do lančanog oštećenja i otkaza drugih delova, kao što su: vratila, kućišta i sedišta ležajeva, spojnice, kućišta i čitave mašine, namotaji električnih mašina itd. Oštećenja ležajeva tokom njihove eksploatacije uzrokuju⁸¹ [112]:

- oštećenja čitavih sklopova (mašina),
- smanjenje efikasnosti rada,
- povećanu potrošnju energije,
- nezadovoljavajuće ergonomske uslove rada,
- česte zamene ležaja,
- zastoje u proizvodnji,
- teško obrtanje vratila,
- blokade ležišta,
- oštećenja sedišta ležaja,
- deformacije ili oštećenja vratila,
- oštećenja i lomove spojnice,
- oštećenja kalemova motora,
- oštećenja kućišta mašina i drugih delova,
- paljenje maziva,
- eksplozije i požare u postrojenju itd.

Zbog toga je potrebno vršiti dijagnostičke ležajeva, kako bi se obezbedio siguran i pouzdan rad mašina. Dijagnostičke kontrole ležajeva se ne vrše kada to ekonomski nije isplativo, odnosno kada je

⁸¹ Ilić, B., Petrov, T., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 11-16.

isplativije redovno menjati ležajeve nego pratiti njihovo stanje. To je najčešće slučaj kod jeftinijih i jednostavnijih mašina.

Dijagnostičke kontrole se fokusiraju na ležajeve, zbog toga što su iskustva pokazala da ležajevi, kao vitalni delovi mašina, najbolje pokazuju tehničko stanje u kome se oni nalaze. Pored toga, prestanak funkcionisanja mašina uzrokovan otkazom ležajeva može uzrokovati neplanirane zastoje u proizvodnji, koji dovode do velikih troškova, kako zbog zastoja u proizvodnji tako i zbog oštećenja visoko vredne opreme, zatim može dovesti do havarija i znatnog smanjenja pouzdanosti cele mašine.

Pošto se oštećenja ležajeva najčešće manifestuju prekomernim povećanjem vibracija, buke, temperature i udara, produkata habanja i sagorevanja u mazivu, teškim obrtanjem vratila itd., to je prilikom dijagnostičkih kontrola, kao dijagnostičke parametre, poželjno pratiti neke od navedenih veličina. Međutim, kontrola ležajeva može biti besmislena ako mašina otkazuje i zahteva česte popravke zbog nekih drugih loše održavanih delova.

Najčešće uzrok oštećenja ležajeva nije njihova neispravnost, već je to obično neka druga neispravnost mašine koja je dovela do njihovog oštećenja. Kada se utvrdi da postoji oštećenje ležajeva onda treba tražiti uzroke koji su doveli do njihovog oštećenja (kao što su npr. necentriranost ili debalans), odnosno važno je poznavati uzroke i posledice oštećenja ležaja.

Višegodišnjim istraživanjima, koje je sprovela firma SKF, o produženju životnog veka ležajeva utvrđeno je da samo kod 25% ležajeva životni vek zavisi od njihovog kvaliteta. Ostali parametri kao što su montaža, podmazivanje, redovno i pravilno održavanje ustvari imaju najveći uticaj na rad ležajeva.

Kotrljajni ležajevi su prisutni u velikom broju mašina i često se smatraju glavnim „krivcima“ za otkaze na istim. Opsežna istraživanja fabrike kotrljajnih ležajeva SKF iz Švedske pokazuju da samo 34% ugrađenih ležajeva doživi projektovani radni vek, dok 66% otkaze pre vremena (u 36% slučajeva uzrok je nepravilno održavanje, 16% pogrešna montaža i 14% nepravilno zaptivanje) [107].

U tabeli 5.3. su prikazani rezultati istraživanja koji pokazuju procentualne udele pojedinih uzroka otkaza u ukupnom broju otkaza kotrljajnih ležajeva i ostalih kinematskih sklopova⁸² [107]

Tabela 5.3. Procentualni udeli pojedinih uzroka otkaza u ukupnom broju otkaza kotrljajnih ležajeva i ostalih kinematskih sklopova [107]

Uzroci otkaza	Procentualni udeli pojedinih tipova otkaza u ukupnom broju otkaza, %		
	Kotrljajni ležajevi	Klizni ležajevi	Zupčanici
Neadekvatan proračun i konstrukcija	13,8	9,1	6,9
Greške u materijalu	1,9	3,6	0,8
Greške proizvodnje i montaže	14,4	10,7	17,6
Neadekvatana eksploatacija i održavanje	37,4	39,1	36,6
Tribološki procesi	28,5	30,5	38,0
Ostalo	4,0	7,0	-

1. Tribološki procesi u ležajevima mašina

Ležajevi su mašinski elementi čiji je zadatak da omoguće relativno kretanje obrtnih delova, prvenstveno vratila i osovina, uz istovremeno prenošenje opterećenja između njih. Na ovaj način se prenosi sila sa vratila na ležajeve i dalje na konstrukciju. Pošto su vratila, a i osovine, uglavnom obrtni elementi, to je razlog što se u osloncima pojavljuje trenje, koje može da bude trenje klizanja ili trenje kotrljanja. Prema vrsti trenja ležajevi se dele na:

⁸² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

- klizne ležajeve, koji rade na principu trenja klizanja, između delova u relativnom kretanju nalazi se samo tanki sloj ulja, tzv. uljni film i
- kotrljajne ležajeve, koji rade na principu trenja kotrljanja, kod njih se između delova u relativnom kretanju (unutrašnjeg prstena vezanog za osovinu i spoljašnjeg prstena vezanog za kućište ležaja) nalaze kotrljajna tela: kuglice, valjci, konusi, bačvice ili iglice.

Osnovne prednosti kliznih ležajeva su u njihovoj nosivosti, odnosno radnom veku. Ako se kod kliznih ležajeva obezbede uslovi hidrodinamičkog podmazivanja, onda oni imaju skoro neograničen radni vek. Ovo je naročito bitno kod rada sa visokim brojem obrtaja, gde kotrljajni ležajevi zbog ograničene nosivosti i ograničenog radnog veka ne mogu da se primene. Za istu nosivost dimenzije kliznih ležajeva su znatno manje u odnosu na kotrljajne.

Osnovna prednost kotrljajnih ležajeva je u malom trenju i gotovo minornim zahtevima u pogledu podmazivanja. Iako je u odnosu na klizne ležajeve trenje kotrljanja znatno manje od trenja klizanja, ono je veoma značajno za dalja istraživanja sa aspekta nauke. U eksploataciji se i klizni i kotrljajni ležajevi nadopunjuju u svojstvima i karakteristikama, pa se i jedni i drugi koriste sa mnogo uspeha. Materijali za izradu kotrljajnih ležajeva (prstenova i kotrljajnih tela) su čelici od visokolegiranog hroma i nikla čiji je srednji sadržaj ugljenika od 1,0 do 1,1 %. U velikoj meri se koriste i čelici za cementaciju, a za uslove rada na visokim temperaturama koriste se termootporni čelici.

Dijagnostika tribomehaničkih sistema ima veoma značajnu ulogu u razvoju teorije i prakse trenja, habanja i podmazivanja. Posebna pažnja se posvećuje razvoju savremenih uređaja i metoda za praćenje promene stanja (dijagnostiku) tribomehaničkih sistema.

Tehnički sistemi (mašine) u industriji imaju veliki broj sklopova i mehanizama koji su u procesu kretanja i međusobnog kontakta. Sve mašine, sklopovi i mehanizmi sastoje se, po pravilu, od svega nekoliko osnovnih pokretnih mašinskih elemenata: ležajeva (kliznih ili kotrljajnih), zupčanika, vođica, lančanih prenosnika i čeličnih užadi. U svim tim elementima osnovna pojava je relativno kretanje različitih površina u direktnom ili indirektnom kontaktu. Takvo kretanje može biti:

- klizanje jedne površine po drugoj,
- kotrljanje jednog elementa (točak, kugla, valjak) po ravnoj površini i
- kombinovano kretanje.

Na mestu kontakta javljaju se složene mehaničke, termičke, ali i hemijske pojave. Dva osnovna procesa koji se javljaju pri relativnom kretanju mašinskih elemenata su trenje na dodirnim površinama i trošenje materijala sa površina koje su u međusobnom kontaktu.

Složeni mehanizmi i procesi u pojavama trenja i njihove posledice pri različitim uslovima, a posebno procesi trošenja površina i mogućnosti njihovog smanjivanja predmet su istraživanja nauke pod nazivom tribologija. Internacionalan naziv tribologija izveden je od grčke reči tribos - trenje i logos - nauka, dok je u pojedinim zemljama poznata pod nazivom trenje, habanje i podmazivanje. Iako novija nauka, tribologija izučava pojave poznate veoma dugo i kao takva ne predstavlja nikakvu novinu, suština je u novom prilazu problemima trenja i habanja materijala, i ulozi maziva i podmazivanja.

a) Trenje u ležajevima

Trenje, neodvojivo svojstvo površine parova materijala u kontaktu, je nepoželjno u ogromnoj većini elemenata i mašinskih sklopova i drugih mašinskih uređaja (sem kod kočnica i mehaničkih spojnica gde je koristan proces). Pojava sile trenja pri klizanju i kotrljanju površina u kontaktu ne dovodi samo do nekorisnog utroška energije (pretvaranje izgubljene mehaničke energije u toplotnu), već usled istrošenja i razaranja površina, do mogućnosti teških oštećenja elemenata i sklopova i, konačno, do otkazivanja rada mašine i postrojenja.

Trenje u ležaju je glavni uzročnik razvoja toplote u njemu, a time i njegove radne temperature. Temperatura ležaja se povećava kada se u njemu povećava i trenje. Trenje zavisi, osim od sile, još od niza drugih faktora, pre svega od vrste i veličine ležaja. U stacionarnim uslovima rada kotrljajnih ležajeva toplotu trenja treba odvoditi. U skladu sa tim, razlika temperatura jednog ležajnog sistema u stacionarnom

stanju u odnosu na drugi koji koristi identičnu veličinu i broj ležaja mera su efikasnosti tog sistema sa stanovišta odvođenja toplote.

b) Oštećenja ležajeva

Oštećenje (trošenje) se, u najširem smislu, definiše kao nepoželjno odstranjenje materijala sa površine bez obzira na uzrok. Određeno oštećenje (trošenje) materijala površina u kontaktu i međusobnom relativnom kretanju u određenoj sredini smatra se normalnom pojavom. Kao abnormalnom pojavom protiv koje se danas može, najčešće, uspešno boriti različitim tribološkim sredstvima i merama, smatra se svako pojačano trošenje ili oštećenje površina, kao i otkazivanje ili lom mašinskog elementa.

Vek funkcionalnog starenja tehničkih sistema je u principu znatno duži od dopuštenog habanja pojedinih elemenata sistema. Fizičko habanje elemenata kreće se u proseku od 1,5-2 godine i odvija se mnogo brže od funkcionalnog starenja tehničkog sistema koje se kreće u proseku od 5-10 godina. Eksploataciona i svaka druga težnja je njihovo izjednačavanje, ali današnjica ukazuje da jednakosti bar za sada nema. Osnovni zadatak projektovanja i održavanja tehničkih sistema je minimiziranje razlike između ova dva vremenska perioda.

Kotrljajni ležajevi su komponente mašina sa ograničenim rokom upotrebe za kojima postoji velika tražnja. Dužina njihovog funkcionalnog (radnog) veka određena je brojnim faktorima i eventualnim oštećenjima koja se mogu pojaviti.

Oštećenje (trošenje) je promena stanja ležajeva, koja još ne utiče na funkciju rada, ali se može razviti u otkaz.

Otkaz je stanje ležaja, koje onemogućava normalno funkcionisanje mašine u koju je ugrađen. Pri tome treba razlikovati:

- kritičan otkaz, koji potpuno onemogućava funkciju tehničkog sistema i
- nekritičan otkaz, koji u nekim granicama smanjuje učinak i kavalitet rada (funkcionisanja) tehničkog sistema.

Oštećenja ležajeva mogu nastati:

- u toku proizvodnje (nehomogenost materijala, tolerancije u proizvodnji i sl.),
- prilikom transporta i skladištenja (oscilacije, neadekvatno pakovanje i sl.),
- prilikom montaže (deformacije, neodgovarajući otvor, dimenzione tolerancije, greške u poravnanju),
- u toku eksploatacije (preopterećenje, nepravilno podmazivanje, strana tela (npr. prašina), strani mediji (agresivni gas), vlaga, pregrevanje i sl.).

Pravilan izbor kotrljanog ležaja i njegovog sklopa je prvi preduslov za obezbeđenje njegovog dugog radnog veka, pa tek onda do izražaja dolaze pravilna montaža, uslovi rada i uslovi održavanja. Znatno smanjenje oštećenja ležajeva se postiže njihovom pravilnom montažom po preporuci proizvođača, pravilnim održavanjem i upotrebom odgovarajućeg maziva. Vek trajanja kotrljajnih ležajeva znatno se smanjuje, ako debljina uljnog filma nije dovoljna da zaštiti kontakt metala na metal. Jedan od načina da se ovo izbegne jeste svakako izbor i korišćenje odgovarajućih maziva, odnosno aditiva koji eliminišu visoke temperature uzrokovane lokalnim kontaktima i zaptivača koji sprečavaju ulazak nečistoća. Upotreba ovih aditiva znači povećanje nošenja uljnog filma u tačkama kontakta, čiji je krajnji rezultat niži kontakt pritiska i povećanje radnog veka ležaja.

Uslovi korišćenja kotrljajnih ležajeva na mašinama izuzetno su nezadovoljavajući zbog permanentnih povećanja opterećenja i brzina u proizvodnim procesima. Specifičnost konstrukcije i složeni uslovi rada utiču na to da se u ležajevima razvijaju različiti tribološki procesi i različite vrste oštećenja. Obično je dominantna jedna vrsta oštećenja, a nju potpomažu druge vrste oštećenja. Iznenadan, neočekivan i brz razvoj oštećenja se retko dešava. Obično prva oštećenja kotrljajnih tela nastaju na površini i javljaju se konstantno u periodu od nekoliko meseci. U opštem slučaju informacije o uzrocima oštećenja ili preostalom radnom veku ležaja mogu se dobiti za veme rada mašine uz pomoć dijagnostičkih mernih instrumenata.

Pojava oštećenja ležajeva se manifestuje uobičajenim simptomima, kao što su:

- pregrevanje ležaja,
- pojava vibracija na ležaju,
- pojava buke itd.

Uz pomoć dijagnostičkih metoda može se oceniti stanje kotrljajnih ležajeva. Na ovaj način mogu se vršiti neka predviđanja o stepenu i uzroku oštećenja i na taj način u velikoj meri izbeći ometanja proizvodnje.

U svakom slučaju nakon svakog otkaza ili oštećenja, mašine moraju da se isključe da bi se rastavile, popravile i ponovo sastavile u zavisnosti od stepena oštećenja.

Istraživanja pokazuju da je unutrašnja kotrljajna staza mnogo podložnija oštećenjima nego spoljašnja i kotrljajni elementi ležaja, zbog toga što su:

- rotacione brzine kaveza prema spoljašnjoj kotrljajnoj stazi veće nego prema unutrašnjoj stazi. Kinetički odnosi prevode kuglicu preko unutrašnje staze frekvencijom, koja je za oko 29% viša od frekvencije kojom kuglica prelazi po spoljašnjoj stazi.
- dodirne sile na unutrašnjoj stazi koncentrisane su na manju površinu usled manjeg radijusa zakrivljenosti, zbog čega je naprezanje veće.

c) Pregrevanje ležajeva

Optimalna radna temperatura ležaja, koji radi u normalnim uslovima eksploatacije kreće se u granicama od 50 do 60°C. Temperatura ležaja se povećava kada se u njemu povećava trenje. Povećana temperatura ležaja bez promene radnih uslova je siguran znak da je ležaj oštećen. Temperature na ležajevima veće od 120°C, čak i pri malim brzinama uzrokuju takva oštećenja koja se ne mogu otkloniti ni naknadnim merama održavanja, pri čemu je zamena takvih ležajeva neminovan proces. Porast temperature ležaja iznad temperature okoline može biti uzrokovan različitim uticajima i proporcionalan je brzini obrtanja i opterećenju. Nedovoljna količina maziva za podmazivanje je uglavnom najčešći uzrok pojave visokih temperatura u ležajevima, odnosno prevremenih otkaza ležajeva. Temperatura ležaja se može meriti različitim kontaktnim i beskontaktnim instrumentima ili najjednostavnije dodiranjem ruke⁸³ [91].

2. Vrste oštećenja ležajeva

S obzirom na mehanizam (proces) koji uzrokuje oštećenja (trošenja), postoji više vrsta oštećenja ležajeva, kao što se vidi iz tabele 5.4.[2]:

- mehanička (habanje),
- hemijska (korozija),
- termička,
- biološka i sl.

Mehanička oštećenja (trošenja) se u praksi obično nazivaju habanjem, a hemijska korozijom materijala. Osnovne vrste oštećenja (trošenja) su zapravo većim delom posledice pojave trenja. Oštećenja (trošenja) površina mašinskih elemenata nisu samo posledica njihovog potpunog ili delimičnog kontakta već i kontakta tih površina sa sredinom koja ih okružuje. Agresija kiseonika i vlage iz vazduha, delovanje čvrstih kontaminata svih vrsta u znatnoj meri doprinose povećanju navedenih osnovnih oštećenja (trošenja) površina mašinskih elemenata, kao i novim specifičnim vrstama oštećenja (trošenja). Čak i samo mazivo pri strujanju duž površina elemenata, svojom energijom kretanja i specifičnim hidrauličkim i reološkim pojavama, može da doprinese određenim vrstama oštećenja (trošenja).

⁸³ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015. (rad prihvaćen za objavljivanje)

Tabela 5.4. Vrste oštećenja (trošenja) ležajeva [2]

Mehanička oštećenja (habanje)	Adhezivno habanje	Normalno adhezivno habanje
		Teško adhezivno habanje
		Lako zaribavanje
		Teško zaribavanje
		Zavarivanje (blokiranje)
	Abrazivno habanje	Lako abrazivno habanje
		Lako brazdanje
		Teško brazdanje
	Habanje usled zamora materijala	Početni piting
		Progresivni piting
		Lom
	Strujna erozija	Fluidna erozija
		Udarna erozija
Kavitaciona erozija		
Električna erozija	-	
Hemijska oštećenja (korozija)	Difuzno trošenje	-
	Oksidaciona (kiseonična) korozija (rđanje)	Diretna oksidaciona korozija
		Vibraciona korozija (fretting)
	Elektrohemijska korozija	-
	Redukciona korozija	Korozija slabim kiselinama
		Korozija jakim kiselinama
Korozija S-P-Cl		
Termička oštećenja	Visokotemperaturna erozija	-
	Plastično strujanje materijala	-
Biološka oštećenja		-

a) Mehanička oštećenja (habanje)

Mehanička oštećenja predstavljaju proces postepenih oštećenja površina elemenata kotrljajnih ležajeva koje su u relativnom kretanju. U odnosu na klizne ležajeve, mehanička oštećenja u kotrljanim ležajevima daleko su manje značajna. Ova oštećenja (habanja) se naročito odnose na cilindrične i konične ležajeve. Postoji više vrsta mehaničkih oštećenja (habanja), kao što su [2]:

- adhezivno habanje,
- abrazivno habanje,
- habanje usled zamora materijala,
- strujna erozija,
- električna erozija itd.

i) Adhezivno habanje

Adhezivno habanje predstavlja osnovni oblik mehaničkog odstranjivanja delova materijala elemenata koji su u direktnom kontaktu, a koje se manifestuje odnošenjem materijala sa površina elemenata i postepenom promenom makro geometrije elemenata. Ova vrsta habanja prisutna je kod nepodmazanih i slabo podmazanih ležajeva, kod kojih debljina filma maziva nije dovoljna da potpuno razdvoji površine koje su u međusobnom kontaktu. Ovo habanje se javlja kao posledica zavarivanja pod uticajem visokih temperatura koje su uzokovane visokim trenjem. Adhezivno habanje predstavlja osnovni vid mehaničkog trošenja ili habanja materijala pri klizanju površina u međusobnom kontaktu. Zavisno od parametara koji definišu uslove kontakta i kretanja, adhezivno habanje može imati različit intenzitet i različite posledice. U

najopštijem slučaju adhezivno habanje, posle perioda uhodavanja i prilagođavanja površine, prelazi u stacionarno stanje, koje se manifestuje u ravnomernom i umerenom odnošenju materijala sa površine mašinskog elementa i postupnoj izmeni makro geometrije elementa. To je normalno adhezivno habanje.

ii) Abrazivno habanje

Abrazivno habanje se definiše kao oblik mehaničkog odstranjivanja delova materijala elemenata kada tvrdi materijal klizi po mekšem i uzrokuje njegovo brazdanje, rezanje i zadiranje. Ova vrsta habanja obično je prisutna kod neadekvatno zaptivenih ležajeva. Materijali koji izazivaju pojavu abrazije mogu biti: zaostali materijali još iz procesa izrade, kontaminanti iz okoline (prašina, vlaga, opiljci, pesak, dim, blato itd.) ili drugi strani materijali (kvarcni pesak, atmosferske nečistoće), koji na različite načine dospevaju u prostor između elemenata. Abrazivno habanje podrazumeva pojmove kao što su zadiranje, rezanje i brazdanje – pretežno trajne plastične deformacije materijala na površini ili neposredno ispod nje. Definiše se kao odstranjivanje materijala sa površina u kontaktu i relativnom kretanju, kao posledice: zadiranja neravnina tvrde površine po površini mekšeg materijala ili delovanja delića raznog porekla na ili između površina materijala. Abrazivno habanje zajedno sa adhezivnim habanjem predstavlja osnovni vid mehaničkog oštećenja (trošenja) kod mašina i opreme [2].

iii) Habanje usled zamora materijala

Habanje usled zamora materijala nastaje kada promenljiva veličina naprezanja (pritisak, zatezanje, smicanje, temperatura itd.) i broj ciklusa pređu one vrednosti koje sam materijal može da izdrži. Pored adhezivnog i abrazivnog trošenja materijala površina u kontaktu i relativnom kretanju, zamor materijala i njegove posledice su danas, verovatno, glavni uzrok ograničenog veka trajanja mnogih mašinskih elemenata [94].

iv) Strujna erozija

Fluidna erozija. - Fluidna erozija (erozivno trošenje) ili strujanje mazivog fluida velikom relativnom brzinom u odnosu na čvrstu površinu u kontaktu može izazvati svojim kinetičkim dejstvom određeno odstranjenje materijala površine. Ono što normalno definišemo kao erozivna trošenja pre su posledica dejstva vrlo malih čvrstih delića, mikro i submikro dimenzija, suspendovanih u mazivom fluidu [2].

Udarne erozija. - Poseban vid abrazivnog habanja sa razaranjem površine kao posledice ponovljenih udara čvrstih delića na površinu. Materijal se sa površine pri tome odstranjuje kinetičkim dejstvom delića u kretanju. Uzroci pojave udarne erozije: prašina ili pesak, nošeni jakim vetrom ili njihovim udarom na površine čvrstog predmeta velikom brzinom (lopatice i kućišta pumpi, duvaljke i cevovodi i hidrauličkom i pneumatskom transportu i dr.). Relativna brzina čestice, veličine čestice i ugao udara na površinu određuje vrednost kinetičke energije erozivne struje, a time i intezitet erozivnog oštećenja [112].

Kavitaciona erozija. - Kada pri strujanju tečnog maziva pritisak u tečnostima padne ispod pritiska pare tečnosti na radnoj temperaturi, u tečnosti se pojavljuju parni ili gasni mehurići. Pri prelasku tečnosti ponovo u oblast visokog pritiska dolazi do razbijanja-kolapsa mehurića. Kako se pri nastajanju parnih ili gasnih mehurova tečnosti (ne mehurovi vazduha rastvorenih u ulju) troši znatna energija, to se pri njihovom kolapsu ona oslobađa u obliku hidrauličnog talasa [2].

v) Električna erozija (mehanička oštećenja (habanja) uzrokovana proticanjem struje kroz ležajeve)

Električna struja pri proticanju kroz mesta kontakta dve površine, koje u strujnom toku predstavljaju i mesta povećanog otpora, može izazvati znatna oštećenja kontaktnih delova, što se ogleda, u njihovom trošenju i izdvajanju delića sa površine. Čak su i struje male jačine opasne. Veličina oštećenja zavisi od više faktora, kao što su: jačina struje, trajanje opterećenja ležaja, brzina obrtanja, vrsta maziva i dr. Jedini način da se izbegnu oštećenja uzrokovana proticanjem struje jeste da se spreči proticanje bilo koje struje kroz ležaj. Nepropropisno uzemljenje opreme može uzrokovati pojavu lutajućih struja koje mogu proticati kroz ležajeve i dovesti do njihovog oštećenja.

b) Hemijska oštećenja (korozija)

Difuzno trošenje. - Adhezivne veze i plastične deformacije metala na mestima stvarnog mikrokontakta površina, očigledno omogućavaju difundiranje pojedinačnih atoma iz strukture materijala jedne površine u kristaličnu strukturu druge površine. To je pogotovo slučaj u uslovima klizanja površina u međusobnom kontaktu, kada dolazi do znatnog plastičnog strujanja i prenosa mase materijala sa znatnim i stalnim procesom rušenja i formiranja sekundarnih struktura sa lokalno vrlo visokim temperaturama. U takvim uslovima mogućnost difuzije je izuzetno velika [2].

Oksidaciona (kiseonična) korozija. - Kiseonik, aktivna komponenta vazduha, reaguje neobično brzo sa svim metalima, osim plemenitih, a i sa mnogim organskim i neorganskim materijama. Kod gvožđa i čelika proces je poznat i kao rđanje. Za nastanak rđanja gvožđa neophodan je direktni kontakt njegove površine sa vodom bilo kojeg porekla, a indirektan sa kiseonikom. Pri tome se stvara hidroksid gvožđa $Fe(OH)_2$ koji se kao nerastvorljiv taložni, i dalje, vezuje sa vodom u rđu. Glavni predstavnici oksidacione korozije su direktna oksidacija i vibraciona korozija (freting) [112].

Elektrohemijska korozija. - Elektrohemijska korozija metalnih površina nastaje isključivo u prisustvu jonskih tečnosti kao što je voda, a naročito vodeni rastvori, koji sa metalom ili metalima u kontaktu čini galvanski spreg. Razaranje koje usled toga nastaje na površinama metala naziva se i elektrohemijska ili galvanska korozija. Elektrohemijska korozija je moguća samo u slučaju potpunog galvanskog električnog kruga. Sa povećanjem otpora u električnom krugu smanjuje se intenzitet korozije, a njegovim prekidom korozija se zaustavlja. Potpuno čista voda se samo u manjoj meri disocira na jone (pozitivan katjon i negativni hidroksidni anjon). Zbog toga je električna provodljivost vode slaba, pa je i elektrohemijska korozija metala u kontaktu sa njom slaba. Međutim, u prirodnoj vodi se nalaze redovno i rastvori soli i druge materije dislocirane na jone, koji povećavaju njenu električnu provodljivost. Stvara se razlika električnih potencijala između dva metala u kontaktu sa elektrolitom. Elektrohemijska korozija u sistemu nastaje u elektronegativnom anodnom materijalu i utoliko je intenzivnija ukoliko je rastojanje između metala u seriji veće. U procesu elektrohemijske korozije metala, pored izdvajanja određenog metala sa dela površine i njegovog prelaska u produkte hemijskog razlaganja, troši se kiseonik.

c) Termička oštećenja

U ovu grupu spadaju procesi oštećenja (trošenja) i razaranja površina pri izuzetno visokim temperaturama (reaktori, peći svih vrsta). Po pravilu to su složeni procesi oksidacije i konverzije strukture, što ima za posledicu eroziju površina i plastičnih strujanja [2].

d) Biološka oštećenja

Mnogi materijali podložni su razgradnji pod dejstvom mikroorganizama (mikrobi, gljive) i nekih viših formi organizama (insekti, glodari). Pod biološkom razgradnjom podrazumevamo svaku nepoželjnu promenu svojstva ili količine materijala, aktivnošću bakterija i živih organizama ili indirektno svojom mrtvom masom ili produktima metabolizma. Mehaničkom oštećenju ove vrste je u velikoj meri podložno drvo, celuloza ali i izolacioni materijal (kablovi), a samo izuzetno i konstruktivni materijali u mašinstvu (neke zaptivke, polimerne mase). U oblastima hlađenja i podmazivanja, vodene emulzije, ulja ili vodene suspenzije čvrstih maziva izrazito su podložne dejstvu mnogih bakterija i gljivica. Dejstvo se ne ogleda samo u degradaciji takvih maziva i opasnostima po zdravlje radnika, već i u mogućnostima znatne korozije metala u kontaktu sa zagađenim i degradiranim fluidom. Određene bakterije (*Thiobacillus*) deluju oksidativno na neka jedinjenja sumpora, što dovodi do prisustva jako korozivnih kiselina, što je slučaj sa uređajima u rudnicima uglja i pirita [2].

3. Uzroci oštećenja ležajeva

Uzroci oštećenja ležajeva se mogu podeliti na:

- normalne (habanje, zamor materijala, korozija itd.) i
- abnormalne (deformacije, otkazi, pucanje, pregrevanje itd.).

Uzroci oštećenja koja se mogu pojaviti u ležajevima su⁸⁴ [112]:

- neadekvatno podmazivanje, upotreba nedovoljne ili suviše velike količine maziva, upotreba maziva sa neodgovarajućim aditivima, upotreba nekvalitetnog (stvrdnutog) maziva, upotreba neodgovarajuće vrste maziva itd.),
- prisustvo kontaminanata u mazivu (prašine, vlage, opiljaka, peska i drugih tvrdih mehaničkih čestica, korozivne atmosfere itd.)
- nepravilna ugradnja (montaža) ležajeva, korišćenje grube sile ili neadekvatnog alata prilikom ugradnje).
- necentriranost (nesaosnost) vratila pogonske i gonjene (radne) mašine),
- statički i dinamički ekscentricitet,
- debalans (neuravnoteženost rotacionih delova pogonske ili gonjene mašine npr. rotora ventilatora),
- savijeno vratilo,
- neparalelnost i nesaosnost remenica pogonske i gonjene (radne) mašine,
- zagrevanje ležajeva uzrokovano prenosom toplote na njih (kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem) sa objekata iz okruženja ili sa okolne atmosfere (visoka temperatura okoline),
- neadekvatna radna sredina,
- velika brzina obrtanja mašine,
- preopterećenje mašine,
- neadekvatno rukovanje,
- vibracije uzrokovane susednim izvorima,
- zamor ležajeva, koji nastaje kao posledica preopterećenja mašine, nepravilnog ili nedovoljnog održavanja,
- upotreba neodgovarajućih ležajeva,
- previsoko trenje obrtnih delova sklopa o nepokrtne delove (npr. zaptivača o vratilo),
- promene brzine obrtanja mašine (npr. kod frekvencijski regulisanih elektromotora)
- proticanje struja kroz ležajeve,
- olabavljenost veza mašine i postolja, odnosno postolja i temelja itd.

a) Oštećenja ležajeva uzrokovana neparalelnošću i nesaosnošću remenica pogonske i gonjene (radne) mašine

Podaci pokazuju da je u oko 20-30% slučajeva uzrok otkaza mašina neadekvatno podešena paralelnost i saosnost remenica pogonske (elektromotora) i gonjene mašine, slika 5.4. Kod takvih mašina kaiševi se više troše i izrazito je veće opterećenje na ležajevima, što značajno povećava temperaturu i time smanjuje vek trajanja ležaja, kaišnika, lančanika, zaptivača i ostalih mašinskih delova [94].

⁸⁴ Ilić, B., Petrov, T., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 11-16.



Slika 5.4. Neparalelnost i nesaosnost remenica pogonske (elektromotora) i gonjene mašine [94]

b) Oštećenja ležajeva uzrokovana necentriranošću (nesaosnošću) vratila pogonske i gonjene (radne) mašine

Empirijska istraživanja pokazuju da se preko 50% svih otkaza na rotacionim mašinama u industriji, bilo direktno bilo indirektno, dešava zbog necentriranosti vratila pogonskih i gonjenih mašina, odnosno zbog lošeg centriranja mašina pri njihovom spajanju. Takođe, istraživanja pokazuju da je u praksi samo 7% spojenih mašina centrirano na zadovoljavajućem nivou u skladu sa tolerancijama koje su propisane od strane proizvođača mašina⁸⁵ [27]. Praktična iskustava pokazuju da prosečna necentriranost pomaka spojenih mašina u realnim pogonskim uslovima iznosi oko 35 (1/100 mm)⁸⁶ [105]. Ovi podaci govore da se prilikom održavanja rotacionih mašina zanemaruje i donekle previđa ovaj dokazani uzrok mnogih otkaza. Delimično, verovatno zbog toga što se pojave necentriranosti teže otkrivaju, sa uređajima koje održavaoci imaju na raspolaganju, a i kada se otkriju korekcionni zahvati radi poboljšanja centričnosti su teško izvodljivi i mukotrpn⁸⁷ [110].

Necentriranost spojenih mašina tokom njihove eksploatacije uzrokuju intenzivnije tribološke procese (trenje i habanje) u ležajevima i spojnicama, a time i povećanje broja otkaza i smanjenje pouzdanosti, kao i povećanje potrošnje energije i smanjenje energetske efikasnosti spojenih mašina (zbog povećanog trenja). Ako se necentriranosti spojenih mašina pravovremeno ne uoče i otklone, pored oštećenja i otkaza ležajeva i spojnica, mogu dovesti do oštećenja i otkaza drugih delova spojenih mašina, kao što su: vratila, zaptivači, namotaji elektromotora itd., kao i do povreda ljudi⁸⁸ [108].

c) Oštećenja ležajeva uzrokovana proticanjem struje

Savremene analize pouzdanosti asinhronih motora pokazuju da većinu otkaza predstavljaju otkazi na ležajevima. Uništenje ili oštećenje ležajnih sklopova i osovine elektromotora čini 12,94% svih otkaza asinhronih motora, te je tom problemu potrebno posvetiti posebnu pažnju. Električki uzročnici oštećenja ležajeva su struje koje teku kroz ležajeve i dovode do njihove erozije. One se razlikuju, kako po načinu nastanka, tako i prema njihovom trajanju tokom rada motora.

Uzroci koji mogu dovesti do proticanja struja kroz ležajeve motora, su⁸⁹ [107]:

- a) osovinski naponi,
- b) elektrostatički elektricitet delova motora usled njihovog obrtanja,

⁸⁵ Adamović, Ž., Ilić, B., Primena dijagnostičkih ispitivanja u cilju povišenja nivoa pouzdanosti i unapređenja energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji, Energetske tehnologije, Vol., No 1-2, Zrenjanin, 2014.

⁸⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena metoda veštačke inteligencije u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

⁸⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Uticaj automatizovane dijagnostike na energetske efikasnost i pouzdanost tehničkih sistema zgrada, Tehnička dijagnostika, Vol. 12, No 2, Beograd, 2013, pp. 26-33.

⁸⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema zgrada automatizovanim dijagnostičkim ispitivanjima, Tehnička dijagnostika, Vol. 6, No 1-2, Banja Luka, 2014, pp. 17-24.

⁸⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

c) lutajuće struje stranih izvora itd.

i) *Struje kroz ležajeve uzrokovane osovinskim naponima*

Osovinske napone (napone duž osovine) može uzrokovati naizmenični magnetski fluks koji obuhvata osovinu, magnetni fluks kroz samu osovinu, te proticanje struje kroz osovinu. Osovinski naponi se pojavljuju kod svih većih rotacionih mašina naizmenične struje. Najčešći uzroci pojave osovinskih napona, koji se indukuju duž osovine svih većih rotacionih mašina naizmenične struje (pa i asinhronih motora), koji stvaraju struje koje protiču kroz ležajeve i druge delove mašine, su:

- magnetna nesimetrija mašine (nesimetrija osnovnog magnetnog fluksa mašine),
- uzdužno magnetisanje osovine,
- remanentni (zaostali) magnetizam u osovini elektromotora
- napajanje motora preko pretvarača frekvencije itd.

Pojave osovinskih napona, te struja kroz ležajeve i druge delove mašina postaju komplikovanije i opasnije što su veće snage i dimenzije tih mašina.

Osovinski naponi uzrokovani magnetnom nesimetrijom mašine. - Od svih struja koje protiču kroz ležajeve smatra se da su najopasnije struje uzrokovane magnetnom nesimetrijom mašine. Magnetna nesimetrija čak može da postoji i kod ispravne mašine zbog nesavršenosti izrade ili specifičnih konstrukcionih rešenja, kao što slučajevi:

- postojanja vazdušnih zazora u jezgru statora, tada je broj linija magnetnog polja, koje se zatvaraju preko delova motora koji imaju vazdušne zapore manji od broj linija magnetnog polja koje se zatvaraju preko delova motora koji nemaju vazdušne zapore,
- postojanja osnih ventilacionih kanala u jezgru statora,
- neravnomernih vazdušnih zazora između rotora i statora, tj. statički i dinamički ekscentricitet,
- različitih debljina i kvaliteta materijala u delovima motora,
- različito izvedenih spojeva šipki i prstenova,
- da šipke kaveza rotora nisu izolovane od paketa rotora itd.

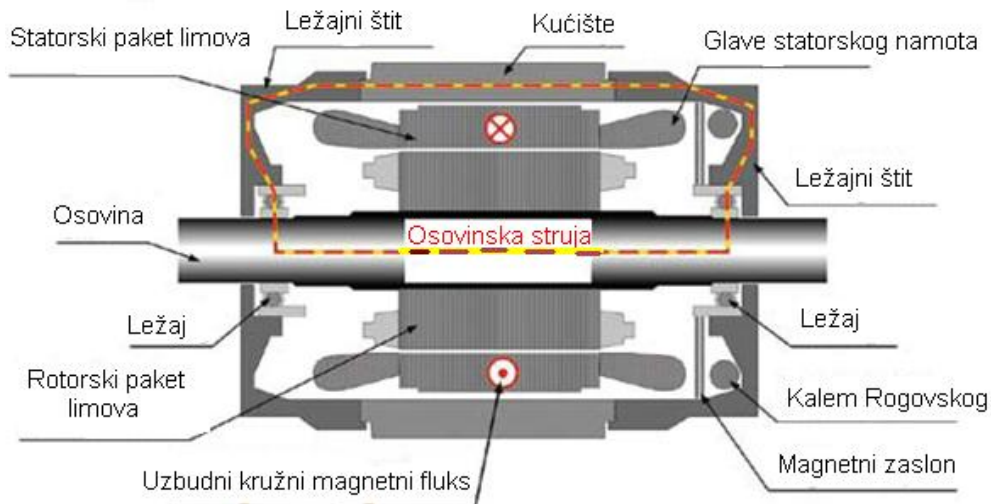
Magnetna nesimetrija mašina se može pojaviti i tokom eksploatacije, zbog pojave: neravnomernog (ekscentričnog) vazdušnog zazora između rotora i statora, kratkih spojeva namotaja rotora, zasićenja u magnetnom kolu motora, različitih vrsta oštećenja itd.

Svaka vrsta oštećenja asinhronog motora odražava se na povećanje njegove magnetne nesimetrije, što uzrokuje pojavu dodatnih harmonika tačno određenih frekvencija u frekvencijskim spektrima: brzine obrtanja, momenta, buke, vibracija, struje statora, osovinskog napona i sl., kojih nema kod ispravnog motora. Kao posledica nesimetričnog osnovnog magnetnog fluksa mašine javlja se mali rezultatni fluks kroz osovinu, koji dovodi do indukovanja elektromotorne sile između njenih krajeva, čija amplituda i frekvencija zavise od uzroka i stepena nesimetrije. Ta elektromotorna sila se naziva osovinski napon, koji ako je dovoljno veliki, može uzrokovati proticanje struje zatvorenom konturom koju obrazuje: osovina - prvi ležaj - prvi ležajni štiti - kućište - drugi ležajni štiti - drugi ležaj - osovina, kao što vidi sa slike 5.5⁹⁰ [75,82].

Da li će navedenom konturom proteći struja zavisi od visine osovinskog napona i probojnog napona uljnog filma u ležajevima. Pošto je impedansa ove konture mala, to pojava čak i malog osovinskog napona može uzrokovati proticanje značajne struje. Osovinski napon može dostići vrednost nekoliko desetih delova volta, a ponekad i nekoliko volti. Prema nekim ispitivanjima osovinski naponi čija efektivna vrednost prelazi 300 mV mogu uzrokovati proticanje struje kroz oba ležaja. Dugotrajnim proticanjem ovih struja neprimetna oštećenja ležajeva se šire i povećavaju dok ne dovedu do potpunog gubitka frikcionih

⁹⁰ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Primena softverskog paketa Testpoint u dijagnostici stanja asinhronih motora metodom spektralne analize osovinskog napona, Info M, Vol. 12, No 45, Beograd, 2013, pp. 42-45.

osobina ležajeva. Da bi se to sprečilo vrši se izolovanje jednog (nepogonskog), ako ne i oba ležaja, prema masi. Na ovaj način se ne smanjuje intenzitet osovinskih napona, nego prekida ili smanjuje intenzitet struje kroz ležajeve. Ako je asinhroni motor povezan sa drugom mašinom, onda struja koju uzrokuje indukovani osovinski napon može oštetiti ležajeve i delove druge mašine. Za merenje osovinskih struja koristi se namotaj Rogovskog koji se smešta u ležajni štit motora, koncentrično oko osovine. Radi sprečavanja greške merenja usled rasipnih magnetnih flukseva glava statorskih namota, između namotaja Rogovskog i glava namota postavlja se magnetni zaslon⁹¹ [75, 82].



Slika 5.5. Zatvorena kontura kojom protiče struja uzrokovana osovinskim naponom asinhronog motora [75,82]

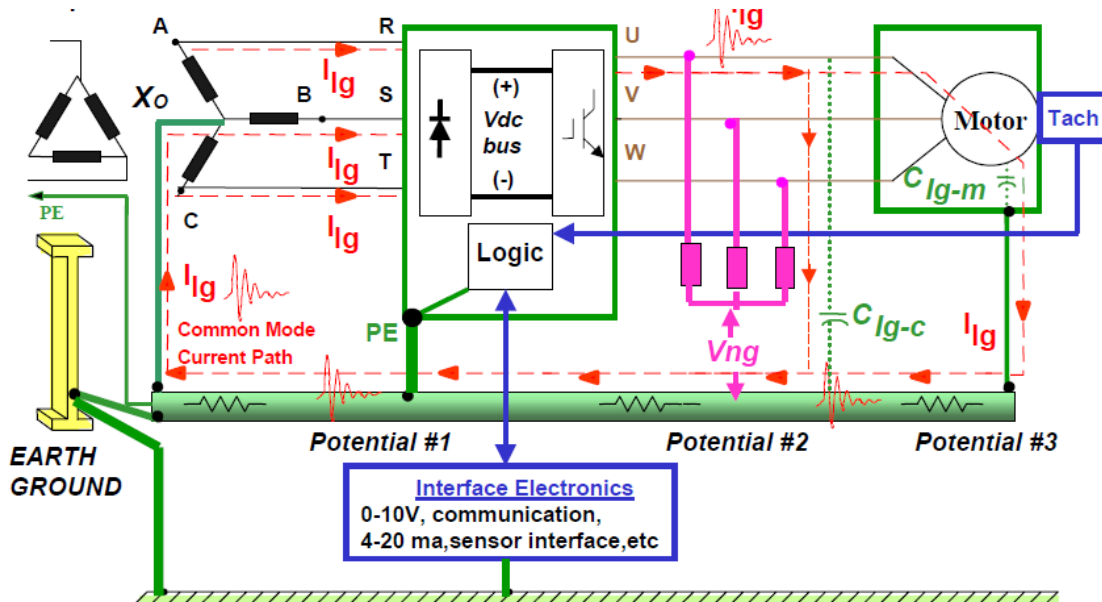
Osovinski naponi uzrokovani uzdužnim magnetisanjem osovine. - Uzdužno magnetisanje osovine, može biti uzrokovano: kratkim spojevima namotaja rotora (aramature), međufaznim kratkim spojevima u namotajima statora, ekscentricitetom statora i rotora (pulsirajućim fluksom), ili nekim drugim nenormalnim stanjem, što može uzrokovati proticanje jakih struja kroz ležave motora.

Osovinski naponi uzrokovani remanentnim magnetizmom u osovini elektromotora. - Osovinski indukovani naponi koji su posledica remanentnog magnetizma u osovini elektromotora, u pogonskim se uslovima ne mogu smanjiti te je potrebno preduzeti mere zaštite od struja kroz ležajeve što podrazumeva odgovarajuće izolovanje svih puteva zatvaranja tih struja.

Osovinski naponi uzrokovani napajanjem motora preko pretvarača frekvencije. - U savremeno regulisanom pogonu generišu se struje koje protiču kroz ležajeve, zbog nesimetričnosti napona zvezdišta motora (engl. common-mode voltages), brzih porasta napona du/dt i visokih sklopničkih frekvencija. Da bi se izbegla oštećenja ležajeva moraju se upotrebiti specijalni filtri na izlazu iz pretvarača frekvencije, te simetrični pažljivo odabrani energetski kablovi. Najčešće treba izolovati ležajeve. Što je regulisani motor veći to je i problem veći. Uputstva daje isporučilac pretvarača. Principijelna šema asinhronog motora napajnog preko pretvarača frekvencije prikazana je na slici 5.6.⁹² [78]

⁹¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Automatizovana dijagnostička ispitivanja mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 11-18.

⁹² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina metodom spektralne analize struje statora, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, Smederevo, 2012, pp. 3-12.



Slika 5.6. Principijelna šema asinhronog motora napajanim preko pretvarača frekvencije radi ilustraciju osovinskog napona i struja kroz ležajeve [94]

ii) *Struje kroz ležajeve uzrokovane elektrostatičkim elektricitetom delova motora usled njihovog obrtanja*

Elektrostatički indukovani napon osovine može biti prisutan u svakom slučaju gde se može pojaviti sakupljanje rotorskog naelektrisanja. Primeri su povezivanje pogona remenima, prolaz jonizovanog vazduha preko lopatica rotorskih ventilatora i sl. Eliminisanje ovih osovinskih napona se ostvaruje držanjem osovine i kućišta statora na istom potencijalu (zemlje) instaliranjem četkica za uzemljenje osovine, koje smanjuju elektrostatički elektricitet i napon osovine na 70-400 mV⁹³ [104].

iii) *Struje kroz ležajeve uzrokovane lutajućim strujama stranih izvora*

Pored navedenih slučajeva oštećenja ležajeva asinhronih motora mogu uzrokovati i lutajuće struje stranih izvora, slika 5.7., kao što su: katodna zaštita, postrojenja za elektrolizu, distributivne mreže sa uzemljenim neutralnim provodnikom, električna vuča itd. [94].



Slika 5.7. Oštećenja ležaja uzrokovana proticanjem lutajućih struja stranih izvora [94]

5.1.5 Proučavanje pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola

Pogodnost provođenja dijagnostičkih kontrola je karakteristika koja govori o tome da li postoji mogućnost pouzdanog pristupa dijagnostičkih uređaja do potrebnih delova tehničkog sistema u procesu eksploatacije i da li se svi dijagnostički postupci mogu provesti sa visokom radnom produktivnošću, potrebnom tačnošću i sa što manjim troškovima.

Kao kriterijum za ocenu pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola uzima se utrošak resursa potrebnih za realizaciju dijagnostičkih kontrola, to su: minimum vremena i minimum utroška materijala.

⁹³ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena metoda veštačke inteligencije u dijagnostici stanja ležajeva mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 5, No 1-2, Banja Luka, 2013, pp. 32-38.

Povećavanjem pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola pored brže dijagnostike, dobija se i pouzdanija dijagnostička informacija što je od izuzetnog značaja za podizanje nivoa pouzdanosti dijagnostičkih kontrola.

Povećanje pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola postiže se:

- izborom konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole,
- izborom dijagnostičke opreme pogodne za dijagnostičke kontrole i
- povećanje nivoa znanja dijagnostičara iz oblasti opšte i konkretne dijagnostike.

5.1.5.1 Izbor konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole

Konstruktivna rešenja tehničkih sistema su pogodna za dijagnostičke kontrole ako imaju dobre karakteristike u pogledu primene dijagnostičkih kontrola, odnosno ako postoji mogućnost pouzdanog pristupa dijagnostičkih uređaja do potrebnih delova tehničkog sistema u procesu eksploatacije i ako se svi dijagnostički postupci mogu provesti sa visokom radnom produktivnošću, potrebnom tačnošću i sa što nižim troškovima [3].

Izbor konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole treba vršiti u skladu sa opštim principima ekonomičnog konstruisanja po kojima se tehnički sistemi konstruišu tako, da troškovi proizvodnje, eksploatacije i održavanja budu minimalni u toku projektovanog vremena korišćenja. U skladu sa navedenim principima prilikom izbora konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole treba:

- izvršiti optimalno prilagođavanje konstruktivnih rešenja tehničkih sistema dijagnostičkim uređajima, s ciljem da se smanji utrošak vremena za dijagnostičke kontrole i obezbede povoljni radni uslovi za dijagnostičko osoblje;
- odlučiti koliko treba ići u konstruktivnom spajanju tehničkih sistema i dijagnostičkih uređaja;
- montažu senzora koji primaju dijagnostički signal od tehničkog sistema i vode ga u dijagnostički uređaj, treba po mogućnosti izvršiti što bliže mestu koje se dijagnostikuje, jer na tačnost dijagnostike značajno utiče dužina dijagnostičkog kanala.

S obzirom na koji način se ostvaruje povezanost između tehničkih sistema i dijagnostičkih uređaja, tehnički sistemi se mogu konstruisati tako:

- da su potpuno odvojeni od dijagnostičkih uređaja, upotreba dijagnostičkih uređaja moguća je samo uz primenu specijalnih umetaka, što predstavlja naknadno prilagođavanje tehničkog sistema dijagnostičkim kontrolama;
- da se u njih mogu ugraditi senzori (prijemnik i pretvarač dijagnostičkog signala);
- da imaju stalno ugrađene senzore, koji imaju veću pouzdanost nego tehnički sistemi, ova varijanta je najjeftinija;
- da su stalno povezani sa dijagnostičkim uređajima, dijagnostika se svodi na očitavanje vrednosti dijagnostičkih parametara pomoću pokaznih instrumenata ili uočavanje svetlosnih ili zvučnih signala koji signaliziraju neko granično stanje.

Zbog svega navedenog, još u fazi projektovanja treba voditi računa o konstruktivnim rešenjima tehničkih sistema pogodnim za provođenje dijagnostičkih kontrola. Realizacija konstruktivnih rešenja tehničkih sistema pogodnih za dijagnostičke kontrole treba da bude rezultat usaglašenog rada inženjera za razvoj u preduzećima koji se bave konstruisanjem (konstruktora), inženjera koji se bave ispitivanjem prototipova i dijagnostičkih stručnjaka u praksi. Korisnik tehničkog sistema treba da od proizvođača dobije kompletnu tehničku dokumentaciju sa opisima funkcionisanja svih delova tehničkog sistema, koja je potrebna za dijagnostičke kontrole i otklanjanje uzroka otkaza.

Ako se o pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola vodi računa u fazi projektovanja tehničkog sistema, onda je moguće izvršiti optimizaciju dijagnostičkih postupaka. Optimizacija se vrši radi izbora

najbržih i najpouzdanijih postupaka dijagnostičkih kontrola. Naravno, optimizaciju dijagnostičkih postupaka moguće je vršiti kod dijagnostičkih kontrola koje nisu nužno uslovljene (tamo gde su dijagnostički postupci propisani zbog zaštite, ne smeju se vršiti nikakve izmene).

Prilikom konstruisanja tehničkih sistema treba izabrati najpovoljnija tehničko–ekonomska rešenja, ne samo u pogledu pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola, već i u pogledu: sklapanja, transporta i montaže, pogodnosti održavanja, potrebnih zaliha rezervnih delova, sigurnosti (pouzdanosti) u radu itd.

5.1.5.2 Izbor dijagnostičke opreme pogodne za dijagnostičke kontrole

Dijagnostička oprema (računari sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom, senzori, kablovi itd.) takođe treba da ima visok nivo pogodnosti za dijagnostičke kontrole, odnosno treba da poseduje osobine, kao što su: raspoloživost, mogućnost brze zamene, kratko vreme popravke, mogućnost svih oblika održavanja i slično.

Da bi se povećao nivo pogodnosti provođenja dijagnostičkih kontrola potrebno je:

- razvijati dijagnostičke kontrole koje ne zahtevaju prekidanje tehnološkog procesa;
- usavršavati merne mogućnosti (principe, strategije, metode očitavanja, predstavljanje mernih veličina, kalibraciju, propise o merenjima, senzore itd.);
- automatizovati proces merenja, prenosa i obrade podataka, izrade izveštaja testova itd.

Računari se u dijagnostici mogu koristiti radi centralizovane kontrole parametara stanja sistema i upravljanja dijagnostičkim procesom.

5.1.5.3 Povećanje nivoa znanja dijagnostičara iz oblasti opšte i konkretne dijagnostike

Pogodnost dijagnostičkih kontrola se definiše i preko nivoa intelektualnih i psihofizičkih sposobnosti dijagnostičara.

Da bi se povećala pogodnost dijagnostičkih kontrola u uslovima primene računara u tehničkoj dijagnostici, dijagnostičar mora shvatiti ciljeve dijagnostičkog procesa i mogućnosti dijagnostičke opreme. Za dijagnostičare se postavljaju povećani zahtevi u pogledu:

- poznavanja ulazno-izlaznih veličina procesa, strukture i karaktera dijagnostičkih parametara;
- visokomisaonog logičkog razmišljanja;
- oštroumnog i sveobuhvatnog zaključivanja i sl.

Za dobro funkcionisanje programa održavanja treba:

- sistem komunikacije dobro postaviti, jer se često dešava da neispravnost otkrije i otkloni prosečan radnik, a da se podaci o tome ne evidentiraju;
- vršiti obuku radnika, ne samo onih zaduženih za dijagnostiku, nego i onih koji rade u radionici, tako da svi održavaoci doprinose uspehu dijagnostičkih kontrola itd.

5.1.6 Izbor dijagnostičkih parametara

Sledeći korak je izbor značajnih i osetljivih dijagnostičkih parametara (signala) na osnovu kojih će se vršiti ocena stanja tehničkih sistema. Izbor dijagnostičkih parametara ustvari predstavlja izbor fizičkih veličina koje se mogu koristiti za jednoznačno definisanje stanja tehničkog sistema.

Dijagnostički parametri (signali) su merljive fizičke veličine (temperatura, vibracije, buka, struja itd.) koje oslikavaju (verno odražavaju) stanje tehničkog sistema ili njegovog podsistema.

Pri izboru dijagnostičkih parametara treba voditi računa da njihov broj bude što manji, najpovoljnije je imati jedan, dva ili eventualno tri parametra. U većini slučajeva stanje tehničkog sistema se dosta verno može pratiti samo sa dva dijagnostička parametra. Što se više parametara prati, to je veća verovatnoća da će se pravilno oceniti stanje tehničkog sistema. Dijagnostika sa više parametara, više mernih signala,

omogućava detekciju uzroka, mesta (lokacije) i stepena oštećenja, a takođe može uzimati u obzir različite radne uslove.

Izabrani dijagnostički parametri treba u potpunosti da definišu stanje sastavnih delova i/ili sistema, što omogućava predviđanje momenata kada će doći do odstupanja osnovnih karakteristika sastavnih delova i/ili sistema od nominalnih (dozvoljenih) vrednosti.

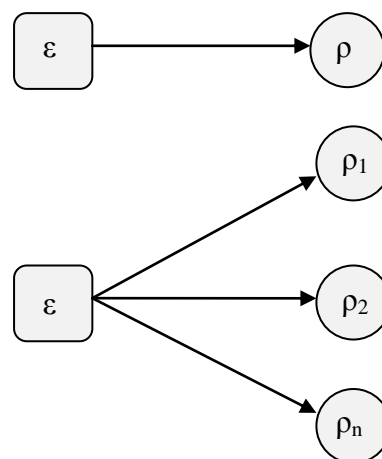
Da bi dijagnostičke metode bile efikasne, potrebno je izabrati one dijagnostičke parametre (fizičke veličine) iz kojih se može dobiti najviše podataka za ocenu stanja sistema.

Prilikom izbora dijagnostičkih parametara koji će se pratiti na tehničkim sistemima treba voditi računa da se izaberu dijagnostički parametri delova tehničkih sistema ili njihovih podsistema:

- čiji otkaz može uticati na bezbednost ljudi i postrojenja,
- čiji otkaz može dovesti do ispada tehničkog sistema iz pogona,
- čiji otkaz može uticati na nivo pouzdanosti,
- čiji otkaz može smanjiti stepen funkcionalnosti tehničkog sistema,
- čija pouzdanost nije dovoljno dugo vremena proverena u realnim uslovima eksploatacije,
- koji su izuzetno skupi,
- čiji radni vek je relativno kratak itd.

Prilikom izbora dijagnostičkih parametara ρ potrebno je [1]:

- izvršiti analizu svih informacija dobijenih iz istorijskih podataka o radu tehničkog sistema,
- utvrditi funkcionalnu zavisnost parametra stanja tehničkog sistema ε od vremena njegovog korišćenja t : $\varepsilon=f(t)$
- u slučaju dijagnostike sa jednim parametrom utvrditi funkcionalnu zavisnost dijagnostičkog parametra ρ od stanja tehničkog sistema ε : $\rho=f(\varepsilon)$, pri tome, jedan ili više dijagnostičkih parametara ρ mogu da definišu samo jedno stanje ε , kao što se vidi sa slike 5.8.
- voditi računa da se zadovolje određeni uslovi u pogledu: informativnosti, maksimalnog relativnog odnosa parametara, saglasnosti između dijagnostičkih parametara ρ i parametra stanja ε , varijacije i korelacije.



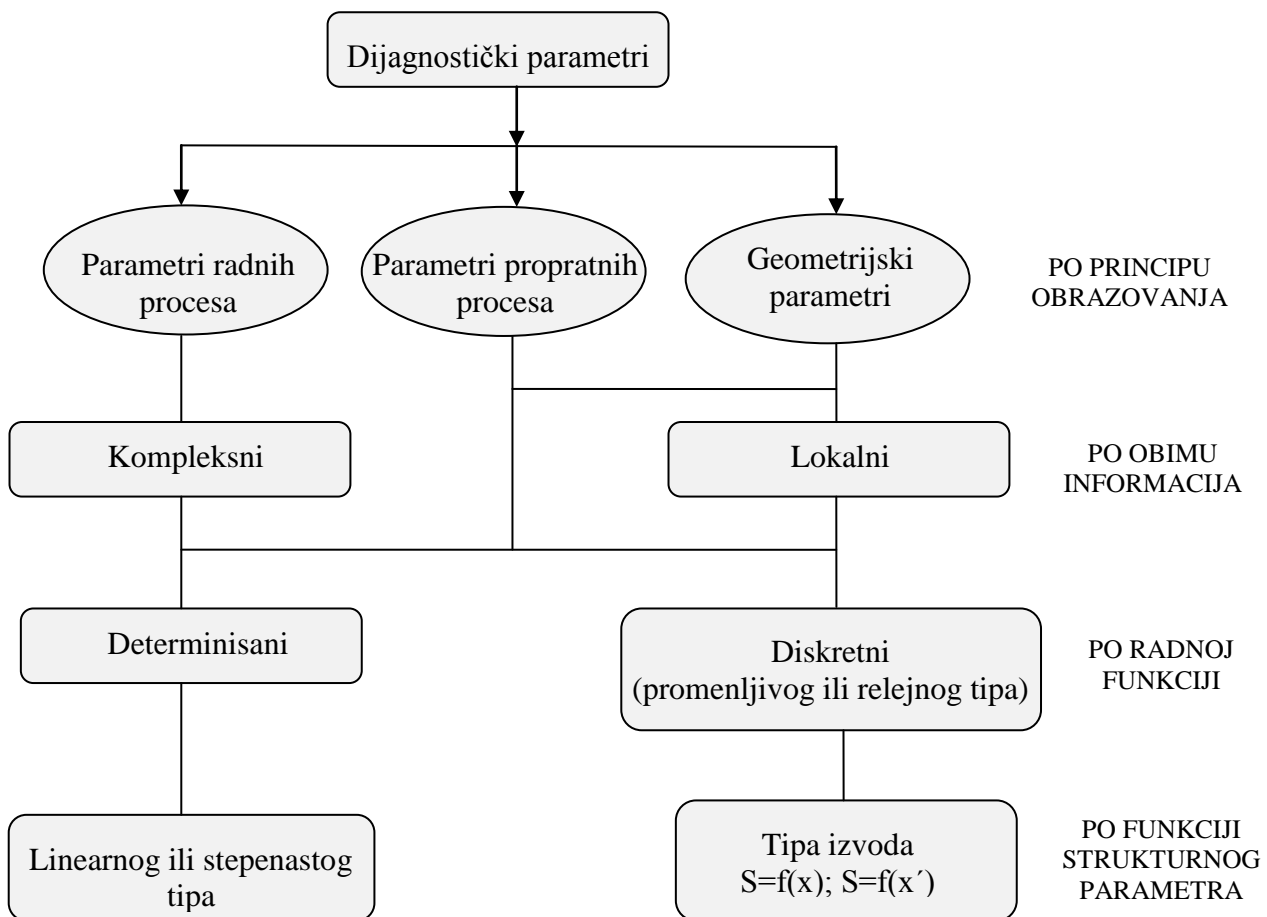
Slika 5.8. Jedan ili više dijagnostičkih parametara ρ mogu da definišu samo jedno stanje tehničkog sistema ε

Promena stanja tehničkog sistema javlja se u obliku simptoma (obeležja) koji se nazivaju dijagnostički simptomi, pa tehnička dijagnostika treba da vrši i prepoznavanje tih simptoma. Informativnost dijagnostičkog parametra (ili "dijagnostička težina") može se oceniti preko broja informacija o stanju tehničkog sistema koji sadrži taj parametar. Veća informativnost dijagnostičkog

parametra, biće ako sadrži što više informacija o stanju tehničkog sistema koje se nalaze u dijagnostičkom parametru.

Za dijagnostičke parametre ρ mogu se izabrati, slika 5.9:

- **Parametri radnih procesa** (snaga, učestalost puštanja u rad itd.), određuju osnovne funkcionalne karakteristike tehničkog sistema i daju (sadrže) opštu široku (kompleksnu) informaciju o stanju tehničkog sistema u celini. Ta informacija se može iskoristiti kao osnova za dalje produbljivanje dijagnostike. Stanje tehničkog sistema zavisi od velikog broja parametara radnog procesa. Pri tome, svi parametri radnog procesa ne utiču podjednako na stanje tehničkog sistema.
- **Parametri propratnih procesa** (temperatura, vibracije, buka itd.), daju (sadrže) užu (lokalnu) informaciju o stanju tehničkog sistema koji se dijagnostikuje. Oni se mogu dosta tačno i široko primenjivati pri dijagnostici složenih sistema.
- **Geometrijski (strukturni) parametri** (zazor, slobodan hod, dužina, površina, obim, ugao u ravni, prostorni ugao, krivina linije, krivina površine, momenti inercije, otporni moment inercije, polarni moment inercije i sl.), određuju pojedine elementarne veze između pojedinih delova u sistemu i daju (sadrže) ograničenu, ali konkretnu informaciju o stanju tehničkog sistema.



Slika 5.9. Klasifikacija dijagnostičkih parametara

5.1.6.1 Izbor temperature kao prvog dijagnostičkog parametra

Kako je vrlo često slučaj da otkazima prethodi ili da ih prati pojava pregrevanja radne opreme ili pojedinih njenih delova, to se oni mogu na vreme otkriti merenjem temperature.

Zagrevanje je fizička pojava čiji su parametri od velike važnosti pri praćenju stanja i ocenjivanju rada opreme, instalacija i tehnoloških procesa u postrojenjima različitih namena. Odstupanja od normalnih vrednosti stepena zagrejanosti nekog tehničkog sistema govore o promeni nekog svojstva, pa nedostatak kontrole nad tom promenom može ugroziti siguran rad aparata i opreme u postrojenjima i poremetiti tehnološki proces, smanjujući ukupnu pouzdanost sistema.

Praćenjem temperature može se oceniti termičko stanje tehničkog sistema, što omogućava blagovremeno pronalaženje neispravnih delova na tehničkom sistemu i sprečavanje težih otkaza. Istovremeno se dobijaju i veoma važni podaci za statističku analizu, procenu kvaliteta, postojanost sistema, kao i potrebno vreme za aktivnosti održavanja.

Neprekidno se može vršiti praćenje termičkog stanja složenih i za proces proizvodnje važnih tehničkih sistema, čiji otkaz može izazvati značajne smetnje u eksploataciji.

Vrednosti temperature - njena visina, raspodela ili odstupanje od normalne vrednosti, daju mogućnosti za procenu stanja. Otkrivanje promena u provođenju toplote kroz ili van nekog aparata, izazvane neispravnim radom samog aparata ili stvaranje barijera u provodnim delovima su jedan od ciljeva praćenja temperature.

Pri analizi termičkog stanja sistema, da bi se sagledali njegovi mogući efekti, polazi se od izvora toplotne energije u samom sistemu. U sistemu izvor toplotne energije može biti sam proces (sagorevanje uglja, para u turbini) ili sam sistem (trenje i slično). Kontrolom termičkog stanja, a poznavajući sve izvore toplote u sistemu može se doći do činjenice o vrednosti razmenjene toplote u pojedinim delovima sistema i na osnovu toga zaključiti:

- da li je došlo do umanjenja mehaničkih karakteristika delova,
- da li su oštećene površine za razmenu toplote,
- da li je došlo do zaprljanja površina za razmenu toplote,
- da li je došlo do oštećenja na izolacionom materijalu,
- da li su oštećeni ležajevi,
- da li je oštećenje nastupilo na električnim komponentama i instalacijama i druge moguće situacije.

Rezultat ponašanja i stanja tehničkog sistema (električne, mehaničke i druge procesne opreme) pri emitovanju toplote, može biti snažan trag za dijagnostikovanje problema, sa velikom pouzdanošću predviđanja.

Praćenje (merenje) temperature asinhronih motora. - Merenje temperature je uobičajena metoda dijagnostike i zaštite električnih mašina i pogona od pregrevanja. Neprekidnim merenjem temperature mogu se sprečiti oštećenja statorskih namota i paketa, rotorskih namota i paketa, kao i oštećenja ležajeva (najčešće kombinovano sa merenjem vibracija).

Granice korišćenja električnih mašina su uveliko određene najvećom temperaturom koju izolacija mašine može izdržati. Često se (pri proizvodnji mašina i kasnije pri dijagnostici stanja mašine) ispitivanje karakteristika provodi merenjem temperature namotaja, odnosno temperature mašine. Većina izolacionih materijala niskonaponskih asinhronih motora je organskog porekla i osetljiva je na prekoračenja dopuštenih najvećih temperatura. Praćenje (neprekidno ili povremeno merenje) temperature asinhronog motora ima važnu ulogu u oceni stanja motora i njegovog životnog veka, a posebno kod pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom gde povišena temperatura (iznad one za koju je motor izrađen i sertifikovan) predstavlja nedopušteno stanje u radu motora, odnosno direktnu opasnost od eksplozije.

Merenje temperature posebno je opravdano kod velikih jedinica i važnih EMP-a. Upoređivanjem vrednosti dobijenih temperatura (kroz periodična merenja) može doneti zaključak o stanju elektromotora, što se može primeniti u dijagnostičke svrhe. Merenje temperature se takođe koristi u zaštitne svrhe, porastom temperature preko najveće dopuštene vrednosti automatski se isključuje elektromotor. Zaštita električnih mašina nadzorom termičkog stanja se provodi neprekidno kada je mašina u radu.

5.1.6.2 Izbor vibracija kao drugog dijagnostičkog parametra

Merenje i analiza mehaničkih vibracija, je bez premca najefektnija tehnika detekcije i lokalizacije oštećenja na rotirajućim mašinama. Već mnogo puta je dokazano da, u odnosu na druge metode ispitivanja bez razaranja, analiza vibracija pruža najviše informacija o stanju delova sistema (mašina). Neki sistemi,

koji su od ključnog značaja za rad celokupnog postrojenja, mogu biti predmet neprekidnog nadzora vibracija, što znači da postoji upozorenje, odnosno da se oglasi alarm čim se vibracije povećaju preko unapred utvrđenog nivoa. Na ovaj način se sprečava brzo širenje oštećenja i pojava havarijskog otkaza. Ova metoda prati frekvencije vibracija rotacionih mašina. Pravilnim utvrđivanjem vrednosti frekvencije, sve degradacije stanja komponenti rotacionih mašina se mogu pratiti i ocenjivati. Neobičajeno trošenje se može detektovati i popraviti pre nastanka otkaza. Koristi se zato što je izvrstan pokazatelj primarnih sila koje deluju na mašinu. Mnoge poteškoće u radu: neizbalansiranost, ekscentricitet osovine, trenje u ležajevima, rezonancije, nestabilnosti, trošenje ležajeva ili pak oslobođeni i slomljeni delovi mašine mogu se detektovati i razdvojiti jedna od druge pomoću vibracione analize. Praćenje vibracija je posebno efikasna metoda za zaštitu mašina, koja operaterima omogućava da daju naloge za automatsko isključenje mašine u slučaju kada nivo vibracija postane prekomeran. S obzirom da se praćenje vibracija mašina vrlo često koristi u svrhu zaštite, proširivanje toga sistema dijagnostičkim alatima u svrhu dijagnostike mašina je samo po sebi razumljivo i jedna je od najčešće korišćenih metoda za dijagnostiku mašina.

5.1.6.3 Izbor struje kao trećeg dijagnostičkog parametra

Pre su se uglavnom za potrebe dijagnostike koristile metode bazirane na termičkim i mehaničkim veličinama, npr. temperaturi i vibracijama. Međutim, kvalitetna dijagnostika zahteva posmatranje i obradu niza električnih veličina.

Sagledavanjem talasnih oblika struja električnih motora moguće je evidentirati neke od problema za koje su metode poput praćenja vibracija i temperature nedovoljno efikasne. Analiza frekvencijskog spektra struje struje motora je veoma korisna metoda za detekciju napuklih ili slomljenih šipki rotora i ekscentriciteta, i to tokom rada motora.

5.1.7 Izbor dijagnostičkih metoda

Prilikom izbora dijagnostičkih metoda vodilo se računa o tehnološko-funkcionalnim karakteristikama tehničkih sistema, kao i tome da one zadovolje određene zahteve u pogledu objektivnosti, jednoznačnosti i ponovljivosti. Odnosno vodilo se računa o tome da zaključak o stanju tehničkog sistema ili njegovog sastavnog dela ne sme da zavisi od subjektivne procene specijaliste za dijagnostiku i drugih spoljnih uticaja, kao i tome da se pri ponavljanju postupaka dijagnostike treba uvek da dobiju isti rezultati.

Dijagnostičke metode koriste se za merenje određenih parametara radi poređenja sa standardnim nivoima (merilima). Metode dijagnostike daju dodatne informacije o razvoju parametara mašine u toku vremena, pokazujući tendencije i predviđajući moguće promene parametara. Metode dijagnostike koriste analizu izmerenih signala da bi se identifikovali tipovi mogućih otkaza, ozbiljnost i lokaciju defekta. Još složeniji problemi rešavaju se metodama za prognozu stanja. Ovde se rešavaju problemi predviđanja mogućeg širenja postojećih defekata, prognoze preostalog vremena korišćenja i prognoze vremena bezotkaznog rada. Moderni sistemi dijagnostike bazirani su na metodama bez razaranja.

Za dijagnostiku stanja nekog složenog tehničkog sistema potrebno je primeniti nekoliko dijagnostičkih metoda istovremeno (kombinovano), kao i veliki broj dijagnostičkih instrumenata.

Metode tehničke dijagnostike bazirane na praćenju temperature, vibracija i struje u potpunosti definišu stanje tehničkog sistema. Zato se pomoću savremenih dijagnostičkih metoda, kao što su: metoda termografije, metoda analize spektra vibracija i metoda analize spektra struje statora, računarom upravljani dijagnostički proces se može realizovati u velikom broju pogona u industriji.

5.1.7.1 Izbor metode termografije kao prve dijagnostičke metode

Za merenje temperature (praćenje termičkog stanja) mogu se koristiti sledeći uređaji:

- kontaktni uređaji (termometri, termostati, termistori, termoparovi i sl.),
- beskontaktne uređaji (termometarski pištolji, optički pirometri, radijacioni pirometri, termografske kamere itd.) i
- indikatorski uređaji (boje, temperaturne krede, papir, kuglice i slični materijali koji su osetljivi na promenu temperature).

Koji ćemo uređaj koristiti zavisi od tehničkog sistema čija se temperatura želi meriti (pratiti). Sigurno je da nijedan uređaj nije potpuno i uvek primenjiv, već je više ili manje ograničen svojim karakteristikama, bilo da se radi o površinskim merenjima temperature ili o merenju u unutrašnjosti nekog uređaja ili sistema.

Termografija je metoda beskontaktnog merenja temperature površine objekta, snimanjem infracrvenog spektra zračenja površine. Svaki objekat sa svoje površine odaje toplotu infracrvenim zračenjem čija talasna dužina zavisi od temperature objekta. Termografska kamera je uređaj koji nam omogućava da snimimo zračenje sa površine nekog objekta i prikazemo ga u nama vidljivom (optičkom) spektru. Jednostavno rečeno, termografija nam omogućava da saznamo, te vizuelno prikazemo temperaturu objekta bez potrebe za kontaktnim merenjem⁹⁴ [72].

Zahvaljujući okolnosti da se termografske kontrole izvode bez uticaja na rad pogona i činjenici da se radi o uređajima sa velikom osetljivošću, neispravnosti se otkrivaju u najranijoj fazi nastanka. Kada se dođe do podatka o stepenu neispravnosti, bez teškoća se može planirati i obaviti otklanjanje neispravnosti u najpovoljnijem momentu, a to je vrlo značajno sa stanovišta uštede u vremenu, ljudstvu i novcu. Sistematskim termografskim kontrolama se postiže veća pouzdanost rada postrojenja, bilo da se radi o tačnoj proceni neispravnosti, bilo da se inicira dalje ispitivanje povoljnijim metodama.

5.1.7.2 Izbor metode analize frekvencijskog spektra vibracija kao druge dijagnostičke metode

Činjenica da se većina neispravnosti mašina manifestuje povećanim vibracijama mašina ili pojedinih njihovih delova iskorišćena je kao pouzdan pokazatelj neispravnosti mašina. Sa mašina se snima frekvencijski spektar vibracija i analizom tog spektra može se oceniti stanje mašina i mehanička oštećenja, ako postoje. Poznato je da svaka vrsta neispravnosti mašina uzrokuje vibracije tačno određene frekvencije, a nivo tih vibracija proporcionalan je stepenu neispravnosti.

Kako mehanički sistemi i mašine čine većinu pogonske opreme, praćenje vibracija je najčešće ključna komponenta većine koncepcija održavanja prema stanju. Međutim, praćenje vibracija samostalno ne može dati sve potrebne podatke za uspešno održavanje prema stanju. Ova metoda je ograničena time što se prati samo mehaničko stanje mašine, a da se ne prate ostali parametri za održavanje pouzdanosti i efikasnosti. Zato koncepcija održavanja prema stanju treba da sadrži i druge dijagnostičke metode. U području elektromašinstva posebno su interesantne metode za dijagnostiku stanja električnih rotacionih mašina, kao što je metoda analize frekvencijskog spektra struje statora motora.

5.1.7.3 Izbor metode analize frekvencijskog spektra struje statora motora kao treće dijagnostičke metode

Dijagnostička metoda analize frekvencijskog spektra struje statora se bazira na činjenici da svaka vrsta neispravnosti elektromotora, uzrokuje u frekvencijskom spektru struje statora porast tačno određene frekvencijske komponente. Analizom tog frekvencijskog spektra, odnosno poređenjem amplituda dodatnih harmonika struja sa amplitudom osnovnog harmonika i uz poznavanje konstrukcionih karakteristika elektromotora, moguće je doneti zaključke o tipu i stepenu neispravnosti na asinhronom elektromotoru (npr. elektromotor bez oštećenja, stanje elektromotora još uvek zadovoljavajuće, elektromotor je pred havarijom i sl.).

5.1.8 Izbor dijagnostičke opreme

Prilikom izbora dijagnostičke opreme (hardverske i softverske podrške računara, senzora, kablova itd.) vođeno je računa da njena primena bude tehnički i ekonomski opravdana, odnosno:

- da se može koristiti u svim prilikama i u svim industrijskim sredinama,

⁹⁴ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

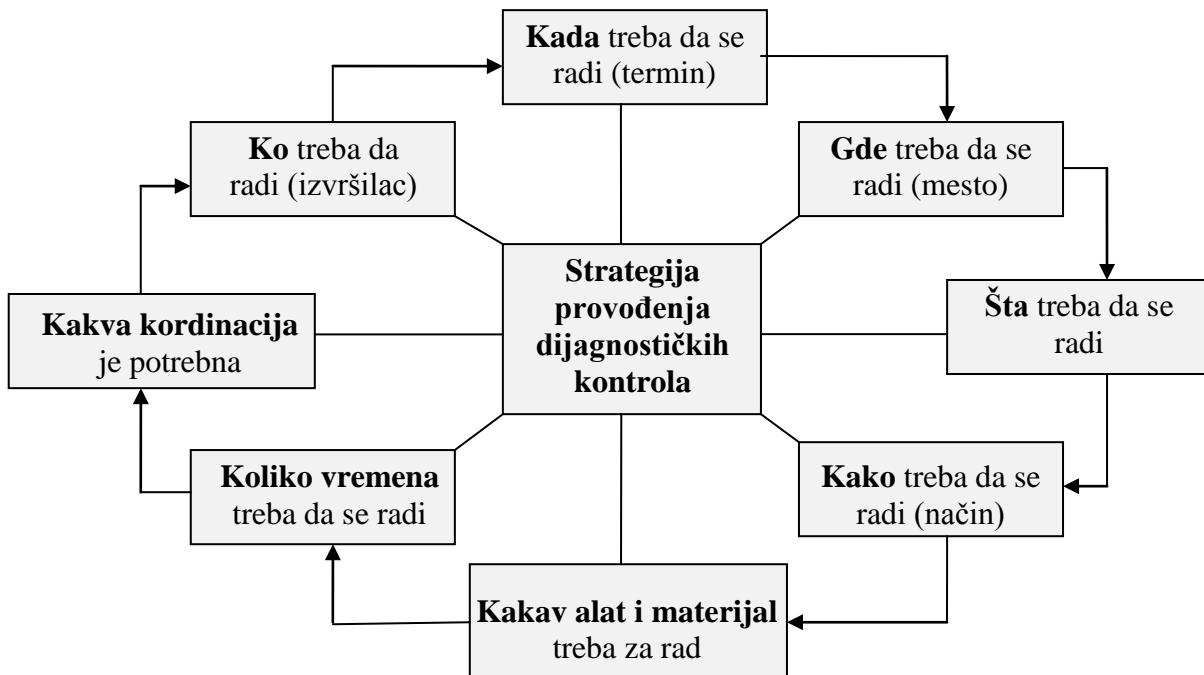
- da bude jednostavna za upotrebu,
- da bude visoko pouzdana i tačna,
- da ima male potrebe za održavanjem,
- da se može koristiti pri svim mogućim stanjima tehničkih sistema,
- da se može izvršiti obuka izvršilaca za uspešno korišćenje ove opreme itd.

Prilikom izbora dijagnostičke opreme (sredstava) bitno je odrediti opremu za svaki tehnički sistem i njegove sastavne delove, naročito za one koji se žele održavati pod kontrolom da bi se otkrili i ekstremni slučajevi otkaza.

U delu disertacije „5.1.13. Razrada dijagnostičkih metoda“ detaljno je obrazložen izbor dijagnostičke opreme za pojedine dijagnostičke metode.

5.1.9 Izbor optimalne strategije provođenja dijagnostičkih kontrola

Strategija provođenja dijagnostičkih kontrola (ko, kada, gde, šta i kako treba da radi, slika 5.10.) se određuje na osnovu operativnih normi za izvođenje svake dijagnostičke kontrole i trenutaka kada će se izvoditi te dijagnostičke kontrole. Optimalna strategija provođenja dijagnostičkih kontrola može se postići svođenjem troškova dijagnostike, troškova preventivnog i korektivnog održavanja i troškova zbog zastoja u proizvodnji na očekivani minimum.



Slika 5.10. Strategija provođenja dijagnostičkih kontrola

Praćenje stanja tehničkih sistema može biti neprekidno ili povremeno. Jedan od značajnih problema održavanja prema stanju predstavlja određivanju optimalne periodičnosti dijagnostičkih kontrola, za šta je potrebno raspolagati sa odgovarajućim polaznim informacijama, kao što su:

- zakonitost promene stanja tehničkog sistema,
- troškovi dijagnostike,
- troškovi preventivnog i korektivnog održavanja i
- troškova zbog zastoja u proizvodnji.

Sušтина je da se u određenim vremenskim intervalima, izvode dijagnostičke kontrole delova sistema, pri čemu su ti vremenski intervali kraći od srednjeg vremena između otkaza *MTBF*. Momenti dijagnostičkih kontrola mogu se dobiti iz uslova da sistem ispunjava zahtevanu pouzdanost. Periodičnost

dijagnostičkih kontrola je optimalna, ako je raspoloživost sistema maksimalna, a troškovi održavanja minimalni.

S obzirom na obimnost tehničkog sistema koji je obuhvaćen dijagnostičkim kontrolama, dijagnostika se deli na:

- delimičnu i
- sveobuhvatnu (celokupnu).

Delimična dijagnostika, podrazumeva dijagnostičke kontrole samo određenih delova tehničkog sistema. Primenjuje se ako je niža pouzdanost nekih delova sistema ili posle havarije na nekim delovima sistema. Često se delimična dijagnostika provodi na mašini zajedno sa merama održavanja na mašini.

Sveobuhvatna dijagnostika, podrazumeva dijagnostičke kontrole svih delova sistema. Obično se provodi u planiranim vremenskim intervalima posle određenog vremena korišćenja sistema ili posle završenih radova. Pri tome se procenjuje tehničko stanje svih delova sistema, pri čemu se uzimaju u obzir troškovi proizvodnje, kvalitet rada i pouzdanost sistema. Često se kao rezultat ovakve dijagnostike javlja potreba za manjim radovima podešavanja ili održavanja sistema. Sveobuhvatnom dijagnostikom se može doći i do zaključka da se sistem mora isključiti i da se na njemu, u većoj meri, moraju izvršiti preventivne popravke. Ovakvoj dijagnostici se pridaje sve veći značaj, oprema za nju je veoma kompleksna, zbog toga se za njeno provođenje utvrđuje termin.

5.1.10 Određivanje graničnih vrednosti (granica otkaza) dijagnostičkih parametara

Pri razvoju novog automatizovanog dijagnostičkog modela granice otkaza zauzimaju jedno od najvažnijih mesta i od njihovog pravilnog izbora zavisi i primenljivost modela.

Poznavanje granica istrošenosti jedan je od preduslova za kvalitetno i ekonomično provođenje aktivnosti održavanja, a takođe i preduslov za primenu koncepcije održavanja prema stanju. Za sastavne delove sistema treba da postoji više granica istrošenosti, odnosno granica upotrebljivosti.

Praksa zahteva postupke koji omogućavaju laku primenljivost granice otkaza sa dozvoljnom tačnošću koja je potvrđena iskustvom. Tako su stvoreni neki standardi za univerzalnu primenu.

Održavanje prema stanju predviđa neprekidne ili povremene dijagnostičke kontrole i merenja tehničkih parametara kojima se ocenjuje tehničko stanje funkcionalnih sistema kao celine. Posmatra se i prati neki pokazatelj – parametar, koji reprezentuje stanje posmatranog sistema, tj. njegovog dela, i koji je po svom karakteru slučajan. Odluka o aktivnostima održavanja se donosi kada vrednosti kontrolisanih parametara dostignu “granicu upotrebljivosti”, odnosno predkritični nivo. Zbog toga je za svaki kontrolisani dijagnostički parameter (temperaturu, vibracije i struju) potrebno odrediti dozvoljene vrednosti (granice otkaza).

Prilikom određivanja graničnih vrednosti dijagnostičkih parametara treba uzeti u obzir:

- preporuke proizvođača opreme (dozvoljeni temperaturni opseg, strujni limiti itd.),
- standarde ISO, BS, API, IEC itd.,
- dijagrame preporučene od proizvođača instrumenata za dijagnostiku,
- iskustvo vezano za slične i specifične sisteme i sl.

Granične vrednosti dijagnostičkih parametara moraju biti definisane zbog pravovremenog prekidanja razvoja oštećenja kako ne bi došlo do težih havarija ili neželjenih zastoja. S druge strane, potrebno je izbeći pojavu “lažnih” alarma. Alarmi se generišu na dva načina:

- kada dođe do promene stanja nekog signala,
- kada vrednost neke merene veličina izađe iz opsega “ispravnog rada”.

U slučaju prekoračenja podešene granične vrednosti dijagnostičkog parametra automatski se generiše alarm i/ili SMS poruka o nastalom događaju i u zavisnosti od detektovane greške dolazi do isključenja pojedinih podsistema.

Određivanje graničnih vrednosti dijagnostičkih parametara je kompleksan zadatak i zahteva timski rad (konstruktora, inženjera tehnologije i održavanja) i može se vršiti na osnovu:

- empirijskih postupaka (iskustva),
- eksperimentalnih istraživanja i
- teorijskih proračuna.

Empirijski postupak se bazira na pretpostavci da iskusni dijagnostičari mogu oceniti „rezervu upotrebljivosti“. Oni obično na odabranim sastavnim delovima i/ili sistemu snimaju i prate napredovanje promene stanja (npr. istrošenost), a rezultate statistički obrađuju i iz toga postavljaju „rezervu upotrebljivosti“. Ovako dobijene rezultate koriste u remontima i u drugim slučajevima provođenja aktivnosti održavanja.

Eksperimentalni postupak u određivanju „rezerve upotrebljivosti“ sastoji se u utvrđivanju zavisnosti između tehnoloških parametara i vremena upotrebe. Ovaj postupak, kao i empirijski i proračunski, se već značajno primenjuje u industriji.

Granične vrednosti dijagnostičkih parametara mogu, u principu, biti dvojake: alternativne i prognoza „rezerve upotrebljivosti“ (prognoza perioda preostalog korišćenja). U oba slučaja potrebno je odrediti granične vrednosti dijagnostičkih parametara.

Određivanje „rezerve upotrebljivosti“ sistema neophodno je u smislu njenog optimalnog smanjenja, kao i određivanja momenata sledećih dijagnostičkih kontrola ili određivanja momenata provođenja neophodnih aktivnosti održavanja.

Kriterijumi za utvrđivanje granica otkaza su:

- tehničko-tehnološki (proizvodni, montažni i dr.), kao što su: zazor sklopa vratila i kliznog ležišta, debljina termički obrađenog sloja vratila, zvuk u radu reduktora i sl.
- ekonomski, uzimaju u obzir troškove izrade/opravke i zamene sastavnog dela sistema itd.;
- sigurnosno-bezbednosni, sigurnost i bezbednost se moraju razmatrati u skladu sa mogućim posledicama pojave otkaza;
- ergonomski, uzimaju u obzir odnos čovek – tehnički sistem (npr. buku i vibracije, potrebnu snagu pri opsluživanju itd.) itd.

Tako se nivo vibracija koji može biti dozvoljen pre preduzimanja aktivnosti održavanja najbolje može odrediti na osnovu iskustva i statistike. Neka iskustva sugerišu da „akcioni nivo vibracija“ treba da bude postavljen na dvostruko veći nivo (6 do 10 dB) od nivoa vibracije koji se smatra normalnim. Karakteristike pomeraja, brzine i ubrzanja vibracije mere se radi utvrđivanja veličina i ozbiljnosti vibracija. Sa aspekta rada tehničkog sistema, amplituda pomeraja vibracija predstavlja indikator koji se koristi za utvrđivanje stanja tehničkog sistema (koliko je dobar ili loš rad sistema). Što je veća amplituda, to je ozbiljnija vibracija.

Osnovni cilj kontrole vibracija nije da se odredi koliki nivo vibracija neki deo sistema može da izdrži pre nego što otkaze, već da se postigne odgovarajuća opomena u pogledu neispravnosti, kako bi se moglo pristupiti planiranom otklanjanju uzroka nastanka vibracija pre pojave otkaza sistema. Apsolutne tolerancije vibracija ili granice za bilo koji deo sistema nisu moguće. Analiza neispravnosti i otkaza je prilično kompleksna da bi takve granice mogle da postoje. Iskustvo specijalista za vibracije može pomoći za dobijanje izvesnih realnih smernica. Prilikom utvrđivanja prihvatljivih nivoa vibracija sistema, treba razmotriti iskustvo i činioce kao što su: bezbednost, troškovi otklanjanja neispravnosti, troškovi usled zastoja u proizvodnji, važnost sistema u tehnološkom lancu proizvodnje i dr.

Slično kao kod vibracija može se učiniti i prilaz definisanju maksimalnih nivoa i za druge parametre tehničkog stanja, kao što su temperatura, i struja što je detaljno obrazloženo u delu disertacije „5.1.13. Razrada dijagnostičkih metoda“.

5.1.11 Izbor optimalne arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Izbor optimalne arhitekture (hardverske i softverske podrške računara, senzora, komunikacionih sistema itd.) novog automatizovanog dijagnostičkog modela je izuzetno bitan za njegov kasniji efikasan rad. Na osnovu proučene literature vezane za automatizovanu dijagnostiku [28-34,36-45,48-67,119-135,139-149,156,159,165-167,193,195-206] predložena je optimalna arhitektura novog automatizovanog dijagnostičkog modela prikazana na slici 5.11.

Predložena arhitektura novog automatizovanog dijagnostičkog modela koji je baziran na primeni računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, koristi tri dijagnostičke metode: metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora. Svaka od ovih dijagnostičkih metoda, objedinjuje u sebi celi niz aktivnosti i postupaka koji započinju „snimanjem“ ulaznog podatka, nastavljaju se obradom podataka, ocenom dobijenih rezultata i završavaju donošenjem odluke o provođenju potrebnih aktivnosti i zahvata na kontrolisanom tehničkom sistemu⁹⁵ [79]. Izvršene operacije dijagnostičkih kontrola mogu se podeliti u tri etape: pretvaranje fizičkih veličina koje prate rad kontrolisanog tehničkog sistema u dijagnostički signal (u električnu veličinu), merenje (registrovanje) određenih parametara dijagnostičkog signala i upoređivanje vrednosti izmerenih parametara signala sa dozvoljenim vrednostima utvrđenim tehničkim normama.

Predložena arhitektura novog automatizovanog dijagnostičkog modela koristi veoma širok spektar različite hardverske i softverske podrške, računarskih platformi, upravljačkih arhitektura, komunikacionih sistema itd., i sastoji se od:

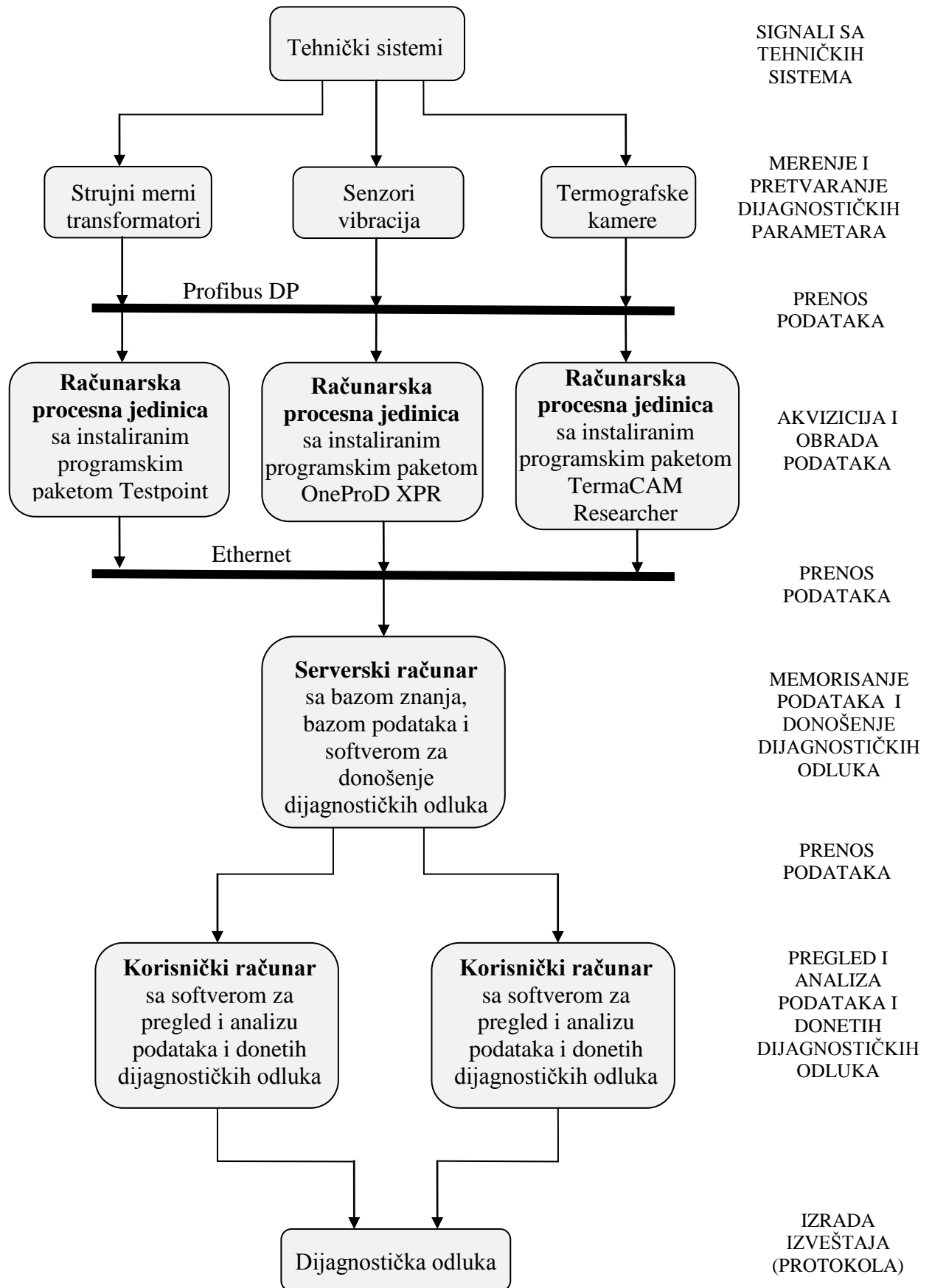
- senzora (termografskih kamera, senzora vibracija i strujnih mernih transformatora), koji pretvaraju fizičke veličine u električne signale,
- kondicionera (jedinica za primarnu obradu) signala, koji prilagođavaju analogne električne signale za konverziju u digitalne,
- tri računarske procesne jedinice sa hardverskom i softverskom podrškom za akviziciju i obradu podataka (npr. A/D konvertora koji vrše konverziju analognih u digitalne signale),
- serverskog (centralnog) računara na kome je instaliran softver za bazama podataka i bazama znanja, kao i softver za donošenje dijagnostičkih odluka,
- dva korisnička (operatorska) računara na kojima je instaliran softver za pregled i analizu podataka (prikaz grafika, alarma i sl.),
- komunikacioni sistem itd.

Senzori pretvaraju fizičke veličine, najčešće neelektrične (temperaturu, vibracije itd.) u električni signal (napon, struju itd.) pogodan za prenos i dalju obradu.

Signal iz senzora se dovodi na kondicioner signala. U nekim slučajevima on ne postoji, u drugim slučajevima je u istom kućištu sa sensorom, a negde je sastavni deo sistema zaštite, upravljanja ili računarske procesne jedinice. Kondicioner signala se često naziva i jedinica za primarnu obradu signala. On služi da uz poznate karakteristike pretvaranja pretvori električni signal na izlazu iz senzora u merljivi strujni ili naponski analogni signal.

Kondicionirani merni signal se vodi na računarske procesne jedinicu, gde se provodi analogno-digitalna konverzija signala, te obrada digitalizovanih podataka. Računarske procesne jedinice, u pravilu, imaju i mogućnost privremenog memorisanja obrađenih podataka, za slučaj da dođe do prekida rada računarske mreže.

⁹⁵ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Razvoj modela automatizovanog dijagnostičkog sistema i njegov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 1-2, Banja Luka, 2012, pp. 20-40.



Slika 5.11. Predlog optimalne arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Rezultati obrade podataka se preko računarske mreže Ethernet prenose na serverski računar. Serverski računar je centralno mesto razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela na kome se nalazi baza podataka i baza znanja, kao i softver za donošenje dijagnostičkih odluka (npr. Motormonitor). Svrha ovog računara je da prihvata podatke sa sve tri računarske procesne jedinice i da ih memoriše u bazu podataka, kao i da omogućiti preuzimanje podataka iz baze podataka na nalog korisničkih softvera za pregled i analizu podataka⁹⁶ [109].

U dijagnostičkom centru se nalaze dva korisnička računara koji su jedini vidljivi deo automatizovanog dijagnostičkog modela sa stanovišta prosečnog operatera sistema. Na njima se prezentuju sakupljeni podaci (informacije) o stanjima praćenih tehničkih sistema u ljudima prihvatljivom i smislenom obliku, upotrebom softvera za pregled i analizu podataka, čime se omogućava operaterima da imaju uvid u sve dijagnostičke parametre od interesa za pouzdan i bezbedan rad tehničkih sistema. Stručnjaci (eksperti) sa velikim iskustvom u dijagnostičkim kontrolama tehničkih sistema, na osnovu detaljne analize pristiglih i obrađenih rezultata merenja (uz pomoć računara i programskih aplikacija prilagođenih za razne vidove analize i prikaza), daju svoja ekspertska (stručna) mišljenja o stanjima kontrolisanih tehničkih sistema stacioniranih u industrijskim pogonima, a koja su od značaja za proizvodni proces, ocenjuju njihovu raspoloživost i pogonsku spremnost, daju preporuke o daljem radu ili popravkama, izrađuju izveštaje i sl⁹⁷ [94].

Na slici 5.12. je prikazan princip donošenja dijagnostičkih odluka (detekcije otkaza) primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela. Sa slike se može uočiti da se celi automatizovani dijagnostički proces sastoji iz više faza.

Za dijagnostičke parametre su izabrane fizičke veličine iz kojih se mogu dobiti najpouzdanije informacije o stanjima tehničkih sistema koji se kontrolišu, kao što su: temperatura, vibracije i struja statora motora. U tu svrhu su u delove tehničkih sistema (npr. u ležajevе asinhronog motora) konstrukciono ugrađeni ili se nakanadno postavljaju odgovarajući senzori (npr. senzori vibracija, senzori struje – strujna klešta i senzori temperature – termografske kamere) koji iz praćenog tehničkog sistema uzimaju uzorak neke fizičke veličine (temperature, vibracija i struje) i pretvaraju je u električnu veličinu pogodnu za prenos i dalju obradu⁹⁸ [81].

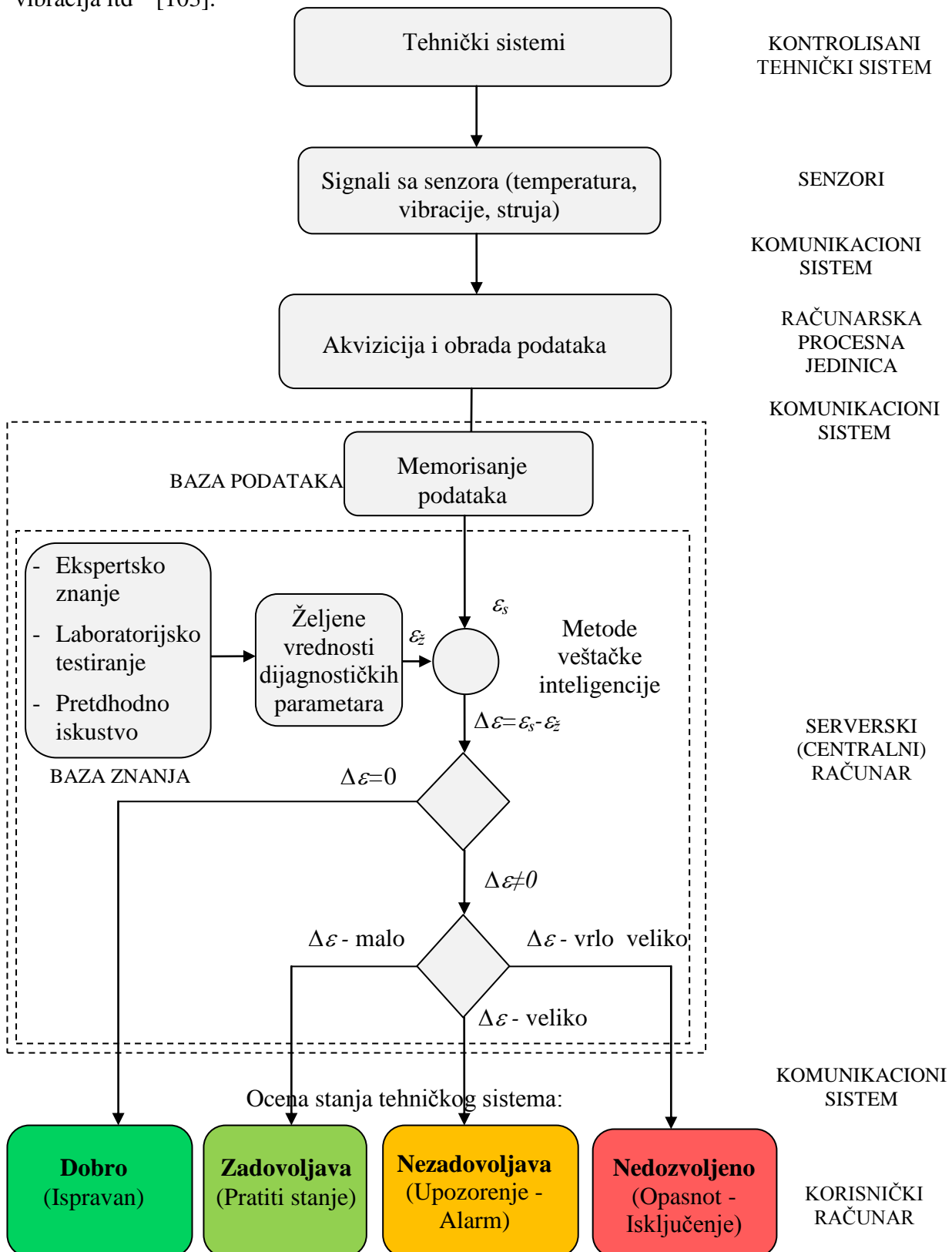
Zatim, se standardni analogni signali odvođe u računarske procesne jedinice gde se vrši akvizicija i obrada podataka. Prilikom akvizicije podataka treba voditi računa u kom obliku će se ti podaci prenositi (kao električni (strujni ili naponski u analognom ili digitalnom obliku), kao pneumatski ili kao optički signali), kao i kojim medijumom (metalnim provodnikom, optičkim vlaknima ili vazduhom) i na koji način (Ethernetom, Internetom, GPRS) takođe treba voditi računa i o tome da li su prisutne smetnje u okruženju kroz koje će se prenositi. Ako se podaci prenose kroz okruženje u kome postoji opasnost od elektromagnetnih smetnji, uzrokovanih lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima itd., onda se preporučuje da se na licu mestu izvrši delimična obrada (akvizicija) podataka, odnosno da se izvrši digitalizacija signala (konverzija signala iz analognog u digitalni oblik) i da se u takvom obliku pomoću optičkih kablova prenesu do mesta na kome će se izvršiti njihova dalja obrada. Da bi se na osnovu prikupljenih podataka mogla izvršiti ocena stanja tehničkog sistema, često je na prikupljenim podacima potrebno izvršiti niz operacija, odnosno izvršiti obradu tih podataka. Upravo je to deo dijagnostičkog procesa u kome se računari najviše i najduže primenjuju i u kome je moguć visok nivo automatizacije. Poslednjih godina razvijene su različite metode za obradu podataka, koje se mogu koristiti u dijagnostičke svrhe, kao što su: metoda analize frekvencijskog spektra, metoda korelacije, metoda usrednjavanja signala, metoda trenda itd. Obrada podataka se može vršiti pomoću vlastitih programa napisanih u nekom od programskih jezika za vizuelno programiranje kao što su: Visual Basic, C++, Delphi, Matlab, TestPoint itd. Međutim, u nekim slučajevima povoljnije je koristiti gotove programske pakete, kao što su npr.

⁹⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji automatizovanom dijagnostikom, Zbornik radova/I Naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 25.10.2013.

⁹⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

⁹⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, M., Savić, B., Automatizovani dijagnostički sistemi komunikacionih uređaja, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

TermaCAM Research za obradu termografskih slika, OneproD XPR za analizu frekvencijskog spektra vibracija itd⁹⁹ [103].



Slika 5.12. Princip donošenja dijagnostičkih odluka (detekcije otkaza) primenom predloženog novog automatizovanog dijagnostičkog modela

⁹⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja mašina u procesnoj industriji, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

Rezultati obrade podataka sa svih procesnih računara se preko računarske mreže Ethernet prenose na serverski računar, gde se automatski memorišu i kreira se baza podataka za svaki tehnički sistem posebno. Podaci se memorišu u internoj memoriji serverskog računara u dBase IV (Wide) formatu što omogućava kasniju detaljnu analizu specijalizovanim programima, kao što je npr. Microsoft Excel i sl. Tako da se dobijeni podaci mogu učitati u Microsoft Excel, Matlab ili neki drugi program, u kome se mogu crtati grafici, tabele, vršiti matematičke analize i na osnovu njih kreirati izveštaji i donositi dijagnostičke odluke o stanjima tehničkih sistema. SCADA softver CX-Supervisor na Windows platformi omogućava vizualizaciju i arhiviranje svih dijagnostičkih parametara (temperature, brzine i struje). Pomoću softvera za donošenje dijagnostičkih odluka npr. Motormonitor (koji se bazira na primeni metoda metoda veštačke inteligencije, kao što su: ekspertske sistemi, fazi logika, neuronske mreže, hibridni sistemi itd.) vrši se poređenje stvarnih (izmerenih) vrednosti dijagnostičkih parametara sa željenim (specificiranim ili prethodno izmerenim tokom periodičnih ispitivanja ili tokom puštanja u pogon). Željene vrednosti dijagnostičkih parametara predstavljaju vrednosti koje sistem zadovoljava u ispravnom stanju i one se dobijaju na osnovu matematičkih modela, teorijskih i empirijskih saznanja, sprovedenih simulacija, ekspertske znanja, baza znanja, laboratorijskog testiranja, prethodnog iskustva i sl. Na osnovu veličine odstupanja stvarnih (izmerenih) vrednosti dijagnostičkih parametara od željenih ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_z$) softver za donošenje dijagnostičkih poruka ocenjuje stanje (stepen neispravnosti) tehničkog sistema i na osnovu toga donosi dijagnostičku odluku o daljim aktivnostima održavanja (o nastavku ili zaustavljanju rada pogona), ito:

- Kada ne postoji (ili je vrlo malo) odstupanje stvarne vrednosti dijagnostičkih parametara od željene ($0 \leq \Delta\varepsilon < \varepsilon_0$ npr. $0 \leq \Delta T < 5^\circ\text{C}$) serverski računar daje dijagnostičku poruku da je stanje tehničkog sistema „**Dobro**” (tehnički sistem je ispravan, radno sposoban) i da može nastaviti normalno da radi.
- Kada se pojavi odstupanje stvarne od željene vrednosti, serverski računar upozorava o mogućoj pojavi otkaz, ito:
 - U slučajevima malih odstupanja ($\varepsilon_0 \leq \Delta\varepsilon < \varepsilon_1$, npr. $5^\circ\text{C} \leq \Delta T < 10^\circ\text{C}$) kada ne postoji opasnost od većih oštećenja, serverski računar daje dijagnostičku poruku da stanje tehničkog sistema „**Zadovoljava**“ i da treba da nastavi sa radom, a da se dobijeni podaci iskoriste za planiranje preventivnih aktivnosti održavanja i nabavku rezervnih delova. U dijagnostičkoj poruci se još navodi mesto i uzok neispravnosti.
 - U slučajevima većih odstupanja ($\varepsilon_1 \leq \Delta\varepsilon < \varepsilon_2$, npr. $10^\circ\text{C} \leq \Delta T < 30^\circ\text{C}$), serverski računar daje dijagnostičku poruku da stanje tehničkog sistema „**Nezadovoljava**“ (upozorenje-alarm) i da treba da nastavi sa radom, ali pod posebnim nadzorom, a da se dobijeni podaci iskoriste za planiranje preventivnih aktivnosti održavanja (npr. zamenu ili popravku sastavnog dela sistema) u najkraćem mogućem roku kako bi se izbegao otkaz sistema. U dijagnostičkoj poruci se još navodi mesto i uzok neispravnosti.
 - U slučajevima vrlo velikih odstupanja ($\Delta\varepsilon \geq \varepsilon_2$ (npr. $\Delta T \geq 30^\circ\text{C}$, kada postoji opasnost od otkaza koji su opasni za dalji rad tehničkog sistema, serverski računar daje dijagnostičku poruku da je stanje tehničkog sistema „**Nedozvoljeno**“ (opasnost-isključenje) i da treba odmah isključiti tehnički sistem i otkloniti neispravnost. U dijagnostičkoj poruci se još navodi mesto i uzok otkaza.

Znači, na serverskom računaru se detektuje pojava nekog otkaza i donosi zaključak o mogućem mestu, uzroku i stepenu neispravnosti (otkaza). Proces detekcije otkaza vrlo je zahtevan pošto se različiti otkazi mogu manifestovati, odnosno odraziti na rad pogona na isti ili sličan način. Serverski (centralni) računar predstavlja glavni deo automatizovanog dijagnostičkog procesa, jer on upravlja celokupnim dijagnostičkim procesom, čime se taj proces znatno pojednostavljuje i ubrzava, tako da se izveštaji (protokoli) o sprovedenim dijagnostičkim kontrolama mogu dobiti odmah nakon sprovedenih kontrola, što praktično znači da bez računara nema automatizacije dijagnostičkog procesa.

Korisnici do podataka dolaze tako što se korisnički računari preko servera povezuju sa mernom opremom u industrijskim pogonima. Nakon toga se očitavaju podaci u realnom vremenu i tako se stiče uvid u trenutne rezultate merenja dijagnostičkih parametara. Izmerene veličine se upoređuju sa

specificiranim ili prethodno izmerenim veličinama (izmerenim tokom periodičnih ispitivanja ili tokom puštanja u pogon). Postoje dva klijentska računara na kojima je instaliran programski paket RView32 Runtime koji radi u operativnom sistemu Windows 7 i u kome se izvodi program dijagnostike i vrši vizuelizacija procesa. Tako da više osoba iz službe održavanja koje su udaljene mogu pratiti stanje tehničkih sistema. Na monitorima korisničkih računara prikazuje se prostorni raspored tehničkih sistema koji se kontrolišu. Duplim klikom na ikonicu željenog tehničkog sistema otvara se novi prozor koji prikazuje vrednosti dijagnostičkih parametara sa tog tehničkog sistema u tom trenutku, kao što su vrednosti: temperature T_{IZM} , nivoa vibracija RMS , struje statora motora itd. Takođe, pritiskom na tastere Graf T_{IZM} , Graf RMS i Graf I moguće je pratiti trendove promene navedenih dijagnostičkih parametara, zatim vršiti analizu frekvencijskih spektara vibracija i struje itd. Otkaz bilo kog tehničkog sistema signalizira se operateru u vidu alarmne poruke. Pozadina ikonice tehničkog sistema na kome se pojavio otkaz bilo koje vrste trepće žuto ili crveno (u zavisnosti od stepena neispravnosti), a operater može da dobije više informacija duplim klikom tastera miša na ikonicu tog tehničkog sistema čime se otvara novi prozor u kome se prikazuju detaljniji podaci o otkazu. Ikonice (ili nazivi) tehničkih sistema se zbog jednostavnije dijagnostike nalaze na pozadini koja može imati četiri boje:

- Na zeleno-tamnoj boji pozadine, se nalaze ikonice tehničkih sistema čije je trenutno stanje: „**Dobro**”.
- Na zeleno-svetloj boji pozadine, se nalaze ikonice tehničkih sistema čije trenutno stanje: „**Zadovoljava**”.
- Na treptajućoj žutoj boji pozadine, se nalaze ikonice tehničkih sistema čije trenutno stanje: „**Nezadovoljava**”. Pored optičke (svetlosne) signalizacije uključuje se i zvučna signalizacija.
- Na treptajućoj crvenoj boji pozadine se nalaze ikonice tehničkih sistema čije je trenutno stanje: „**Nedozvoljeno**”. Pored optičke (svetlosne) signalizacije uključuje se i zvučna signalizacija (koja je bučnija i drugačijeg zvuka nego u prethodnom slučaju). Ako se tehnički sistem ne isključi ručno, posle određenog unapred podešenog vremena isključuje se automatski.

Znači, predloženi novi automatizovani dijagnostički model, pored opreme za dijagnostiku stanja, ima i opremu za automatsko uključivanje alarma u slučaju da stvarna vrednost izmerenog dijagnostičkog parametra odstupa od unapred utvrđene dozvoljene vrednosti. Alarmna stanja se prikazuju vizuelno treptanjem žute ili crvene (u zavisnosti od stepena neispravnosti) pozadine ikonice tehničkog sistema na kome se pojavio otkaz bilo koje vrste. Pritiskom na taster „Alarmi“ otvara se novi prozor sa popisom svih alarmnih stanja koja su se desila, gde je navedena vrsta alarma, datum, vreme i vrednost merene veličine u trenutku kada se dogodilo to alarmno stanje.

Automatizovani dijagnostički model obezbeđuje visoku pouzdanost rada kroz neprekidne samoprovere vlastite sposobnosti delovanja. U slučaju pojave alarma, moguće je da se releji za isključenje tehničkog sistema aktiviraju jednim prekoračenjem ili da se zahteva prekoračenje dva alarma kako bi se aktivirao relej za isključenje mašine. Ovo poslednje naziva se glasačka logika (engl. voting logic). Ukoliko se koristi glasačka logika, releji za isključenje tehničkog sistema se aktiviraju samo kada se dve ili više praćenih dijagnostičkih veličina zajednički slože o pojavi nenormalnoga stanja, što znači da u tom slučaju jedno samostalno prekoračenje alarma ne može aktivirati relej za isključenje kontrolisanog tehničkog sistema. Glasačkom logikom osigurava se zaštita od slučajnih i nepotrebnih isključenja tehničkih sistema.

Korišćenjem računara za upravljanje procesom prikupljanja, obrade i prikaza podataka skraćuje se vreme izrade izveštaja (protokola) o dijagnostičkim kontrolama (jer se klasičnim načinom dijagnostike gubi puno vremena) i što je još važnije povećava se pouzdanost dijagnostičkih kontrola. Svako novo merenje se upoređuje sa prethodnim kako bi se uočila razlika u radu tehničkih sistema i eventualno napredovanje oštećenja na tehničkim sistemima. Analizom većeg broja dijagnostičkih parametara koji su relevantni u dijagnostici stanja tehničkih sistema uočavaju se eventualna oštećenja na tehničkim sistemima koja se klasifikuju prema težini. Težina oštećenja pokazuje kada je potrebno pristupiti otklanjanju i koliko bi to uticalo na rad tehničkog sistema dok se ne otkloni. Očitavanjem vrednosti dijagnostičkih parametara, njihovom analizom i na osnovu istorije otkaza na tehničkom sistemu može se postaviti dijagnoza stanja sistema. Prilikom analize koriste se namenski softveri drugih kompanija, kao što je npr. programski paket

Motormonitor (za donošenje dijagnostičkih odluka metodom analize frekvencijskog spektra struje statora). Pored njih se koriste i arhiva izveštaja i razne preporuke¹⁰⁰ [85].

Cilj predloženog automatizovanog dijagnostičkog modela je da automatski identifikuje početna odstupanja karakteristika i stanja opreme od projektovanih, odnosno da analizom parametara bitnih za rad tehničkih sistema detektuje otkaze u početnoj fazi nastanka, čime se stvaraju uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče teži (i vrlo često puno skuplji) otkaze i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu. Na osnovu uvida u veliki broj dijagnostičkih parametara tehničkih sistema moguće je ostvariti uvid u stanje opreme i pogona u realnom vremenu, detektovati otkaze u početnoj fazi nastanka, sprečiti ili smanjiti posledice otkaza, analizirati uzroke otkaza, izvršiti optimizaciju upravljanja opremom, provesti održavanje prema stanju itd¹⁰¹ [96].

U odgovarajućim tabelama se daje prikaz podataka za posmatrane tehničke sisteme. Podaci koji se upisuju u tabele su: redni broj i naziv tehničkog sistema, uzroci otkaza, datum i vreme kada je podatak o stanju tehničkog sistema stigao u računar, da li je podatak poslat zbog alarma ili po zahtevu, zatim podaci o temperaturama, vibracijama, strujama itd.

5.1.11.1 Izbor optimalnog načina merenja i pretvaranja fizičkih veličina

Za dijagnostičke parametre su izabrane fizičke veličine iz kojih se mogu dobiti najpouzdanije informacije o stanjima tehničkih sistema koji se kontrolišu, kao što su: temperatura, vibracije i struja statora motora. U tu svrhu su u delove tehničkih sistema (npr. ležajeve asinhronog motora) konstrukciono ugrađeni ili se naknadno ugrađuju odgovarajući senzori (npr. senzori vibracija, senzori struje – strujna klešta i senzori temperature – termografske kamere) koji iz praćenog tehničkog sistema uzimaju uzorak određene fizičke veličine (temperature, vibracija i struje) i pretvaraju u električnu veličinu pogodnu za prenos i dalju obradu¹⁰² [81].

5.1.11.2 Izbor optimalnog načina prenosa podataka

Izbor komunikacione opreme je izuzetno značajan za efikasan rad predloženog novog modela. Prvo se definiše vrsta i obim informacija koje se žele preneti, zatim se definiše daljina na koju se želi ostvariti prenos i u skladu sa tim vrši izbor opreme. Na ovaj način, određuje se topologija mreže, prenosni medijum, način prenosa i protokol koji definiše format u kome se podaci prenose, brzina prenosa, vreme odziva, potrebno napajanje itd. Da bi se mogla izabrati oprema koja će zadovoljiti potrebnu brzinu protoka podataka i mogućnost da se svi elementi projektovanog modela priključe na odabranu mrežu, moraju se poznavati karakteristike pojedinih tipova mreža i protokoli.

Povezivanju delova automatizovanog dijagnostičkog modela i postavljanju kablova između senzora i delova modela za akviziciju podataka treba posvetiti posebnu pažnju. U većini slučajeva dvožilne parice su prihvatljive za povezivanje senzora sa delom za akviziciju podataka, ali se u slučaju zahteva za velikom nezavisnošću od šuma preporučuje upotreba optičkih kablova. Komunikacija između računarskih procesnih jedinica i serverskog (centralnog) računara treba da bude uspostavljena pomoću integrisane veze s niskim nivoima šuma. U slučaju da postoji više računarskih procesnih jedinica u lokalnom sistemu najbolje rešenje je da komuniciraju korišćenjem lokalnih mreža npr. Ethernet. Svaka računarska procesna jedinica može da direktno komunicira sa udaljenim sistemom ili one mogu biti povezane na lokalni server koji centralizuje i upravlja komunikacijom sa udaljenim sistemom (npr. putem Interneta).

Izbor optimalnog načina prenosa podataka na daljinu, koji mora da bude pouzdan i što je moguće jeftiniji, vrši se prema sledećoj proceduri:

¹⁰⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Ašonja, A., Automatizovani dijagnostički sistemi gasovoda, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

¹⁰¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti postrojenja u procesnoj industriji automatizovanom dijagnostikom, Zbornik radova/XXXVI Majski skup održavalaca Srbije - „Merenje indikatora performansi održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 31.05.2013.

¹⁰² Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, M., Savić, B., Automatizovani dijagnostički sistemi komunikacionih uređaja, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

- Ukoliko postoji mrežna Ethernet infrastruktura (Ethernet kabl, broadband ili xDSL modem) onda je Ethernet najbolje rešenje – jeftin, omogućava velike brzine prenosa.
- Ukoliko nije raspoloživ Ethernet, a u blizini je telefonska linija, onda je PSTN modem (analogni ili ISDN) najbolje rešenje – troškovi komunikacije su neznatni, a brzine prenosa uglavnom zadovoljavaju potrebe.
- Za “izolovana” mesta bez Ethernet-a ili telefonske linije, jedino rešenje predstavlja GSM, ukoliko je na raspolaganju dovoljno jak signal za prenos podataka. Troškovi prenosa su značajni, tako da izbor opcije komuniciranja zavisi od saobraćaja:
 - U aplikacijama gde je saobraćaj slab i povremen (korišćenje npr. samo start i stop komandi, bez prikupljanja podataka), SMS je najbolje rešenje.
 - U aplikacijama u kojima se vrši kontrola i podešavanje parametara može se koristiti GSM ili dial-up konekcija. Ovo rešenje je skuplje od prethodnog, ali su mogu prenetih mnogo veće količine podataka.
 - U aplikacijama gde se vrši prikupljanje podataka (npr. za audit trail) koje zahtevaju prenos većih količina podataka, GPRS konekcije su pogodnije zbog većih brzina prenosa i nižih cena po Kbyte u odnosu na GSM konekciju. Ovakva rešenja su posebno primerena za udaljene lokacije kao što su pumpne stanice za vodu, transformatorske stanice, komunikacioni objekti i slično, jer bi troškovi ožičenja verovatno prevazišli cenu ukupne automatizacije i takvo rešenje ne bi bilo isplativo.
- Ako je moguće obezbediti pristup Internetu (analogni, ISDN, ADSL itd.), sa standardnim komponentama kao što su stoni računar, laptop, nezavisno od operativnog sistema i web browser-a, moguće je realizovati daljinski pristup tehničkom sistemu. Zbog potencijalne nebezbednosti podataka i otvorenosti Interneta poželjno je primeniti odgovarajući sigurnosni koncept zaštite podataka (npr. VPN).
- Ukoliko nisu na raspolaganju Internet, GSM i druge radio tehnike postoji mogućnost satelitske komunikacije. Problem kod prenosa podataka putem satelita su velika rastojanja (sateliti se nalaze na visini od 36.000 km iznad površine Zemlje), što podrazumeva kašnjenje u prenosu signala i visoke troškove. Provajderi satelitskih usluga nude mogućnost komprimovanja podataka i optimizacije saobraćaja, ali ovo rešenje je smisleno samo u slučaju visoko kritičnih postrojenja gde ne postoje druge mogućnosti prenosa podataka.

Iako neke od pomenutih tehnologija (npr. GSM) zahtevaju značajne troškove u toku eksploatacije, ovakvi pristupi doprinose fleksibilnijem prikupljanju podataka i sigurnijim konekcijama. S druge strane, pristupi koji ne zahtevaju troškove za prenos podataka (WLAN, Bluetooth) smanjuju fleksibilnost i doprinose osetnoj nestabilnosti komunikacione veze ili zahtevaju statičko pozicioniranje podsistema (pomeranje nakon instalacije je ograničeno zbog dužine kablova) i znatnim troškovima instalacije.

Prilikom primene sistema najbolje rešenje je korišćenje više tehnologija, tj. primena više pristupa, koje će biti podesno za svako usko grlo distribuiranog sistema, npr. lokalna stanica sa senzorima može biti povezana korišćenjem WLAN-a, dok svaka udaljena stanica može biti povezana korišćenjem GPRS-a. Ovakav sistem zahteva brojne middleware podsisteme radi stvaranja interfejsa za različite komunikacione protokole i rad sa podacima u svakoj tački distribuiranog sistema.

5.1.11.3 Izbor optimalnog načina prikupljanja podataka

U većini slučajeva prikupljanje podataka je teško u potpunosti odvojiti od obrade podataka. Nakon pretvaranja neke fizičke veličine (mernog signala) u električni signal, proces dijagnostike se nastavlja prikupljanjem tih podataka i njihovom primarnom obradom. Prikupljanje podataka predstavlja zapisivanje podataka dobijenih merenjem, kao i uslova u kojima je merenje izvršeno (opterećenje mašine, temperatura, napon itd.). Preciznost i način na koji će se izvršiti prikupljanje podataka prvenstveno zavise od dalje obrade podataka, odnosno operacija koje će se na prikupljenim podacima vršiti. Najvažnije za proces prikupljanja podataka, nezavisno od složenosti sistema koji se dijagnostikuje, jeste da se sačuva

verodostojnost podataka dobijenih iz senzora. Prikupljeni i memorisani podaci moraju biti tačni, odnosno odgovarajućeg kvaliteta (oslobođeni šumova) kako bi bili primenljivi u procesu obrade.

Kod automatizovanih dijagnostičkih modela, koji obrađuju veliki broj ulaznih podataka, uobičajeno je da se kontrolisani tehnički sistem nalazi fizički udaljen od mesta na kome se vrši obrada podataka i donošenje dijagnostičkih odluka. U takvim slučajevima prilikom prikupljanja podataka treba voditi računa u kom obliku će se ti podaci prenositi (kao električni (strujni ili naponski signali u analognom ili digitalnom obliku), kao pneumatski signali, kao optički signali itd.), kao i kojim medijumom (metalnim provodnikom, optičkim vlaknima ili vazduhom) i na koji način (Internetom, GSM/GPRS itd.), takođe treba voditi računa i o tome da li su prisutne smetnje u okruženju kroz koje će se prenositi. Ako se podaci prenose kroz okruženje u kome postoji opasnost od elektromagnetnih smetnji, uzrokovanih lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima itd., onda se preporučuje da se na licu mesta izvrši delimična obrada (akvizicija) podataka, odnosno da se na licu mesta izvrši digitalizacija signala (pretvaranje signala iz analognog u digitalni oblik) i da se u takvom obliku pomoću optičkih kablova prenesu do mesta na kome će se izvršiti njihova dalja obrada. Predlog arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela za dijagnostiku na daljinu prikazan je na slici 5.13.

. U suštini proces prikupljanja (akvizicije) podataka obuhvata tri lančane funkcije:

- multipleksiranje,
- uzorkovanje (engl. sample) i zadržavanje (engl. hold) i
- konverziju signala iz analognog u digitalni oblik.

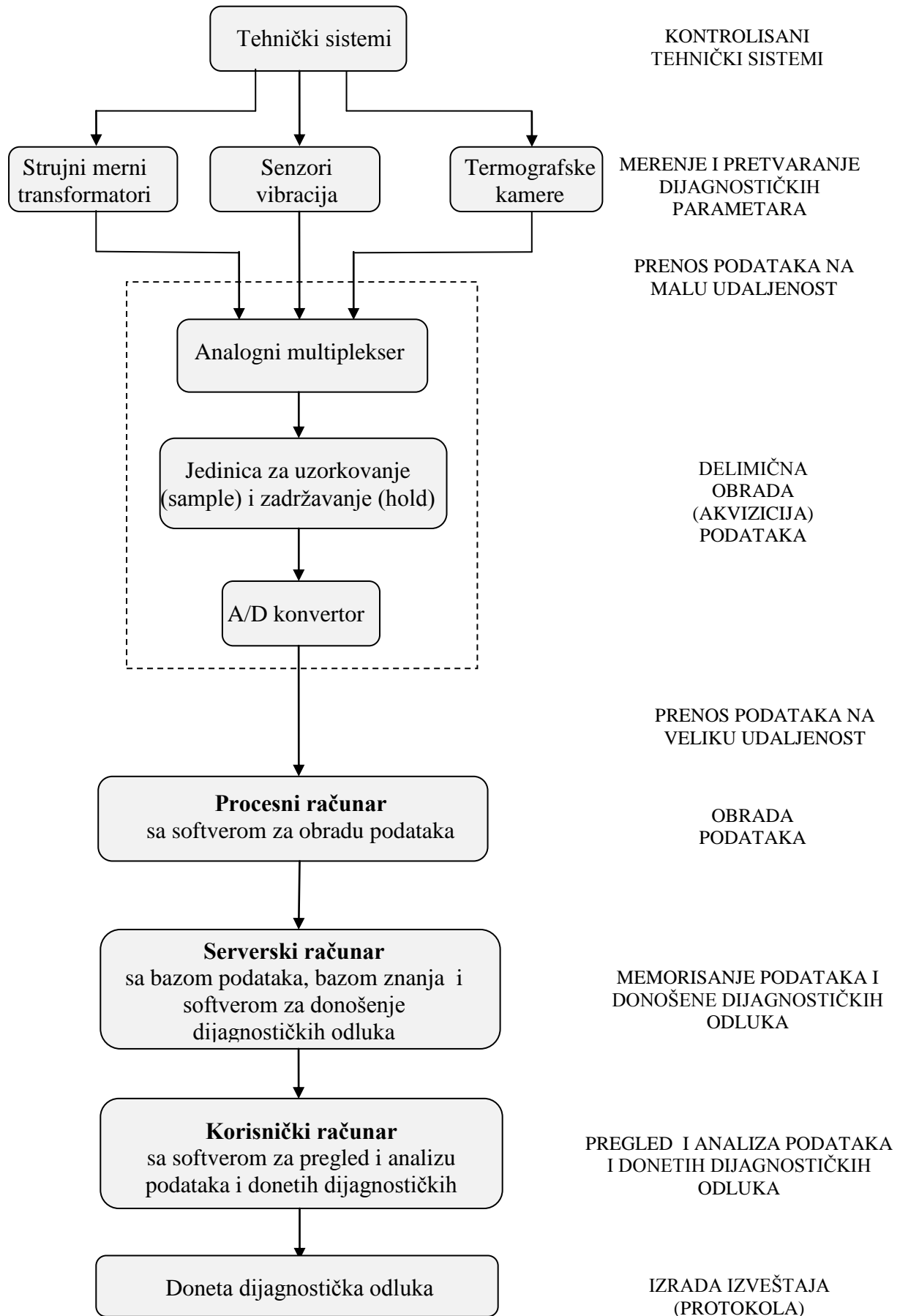
Upotreba multipleksera je potrebna ukoliko se prati veći broj kanala (ulaznih signala). Prednost multipleksera je velika brzina, može se skenirati i do 5.000 kanala u sekundi. Nedostatak multipleksiranja je taj što nadzor nije neprekidan, ali u većini praktičnih slučajeva ciklus uzorkovanja, tj. interval između prikupljanja susednih uzoraka, je vrlo mali u poređenju s vremenom u kojem može doći do greške/promene.

Jedinica za uzorkovanje i zadržavanje, koja je u osnovi operacioni pojačavač, može sačuvati ulaznu vrednost i osigurati na ulazu u analogno-digitalni A/D konvertor prisutnost konstantnog signala za vreme ciklusa A/D konverzije. Navedeno dopušta da vreme uzorkovanja A/D konvertora bude smanjeno, što rezultira bržim sistemom. Pri tome je vrlo važno konverziju izvršiti na kvalitetan način, sa dovoljnim brojem i rezolucijom uzoraka, da se ne izgubi na kvalitetu snimljenog signala. Potrebno je voditi računa i o smeštaju kablova i merne opreme.

Na navedenim principima se može projektovati automatizovani dijagnostički model za veliki broj asinhronih motora na naftnoj platformi, koji predstavljaju tipičan pogon u prostoru sa eksplozivnom atmosferom. Prikladno rešenje može biti primena jedne ili dve sveobuhvatne metode (npr. analize frekvencijskog spektra struje statora ili analize frekvencijskog spektra signala vibracija). Delovi modela koji vrše prikupljanje podataka mogu se nalaziti na samoj naftnoj platformi, a delovi koji vrše obradu i analizu podataka, kao i donošenje dijagnostičkih odluka mogu se nalaziti na kopnu. Pošto nije potrebno neprekidno praćenje stanja svih elektromotora, moguće je iz jednog centra na kopnu nadzirati elektromotore na više naftnih platformi.

Postoji nekoliko različitih pristupa u prikupljanju (akviziciji) podataka sa mašine (vibracije, temperature, opterećenja, nivoi akustičke emisije itd.) koji se dalje prosleđuju ka centralnom (serverskom) računaru kome korisnici pristupaju daljinski.

Klasični, i danas najčešće primenjivani način akvizicije, je žično (kablovima) povezivanje senzora (npr. akcelerometara) i merno- akvizicionih sistema koji su pak dalje povezani sa centralnim računarem.



Slika 5.13. Predlog arhitekture novog automatizovanog dijagnostičkog modela za dijagnostiku na daljinu

U slučaju većeg broja kanala, a naročito u slučaju kada jedan višekanalni merno-akvizicioni sistem opslužuje više udaljenih mašina (npr. na rotacionom bageru) ukupne dužine kablova mogu biti veoma

velike što naravno znatno podiže ukupnu cenu instalacije. Ujedno prenos analognih signala kroz duge kablove postavljene u industrijskom okruženju može dovesti do pojave smetnji u samom mernom signalu. Iz tog razloga se, ukoliko je moguće, preporučuje se da se centralni merno-akvizicioni sistem zameniti sa više merno-akvizicionih sistema koji se nalaze blizu svake od mašina koja se nadzire. Dalje se merno-akvizicioni sistemi međusobno umrežavaju i povezuju sa centralnim računarem. Međusobno povezivanje merno-akvizicionih sistema se najčešće izvodi primenom optičkih kablova sa pripadajućim medija konverterima – prenos digitalizovanih informacija optičkim kablovima nije osetljiv na potencijalne elektromagnetne smetnje od napojnih elektroenergetskih kablova koji su najčešće postavljeni blizu komunikacionog voda [3].

Senzore je pogodno podeliti prema prostornom rasporedu i realizovati manje merno-akvizicione podsisteme koji bi donekle nezavisno vršili akviziciju na užem prostoru i po potrebi kontrolu procesa. Umesto multipleksiranja klasičnih senzora moguće je ovo početno prikupljanje vršiti inteligentnim sensorima, te i na ovom najnižem nivou hijerarhije imati mrežu. Ako je broj merenih veličina veliki, pa postoje i drugi merno-akvizicioni podsistemi, oni se međusobno mogu sprežati preko računara višeg nivoa, sve do sprežanja računara koji su u proizvodnji sa onim zaduženim za globalni prikaz, planiranje i analizu proizvodnje, ako postoje. Može se uočiti da je, pored prostorne, izvršena i distribucija funkcija u mernom i kontrolnom sistemu. Komunikacija računara višeg i nižeg nivoa ne mora stalno da se odvija, već samo periodično radi provere i u intervalima sa brzom promenom merenih veličina. Projektovanje distribuiranog merno-akvizicionog sistema je donekle otežano komunikacionim problemima, ali je dosta olakšano samom podelom zadataka na delove koji se nesmetano paralelno izvršavaju u zasebnim jedinicama sistema.

Treća opcija pak, jeste korišćenje bežične komunikacije. Korišćenje industrijske wireless komunikacije uz obaveznu primenu sigurnosnih protokola danas postoji kao opcija dok je pak prenos mernih signala bežičnim putem primenom tzv. wireless vibracionih transmitera i dalje u fazi razvoja s obzirom na veći broj ograničenja koja su najčešće vezana za samo napajanje senzora [3].

5.1.11.4 Izbor optimalnih metoda obrade podataka

Nakon što podaci pristignu u računar vrši se njihova obrada. Zavisno od vrste dijagnostičkih kontrola izračunavaju se parametri važni za utvrđivanje ispravnosti tehničkih sistema.

Obrada podataka (engl. processing) je deo dijagnostičkog procesa gde se, prethodno prikupljeni i odgovarajuće formatirani, podaci obrađuju i pretvaraju u oblik koji omogućava lakše donošenje dijagnostičkih odluka. Obrada podataka se može vršiti za vreme rada (on-line) ili nakon što su podaci zapisani i sačuvani (off-line).

Da bi na osnovu prikupljenih podataka mogli izvršiti ocenu stanja tehničkog sistema, često je na prikupljenim podacima potrebno izvršiti niz operacija, odnosno često je potrebno izvršiti obradu tih podataka. Upravo je to deo dijagnostičkog procesa u kome se računari najviše i najduže primenjuju i u kome je moguć visok nivo automatizacije.

Poslednjih godina razvijene su različite metode obrade podataka, koje se mogu koristiti u dijagnostičke svrhe, kao što su¹⁰³ [79]:

- metoda analize frekvencijskog spektra,
- metoda (funkcija) korelacije,
- metoda usrednjavanja signala i
- metoda trenda.

Razvoj računarskog hardvera i softvera, kao i dijagnostičke (merne) opreme velikih mogućnosti po prihvatljivim cenama, omogućili su širu primenu ovih metoda.

¹⁰³ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Razvoj modela automatizovanog dijagnostičkog sistema i njegov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 1-2, Banja Luka, 2012, pp. 20-40.

Obrada podataka može se vršiti pomoću vlastitih programa napisanih u nekom od programskih jezika za vizuelno programiranje, kao što su: Visual Basic, C++, Delphi, Matlab, TestPoint itd. Međutim, u nekim slučajevima je povoljnije koristiti gotove programske pakete, kao što su npr.: TermaCAM Research za obradu termografskih slika, OneproD XPR (napredna vibrodijagnostika) ili OneproD VIO (Viewer) softver za analizu frekvencijskog spektra vibracija itd.

1. Metoda analize frekvencijskog spektra

Pošto je metoda analize frekvencijskog spektra jedna od često korišćenih metoda obrade podataka pri dijagnostičkim kontrolama elektromehaničkog stanja asinhronih motora, ovde će se prikazati osnovni principi ove metode.

Da bi se mogla izvesti analiza frekvencijskog spektra struje statora motora (ili vibracija) potrebno je prethodno izvršiti transformaciju signala (struje) snimljenih u vremenskom domenu u frekvencijski domen, kojim se svaki periodični signal periode T predstavlja vremenski jednako razmaknutim frekvencijskim komponentama. Pretvaranje se vrši primenom Fourijeove transformacije, koja se izvodi pomoću spektralnih analizatora ili kartica za prikupljanje (akviziciju) podataka DAQ (Data AcQuisition) utaknutih u ISA ili PCI slot matične ploče računara.

Pretvaranje u frekvencijski domen predstavlja prikaz spektra frekvencija snimljenog signala i odgovarajućih amplituda. Analizom signala (vibracija, struje i sl.) u frekvencijskom domenu moguće je detektovati različite tipove otkaza.

Metoda analize frekvencijskog spektra se bazira na razvoju proizvoljne funkcije u trigonometrijski Furijeov red, koji predstavlja vezu između vremenskog i frekvencijskog domena funkcije.

Svaka neprekidna periodična funkcija $g(t) = g(t + n \cdot T)$, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, periode T može se predstaviti Furijeovim trigonometrijskim redom:

$$g(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \cos(2\pi f_k t) + b_k \sin(2\pi f_k t)\} \quad (5.1)$$

Izraz (5.1) se može napisati kao:

$$g(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (5.2)$$

gde je:

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, \quad c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad \text{i} \quad \phi_k = \tan^{-1} \left(\frac{a_k}{b_k} \right)$$

$2\pi f_k$ - k -ti harmonik periodične funkcije, za $k=1$ zove se osnovni harmonik

c_0 - amplituda jednosmerne komponente

c_k - amplituda k -tog harmonika

ϕ_k - početna faza k -tog harmonika

Posmatrajući izraz (5.2), vidi se da Furijeov red predstavlja zbir sinusoidalnih harmonika sa različitim početnim fazama. Amplituda i početna faza svakog harmonika utiču na konačni talasni oblik signala $g(t)$.

Pomoću Furijeovog reda mogu se predstaviti izobličeni talasni oblici vibracija (ili struje) i razložiti na harmonike.

Diskretna Fourijeova Transformacija (DFT). - Diskretna Fourijeova Transformacija (DFT) se koristi za numeričko određivanje spektra signala. DFT je veoma važna u domenu frekvencijske analize zato što uzima diskretni signal u vremenskom domenu i transformiše ga u frekvencijski domen.

DFT se primenjuje nad ulaznim nizom podataka $g(t_n)$ koji se sastoji od N elemenata, pri čemu se kao rezultat dobija izlazni niz $G(f_k)$ koji takođe ima N elemenata:

$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) \cdot e^{-j2\pi \cdot n \cdot k / N} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.3)$$

$$e^{-j2\pi / N} = \cos(2\pi / N) - j \sin(2\pi / N) \quad (5.4)$$

gde k predstavlja k -ti harmonik osnovne frekvencije f .

Obrnuto, iz frekvencijskog spektra vremenska se funkcija dobija Inverznom Diskretnom Furijeovom Transformacijom (iDFT):

$$g(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} G(f_k) \cdot e^{j2\pi \cdot n \cdot k / N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5.5)$$

Kao što se može uočiti, razlika u računanju DFT i iDFT je samo u množenju svakog člana sa $1/N$, kao i u primeni različitih koeficijenata.

U navedenim izrazima važno je uočiti da se pretvaranje uzorkuje na diskretnim frekvencijama f_k , dok je vremenski signal uzorkovan u trenucima t_n . Ovom transformacijom se diskretna vremenska funkcija $g(t_n)$ predstavlja preko skupa diskretnih vrednosti u frekvencijskom domenu $G(f_k)$.

Vidi se da se neprekidni vremenski signal može predstaviti kao diskretna serija (ograničenim brojem diskretnih vrednosti) u frekvencijskom domenu, što je vrlo korisno u digitalnoj obradi signala. U matematici odnosno teoriji diskretnih i linearnih transformacija, uobičajeno se govori o domenu originala (vremenskom domenu) i domenu slike (frekvencijskom domenu). Prednost ovih transformacija je što se neprekidni ulazni signal može predstaviti približno, s željenom tačnošću, pomoću konačnog skupa elemenata (brojeva).

Brza Furijeova Transformacija FFT. - U digitalnoj tehnici se koristi poseban oblik Furijeove transformacije koji se naziva Brza Fourierova transformacija FFT. Brza Furijeova Transformacija predstavlja skup postupaka kojim se efikasno računa Diskretna Furijeova Transformacija (DFT). FFT smanjuje broj potrebnih izračunavanja za računanje DFT. Ubrzanje može da iznosi preko 100 puta. FFT postupci se zasnivaju na razlaganju N članova niza u nekoliko podnizova.

Vrlo često je, zbog dalje obrade, potrebno vremenski signal iz senzora digitalizovati što podrazumeva uzorkovanje u vremenu. Dakle, neprekidni vremenski signal često treba predstaviti kao niz diskretnih vrednosti sa jednakim vremenskim razmacima. Da bi se FFT-om dobila zadovoljavajuća tačnost transformacije frekvencija uzorkovanja mora zadovoljiti Nyquistov kriterij, što znači da se snimanje mora izvršiti najmanje dvostrukom frekvencijom najveće frekvencije koju želimo analizirati. Da bi se rezolucija transformacije povećala N puta, potrebno je prikupiti N puta više uzoraka, pošto upravo broj uzoraka određuje rezoluciju transformacija. Klasična FFT daje spektar koji pokriva frekvencije od 0 Hz do maksimalne snimljene frekvencije f_{max} . Veća rezolucija se može dobiti na nekoliko načina. Prvi način je da se poveća stepen transformacije čime se povećava vreme potrebno za provođenje transformacije. Druga mogućnost je da se smanji maksimalna frekvencija. Ovo rešenje nije uvek povoljno pošto se time gube više frekvencije koje su potrebne za određivanje stanja ekscentriciteta. Sledeće rešenje je da se produže vremena snimanja, što automatski daje bolju rezoluciju, uz uslov da se osigura konstantnost merene veličine tokom celog snimanja. U tom slučaju analiza se provodi izrezivanjem dela spektra koji je zanimljiv (tzv. ZOOM FFT).

2. Metoda (funkcija) korelacije

Metoda (funkcija) korelacije se zasniva na korelaciji dva signala u vremenskom domenu, npr. između talasnog oblika signala i njegovog pomaka (auto korelacija). Pojavljuje se u dve varijante: autokorelacija i korelacija.

Funkcija autokorelacije. - Funkcija autokorelacije predstavlja meru sličnosti neke funkcije i iste te funkcije pomaknute u vremenu za vreme τ . Funkcija autokorelacije je data izrazom:

$$R_{ff}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau) f(t) dt \quad (5.6)$$

Funkcija korelacije. - Funkcija korelacije prikazuje se u zavisnosti od τ i ima najveće vrednosti na mestima poklapanja funkcija. Funkcija korelacije ima oblik:

$$R_{fn}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)h(t)dt \quad (5.7)$$

Metoda (funkcija) korelacije koriste se za smanjivanje šuma u signalima.

3. Metoda usrednjavanja signala

Metoda usrednjavanja signala (engl. signal averaging) se često koristi pri obradi podataka prilikom dijagnostike obrtnih elemenata u ležajevima. Repetitivni se snimak senzora ponavlja nekoliko puta uzastopno, a usrednjavanjem signala smanjuje se uticaj smetnji, pa vrednosti nastale usled otkaza bolje dolaze do izražaja. Metoda je u osnovi usrednjavanje velikog broja uzoraka, koji se dobijaju iz senzora pri čemu je svaki uzorak pažljivo vremenski pridružen istom periodu. Kod obrtne opreme obrtna perioda elementa koji se posmatra je obično poznata. Na taj način se šum, koji se generiše u sistemu, može prigušiti, a signal (poznate obrtne periode) pojačati.

U praksi se vrlo često očitava veliki broj uzoraka tokom dužeg vremenskog perioda. U tom slučaju broj uzoraka koje je potrebno usrednjavati zahtevao bi veliku memoriju za zapisivanje vrednosti. Da bi se broj zapisa smanjio usrednjavanje se vrši prema sledećem izrazu:

$$\bar{x}_n = \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n - \bar{x}_{n-1}}{n} \quad (5.8)$$

gde je:

n - broj zapisa

x_n - vrednost promenljive n -tog zapisa

\bar{x}_n i \bar{x}_{n-1} - srednje vrednosti n i $n-1$ promenljivih

Ovim načinom srednja vrednost zapisa se u svakom trenutku može izračunati pomoću samo dva snimljena zapisa. Na taj način uštede u memoriji su velike, ali treba voditi računa o brzini računanja posebno kada je period uzimanja uzoraka kratak.

4. Metoda trenda

Jedan od najjednostavnijih oblika obrade podataka je zapisivanje neke veličine tokom dužeg vremenskog perioda, te poređenje izmerene veličine sa prethodnim vrednostima. Kada se pojave veća odstupanja između njih može se sumnjati na otkaz.

Automatizovani dijagnostički modeli vrše zapisivanje podataka tokom dužeg vremenskog perioda. Takav način zapisivanja omogućava kvalitetno praćenje **trenda** stanja mašine, kao i razvoja eventualnih otkaza i neispravnosti. U tom slučaju je vrlo važno da se podaci zapisuju sistematski i neprekidno.

Statistička metoda trenda omogućava da se na osnovu prošlosti spozna budućnost – da se odgovori na večno pitanje šta nas čeka sutra. Trend je funkcija koja predstavlja rezultantu opštih i specifičnih uticaja na pojavu koji joj daju smer i determinišu oblik njenog kretanja.

Metoda trenda omogućava da se sagleda promena pojave tokom vremena i da se na osnovu tih promena donesu bitni zaključci o samoj pojavi, zakonitostima u njenom razvitku, brzini njenog razvitka, obimu pojave itd. Ona omogućava da se detaljno upozna način odvijanja pojave i da se na osnovu tih spoznaja može proceniti kako će se pojava odvijati u budućnosti ili da se rekonstruiše kako se pojava odvijala u prošlosti. Metoda trenda se bazira na utvrđivanju najprilagođenije linije, odnosno utvrđivanju funkcije (zavisnosti) koja će na najbolji način opisati zakonitost promene pojave tokom vremena. Dakle, ovom metodom se utvrđuje centralna tendencija, pokušavajući definisati funkciju koja s najmanjom greškom, odnosno onu za koju je kvadrat odstupanja svakog podatka od nje najmanji.

Korišćenje spoznaja o načinu odvijanja pojave tokom vremena za predviđanje budućnosti, odnosno načina ponašanja pojave u budućnosti naziva se proces ekstrapolacije.

5.1.11.5 Izbor optimalnog načina donošenja dijagnostičkih odluka

Nakon konačne obrade podataka, mogu se donositi dijagnostičke odluke (zaključci). U cilju jednostavnije dijagnostike vrlo je važno da podaci na osnovu kojih se vrši donošenje dijagnostičkih odluka budu u što jednostavnijem i preglednijem obliku i da sadrže informacije potrebne za tačnu detekciju uzroka otkaza.

Identifikacija uzroka i stepena mogućeg otkaza, zadnja je i ključna faza dijagnostičkog procesa. Dijagnostičke odluke (zaključci) su presudne za celi sistem dijagnostike, odnosno donošenje strategije održavanja i popravki praćenog tehničkog sistema. Dok je pretvaranje ulaznih veličina, prikupljanje i obradu podataka moguće provesti potpuno automatizovano, to sa donošenjem dijagnostičkih odluka nije u potpunosti moguće. U današnje vreme to je još uvek faza koja je najmanje automatizovana i u kojoj u mnogim slučajevima do izražaja dolazi čovek. Tendencije su razvoja i primene metoda veštačke inteligencije i algoritama za dijagnostiku prilikom donošenja dijagnostičkih odluka, ali konačnu odluku vrlo često donosi čovek. Programski paket Motormonitor se može koristiti za donošenje dijagnostičkih poruka metodom analize frekvencijskog spektra struje statora motora. Zagovornici potpuno automatizovane dijagnostike naglašavaju da količina podataka i složenost velikih sistema prevazilazi mogućnosti čoveka, dok protivnici takvog pristupa tvrde da pravilnu interpretaciju rezultata može dati samo čovek.

Korišćenje računara olakšava donošenje dijagnostičkih odluka zbog složenosti postupaka, kao i vrlo često velikog broja podataka i parametara koje treba uzeti u obzir. Za neke slučajeve postoje razvijeni ekspertske sistemi koji daju kvalitetne rezultate, ali konačna odluka vrlo je često na stručnjaku. Danas je najčešće "dijagnostički procesor" još uvek čovek. Postoje podeljena mišljenja da li to treba da bude tako ili ne.

5.1.12 Predlog sopstvenog modela održavanja prema stanju baziranog na korišćenju novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Održavanje prema stanju se bazira na određenim merenjima sa svrhom prikupljanja podataka o dijagnostičkim parametrima u svrhu ocene stanja tehničkih sistema. Neprekidno praćenje stanja opreme omogućava uočavanje mogućeg predotkaznog stanja u početnoj fazi degradacije tehničkih sistema. Tako prikupljeni i obrađeni rezultati praćenja stanja tehničkih sistema omogućavaju planiranje i provođenje aktivnosti održavanja, sa ciljem minimiziranja troškova održavanja i maksimiziranja životnog veka tehničkih sistema. Održavanje prema stanju ne samo da omogućava da se izbegnu katastrofalni otkazi, nego stvara mogućnosti za pravovremenu nabavku rezervnih delova, pripremu potrebne radne snage i planiranje drugih popravki za vreme planiranog zastoja.

Dijagnostika tehničkih sistema je u tesnoj vezi sa održavanjem prema stanju, kao oblikom preventivnog održavanja, čija se strategija donošenja odluka o aktivnostima održavanja bazira na periodičnim ili neprekidnim dijagnostičkim kontrolama stanja tehničkog sistema u realnom procesu eksploatacije. Dijagnostika, kao sastavni deo koncepcije održavanja prema stanju, treba da utvrdi tehničko stanje sastavnih delova sa određenom tačnošću u određenom trenutku vremena. Utvrđivanje radnog stanja sastavnih delova se ostvaruje primenom odgovarajućih savremenih instrumenata i na osnovu čulnih opažanja specijalista za dijagnostiku.

Iznenadan, neočekivan i brz razvoj otkaza tehničkih sistema se retko dešava. Obično prva oštećenja mašina nastaju na površini i javljaju se konstantno u periodu od nekoliko meseci. Ako se na vreme ne uoče i otklone, mogu dovesti do težih posledica, kao što su: zastoji u proizvodnji, smanjenje efikasnosti rada, povećanje potrošnje energije, nezadovoljavajući ergonomske uslovi, paljenje maziva, eksplozije i požari u postrojenju itd. Prilikom oštećenja mašina, na mašinama se lančano oštećuju i drugi delovi: vratila, motori, spojnice, kućišta itd.

U cilju sprečavanja ovakvih situacija potrebno je praćenje operativnog stanja mašine na osnovu parametra za koji se smatra da je dovoljno osetljiv na promenu tehničkog stanja mašine, odnosno na pojavu oštećenja. Od posebne važnosti je detekcija (uočavanje) stanja tehničkih sistema koja prethode otkazima. Pravovremenim otkrivanjem stanja „predotkaza“ (npr. povećanje otpora spoja šipka-prsten asinhronih motora, pad otpora izolacije namotaja statora i sl.) moguće je sprečiti pojavu otkaza, a time i

troškove i opasnosti po ljude i okolinu. Rana detekcija manjih otkaza može sprečiti nastanak većih, što je karakteristično za otkaze mašina koji se razvijaju postepeno.

Na slici 5.14. je prikazan predlog sopstvenog modela održavanja prema stanju baziranog na korišćenju novog automatizovanog dijagnostičkog modela.

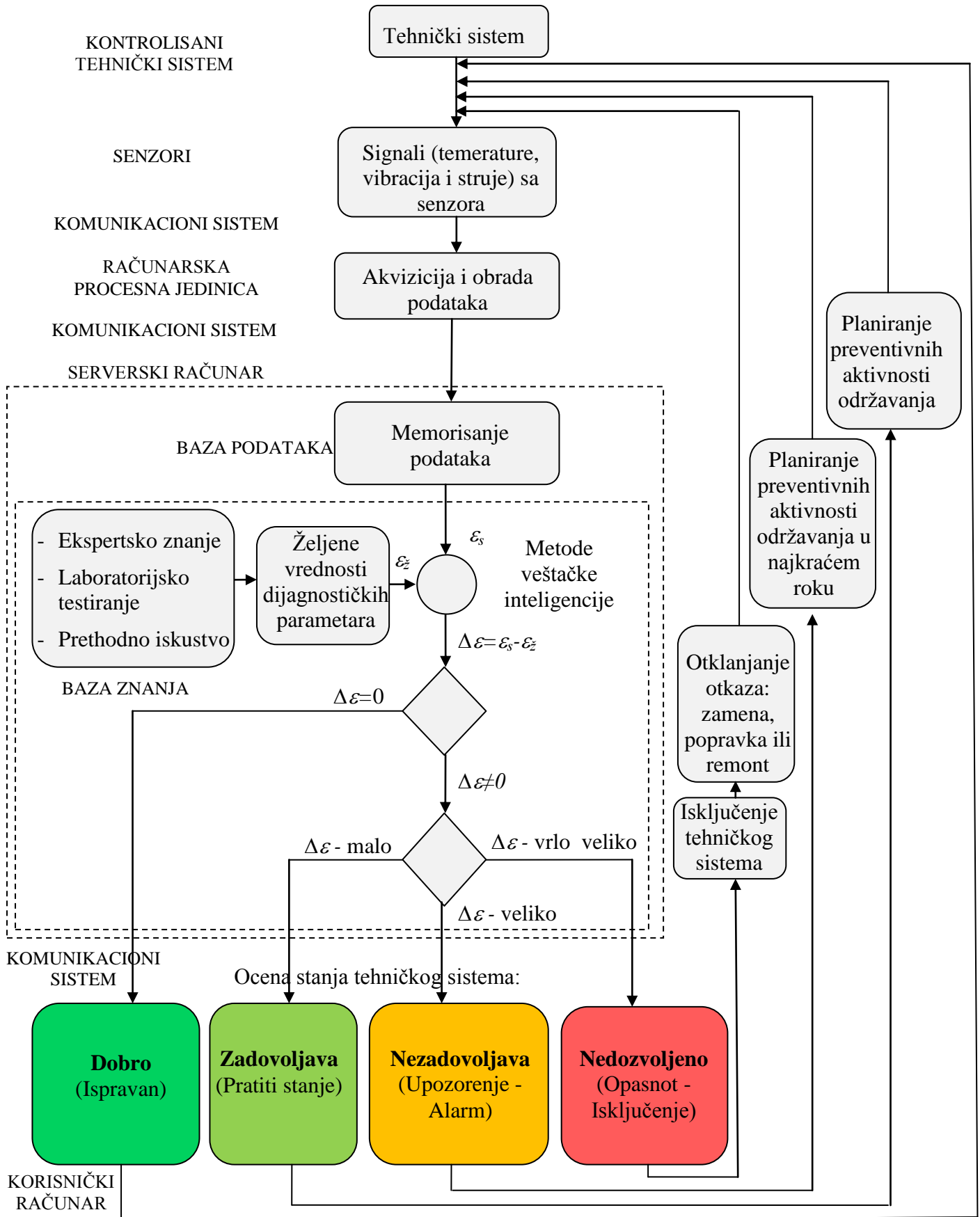
Na osnovu veličine odstupanja stvarnih (izmerenih i preračunatih) od željenih vrednosti dijagnostičkih parametara ocenjuje se stanje (stepen neispravnosti) tehničkog sistema i na osnovu toga donosi dijagnostička odluka o daljim aktivnostima održavanja (o nastavku ili zaustavljanju rada pogona).

- Kada ne postoji (ili je vrlo malo) odstupanje stvarne od željene vrednosti dijagnostičkih parametara ($\Delta \varepsilon \approx 0$), serverski računar daje dijagnostičku poruku da je stanje tehničkog sistema „**Dobro**“ (tehnički sistem je ispravan, radno sposoban) i da može nastaviti normalno da radi do sledeće dijagnostičke kontrole. U tom slučaju tehnički sistem nastavlja normalno da radi i ne planiraju se preventivne aktivnosti održavanja.
- Kada se pojavi odstupanje stvarne od željene vrednosti, serverski računar upozorava o mogućoj pojavi otkaza:
 - U slučajevima malih odstupanja ($\Delta \varepsilon$ - malo), kada ne postoji opasnost od većih oštećenja, serverski računar daje dijagnostičku poruku da stanje tehničkog sistema „**Zadovoljava**“ i da treba da nastavi sa radom, a da se dobijeni podaci iskoriste za planiranje preventivnih aktivnosti održavanja i nabavku rezervnih delova. U dijagnostičkoj poruci se navodi još mesto i uzok neispravnosti. U tom slučaju tehnički sistem nastavlja normalno da radi i planiraju se preventivne aktivnosti održavanja.
 - U slučajevima većih odstupanja ($\Delta \varepsilon$ - veliko), serverski računar daje dijagnostičku poruku da stanje tehničkog sistema „**Nezadovoljava**“ i da treba da nastavi sa radom, ali pod posebnim nadzorom, a da se dobijeni podaci iskoriste za planiranje preventivnih aktivnosti održavanja (npr. zamenu ili popravku sastavnog dela sistema) u najkraćem mogućem roku kako bi se izbegao otkaz sistema. U dijagnostičkoj poruci se navodi još mesto i uzok neispravnosti. U tom slučaju tehnički sistem nastavlja normalno da radi i planiraju se preventivne aktivnosti održavanja u najkraćem roku.
 - U slučajevima vrlo velikih odstupanja ($\Delta \varepsilon$ - vrlo), kada postoji opasnost od otkaza koji su opasni za dalji rad tehničkog sistema, serverski računar daje dijagnostičku poruku da je stanje tehničkog sistema „**Nedozvoljeno**“ i da treba odmah isključiti tehnički sistem i otkloniti neispravnost. U dijagnostičkoj poruci se navodi još mesto i uzok otkaza. U tom slučaju tehnički sistem se odmah isključuje i neispravnost se otklanja.

Praćenje stanja sistema u realnom vremenu i istorijat otkaza na tehničkom sistemu omogućavaju jednostavnu detekciju otkaza inženjerima zaposlenim na održavanju tih sistema. Podaci se prikupljaju sa svih tehničkih sistema kao i alarmi koji se šalju u slučaju otkaza sistema. Na osnovu generisane liste prioriteta tehničkih sistema na kojima je potrebno provođenje aktivnosti održavanja dodeljuju se raspoloživim službama održavanja konkretni zadaci (radni nalozi) za provođenje korektivnih mera (na bazi analize tehničkih sistema u stanju alarma) i preventivnih mera održavanja (na osnovu dijagnostičke ocene stanja). Za svaku aktivnost definiše se potreban materijal, ljudski resursi, dokumentacija i opis procedura rada.

Ukoliko se analizom dobijenih podataka utvrdi da se radi o otkazu, koji zahteva veće intervencije u radu tehničkog sistema, za koje zaposleni na održavanju nisu obučeni, kontaktira se isporučilac tehničkog sistema u cilju otklanjanja uzroka otkaza i ponovnog uspostavljanja normalnog funkcionisanja tehničkog sistema.

Zaposleni na održavanju tehničkih sistema popunjavaju karton određenog tehničkog sistema (evidencija radova), koji pruža hronološki prikaz svih aktivnosti rađenih na nekom tehničkom sistemu, sa opisom aktivnosti, brojem naloga kojim je aktivnost pokrivena, vremenom nastanka otkaza, vremenom popravke itd.



Slika 5.14. Predlog sopstvenog modela održavanja prema stanju baziranog na korišćenju razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela

5.1.13 Razrada dijagnostičkih metoda

5.1.13.1 Razrada metode termografije

1. Osnovni pojmovi o metodi termografije

Kako je vrlo čest slučaj da otkazima prethodi ili ih prati pojava pregrevanja radne opreme ili pojedinih njenih delova, to se oni mogu na vreme detektovati termografskim kontrolama. Termografija se primenjuje skoro u svim sferama ljudske delatnosti, koristi se u medicini, kriminalistici, biologiji, tehnici, nauci, svakodnevnom životu. Ona je posebno značajna u proceni stanja tehničkih sistema kao beskontaktna metoda za čije provođenje nije potrebno zaustavljati proizvodni proces.

Da bi se obezbedio pouzdan rad mašina, vrše se dijagnostičke kontrole njihovih vitalnih komponenti (npr. ležajeva), među koja spadaju i termografske kontrole. Ove kontrole, uz vibrodijagnostičke, se najčešće koriste za ocenu stanja industrijskih i elektroenergetskih postrojenja, koje se provode u okviru programa održavanja prema stanju. Termografske kontrole mogu biti osnovne ili pomoćne, na osnovu kojih se predlažu dalje kontrole povoljnijim metodama, ako se pomoću njih ne može utvrditi pravi uzrok i mesto neispravnosti¹⁰⁴ [80].

Posebna pogodnost metode termografije je u tome što se kontrole izvode bez neposrednog fizičkog kontakta sa tehničkim sistemom koji se ispituje, odnosno izvodi se sa potpuno bezbedne udaljenosti. To omogućava da se kontrole izvode pod naponom, u toku normalnog rada postrojenja, bez prekidanja (zaustavljanja) ili ometanja normalnog rada (funkcionisanja) postrojenja, čime se ostvaruje jedan od preduslova za dobijanje pouzdanih rezultata merenja¹⁰⁵ [72]. Termografske kontrole se provode za vreme normalnog odvijanja proizvodnog procesa, u stvarnim uslovima, što na kraju znači bolji, tačniji i pouzdaniji uvid u stanje mašine.

Termografija je odlična metoda za praćenje rada mehaničke opreme u cilju povećanja novoa pouzdanosti i unapređenja njene energetske efikasnosti. Ova metoda omogućava praćenje temperature i termičkih uslova, dok je oprema u punom pogonu i pod punim opterećenjem. Mehanička oprema, najvećim delom, ima dozvoljene granice radne temperature, koje se mogu koristiti kao granične vrednosti. Za razliku od ostalih dijagnostičkih kontrola, termografija se može koristiti za dijagnostiku različite opreme, kao što su: pumpe, kompresori, motori, ležajevi, koturače, kaišnici, ventilatori, zupčanici, transportni sistemi itd. Ovakve kontrole imaju mnogo prednosti u odnosu na veliki broj konvencionalnih kontrola, ali i zahtevaju dobro obučeni kadar.

Pošto je većina opreme ili procesa projektovana tako da generiše toplotnu energiju u normalnim radnim uslovima, detekcija povišenih temperatura ne znači da i postoje oštećenja. Osoba koja provodi snimanja mora dobro poznavati mehaničke komponente koje kontroliše. Jednom kada se normalna termička slika dobije i definiše, bilo koje odstupanje od te normalne slike može označavati i upozoravati na moguća oštećenja. Potrebno je prethodno snimiti ispravno stanje sistema, da bi se kasnije uočili toplotni zapisi koji odstupaju od normalnog stanja, odnosno koji upozoravaju na neko oštećenje.

Svi mehanički sistemi generišu toplotnu energiju za vreme svog normalnog rada, termografske kontrole omogućavaju da se prate tokovi toplotne energije. Za mehanizme koji se nalaze u relativnom kretanju karakteristične su povišene temperature usled trenja.

Termografskim kontrolama mogu se detektovati otkazi motora u ranoj fazi nastanka, kao što su:

- slabi spojevi na motoru,
- degradacija izolacije namota rotora i statora,
- nesimetričnost napona napajanja,

¹⁰⁴ Ilić, B., Adamović, Z., Savić, B., Stanković, N., Procena termičkog stanja elektroenergetske opreme u procesnoj industriji metodom termografije, *Journal of Engineering & Processing Management*, Vol. 4, No 1, Zvornik, 2012, pp. 163-176.

¹⁰⁵ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, *Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering*, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

- neadekvatan protok vazduha (parcijalno proticanje vazduha),
- preopterećenje,
- kritičan broj obrtaja,
- necentriranost spojnice (neparalelnost osovine),
- oštećenja ležajeva,
- nepodmazani ležajevi (suvi ležajevi),
- trenje u ležajevima,
- nepravilno dimenzionisanje ležajeva u uležištenju (aksijalni, radijalni, radijalno-aksijalni, jednoredni, dvoredni itd.),
- položaj uležištenja (vertikalno, horizontalno) ležaja,
- popuštanje ležajeva itd.

Veliki broj nedostataka u radu opreme se manifestuje pojavom temperaturnog gradijenta (topotnih žarišta) na mestu pojave oštećenja ili nedostatka. Tako se na primer nesaosnost, uz analizu spektra vibracija može dodatno potvrditi uz pomoć termografskog snimka koji ukazuje na povećanu temperaturu spojnice i ležajeva do spojnice. Problemi sa izolacijom na statoru elektromotora koji se detektuju u spektru vibracija, se uz pomoć termografske slike lako lociraju kao mesto lokalnog zagrevanja kućišta elektromotora. Dakle kod analize spektra vibracija, termografija je zgodan pomoćni alat koji nam omogućava da dodatno potvrdimo rezultate analize.

Svi elektromotori imaju normalnu termičku emisiju, kao i poznate maksimalne radne temperature. Ove temperature su obično ispisane na tablici motora i obično se daju kao porast °C iznad ambijentalne temperature okoline. Većina motora je napravljena da radi u ambijentalnoj temperaturi koja ne prelazi 40°C. Prekomerna toplota može se pojaviti ako postoji nesaosnost spojnih elemenata (spojnica) u pogonskoj grupi koji su u sistemu sa elektromotorom.

Termografske kontrole omogućavaju detekciju brojnih nedostataka i potencijalno veoma opasnih mesta na mašinama, čime se stvaraju uslovi da se preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije.

Prilikom kontrola mehaničkih sistema termografija, kao dijagnostička metoda, je mnogo efikasnija za lociranje mesta pregrevanja, nego za identifikaciju osnovnog uzroka pregrevanja. Pregrevanje obično uzrokuje neka komponenta koja nije vidljiva direktno sa termografskom kamerom. Ostale dijagnostičke metode, kao što su analiza vibracija, analiza zamašćenosti i ultrazvuk se mogu primeniti, radi utvrđivanja tačnog uzroka pregrevanja.

Kod merenja temperature sa površine, mogućnost primene termografskih kamera, u odnosu na prethodne uređaje, vrlo je velika. Međutim, kada se radi o merenju temperature u nekoj unutrašnjosti ili kad su merna mesta zaklonjena toplotnim izolacijama, mogućnosti termografskih kamera su ograničene. Ipak nedostatak se u većini slučajeva može izbeći, zahvaljujući činjenici da, ako postoji neka neispravnosti, uvek postoji neki toplotni put od izvora toplote do posmatrane površine.

Termografske kontrole predstavljaju on-line postupak koji nalazi sve veću primenu u dijagnostici aparata visokonaponskih postrojenja. Dijagnostika elemenata visokonaponskih postrojenja se sastoji u tumačenju podataka prikupljenih sa njih, da bi se odredilo u kakvom su stanju. Ona ima veliki uticaj na ukupne troškove održavanja, kao i na pouzdanost i raspoloživost elemenata.

Kod dijagnostike bilo kog elementa u postrojenju potrebni su:

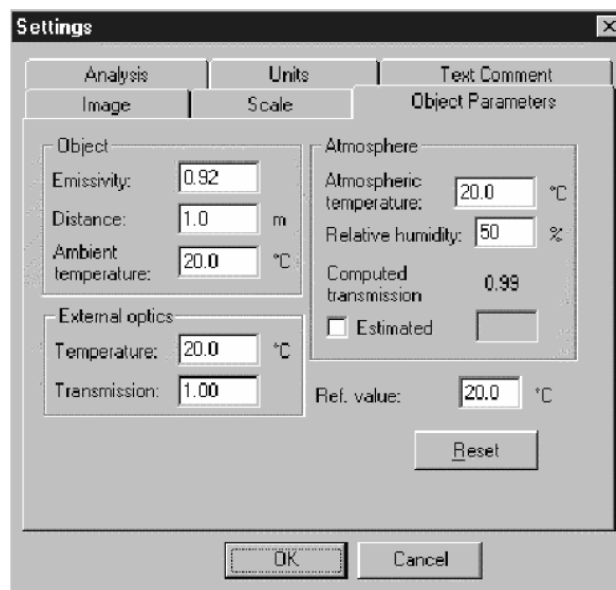
- odgovarajući senzori za praćenje stanja posmatranog elementa (u ovom slučaju termografska kamera predstavlja senzor),
- formule za procesiranje podataka i
- kriterijumi za donošenje odluka.

2. Izbor optimalnih postupaka termografskih kontrola

Problemi koji se javljaju u toku snimanja termograma, ujedno predstavljaju i nedostatke termografije. Na njih treba posebno obratiti pažnju pre i u toku snimanja, jer zbog njih dolazi do pogrešnih rezultata merenja i donošenja pogrešnih zaključaka.

Da bi termografska kamera mogla da na minimum svede (kompenzuje) različite uticaje iz okruženja na rezultate merenja i da automatski izračuna tačnu visinu i raspodelu temperature na površini posmatranog objekta potrebno je pre snimanja u softveru kamere podesiti sledeće parametre posmatranog objekta i njegove okoline, slika 5.15 [5]:

- emisivnost (svojstva površine) posmatranog objekta,
- temperaturu objekata iz okruženja, tj. zračenja koje potiče od objekata iz okoline,
- udaljenost kamere od posmatranog objekta,
- temperaturu atmosfere i
- relativnu vlažnost vazduha.



Slika 5.15. Prozor u kome se podešavaju parametri posmatranog objekta i njegove okoline [5]

1. Najvažniji parametar objekta koji mora biti podešen u softveru kamere je emisivnost posmatranog objekta, koja, u najkraćem, predstavlja meru količine zračenja koje emituje posmatrani objekat u poređenju sa količinom zračenja koju emituje savršeno crno telo iste temperature. Emisivnost posmatranog objekta (reflektovano zračenje), zavisi od svojstva površine, materijala, strukture i geometrije posmatranog objekta, kao i od ugla snimanja. U većini slučajeva, materijali su sa različitim načinima površinske obrade i imaju emisivnost koja se kreće u granicama od 0,1 do 0,95. Veoma uglačane površine, kao što su ogledala imaju nisku emisivnost ispod 0,1, dok oksidovane i ofarbane površina imaju visoku emisivnost, pa su pogodne za termografske kontrole. Farbe na bazi ulja, bez obzira na boju iz vidljivog spektra, imaju emisivnost preko 0,9 u infracrvenom delu spektra. Ljudska koža ima emisivnost od 0,97 do 0,98. Neoksidovani metali imaju nisku emisivnost, koja se povećava sa porastom temperature. Dok metali koji su ofarbani ili obloženi gumom ili plastikom imaju visoku emisivnost. Nemetali obično imaju visoku emisivnost, koja se smanjuje sa porastom temperature. U praksi je određivanje tačne emisivnosti ϵ problematično posebno za materijale koji imaju nisku emisivnost kao što su ogoljeni metali (bakar, aluminijum, beli metal), pa se za njih ne preporučuje kvantitativno ispitivanje. Precizno merenje apsolutne temperature u postrojenjima, pomoću termografskih kamera, je veoma teško izvesti. Problemi nastaju zbog tog što se u postrojenjima upotrebljavaju različiti materijali, koji se dobijaju različitim tehnikama obrade, pa su im emisivnosti nepoznate. Odličan operater termografije ove koeficijente može odrediti približno, ali ukoliko se traži izuzetno precizno merenje apsolutne temperature, onda je to praktično nemoguće izvesti. Ako je ipak to neophodno, emisivnosti se mogu prethodno odrediti merenjima u laboratorijskim uslovima

na konkretnim materijalima. Sopstvena temperatura objekta koji se meri može imati uticaj na emisivnost. Ovaj uticaj je uglavnom mali¹⁰⁶ [90].

2. Kompenzacija uticaja temperature objekata iz okruženja tj. zračenja koje potiče od objekata iz okoline, a koje se reflektuje od površine posmatranog objekta, se ostvaruje unosom temperature tih objekata u softver kamere. Uticaj zračenja iz okoline na rezultate merenja treba svesti na minimum, posebno ako se meri temperatura objekta koji ima temperaturu blisku temperaturi okoline ili ima nizak emisivni faktor. Do termografske kamere ne dolazi samo zračenje koje potiče od posmatranog objekta, već i zračenje koje potiče od objekata iz okruženja. Što je emisivnost posmatranog objekta manja to je veći udeo reflektovanog zračenja u ukupnom zračenju koje emituje taj objekat, pa su zbog toga objekti sa niskom emisivnošću nepovoljni za termografske kontrole. Najveće probleme pri merenju temperature zadaje refleksija, koja se često pojavljuje od jakog Sunca ili od susednih elemenata kroz koje protiče struja.

3. Kompenzacija uticaja atmosfere se ostvaruje unosom (podešavanjem) sledećih parametara u softver kamere: udaljenosti (rastojanja) kamere od posmatranog aparata, temperature atmosfere (temperature okolnog vazduha) i relativne vlažnosti vazduha.

Pri prolasku kroz atmosferu od posmatranog objekta prema kameri dolazi do slabljenja zračenja zbog apsorpcije od strane čestica vazduha. Ovo slabljenje zračenja je veće što je veća udaljenost (rastojanje) kamere od posmatranog objekta i što je veća relativna vlažnost vazduha. Pored toga postoji i zračenje koje atmosfera emituje prema kameri. Ovo zračenje je veće što je veća temperatura atmosfere.

Tokom termografskih kontrola aparata energetskih postrojenja na otvorenom prostoru, atmosferske prilike (vetar, kiša, sneg, magla itd.) značajno utiču na tačnost rezultata kontrola. Prvenstveno se ovde misli na pojavu hlađenja toplih mesta usled atmosferskih prilika. Vetar, kiša i sneg značajno utiču na rashlađivanje aparata energetskih postrojenja koji se nalaze na otvorenom prostoru. Rashlađujući uticaj vetra se uzima u obzir tako što se izmerena vrednost temperature pomnoži sa korekcionim faktorom, čija vrednost zavisi od brzine vetra i zasnovana je na empirijskim merenjima. Tako se dobija vrednost temperature koju bi posmatrani objekat imao kada brzina vetra ne bi bila veća od 1 m/s. Osim vetra, slaba kiša i sneg, te udaljenost objekta mogu ometati merenje, ali u promenljivom obimu. Termografsko snimanje se ponekad može obaviti sa zadovoljavajućim rezultatima i kada pada slabiji suv sneg ili slaba kiša. Međutim, jak sneg, kiša i magla predstavljaju prepreke kroz koje infracrveni zraci ne mogu da prođu i termografska kamera meri temperaturu gustih pahulja snega ili kapi kiše, a ne objekta koji se posmatra. Kvalitet termografske slike se u takvim situacijama značajno pogoršava i pouzdano merenje je tada nemoguće, pa se uglavnom i ne provodi. Takođe, tokom vrelih letnjih dana površina posmatranog objekta se može zagrejati do veoma visokih temperatura zbog jakog sunčevog zračenja. Merenja je najbolje provesti pri slaboj vidljivosti (noću ili danju po oblačnom vremenu).

3. Kriterijumi za ocenu stanja mašina na osnovu vrednosti temperatura njihovih ležajeva

Povišen nivo vibracija na ležajevima mašina u znatnoj meri je indikator povišenja temperature na ležajevima. Za temperaturu kao parametar stanja na ležajevima koriste se standardne granične vrednosti navedene u tabeli 5.5. Danas se kao najpraktičniji uređaji za merenje temperature na ležajevima mašina koriste laserski infracrveni termometri i termografske kamere [5].

Tabela 5.5. Kriterijumi za ocenu stanja mašina na osnovu vrednosti temperatura njihovih ležajeva [5]

Temperatura ležaja T	Ocena stanja mašine
$T < 55^{\circ}\text{C}$	Dobro
$55^{\circ}\text{C} \leq T < 62^{\circ}\text{C}$	Zadovoljava
$62 \leq T < 73^{\circ}\text{C}$	Nezadovoljava (Upozorenje)
$T \geq 73^{\circ}\text{C}$	Nedozvoljeno

¹⁰⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetsku efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.

4. Kriterijumi za ocenu stanja aparata elektroenergetskih postrojenja

U toku rada elektroenergetskih postrojenja mogu se pojaviti defekti, koji ako se na vreme ne uoče i ne otklone, mogu dovesti do otkaza i havarija, a time i do neplaniranih prekida u napajanju potrošača električnom energijom, kao i do gubitaka električne energije i smanjenja energetske efikasnosti.

Da bi se to sprečilo vrše se termografske kontrole, koje omogućavaju detekciju defekata aparata elektroenergetskih postrojenja u početnoj fazi nastanka, čime se stvaraju uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreče ozbiljniji otkazi i havarije, a time i prekidi u napajanju potrošača električnom energijom, kao i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu.

Da bi se mogao pravilno oceniti stepen defekta neke priključne stezaljke aparata elektroenergetskih postrojenja potrebno je poznavati njenu normalnu radnu temperature, njeno opterećenje, temperaturu okolnog vazduha i sl. U trofaznim sistemima procena stepena defekata priključnih stezaljki aparata elektroenergetskih postrojenja uglavnom se vrši komparativnom metodom, koja se zasniva na međusobnom poređenju temperatura istih priključnih stezaljki (istih su karakteristika, od istog su materijala, istog stanja površina, iste boje i sl.), koje se nalaze u različitim fazama i koje su izložene istom opterećenju i istim uslovima rada. Pri tome se obavezno usvaja referentna priključna stezaljka, a za referentnu se usvaja priključna stezaljka koja ima najnižu temperaturu i ona se smatra ispravnom. Svaka priključna stezaljka koja ima temperaturu višu od temperature referentne priključne stezaljke naziva se topla priključna stezaljka. Temperaturna razlika između tople priključne stezaljke i referentne priključne stezaljke ΔT_m se definiše, pri struji opterećenja koja se kreće u granicama $I_m=(0,3-0,6)I_n$ (gde je I_n - nominalna struja), kao razlika između izmerene temperature te tople priključne stezaljke T_{hot} i izmerene temperature referentne priključne stezaljke T_{ref} ¹⁰⁷ [72]:

$$\Delta T_m = T_{hot} - T_{ref}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.9)$$

Međutim, procena stepena defekta tople priključne stezaljki vrši se na osnovu temperaturne razlike $\Delta T_{0,5}$ koja bi bila između te tople priključne stezaljke i referentne priključne stezaljke pri struji opterećenja I_m jednakoj 50% nominalne struje I_n ($I_m=0,5I_n$). Ova temperaturna razlika se izračunava prema relaciji:

$$\Delta T_{0,5} = \Delta T_m \left(\frac{0,5I_n}{I_m} \right)^2, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

Prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6, na osnovu izračunate temperaturne razlike $\Delta T_{0,5}$ vrši se ocena stanja i stepena defekta priključnih stezaljki aparata elektroenergetskih postrojenja i usvaja dijagnostička poruka o aktivnostima održavanja koje je potrebno preduzeti [5].

Tabela 5.6. Kriterijumi prema kojima se na osnovu izračunate temperaturne razlike $\Delta T_{0,5}$ vrši ocena stanja i stepena defekata priključnih stezaljki aparata elektroenergetskih postrojenja [5]

Stepen defekta	$\Delta T_{0,5}, \text{ } ^\circ\text{C}$	Ocena stanja priključnih stezaljki	Ocena stepena defekta i dijagnostička poruka
0	$0^\circ\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 5^\circ\text{C}$	Dobro	Priključna stezaljka je ispravan i može nastaviti normalno da radi.
1	$5^\circ\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 10^\circ\text{C}$	Zadovoljava	Početni stepen defekta, koga treba pažljivo pratiti i planirati njegovo otklanjanje.
2	$10^\circ\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 30^\circ\text{C}$	Nezadovoljava	Razvijeni stepen defekta, koga treba termografski kontrolisati jednom mesečno i otkloniti kada se ukaže prva povoljna prilika.
3	$\Delta T_{0,5} \geq 30^\circ\text{C}$	Nedozvoljeno	Havarijski stepen defekta, koga treba hitno otkloniti.

¹⁰⁷ Ilić, B., Adamović, Z., Radovanović, L.J., Savić, B., Stanković, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

Tokom merenja kontrolisani aparati elektroenergetskih postrojenja treba da budu opterećeni barem s 50% nazivnih vrednosti struja, kako bi se smanjile moguće greške zbog preračunavanja struja na nazivno opterećenje.

Navedeni kriterijumi se odnose na otkrivene spojeve, kao što su: zatezne, viseće i noseće stezaljke, priključne stezaljke svih aparata (rastavljača, prekidača, mernih i energetskih transformatora, kablovskih glava i sl.) itd.

Uzroci pojave pregrevanja elemenata elektroenergetskih postrojenja mogu biti različiti, kao što su: loši spojevi (kontaktne površine labave (npr. zbog nedovoljno pritegnutih zavrtnjeva), zatim mehanički oštećene (npr. naprsle), korodirale (npr. zbog spoja različitih metala), zaprljane, nagorele, prisutni tragovi zavarivanja između kontaktnih površina i sl.), preopterećenje, nesimetrično opterećenje, viši harmonici struje, vrtložne struje, kao i prenos toplote kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem na te elemente sa objekata iz okruženja.

Prilikom utvrđivanja mesta pregrevanja treba znati da u nekim slučajevima mesta pregrevanja ne predstavljaju i mesta neispravnosti, jer do pregrevanja potpuno ispravnih mesta može doći zbog prenosa toplote (kondukcijom, konvekcijom ili zračenjem) na njih sa mesta pregrevanja koja predstavljaju mesta neispravnosti. Bez obzira na to što mesta pregrevanja ne predstavljaju uvek i mesta neispravnosti sigurno je da postojanje pregrevanja ukazuje na to da postoje određene neispravnosti, koje je potrebno otkloniti.

Jasno je da termografske kontrole treba da budu sastavni i obavezni deo dijagnostike bilo kog tehničkog sistema pa i elektroenergetskog. S tim u vezi korisno je da se izvrši rangiranje redosleda popravki unutar svakog područja, a prema visini pregrevanja i važnosti aparata koji se pregreva. Pored tri grupe pregrevanja potrebno je uzeti u obzir da li aparat koji se pregreva radi unutar ili izvan dizajniranog veka upotrebe. Takođe, treba uzeti u obzir ako u istom polju postoji pregrevanje još nekog aparata¹⁰⁸ [71].

Utvrđivanje mesta pregrevanja u unutrašnjosti aparata znatno je složenije, jer je tada potrebno poznavati niz faktora, kao što su konstrukcija aparata, mogući pravci prenosa toplote iz unutrašnjosti na površinu aparata itd. Pri merenjima je potrebno uzeti u obzir da, zavisno od položaju izvora toplote, temperature u unutrašnjosti mogu biti znatno više nego na površini.

Dugoročno gledano pregrevanje aparata se može koristiti kao pokazatelj kvaliteta ugrađene opreme u postrojenju, te kvaliteta obavljenih remontnih radova.

Kriterijumi prema kojima se na osnovu toga da li je potrebno veće ili manje pregrevanje aparata donosi odluka o reviziji su navedeni u tabeli 5.7.

Tabela 5.7. Kriterijumi prema kojima se na osnovu toga da li je potrebno veće ili manje pregrevanje aparata donosi odluka o reviziji

Potrebno je veće pregrevanje aparata da bi se donela odluka o reviziji	Potrebno je manje pregrevanje aparata da bi se donela odluka o reviziji
Pregrevanje prolaznih stezaljki	Pregrevanje kontakata i spojeva
Aparat radi unutar projektovanog veka upotrebe	Aparat radi van projektovanog veka upotrebe
Nije bilo prethodnog pregeravanja na tom aparatu	Bilo prethodnog pregeravanja na tom aparatu
Ne postoji pregrevanje u istom polju	Postoji pregrevanje u istom polju
Niži naponski nivo (manja masa toplotne izolacije)	Viši naponski nivo (veća masa toplotne izolacije)

Slučaj međusobnog poređenja temeperature kompletnih polova prekidača, odnosno tela mernih transformatora i slično mnogo je složeniji za ocenu, ali treba imati na umu da i najmanje razlike od 3 do 5°C mogu da budu opasne. To je sasvim razumljivo ako se uzme u obzir činjenica da je za zagrevanje tako velikih količina ulja i porcelana, koliko na primer sadrži jedan pol malouljnog prekidača reda 110 kV ili

¹⁰⁸ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

više, makar i samo za par °C iznad normalne radne temperature, potrebna znatna količina energije. Tolika količina energije oslobađa se tek ako su u pitanju ozboljniji otkazi u unutrašnjosti, na primer, izrazito loši kontakti u komorama. Prilikom ove procene treba imati u vidu da dozvoljena vrednost pregrevanja zavisi od veličine aparata, njegove konstrukcije, mase i vrste toplotne izolacije (porcelan, ulje) između površine aparata i toplog mesta, koje se nalazi u unutrašnjosti samog aparata i koje greje celu masu. Naime, ukoliko je aparat veći, odnosno veća masa toplotne izolacije, tada se za dozvoljene razlike moraju usvojiti niže vrednosti i obrnuto. Takav je slučaj sa opremom 220 kV u odnosu na opremu napona 110 kV, a pogotovu u odnosu na opremu napona 35 kV [5].

5. Izbor dijagnostičke opreme

a) Izbor termografske kamere

Za praćenje termičkog stanja tehničkih sistema mogu se koristiti termografske kamere. Termografske kamere su vrlo složeni uređaji sa veoma širokim mogućnostima primene. Kod ovih uređaja posmatrana površina je izdvojena na hiljade manjih sastavnih površina, a sa svake takve površine meri se intenzitet zračenja, a samim time i temperatura. Termička slika pretvara se u vidljivu koja se prati na ekranu. Na ekranu se dobija termička slika koja bi bila istovetna onoj koju bi naše oči videle kada bi bile osetljive na toplotne, a ne samo na svetlosne zrake¹⁰⁹ [179].

Računarom upravljane termografske kontrole moguće je ostvariti tako što se odgovarajućim serijskim kablom sa DB-9 M/F priključcima poveže serijski port (priključak) termografske kamere FLIR i serijski port (priključak) desktop računara.

Primena termografskih uređaja poslednje generacije doprinela je velikom unapređenju analize i prikaza rezultata kontrola. Digitalizacija rezultata merenja dovela je do znatno brže i komfornije manipulacije i obrade podataka. Mogućnosti obrade video i termo zapisa su omogućili da se nakon merenja u postrojenjima uradi kvalitetna analiza karakterističnih mesta na personalnom računaru.

b) Izbor softverske podrške

Nakon sprovedenih termografskih snimanja vrši se analiza termografskih slika na osnovu koje se utvrđuju mesta i uzroci neispravnosti i preporučuju mere koje treba preduzeti kako bi se uočene neispravnosti otklonile u optimalnom vremenskom periodu. Međutim, pošto sopstveni operativni sistem kamere omogućava samo elementarnu analizu termograma, da bi se mogla izvršiti detaljna analiza termograma, pored kamere koristi se i računar na kome je instaliran softverski paket ThermaCAM Researcher, specijalno razvijen za dijagnostiku i naučna istraživanja. Tako se nakon provedenih termografskih snimanja vrši prebacivanje termograma visokog kvaliteta sa kamere najnovije generacije na hard disk računara. Rezultati snimanja se sistematizuju i omogućavaju formiranje baze termografskih snimaka¹¹⁰[89].

Osnovna namena softverskog paketa ThermaCAM Researcher je obrada termograma koji sa termografske kamere dolaze u realnom vremenu. Međutim ovaj paket omogućava i obradu termograma koji dolaze sa hard diska računara. Program može obrađivati brze, srednje i spore toplotne procese, zatim može prikazivati trenutne termograme, čuvati ih na hard disku, pa ih naknadno obrađivati (analizirati). Ovaj program omogućava da se sa termografske slike lako mogu uočiti tačke sa maksimalnim i minimalnim temperaturama, kao i njihov međusobni raspored i zavisnost. Termogrami se mogu obrađivati pomoću alatki za numeričku i statističku analizu, kao što su¹¹¹ [76]:

¹⁰⁹ Savić, B., Ilić, B., Primena termografske dijagnostike računara u informacionim sistemima u okviru koncepcije održavanja prema stanju, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.

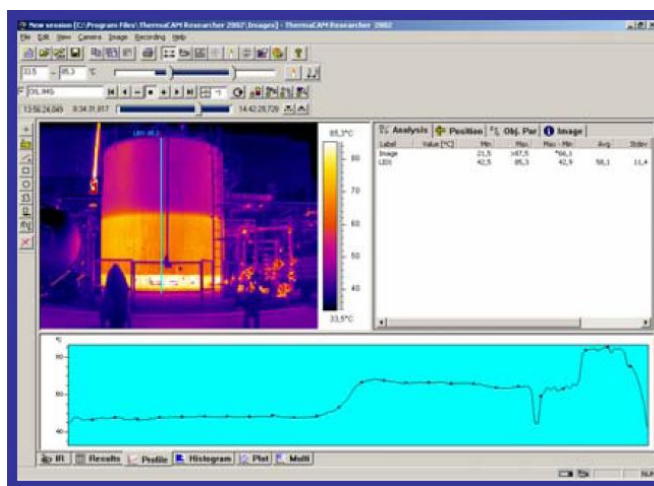
¹¹⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetsku efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 3, Beograd, 2014, pp. 17-26.

¹¹¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Automatizovana termografska ispitivanja kliznih i kotrljajnih ležajeva, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, Vol. 4, No 1-2, pp. 10-19, 2012.

- izoterma,
- tačka,
- područje i
- linija.

Rezultati dobijeni primenom ovih alatki mogu se prikazati u prozoru programa zajedno sa termogramom, ito kao: deo u kome je prikazan traženi profil temperatura, deo u kome je prikazan histogram, deo u kome je prikazan crtež i deo u kome je prikazana tabela u kojoj su navedeni osnovni podaci.

Rezultati merenja mogu se takođe povezati i obraditi različitim podprogramima. Postoji nekoliko mogućih prikaza programa ThermaCAM Researcher, slika 5.16. Ti prikazi se mogu izabrati pomoću ikonica koje se nalaze u donjem delu prozora. Tako je moguće kombinovati termogram sa profilom temperature, histogramom, crtežom ili tabelom rezultata. Raspored delova u prozoru nije moguće menjati, ali se njihove veličine mogu povećavati i smanjivati. Moguće je dobiti i iznos apsolutne temperature ili pak provesti relativno merenje. Relativna merenja se odnose na prethodno definisanu referentnu temperaturu i parametre objekta [5].



Slika 5.16. Jedan od mogućih prikaza prozora programa ThermaCAM Researcher [5]

Razlikuje se kvalitativna i kvantitativna analiza termograma. Kvalitativna analiza omogućava da se na termogramu mogu uočiti samo toplija i hladnija mesta, te da se na osnovu poznavanja razmatranog problema može doneti zaključak o mogućim uzrocima tih temperaturnih nehomogenosti. Kvantitativna analiza omogućava da se sa termograma mogu dobiti podaci o visinama temperatura na odabranim tačkama ili segmentima posmatrane površine što je posebno važno kada se razmatra opreme u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom. Tako je moguće dobiti iznose minimalne, maksimalne i prosečne temperature na odabranom delu površine, kao i histogramski prikaz udela pojedinih temperatura (temperaturnih intervala).

i) Automatizacija termografskih kontrola tehničkih sistema primenom fazi logike kao metode veštačke inteligencije

Da bi se nakon izvršenih termografskih snimanja moglo uspešno oceniti stanje nekog tehničkog sistema i doneti odluka o potrebi hitnosti intervencije na njemu potrebno je poznavati ulazne podatke koji se odnose na taj tehnički sistem, kao što su¹¹² [100]:

- starost (životni vek) tehničkog sistema,
- temperature prethodnih pregrevanja,

¹¹² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom procene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.

- temperatura trenutnog pregrevanja (minimalna i maksimalna temperatura na termogramu, u samoj kameri se kao izlazni podatak dobija temperatura toplog mesta ili pregrevanje),
- nazivni napon,
- indeks zagađenja,
- podaci o materijalu tehničkog sistema,
- podaci o proizvođaču tehničkog sistema,
- inventarski i serijski broj, kao i oznaka tipa (kako bi se preko ovih podataka mogao identifikovati tehnički sistem i obezbediti uspešno provođenje koncepcije održavanja prema stanju),
- podaci o predistoriji tehničkog sistema, kao što su:
 - podaci vezani za otkaze (najčešći uzroci otkaza, preduzete aktivnosti itd.) i
 - podaci o najčešćim delovima tehničkih sistema koji otkazuju i zamenjuju se.
- iskustveni podaci o sličnim tehničkim sistemima,
- preporuke proizvođača tehničkih sistema,
- uputstvo za održavanje itd.

Da bi se svi navedeni ulazni podaci mogli uzeti u obzir potrebno je formirati veliku bazu znanja u kojoj će svaki tehnički sistem biti definisan svojim mestom u pogonu i trenutnim stanjem. Pri tome treba znati kako i koliko koji ulazni podatak utiče na izlazne podatke. Zbog toga se koriste samo neki od ovih ulaznih podataka za koje se zna kako i koliko utiču na stanje tehničkog sistema i potrebu hitnosti intervencije na njemu.

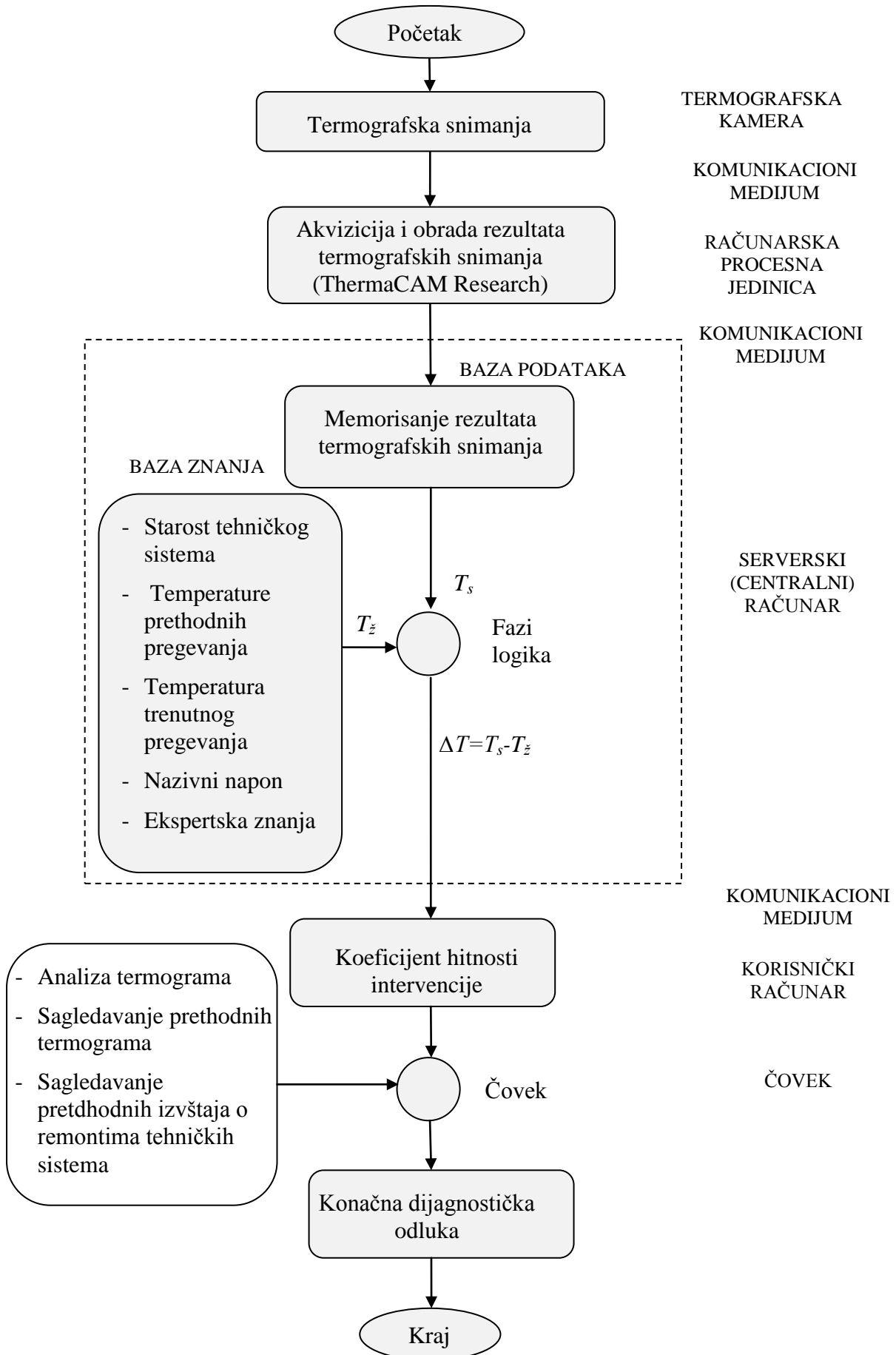
Navedeni ulazni podaci se razmatraju kroz određene kriterijume na osnovu kojih je moguće [100]:

- proceniti trend promene stanja tehničkog sistema,
- napraviti prognozu ponašanja tehničkih sistema u budućnosti,
- blagovremeno alarmirati odgovorno osoblje i
- isključiti tehnički sistem u cilju sprečavanja većih oštećenja ili havarija.

Korišćenjem savremenih metoda veštačke inteligencije stvaraju se mogućnosti da se znatno skрати vreme trajanja termografskih kontrola i poveća tačnost ocene stanja tehničkih sistema. Postoji više metoda veštačke inteligencije koje se mogu koristiti za donošenje dijagnostičkih odluka, kao što su: ekspertske sistemi, fazi logika (fuzzy logic), neuronske mreže, sistemi bazirani na znanju KBS (knowledge based system), zaključivanje bazirano na slučaju CBR (case based reasoning), zaključivanje bazirano na modelu MBR (model based reasoning), genetski algoritmi itd. Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke. U većini slučajeva, one ne mogu da rade pojedinačno da bi donele dijagnostičku odluku, već se moraju međusobno dopunjavati kako bi formirale jedinstveni sistem. Primena više metoda nije jednostavna i zahteva posebna znanja iz oblasti razvoja softvera. Zbog toga su ovde razmotrene samo mogućnosti primene fazi logike, koja na osnovu temperature trenutnog pregrevanja i osobina kontrolisanih tehničkih sistema (starosti tehničkog sistema, temperature prethodnog pregrevanja i naponskog nivoa) vrši ocenu stanja i utvrđuje potrebu hitnosti intervencije (vremenski rok za remont) na tehničkom sistemu.

Fazi logika omogućava primenu ekspertske znanja i iskustava stručnjaka iz oblasti termografije. Korišćenjem fazi logike izbegava se potreba za angažovanjem visokoobučeni i iskusni dijagnostičari, koji nisu uvek na raspolaganju kada treba rešiti neki problem, a i kada jesu njihove usluge mogu biti skupe. Pored toga korišćenjem fazi logike obezbeđuje se da se dijagnostičke kontrole obavljavaju brzinom i tačnošću, i pored velikog broja podataka koje treba obraditi (posebno kada je potrebno često ili neprekidno pratiti više dijagnostičkih parametara), što dijagnostičari najčešće nisu u stanju.

Celi postupak automatizacije termografskih kontrola primenom fazi logike kao metode veštačke inteligencije, koja koristi bazu znanja, se provodi prema predloženom sopstvenom algoritmu, koji je prikazan na slici 5.17

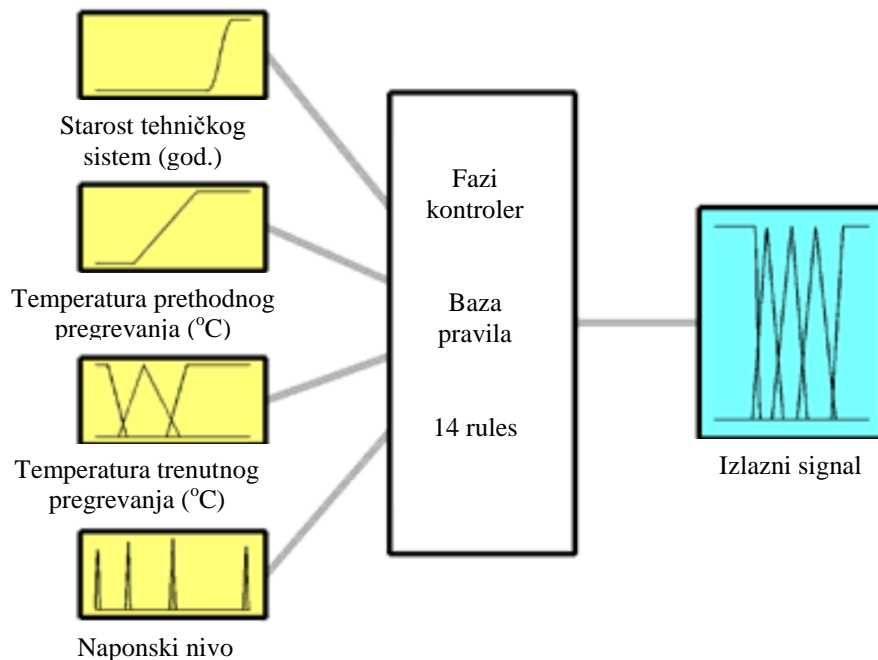


Slika 5.17. Predlog sopstvenog algoritma za automatizaciju termografskih kontrola fazi logikom kao metodom veštačke inteligencije

ii) Projektovanje fazi kontrolera u programskom paketu Matlab/Simulink

Fazi logika se realizuje u programskom paketu Matlab/Simulink u kome se projektuje fazi kontroler prikazan na slici 5.18. Iz postojeće baze znanja kao ulazni podaci (signali), koji se odnose na kontrolisani tehnički sistem, u fazi kontroler, unose se¹¹³ [83]:

- starost (životni vek) tehničkog sistema,
- temperature prethodnih pregrevanja,
- temperatura trenutnog pregrevanja i
- naponski nivo.



Slika 5.18. Fazi kontroler projektovan u programskom paketu Matlab/Simulink [83]

Kao izlazni podatak (signal) iz fazi kontrolera dobija se koeficijent hitnosti intervencije (čija vrednost je iz intervala $[0,1]$), koji govori o stanju (stepenu neispravnosti) kontrolisanog tehničkog sistema (temperaturi toplog mesta - mesta pregrevanja) i o potrebi hitnosti intervencije (verovatnoći otkaza posmatranog tehničkog sistema) na njemu. Što je vrednost ovog koeficijenta (izlaznog podatka) veća, bliža jedinici, to je neispravnost kontrolisanog tehničkog sistema veća i potrebna je hitnija intervencija [94].

Fazifikacija je jedna od operacija koja se izvodi u fazi kontroleru. Fazifikacija naprosto modifikuje ulazne signale tako da mogu biti pravilno protumačeni i upoređeni sa pravilima u bazi pravila. Ulazni signali se pretvaraju u adekvatne fazi oblike. Ovo omogućavaju funkcije pripadnosti, koje ustvari mapiraju stepen istinitosti neke tvrdnje [83].

Funkcije pripadnosti određuju stepen pripadnosti nekog objekta datom fazi skupu A . Jedino što funkcije pripadnosti moraju da ispune jeste da budu skalirane i da uzimaju vrednosti od 0 do 1. Funkcije pripadnosti mogu da imaju različite oblike. Kakvog će oblika biti funkcija pripadnosti zavisi od vrste i ponašanja sistema. Ako funkciju pripadnosti označimo sa $\mu_A(x)$, onda je fazi skup A nad prostorom definisan kao [94, 205]:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in X\} \quad (5.11)$$

gde je:

¹¹³ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka o stanjima mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 33-40.

$\mu_A(x)$ - funkcija pripadnosti koja mapira stepen pripadnosti elementa x fazi skupu A

Na ovaj način se uvodi neodređenost, koja potiče od osobine ljudi da stvari ne posmatraju na egzaktan, određeni način. Svaki element x fazi skupa A ima stepen pripadnosti tom skupu koji se kreće između 0 i 1.

Funkcije pripadnosti mogu biti uniformnog oblika i parametarske, odnosno funkcionalne definicije. Najčešće se koriste funkcije trougaonog, trapezoidnog i zvonastog oblika [83].

Baza pravila sadrži znanje o tome kako na najbolji način kontrolisati sistem, i to u formi skupa logičkih "if-then" pravila. **Interfejs** je mehanizam za procenjivanje koja kontrolna pravila su relevantna za trenutno stanje tehničkog sistema i odlučuje logičkim sklopom kakav će biti upravljački, tj. izlazni signal. Pretpostavlja se da je opisan najbolji način za upravljanje sistemom i to rečenicama, na nekom od jezika (npr. srpskom). Zadatak je da se pronađe način kako da se ovo „lingvističko" znanje o nekom tehničkom sistemu unese u fazi kontroler. Cilj fazi kontrolera je da fazi logikom mapira preslikavanje njegovih ulaznih u izlazne signale. Primarni mehanizam za to je lista "if-then" tvrdnji koje se nazivaju pravilima. Sva pravila se izvršavaju paralelno i njihov redosled nije bitan. Ovakva lista pravila se naziva baza pravila (rule base). Pravila se odnose na lingvističke promenjive i na njihove osobine.

Ako su prethodno definisani svi termini i sve osobine koje definišu te termine, tj. promenjive, može se pristupiti projektovanju sistema koji interpretira pravila. Da bi se izrazile posledice koje proizvode trenutne vrednosti ulaznih promenljivih formira se skup pravila. Ova pravila imaju oblik¹¹⁴ [86]:

$$\text{if } \langle \text{uslov} \rangle \text{ then } \langle \text{posledica} \rangle \quad (5.12)$$

s tim što je moguće imati više paralelnih "if" pravila koja se povezuju veznicima "and", "or" i "not", tako da se pomoću njih mogu graditi složene tvrdnje. Ovi veznici se odnose na operacije preseka, unije i komplementa u klasičnoj teoriji skupova.

Primer najjednostavnijeg pravila koje je formirano da bi se dobio dijagnostički zaključak nakon sprovedenih termografskih snimanja nekog tehničkog sistema je:

„Ako je tehnički sistem star, pri kraju radnog veka, ako je bilo prethodnih pregrevanja - temperatura prethodnog pregrevanja iznosila je 23°C, ako je temperatura trenutnog pregrevanja 30°C i ako je naponski nivo visok 400 kV onda je potrebna hitna intervencija".

Ovo pravilo ima oblik:

„If (životni vek tehničkog sistema is star) and (prethodno pregrevanje is da) and (temperatura trenutnog pregrevanja is visoka) and (naponski nivo is 400 kV) then (hitnost intervencije is hitno)".

Ovo je samo jedno od više pravila koja su formirana i ona su uglavnom zasnovana na iskustvima termografičara. Funkcionalna fazi logika mora da sadrži više od jednog fazi lingvističkog pravila. Kombinovanjem ovih pravila (poznatih kao agregacija), dobija se kompaktna matematička predstava o celokupnoj bazi znanja. U zavisnosti od tipa implikacije koja je korišćena, agregacija se svodi na neku od osnovnih logičkih operacija (konjunkciju ili disjunkciju).

Defazifikacija, koja je poslednja operacija koja se izvodi u fazi kontroleru, transformiše zaključak interfejsa u takav oblik signala da on može biti signal koji predstavlja izlaz. Defazifikacija predstavlja u suštini operaciju suprotnu operaciji fazifikacije pa se naziva i dekodiranje. Ovo je ustvari operacija koja treba da pretvori rezultat agregacije, koji u osnovi predstavlja presek površi, u signal koji je razumljiv. Izlaz kontrolera mora da ima samo jednu vrednost, najčešće predstavljenu realnim brojem. Metode koje se najčešće koriste za defazifikaciju su: centar površi (gravitacije), centar suma, centar najveće površi, prvi maksimum, srednji maksimum i visinska defazifikacija [86].

¹¹⁴ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Automatizacija termografskih dijagnostičkih kontrola elektroenergetskih postrojenja primenom fazi logike kao metode veštačke inteligencije, Drugi naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.

Kada se utvrde sve operacije koje će se primenjivati (operacija fazifikacije, logičke operacije, operacija defazifikacije) može se za svaku kombinaciju dve ulazne promenjive, kao izlaz dobiti grafik trodimenzionalnih površina.

5.1.13.2 Razrada metode analize frekvencijskog spektra vibracija

1. Osnovni pojmovi o metodi analize frekvencijskog spektra vibracija

Veliki deo otkaza mašina manifestuje se povećanjem nivoa vibracija mašina ili pojedinih njihovih delova. U slučaju mnogih neispravnosti vibracije mogu biti iskorišćene kao njihov pouzdan pokazatelj. Merenjem vibracija mogu se detektovati otkazi ležaja, otkazi rotorskog kaveza i niz drugih otkaza električnih mašina. Zbog činjenice da se većina otkaza manifestuje i kroz povećanje vibracija, za interpretaciju rezultata merenja vibracija i donošenje zaključaka o mogućem uzroku važno je iskustvo osobe koja vrši dijagnostiku.

Prednost vibracione dijagnostike je u tome što se ispitivanja izvode u pogonskim uslovima, bez zaustavljanja pogona (on-line metoda). Ugradnja senzora je jednostavna (izrada provrta s odgovarajućim navojem). Kao i većina dijagnostičkih metoda i ova metoda zahteva veliko iskustvo i relativno složenu mernu opremu¹¹⁵ [181].

Program održavanja i kontrole rada opreme na bazi vibracija zasniva se na činjenicama da:

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

Zbog toga:

- periodične i neprekidne kontrole vibracija i buke omogućavaju da se detektuje postojanje neispravnosti, i
- analize frekvencijskog spektra vibracija i buke omogućava da se detektuje koji deo sistema je neispravan i zbog čega.

Osnovni postupci vibrodijagnostičkih kontrola prikazani su na slici 5.19.

Za efikasno korišćenje ovih činjenica neophodan je program kontrole vibracija i buke na svim tehničkim sistemima. Tako se postiže detekcija neispravnosti u ranim stadijumima. Kad se detektuje neispravnost, primenjuje se analiza vibracija i buke radi određivanja korektivnih i preventivnih aktivnosti održavanja.

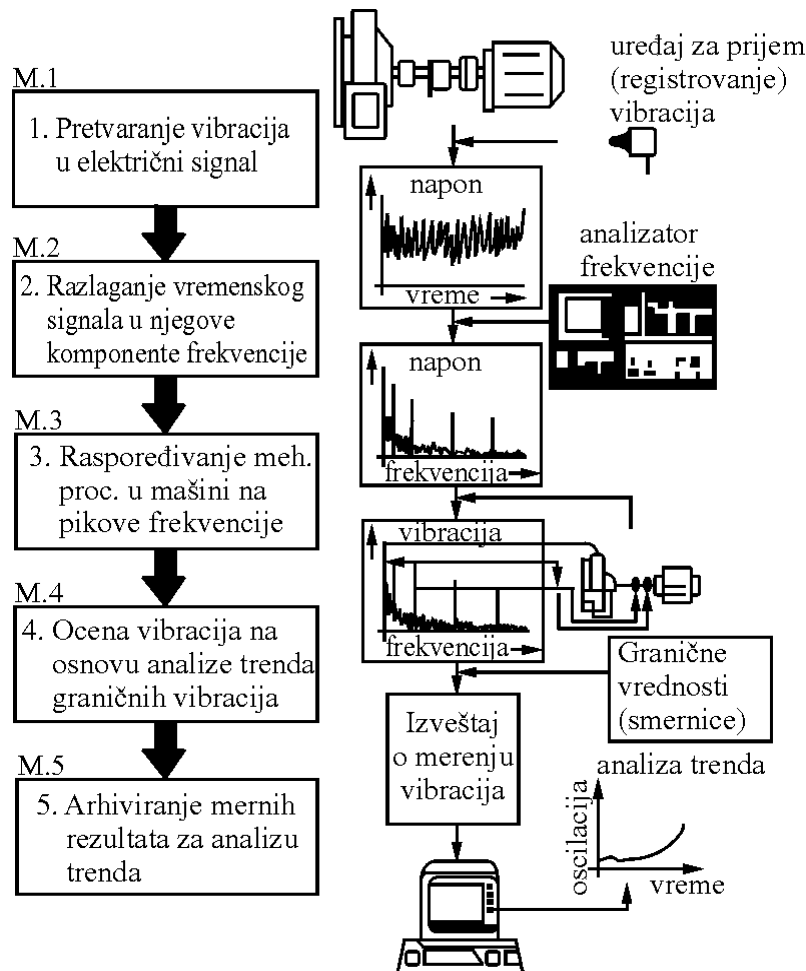
Program održavanja na bazi vibracija i buke zahteva poznavanje dve važne stvari. Prvo, a to je ono što održavaoci već poseduju, jeste poznavanje načina funkcionisanja tehničkih sistema i poteškoća koje su karakteristične za te tehničke sisteme, kao i načina kako ih otkloniti. Drugo, to je upravo sposobnost da se neispravnosti potpuno tačno i u svom ranom toku razvoja raspoznaju i utvrde. Merenje i analiza vibracija i buke predstavljaju ključ za obezbeđenje ovih zahteva.

Može se, u principu, izdvojiti sedam osnovnih postupaka za funkcionisanje programa održavanja na bazi vibracija i buke. To su sledeći postupci [2]:

- popis tehničkih sistema koje treba obuhvatiti programom održavanja (prvenstveno tehničkih sistema koji su kritični za proizvodnju),
- definisanje dozvoljenih nivoa vibracije i buke na tehničkim sistemima,

¹¹⁵ Savić, B., Stanković, N., Analiza vibracija elektromotora u radu i preduzimanje mera u cilju njihovog umanjavanja i otklanjanja, Savetovanje - Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, maj 2005.

- definisanje ispravnog stanja i nivoa vibracija i buke za svaki tehnički sistem,
- definisanje mernih tačaka na tehničkim sistemima za periodičnu i kontinualnu kontrolu vibracija i buke,
- definisanje učestalosti (na bazi trenutnog stanja) izvođenja periodičnih kontrola vibracija i buke,
- definisanje informacionog sistema za registrovanje podataka i njegovo uvođenje u primenu,
- obuka specijalista za provođenje programa održavanja na bazi vibracija i buke itd.



Slika 5.19. Osnovni postupci vobrodijagnostičkih kontrola¹¹⁶ [2]

a) Vibracije kao parametar stanja

U poslednje vreme razvijena je potpuno nova tehnologija merenja vibracija i zvuka koji zbog svog generisanog sadržaja predstavljaju jedan od najznačajnijih indikativnih pokazatelja sveukupnog dinamičkog stanja mašine, ili pojedinih njenih sastavnih delova. Ova tehnologija može rešiti veliki broj problema na mašinama i postrojenjima.

Celokupan dijagnostički pristup polazi od činjenice da svaki poremećajni uzročnik generiše vibracije tačno određenog karaktera, prepoznatljive, pre svega, po frekvenciji kao ključnom parametru. Pri tome, identifikacija dominantnih parcijalnih komponenti, registrovanih u području vremenskog ili frekvencijskog domena, bazirana je na korišćenju asimiliranog znanja i iskustva o specifičnim karakteristikama potencijalne slike vibracija pokretnih, najčešće rotirajućih, mašinskih delova. Za mnoštvo vitalnih rotirajućih mašinskih delova pored osnovne frekvencije i njenih viših harmonika, egzaktnim matematičkim

¹¹⁶ Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana: Pouzdano održavanje termoelektrana, hidroelektrana, solarnih elektrana, vetroelektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku – Adam institut, Smederevo, 2014.

putem definisan je niz prinudnih i sopstvenih frekvencija kojima mogu odgovarati i dominantne komponente u snimljenim spektrima.

Mehaničkim vibracijama, u opštem slučaju, podrazumevamo oscilatorno kretanje krutog tela u odnosu na njegov ravnotežni položaj. Uzročnik kretanja je poremećajna prinudna sila (prinudne vibracije) koja po svojoj prirodi može biti determinisana ili slučajna. Slobodnim vibracijama nazivamo periodično kretanje koje telo izvodi po prestanku delovanja poremećajne sile.

U svim ovim slučajevima se opšti karakter kretanja može izraziti harmonijskom vremenskom funkcijom, a kao osnovni parametri za njenu identifikaciju, pored frekvencije vibracija (broj ciklusa u jedinici vremena), alternativno se može izabrati i jedna od veličina kao što su amplituda pomeraja, brzina i ubrzanje vibracija. Pored analitičkog izražavanja, vibracije se mogu prikazati i grafički. U praksi su zapisi vibracija daleko složeniji. U najvećem broju slučajeva sreće se složeno oscilovanje, dobijeno superpozicijom dveju ili više elementarnih vibracija sa različitim intenzitetima i različitim frekvencijama.

Vibracije se dele na aksijalne i radijalne. Aksijalne vibracije su vibracije duž ose vratila, a radijalne vibracije su vibracije normalne na osu vratila. Radijalne vibracije mašina sa horizontalnim rotorom se dele na horizontalne i vertikalne.

b) Merenje i analiza vibracija

U današnje vreme **merenje vibracija** jedna od najvažnijih dijagnostičkih metoda u pogonima. Karakteristični parametri vibracija, koji se mogu meriti su [3]:

- perioda vibracija T , u s
- frekvencija vibracija $f=1/T$, u Hz
- pomeraj vibracija x , u mm
- brzina vibracija v , u mm/s
- ubrzanje vibracija a , u mm/s^2
- faza vibracija φ , u $^\circ$ ili rad i
- vektor vibracija.

Značaj izmernih parametara vibracija je u tome što se oni mogu iskoristiti za dijagnostiku stanja i opisivanje neželjenog stanja sastavnih delova sistema.

Često se frekvencija vibracija izražava relativno u odnosu na frekvenciju rotacije (obrtnja rotora) motora. Frekvencija rotacije (obrtnja rotora) f_r se računa po obrascu:

$$f_r = \text{RPM}/60, \text{ Hz} \quad (5.13)$$

gde je RPM - brzina obrtnja rotora, u o/min

Na primer, ukoliko je brzina obrtnja rotora $\text{RPM}=1470$ o/min, tada je frekvencija rotacije (obrtnja rotora) $f_r = \text{RPM}/60 = 1470/60 = 24,5$ Hz. Ako se frekvencija vibracija izražava relativno, u tom slučaju za frekvenciju 24,5 Hz se koristi oznaka $1 \times f_r$ (jednostruki iznos frekvencije rotacij), dok se za frekvenciju 49 Hz koristi oznaka $2 \times f_r$ (dvostruki iznos frekvencije rotacije). Relativno izražavanje frekvencije pogodnije je kod mašina s velikim brojem obrtaja, jer je jednostavniji postupak upoređivanja rezultata različitih merenja vibracija.

Može se vršiti merenje amplitude pomeraja vibracija od pozitivne do negativne vršne vrednosti (pika) P-P (peak-to-peak), u tom slučaju meri se ukupni hod krutog tela. Međutim, najčešće se meri efektivna (srednja kvadratna) vrednost pomeraja RMS vibracija, koja predstavlja isto što predstavlja i efektivna vrednost mrežnog napona napajanja $U=230$ V, dok amplituda (vršna vrednost) mrežnog napona napajanja iznosi $U_{\text{peak}}=325,27$ V. U idealnom slučaju efektivna vrednost pomeraja se računa po obrascu [3]:

$$\text{RMS} = \text{Peak}/\sqrt{2} = 0,707 \cdot \text{Peak} \quad (5.14)$$

I kod brzine vibracija treba obratiti pažnju na to da li se vrši merenje vršnih vrednosti (peakova) ili nivoa (efektivnih vrednosti brzine) vibracija *RMS*.

Umesto u mm/s nivo vibracija (efektivna vrednost brzine) se može izraziti i u dB, prema relaciji¹¹⁷ [154]:

$$v_{dB}=20 \cdot \log v, \text{ dB} \quad (5.15)$$

Takođe, odnos nivoa (efektivnih vrednosti brzina) dodatnog i osnovnog harmonika vibracija se može izraziti u dB prema relaciji:

$$V_{dB}=20 \cdot \log(v_d/v_o), \text{ dB} \quad (5.16)$$

Na primer ako efektivna vrednost brzine dodatnog harmonika iznosi $v_d=7,9$ mm/s, a osnovnog harmonika vibracija iznosi $v_o=10^{-6}$ mm/s, onda se dobija da je [3]:

$$V_{dB}=20 \cdot \log(v_d/v_o)=20 \cdot \log(7,9/10^{-6})=138 \text{ dB} \quad (5.17)$$

Vektor vibracija je parametar koji u sebi sadrži podatak o brzini i fazi vibracija.

Najčešće mereni parametri vibracija su frekvencija osnovne vibracije (prvog harmonika), frekvencije viših harmonika, te pomeraj, brzina i ubrzanje tela uzrokovanih vibracijama. Vrednosti pomeraja i ubrzanja se ponekad koriste za utvrđivanje nivoa vibracija. Međutim, i tada je neophodno znati frekvenciju vibracija. Često se za povezivanje odnosa pomeraja ili ubrzanja sa frekvencijom, radi utvrđivanja nivoa vibracija, koriste posebno napravljeni dijagrami od strane proizvođača uređaja za vibracije.

Sa mernih mesta mašina, najčešće sa ležajeva, snima se frekvenzijski spektar vibracija i vremenski zapis po potrebi pri normalnom radu. Izmereni signal vibracija sadrži informacije o stanju mašine, koje je daljom obradom moguće rekonstruirati. Snimljeni signal najčešće se posmatra u frekvenzijskom domenu (obrada FFT-om). Važno je uzeti u obzir da svaka mašina ima vlastiti karakteristični frekvenzijski spektar vibracija. Analizom i vrednovanjem tih snimaka ocenjuje se stanje mašine i mehanička oštećenja, ako postoje. Identifikacija neispravnosti mašina utvrđuje se na osnovu dominantnih frekvencija na frekvenzijskim snimcima i na osnovu nejednakosti na vremenskim zapisima. Poznato je da svaka neispravnost uzrokuje vibracije na tačno određenoj frekvenciji. Amplituda pomeraja ili nivo (efektivna vrednost brzine) vibracija *RMS*, koji pripadaju datoj frekvenciji, proporcionalni su stepenu neispravnosti. Da bi se signal vibracija mogao iskoristiti kao dijagnostička veličina, važno je merenja obavljati u pravilnim vremenskim intervalima, a svaka promena spektra može upućivati na neispravno stanje. Prema tome, snimanjem amplitudno-frekvenzijskih karakteristika vibracija može se utvrditi:

- stepen neispravnosti (na osnovu amplituda pomeraja ili nivoa (efektivnih vrednosti brzine) vibracija *RMS* koje pripadaju datoj frekvenciji) i
- uzrok neispravnosti (na osnovu frekvencije vibracija).

Kod asinhronih motora vibracije su periodične vremenske funkcije, što znači da se mogu rastaviti na harmonijske (sinusne) funkcije. Za svaki harmonik moguće je odrediti amplitudu pomeraja izraženu u μm i fazu pomeraja izraženu u stepenima ($^\circ$) u odnosu na referentnu tačku.

U praksi se kao mera nivoa vibracija ne koristi amplituda pomeraja, već efektivna vrednost brzine vibracija izražena u mm/s. Vremenski dijagram brzine vibracija predstavlja prvi izvod vremenskog dijagrama pomeraja vibracija. Iz ovog proizlazi da će u talasnom obliku brzine vibracija biti naglašene brze vibracije, a kada se izračuna efektivna vrednost brzine vibracija dobija se veličina u kojoj je sumiran uticaj svih harmonijskih članova.

Merenja ubrzanja vibracija su tesno povezana sa inercionim silama koje deluju na sistem, pri čemu se mogu javiti relativno velike sile pri visokim frekvencijama, mada pomeraj i brzina vibracija mogu da budu mali. Prekomerna sila može rezultirati u prekidu podmazivanja, a zatim može doći do oštećenja površine ležaja. Uglavnom, merenja ubrzanja vibracija se preporučuju za frekvencije vibracija iznad 60.000 ciklusa u minuti, mada se mogu koristiti i merenja brzine.

¹¹⁷ Novinc, Ž., Halep, A., Tehnička dijagnostika i monitoring u industriji, Kigen, Zagreb 2010.

Osim toga, pri ocenjivanju nivoa vibracija treba meriti i fazu, koja omogućava primenu pogodnijeg načina za upoređivanje jednog kretanja sa drugim. Upoređivanje relativnog kretanja dva ili više delova sistema, često je bitno kod dijagnosticiranja specifičnih neispravnosti na sastavnim delovima sistema. Na primer, ako se analizom otkrije da se vibracije nekog dela sistema nalaze izvan faze sa postoljem ili fundamentom, odnosno njihovim apsolutnim vibracijama, moraju se proveriti labavost vijaka, zalivanje betona i dr. Merenje faze je važno i za balansiranje (uravnotežavanje masa). Ako je problem dela sistema debalans, pri čemu se može meriti faza, onda možemo u tom slučaju izvršiti balansiranje dela (primer balansiranja točkova automobila).

Na tržištu postoji veliki izbor opreme za merenje vibracija, kojom je moguće provesti frekvencijsku analizu vibracija. Vibracije se registruju analognim putem – pretvaranjem mehaničkih pomeraja u analogne električne signale (strujne ili naponske). Instrumentalni set, prilagođen upotrebi u pogonskim uslovima, se sastoji od pretvarača, mernog instrumenta sa pojačavačem i filtera. Konfiguracija omogućava merenje sva tri karakteristična oblika vibracija (sekcija pretpojačavača objedinjuje i sekciju integratora).

Senzori vibracija mogu da budu kontaktni i beskontaktni, pri čemu prvi mere apsolutne, a drugi relativne vibracije. Osim toga, na njihov izbor utiče i odnos snage izvornog signala i provodljivost veza do mernog mesta. Kontaktni senzori mogu meriti ubrzanje vibracija (piezoelektrični), brzinu (induktivni) i pomeraj (seizmički). Beskontaktni senzori se uglavnom izvode na induktivnom ili kapacitativnom principu.

Vibracije sastavnih delova sistema su kompleksne i sastoje se od više frekvencija. Uglavnom, ukupni ili totalni pomeraj biće zbir svih pojedinačnih pomeraja vibracija. Tamo gde je vibracija kompleksna, da bismo primenili pomeraj na dijagram nivoa vibracija, treba najpre utvrditi pojedinačne pomeraje i njihove frekvencije. To se vrši uz pomoć analizera vibracija sa podesivim filterom.

Signal vibracija snimljen na nekom karakterističnom mernom mestu mašine je suma velikog broja manje ili više izraženih individualnih izvora, i po pravilu sadrži u sebi dosta kompleksnog sadržaja.

Analiza vibracije vrši se kada periodične kontrole ukupnih vibracija ili buke na tehničkim sistemima otkriju njihovo značajno povećanje. Ova analiza treba takođe, da se izvrši na početku izvođenja programa održavanja, kako bi se utvrdilo tehničko stanje sistema.

Postupak analize može se podeliti u dve faze:

- prikupljanje podataka i
- interpretacija i obrada podataka (upoređivanje registrovanih podataka sa baznim podacima o stanju sastavnih delova sistema).

i) Prikupljanje podataka

Nivo upotrebljivosti izmerenih rezultata dosta zavisi od obima preduzetih pripremnih aktivnosti i sprovedene metodologije merenja. Izbor reprezentne veličine stanja, izbor broja i rasporeda mernih mesta, izbor konfiguracije merne opreme zadovoljavajućeg frekvencijskog i dinamičnog dijapazona, izbor filtera optimalnih karakteristika – samo su neki od najznačajnijih elemenata vrlo značajnog procesa pripreme.

Danas skoro svaki merni instrument ima mogućnost izražavanja amplitude, preko neke od fizičkih veličina stanja: pomeraj, brzina, ubrzanje. Ove veličine ne mogu biti generalno preporučene, već izbor svake veličine zavisi od slučaja do slučaja. Ipak najviše je u upotrebi brzina vibracija, s obzirom da u sebi istovremeno sadrži linearnu meru amplitude i frekvencije. Za uprošćavanje registrovanih i analitičkih podataka može se koristiti „karta merenja vibracija i buke“ („karta trenda“) [3]. Pored informacija koje su potrebne za označavanje (skica) sistema i položaj senzora i mikrofona, treba obuhvatiti i dodatne informacije kao što su: podaci o ozubljenju, broj lopatica ventilatora, broj krilaca na radnom kolu pumpe i dr. Ponekad je potrebno prikazati i položaj cevovoda, kanala, zidova zgrada i sl. Kod uslova ispitivanja treba obuhvatiti: brzinu, opterećenje, temperaturu, protok itd.

ii) Interpretacija podataka

Posle korišćenja metoda za dobijanje potrebnih podataka za analizu vibracija i buke, sledi ispitivanje registrovanih podataka i utvrđivanje značajnih vrednosti za frekvenciju vibracija koja je utvrđena. Obično

se letimično pogleda svaka kolona sa podacima o frekvenciji i zaokruži jedna, dve ili tri najznačajnije vrednosti amplitude. Frekvencije se upoređuju na osnovu brzine obrtanja u sistemu. Ako je frekvencija vibracija ili buke direktno povezana sa brojem obrtaja mašine, onda treba upotrebiti stroboskopsku lampu.

Postoji mnogo kriterijuma pomoću kojih se jedno utvrđeno dinamičko stanje mašinskog sistema može deklarirati kao stabilno ili nestabilno, odnosno, kao dobro ili loše. Zajednička osobina svih ovih prilaza, zasnovanih najčešće na upoređivanju odnosa fizičkih veličina izlaza (npr. buke ili vibracija) i ulaza (npr. sile ili momenta) jednog mašinskog sistema – u funkciji frekvencije, svakako je zavisnost od usvojenih teorijskih modela. Razumljivo da im otuda, i praktična primenljivost ostaje ograničena, bilo da pretpostavljaju komplikovan metodološki postupak, bilo da postavljeni modeli ne mogu dovoljno verno interpretirati osobine realnog mašinskog sistema.

Analiza vibracija pokazuje, međutim, da se uočljive promene kod snimljenih signala manifestuju isključivo na karakterističnim delovima frekvencijskog spektra, tj. u očekivanim frekvencijskim područjima koja odgovaraju sopstvenim i/ili prinudnim vibracijama. Odavde se izvodi zaključak da za uspešno praćenje i ocenu stanja i nije potrebna stalna obrada signala u kompletnom frekvencijskom opsegu, već da je sasvim dovoljno, obratiti pažnju na ograničen broj izabranih frekvencijskih područja i pratiti nivo signala po njima.

Složeni rotacioni sistemi zahtevaju svakako, daleko veći broj vitalnih tačaka čije ponašanje stalno, ili povremeno treba pratiti. Dijagnostički sistem koji bi bio postavljen na klasičan način, nesumljivo, bi bio glomazan i nedovoljno pregledan. Stoga se rešenje zadatka traži u pravca angažovanja složenije opreme za akviziciju i obradu podataka. Inteligentni "data loggeri", predstavljaju samo početnu etapu ka stvaranju snažnih centralizovanih računarskih sistema, čiji bi brzi procesori ne samo pratili, već isto tako automatski identifikovali stanje, prognozirali njegovu dalju promenu i donosili merodavne odluke od značaja za održavanje.

U signalu vibracija snimljenom na površini mašinskog dela (sklopa) prisutni su tragovi mnogih individualnih signala generisanih na mestima neželjenog transformisanja dela korisne energije u energiju vibriranja. Radi identifikovanja takvih izvora nedovoljno je izvoditi samo upoređivanje ukupnog nivoa vibracije, već treba izvesti pažljivo raščlanjivanje na sastavne delove i proceniti parcijalno udeo svakog dela. Postupak frekvencijskog razlučivanja naziva se frekvencijska analiza, a kao njen krajnji rezultat dobija se frekvencijski spektar. To se postiže filtriranjem signala vremenskog zapisa vibracija u instrumentu zvanom analizer.

c) Uzroci nastanka vibracija

Uzrok vibracija mora da bude sila koja se menja ili prema svom pravcu ili prema svojoj veličini. Svaki uzrok vibracija ima svoje karakteristike. Svaki pojedinačni izvor generiše vibracije.

U uzroke, koji utiču na pojavu vibracija spadaju [94]: neuravnoteženost (debalans) masa rotacionih delova sistema, nesaosnost (necentriranost) pogonske i gonjene mašine, labavost (nedovoljna dinamička krutost kućišta i temelja sistema), loše podmazivanje, ugib vratila (mehanička „popustljivost”), nejednak zazor između rotora i statora motora (ili generatora), oštećeni kotrljajni i klizni ležajevi, pohabani, ekscentrični ili oštećeni zupčnici, oštećeni pogonski kaiševi i lanci, odstupanja obrtnog momenta, elektromagnetne sile, aerodinamičke sile, hidrauličke sile, „prolazak” kroz rezonansu, zaribavanje (mehaničko dodirivanje), zatupljen rezni alat i dr. U vibrodijagnostici se često spominje pojam „velike trojke“ (engl. big three) zbog činjenice da su tri defekta: neravnoteža (debalans), nesaosnost i labavost, tri najčešća uzroka povećanih nivoa vibracija mašina. Štetne posledice vibracija su: opterećenje ležajeva i njihovo brzo trošenje, povećan zamor materijala i znatno skraćivanje životnog veka mašine, povećana potrošnja energije, štetno delovanje na okolinu kroz povećanu buku itd.

2. Kriterijumi za ocenu stanja mašina na osnovu nivoa vibracija

Praćenje (ocena) stanja mašina uglavnom se vrši na osnovu nivoa (efektivnih vrednosti brzine) vibracija RMS i envelope ubrzanja vibracija gE , mm/s^2 prema standardu ISO 10816-1:1995/Amd 1:2009.

Da bi se ocenilo stanje mašina na osnovu nivoa vibracija, moraju se poznavati dozvoljeni nivoi vibracija. Dozvoljene nivoie vibracija propisuju proizvođači mašina, a ako ih nisu propisali proizvođači

onda treba koristiti postojeće standarde ili metodom poređenja sličnih mašina sami možemo definisati limite (dozvoljene nivoe vibracija), što svakako treba izbegavati. Kanadskim nacionalnim standardom CDA/MS/NVSH 107 precizno su utvrđeni dozvoljeni nivoi (efektivne vrednosti brzina) vibracija *RMS* za određene vrste mašina, tabela 5.8.

Tabela 5.8. Kriterijumi za ocenu stanja mašina na osnovu precizno definisanih nivoa (efektivnih vrednosti brzina) vibracija *RMS* (mm/s) za određene vrste mašina, koji su utvrđeni Kanadskim nacionalnim standardom CDA/MS/NVSH 107¹¹⁸ [154]

Vrsta mašine	Podaci o mašini	Nivo (efektivna vrednost brzine) vibracija <i>RMS</i> , mm/s			
		Dobro (Dugi vek mašine)	Zadovoljava (Kratki vek mašine)	Nezadovoljava (Upozorenje)	Nedozvoljeno (Odmah popraviti)
Gasne turbine	preko 14,7 MW	7,9	18	18	32
	3,7 MW do 14,7 MW	2,5	5,6	10	18
	ispod 3,7 MW	0,79	3,2	5,6	10
Pame turbine	preko 14,7 MW	1,8	18	18	32
	3,7 MW do 14,7 MW	1,0	5,6	18	32
	ispod 3,7 MW	0,56	3,2	10	18
Kompresori	klipni	10	32	32	56
	visoki pritisak vazduha	4,5	10	10	18
	niski pritisak vazduha	1,4	5,6	10	18
	hlađenje	0,56	5,6	10	18
Dizel generatori		1,4	10	18	32
Centrifuge i uljni separatori		1,4	10	18	32
Reduktori	preko 7,3 MW	1,0	10	18	32
	7,35 kW do 7,3 MW	0,56	5,6	18	32
	do 7,35 kW	0,32	3,2	10	18
Kotlovi		1,0	3,2	5,6	10
Agregati		1,0	3,2	5,6	10
Pumpe	preko 3,5 kW	1,4	5,6	10	18
	do 3,5 kW	0,79	3,2	5,6	10
Ventilatori	do 1800 o/min	1,0	3,2	5,6	10
	preko 1800 o/min	0,56	3,2	5,6	10
Elektromotori	preko 3,5 kW ili do 1200 o/min	0,25	1,8	3,2	5,6
	do 3,5 kW ili preko 1200 o/min	0,14	1,8	3,2	5,6
Transformatori	preko 1 kVA	0,14	-	0,56	1,0
	1 kVA ili manje	0,1	-	0,32	0,56

¹¹⁸ Novinc, Ž., Halep, A., Tehnička dijagnostika i monitoring u industriji, Kigen, Zagreb 2010.

Redovnim merenjem nivoa vibracija može se uočiti trend degradacije mašine pa treba na vreme preduzeti odgovarajuće aktivnosti održavanja. Međutim, praćenje trenda mogu omesti npr. vibracije koje preko temelja (tla) dolaze sa drugih mašina, koje se povremeno uključuju. U tom slučaju tokom dijagnosticiranja obavezno treba izmeriti nivo vibracija na temelju (postolju) mašine, kako bi se saznao podatak o nivou smetnji.

3. Kriterijumi za utvrđivanje uzroka otkaza na osnovu frekvencije vibracija

Ako su nivoi vibracija iznad dozvojenih vrednosti, pre nego što se pristupi otklanjanju otkaza potrebno je ustanoviti uzrok povećanja nivoa vibracija.

Kada se sumnja da je uzrok otkaza električne prirode, potrebno je mašinu dovesti (zavrteti) do nominalnog broja obrtaja, a zatim isključiti napajanje. Ako vibracije odmah padnu uzrok otkaza je električne prirode.

Na osnovu frekvencije vibracija moguće je utvrditi uzrok neispravnosti, jer različite neispravnosti na sastavnim delovima sistema uzrokuju vibracije različitih frekvencija, što omogućava da identifikujemo uzrok neispravnosti. Frekvencija vibracija (ako je poznata) pomaže nam da identifikujemo koji je deo sistema neispravan i da ukaže na vrstu problema. Dobijene vibracije će imati frekvenciju koja zavisi od brzine rotiranja dela sistema koji je neispravan ili ima smetnje. Dakle, merenjem i analizom vibracija ležajeva motora može se doneti zaključak o tehničkom stanju motora, tj. moguće je u frekventijskom spektru vibracija prepoznati neispravnosti, kao što su¹¹⁹ [77]:

- neuravnoteženost (debalans) rotora elektromotora ili radne mašine,
- nesaosnost vratila elektromotora i radne mašine,
- neparalelnost remenice elektromotora i radne mašine,
- mehanička labavost (npr. olabavljena veza između mašine i postolja, odnosno postolja i temelja)
- savijena osovina/vratilo,
- statička i dinamička ekscentričnost,
- oštećenja ležajeva (npr. oštećenja spoljašnjeg ili unutrašnjeg prstena, rotacionog elementa i kaveza kod kotrljajnih ležajeva),
- neispravni zupčanici - problemi kod reduktora (npr. oštećeni zubaci zupčanika, ekscentričnost zupčanika),
- rezonancije (npr. jedna od sopstvenih frekvencija mašine se poklapa sa radnom frekvencijom),
- prekinute lamele
- slomljene šipke kaveza rotora asinhronih motora itd.

Na primer, debalans (neuravnoteženost) nekog rotacionog dela proizvešće harmonika vibracija na frekvenciji rotacije mašine $1 \times f_r$.

S druge strane, mehanička labavost proizvešće vibracije frekvencije dvostruko veće od frekvencije rotacije mašine $2 \times f_r$.

Neispravni kotrljajni ležajevi prouzrokujuće vibracije visoke frekvencije koja zavisi od broja obrtaja, broja kuglica u ležaju, i to nekoliko puta veće od frekvencije obrtanja vratila.

Neispravni zupčanici će takođe prouzrokovati vibracije visoke frekvencije koja je jednaka broju zubaca pomnožene sa frekvencijom obrtaja zupčanika.

Nesaosnost vratila elektromotora i radne mašine proizvešće u frekventijskom spektru brzine vibracija, pored osnovnog harmonika vibracija na frekvenciji rotacije $1 \times f_r$, i dodatne harmonike na

¹¹⁹ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Automatizovana vibroakustička ispitivanja kliznih i kotrljajnih ležajeva, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, pp. 13-24, Smederevo, 2012.

dvostrukoj i trostrukoj frekvenciji rotacije $2 \times f_r$ i $3 \times f_r$ (gde je $f_r = RPM/60$ - frekvencija rotacije, a RPM - broj obrtaja u minuti) naročito izražene u aksijalnom smeru.

Detekcija slomljenih šipki kaveza rotora asinhronih motora na osnovu frekvencije vibracija. – Vibracije koje se pojavljuju u elektromotornim pogonima mogu se podeliti na:

- elektromagnetne, koje zavise od indukcije, frekvencije i oblika napona napajanja, klizanja, vrste mašine i sl.,
- mehaničke vibracije, koje su posledica neuravnoteženosti rotora, oštećenja ležajeva, loših postolja i sl., i
- aerodinamičke, koje su posledica strujanja vazduha oko pokretnih delova mašine.

Aksijalne vibracije nastaju delovanjem pulsirajuće sile u smeru osovine. Uzroci pojave te sile mogu biti elektromagnetnog ili mehaničkog porekla.

Elektromagnetni izazvanih aksijalnih vibracija kod simetrične mašine neće biti. One se pojavljuju kod nesimetrije magnetnog polja u mašini. Jedan od uzroka nastanka nesimetrije magnetnog polja je nesimetrija u rasporedu struja koja može biti uzrokovana oštećenjem šipki rotora. Upravo je ova činjenica iskorišćena kod dijagnostike asinhronih motora bazirane na analizi vibracija. Ovde je važno naglasiti da osnovni harmonijski član sile na obodu uzrokuje vibraciju s jednom promenom za vreme jednog punog obrtaja polja statora. Zbog dodatnih harmonijskih članova raspodele obodne sile, pojavljuju se dodatne komponente vibracija zavisne od klizanja, uzrokovane inverznom komponentom raspodele sila.

Pošto svaka nesimetrija kaveza rotora uzrokuje promenu magnetnog polja u vazдушnom zazoru, kao posledica oštećenja menjaju se i sile, a time i vibracije mašine. Slomljena šipka kaveza rotora uzrokuje električnu nesimetriju u rotoru, što ima za posledicu oscilacije brzine obrtanja. Ocena stanja kaveza se donosi na osnovu odnosa amplituda brzine vibracija dodatnih harmonika oko frekvencije rotacije i amplituda brzine vibracija na frekvenciji rotacije izraženog u dB. Ako je taj odnos manji od 1/56 puta ili -35 dB verovatno postoji prekid u kavezu, a ako je odnos veći od -50 dB verovatno je kavez ispravan.

U frekvencijskom spektru vibracija motora s oštećenim rotorom (slomljenim šipkama) javljaju se dodatni harmonici čije su frekvencije razmaknute (udaljene) od frekvencije rotacije f_r i njenih višekratnika νf_r za dvostrukui frekvenciju klizanja $2sf_1$, tj:

$$f_d = \nu f_r \pm 2sf_1, \text{ Hz} \quad (5.18)$$

gde je:

$f_r = RPM/60$, u Hz - frekvencija rotacije (frekvencija osnovnog harmonika)

RPM - broj obrtaja u minuti

s - klizanje

f_1 - frekvencija napona napajanja statora motora

$\nu = 1, 2, 3, \dots$ – celi broj

Mehaničke sile se pojavljuju npr. zbog nepravilnog spajanja elektromotora s radnom mašinom pri čemu i mala odstupanja u spoju mogu izazvati velike vibracije u aksijalnom smeru.

4. Izbor mesta za merenje vibracija

Mesta vibracionih kontrola obrtnih mašina određena su normativnim dokumentima i u pravilu su to mesta uležištenja vratila i osovina, odnosno mesta na kućištima samih ležajeva. Međunarodnim standardima, smernicama i preporukama je definisano da se merenje vibracija izvodi na ležajevima, pošto su kod vibracija elektromotora najizraženije vibracije osovine rotora.

Vibracije asinhronih motora, kao i svih obrtnih mašina se mere u tri smeru, tj. u tri međusobno normalne ravni. Nezavisno od toga da li je mašina horizontalne ili vertikalne izvedbe, dva su smeru radialno usmerena prema osovini, dok je treći smer usmeren aksijalno. Radijalni smerovi se smeštaju u x i y ravan, a aksijalni smer u z ravan.

5. Izbor dijagnostičke opreme

a) Izbor OneproD MVX merno akvizicionog sistema

Sistem neprekidnog nadzora kritičnih mašina može se realizovati pomoću OneproD MVX modularnog merno akvizicionog sistema u 8, 16, 24 i 32-kanalnoj varijanti (u jednom kućištu). Ovaj merno akvizicioni sistem ima velike mogućnosti simultane akvizicije na svim kanalima, kao i mogućnost programiranja različitih radnih režima i definisanja vrste akvizicije i alarmnih vrednosti za svaki radni režim, što ga čini izuzetno moćnim rešenjem za neprekidni nadzor (dijagnostiku i zaštitu) svih kompleksnih rotirajućih mašina.

OneproD merno akvizicioni sistem omogućava realizaciju koncepcije održavanja prema stanju, sa naglašenim multitehničkim pristupom koji omogućava praćenje stanja mašina na osnovu analize dijagnostičkih veličina, kao što su: vibracije, sastav ulju, struja MCSA (engl. Motor Current Signature Analysis), temperatura, kao i procesnih veličina (temperatura, protok i td.).

OneproD MVX merno akvizicioni sistem može da koristi signale sa različitih senzora dijagnostičkih veličina, kao što su: senzori vibracija (ICP akcelerometara, davača brzine, proximity probe za monitoring relativnih vibracija na hidrodinamičkim kliznim ležajevima), senzori temperature, senzori sastava ulja (prisustva metalnih opiljaka, prisustva vode i kiselina /TAN/ itd.), kao i senzora procesnih veličina (naprezanja, pritisaka, struje, napona i sl.).

OneproD MVX merno akvizicioni sistem uključuje veliki broj različitih Onboard procesiranja (analiza na samom mernom sistemu – nije potreban download na računar i postprocesno sračunavanje vibracionog parametra) primenljivih kroz različite tehnike praćenja i vibrodijagnostike kotrljajnih i kliznih ležajeva, kao što su: sumarni nivoi (RMS, peak, peak-peak itd.), uskopojasni parametri (narrow band), širokopojasni parametri (broad band), Crest, Kurtosis parametar, Defect faktor ležajeva, Smax, frekvencijski spektri, vremenski zapisi, zumirani spektri, envelopni spektri itd. Recorder modul omogućava snimanje dugih vremenskih signala za naknadnu analizu harmonijskih redova (npr. snimanje zaletanja i usporenja turbine).

Za prikaz u realnom vremenu (real time-u) svih definisanih parametara na svim kanalima OneproD MVX merno akvizicioni sistem koristi OneproD XPR (napredni vibrodijagnostički) ili OneproD VIO (Viewer) softver.

b) Izbor senzora vibracija

Vibracije se dobro mogu osetiti i dodirom, čovek dodirom oseća pomeraje iznosa 0,01 mm.

Merenja vibracija se mogu izvoditi vibrometrima, proksimetrima (indukovani napon zavisi od udaljenosti objekta od senzora), akcelerometrima (piezoelektričnim sensorima, mere ubrzanje ali se koriste i za merenje brzine i pomeraja, željena se veličina dobija integracijom). Senzori za ove namene su kontaktnog ili beskontaktnog tipa. Beskontaktni vibrometri su specijalne izvedbe kapacitivnih, elektromagnetnih i optoelektronskih senzora. Najširu primenu imaju senzori sa seizmičkim MBK-sistemom, gde se kretanje ovesene mase pretvara u električni signal pomoću potenciometarskog, kapacitivnog, induktivnog, piezoelektričnog ili magnetostrikcionog senzora pomeraja. Senzor je uvek sastavni deo složenog mernog sistema, koji se satoji od pretvarača, osciloskopa i oscilografa, te analizatora spektra.

Ovakvim kontrolama, bez demontaže u toku normalnog rada mašine (ventilatora, pumpi, kompresora, separatora, centrifuge, reduktora, turbina itd.) vrlo brzo i pouzdano se određuje njeno stanje i detektuju otkazi.

Piezorezistivni akcelerometri. - Piezorezistivni akcelerometri se sastoje iz piezorezistivnog elementa sa mernim trakama koje se nalaze u kompaktnom kućištu od nerđajućeg čelika. Kabal ulazi sa strane kućišta i ima mehaničku zaštitu u vidu plašta od nerđajućeg čelika. Idealani su za industrijske i laboratorijske primene, a mere frekvencije od 0 Hz. Povezuju se na DC merno pojačalo za otporničke merne mostove, a imaju različite mogućnosti fiksiranja za objekat (preko 4 vijka, brezona, brza stezaljka, magnet). Oblast primene ovih akcelerometara obuhvata: seizmički nadzor, modalnu analizu, nadzor vibracija, dinamiku vozila, ispitivanje konstrukcija.

Kapacitivni akcelerometri. - U mnogim oblastima, ubrzanje je jedna od ključnih veličina koje se mere. Kapacitivni akcelerometri mogu biti različitih opsega merenja. Njihove ključne osobine su: merenje statičkog ubrzanja (gravitacije) kao i dinamičkog ubrzanja, izuzetna robusnost i trajnost, neosetljivost na promene temperature (integriran senzor za temperaturu), otpornost na rezonanciju i pri visokim frekvencijama, nizak šum. Oblast primene ovih akcelerometara obuhvata: seizmički nadzor, modalnu analizu, nadzor vibracija, dinamiku vozila.

Induktivni akcelerometri. - Induktivni akcelerometri rade na istom principu kao i induktivni davači pomeraja. Masa koja je okačena preko opruga se nalazi u ulju koje deluje kao amortizer. Sve se nalazi u kompaktnom kućištu od nerđajućeg čelika. Kabal ulazi sa gornje strane kućišta. Masa koje sa pomera usled vibracija menja induktivnost u fiksiranim kalemovima koji čine induktivni polumost. Koriste se za merenje konstantnih vibracija, kao i udara, a mere frekvencije od 0 Hz. Povezuju se na AC merno pojačalo za otporničke i induktivne merne mostove sa nosećom frekvencijom od 4,8 kHz. Oblast primene ovih akcelerometara obuhvata: seizmički nadzor, modalnu analizu, nadzor vibracija, dinamiku vozila, ispitivanje konstrukcija.

5.1.13.3 Razrada metode analize frekvencijskog spektra struje statora motora

1. Osnovni pojmovi o metodi analize frekvencijskog spektra struje statora motora

Cilj ovog dela je da pokaže da se primenom metode analize frekvencijskog spektra struje statora motora, koja koristi savremena dostignuća razvoja računarske opreme, mogu dobiti zadovoljavajući rezultati u dijagnostici stanja asinhronih motora.

Detekcija otkaza kaveza rotora motora u početnoj fazi nastanka je relativno teška pošto u normalnom pogonu nije moguće meriti struje u rotoru, pa se otkazi često uočavaju tek u "razvijenoj" fazi kada se manifestuju kao gubitak snage motora, povećanje vibracije, struganje rotora o stator, oštećenje ležajeva i sl. Zbog toga je važna primena dijagnostičkih metoda koje su u stanju da detektuju otkaze u početnoj fazi nastanka, u takve metode spada i metoda analize spektra struje statora.

Kao dijagnostička veličina koristiti se struja statora motora. Svaki tip otkaza asinhronog motora odražava se na povećanje njegove magnetne nesimetrije, koja uzrokuje pojavu dodatnog harmonika (komponente) tačno određene frekvencije u frekvencijskom spektru struje statora, čija amplituda zavisi od stepena nesimetrije. Tako je snimanjem i analizom frekvencijskog spektra struje statora motora moguće na osnovu frekvencija i amplituda pojedinih (dodatnih) harmonika (komponenti) u frekvencijskom spektru struje statora i uz poznavanje konstrukcionih karakteristika motora, doneti zaključke o uzroku i stepenu neispravnosti asinhronog motora, kao što su: oštećenja kaveza rotora, statički i dinamički ekscentricitet, međuzavojni kratki spojevi statorskog i rotorskog namota (kod klizno kolutnih motora), gubitak jedne faze napajanja itd. Postoje razvijeni dijagnostički programi koji na osnovu spomenutih parametara daju ocenu stanja celog elektromotora (npr. rotor elektromotora bez oštećenja, stanje ležajeva još uvek zadovoljavajuće, ležajevi motora su pred havarijom i sl.). Sam postupak dijagnostike se provodi bez ometanja pogona što je značajna prednost ove "on-line" metode.

Da bi se mogla izvesti analiza frekvencijskog spektra struje statora potrebno je prethodno izvršiti transformaciju signala (struje) snimljenih u vremenskom domenu u frekvencijski domen, kojim se svaki periodični signal periode T predstavlja vremenski jednako razmaknutim frekvencijskim komponentama. Pretvaranje se vrši primenom Fourijeove transformacije, koja se izvodi pomoću spektralnih analizatora ili kartica za akviziciju podataka DAQ (Data Acquisition) utaknutih u ISA ili PCI slot matične ploče računara. Znači, Fourijeova transformacija se može vršiti pomoću spektralnih analizatora, kojima se upravlja pomoću računara, na čiji ulaz se dovode prilagođeni signali struje statora motora. Kod statorske struje dodatni harmonici javljaju se na relativno malom razmaku od osnovne frekvencije. Zbog toga je Fourijeovu transformaciju potrebno provesti sa dovoljno visokom rezolucijom [94].

Neinvazivna metoda analiza spektra struje statora motora MCSA (engl. Motor Current Signature Analysis) jedna od najzastupljenijih metoda za dobijanje odgovarajućih podataka vezanih za otkaze motora. Metoda je nedestruktivna i jednostavno primenljiva uz korišćenje računara, pomoću koga se vrši prikupljanje, obrada i prikaz snimljenih podataka zbog čega ove kontrole spadaju u automatizovane, a da bi

bila potpuno automatizovana potrebno je koristiti neku od metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka.

Poslednji, a verovatno i najteži korak u praćenju stanja mašine jeste donošenje odluke da li otkazi postoje, i ako postoje, koji su to otkazi. Trenutno se ovo često radi na taj način da se koristi iskustvo osobe koja poseduje ekspertsko znanje. Ipak, sada se trenutno radi na automatizaciji ovog procesa, koristeći metode klasifikacije kao što su veštačka inteligencija i prepoznavanje oblika.

Kod asinhronih motora je veoma važna brza i sigurna identifikacija početka nastajanja otkaza. Pomoću adekvatnih procedura detekcije, otkaz se može detektovati još u fazi nastajanja tako da se mogu preduzeti odgovarajuće aktivnosti održavanja pre nego što dođe do značajnog oštećenja. To je naročito važno kod asinhronih motora gde je visok zahtev sigurnosti i pouzdanosti, bilo zbog visoke cene izgubljenih radnih sati (elektromotorni pogoni cirkulacionih pumpi, ventilatora svežeg vazduha i ventilatora dimnih gasova u termoelektrani, motori mlinova za ugallj, pogoni tračnih transportera itd.), bilo zbog sigurnosti (rashladne kolone u hemijskoj industriji, pogoni u eksplozivnoj atmosferi itd.).

Uprkos poslovičnoj robusnosti kaveznih motora, koja proističe iz njihove jednostavne i pouzdane konstrukcije, ipak se u kaveznom motoru, tokom životnog veka dešavaju i specifični otkazi. Naročito su karakteristični lomovi šipki kaveza rotora i spojnih prstenova, kao i oštećenja ležajeva i otkazi vezani za statički i dinamički ekscentricitet rotora. Direktna razlog loma šipki kaveza rotora je teško ustanoviti, a osnovni uzrok otkaza se menja od slučaja do slučaja. Međutim, verovatno da česti startovi motora i preopterećenja, termička naprežanja i štedljivi dizajn kaveza, uz slab kvalitet izrade dovode do ovog tipa otkaza kaveza. Takođe, izgleda da kod motora najvećih snaga, sa kliznim ležajevima koji nisu deo kućišta motora, do problema ove vrste može doći ako se pri montaži greškom napravi suviše veliki statički ekscentricitet rotora (u odnosu na osu statora).

Prednosti ove metode su prosta ugradnja opreme (koriste se samo strujni senzori) i relativna nezavisnost od parametara motora. Zahvaljujući tome, metoda MCSA se koristi kao standardni pristup u industrijskom okruženju. Jedini zahtev koji se postavlja pred motor koji je predmet kontrola, jeste da postoji odgovarajući nivo opterećenja. U idealnom slučaju motor treba da bude približno nominalno opterećen sa teretom koji nema oscilacije otpornog momenta, ali je u praksi to često teško postići i kontrole se vrše pri delimično opterećenom motoru.

Rezultati istraživanja su pokazali da se amplitude dodatnih harmonika značajno menjaju sa promenom opterećenja motora [94]. Kod nazivno opterećenog motora struja kaveza rotora je takođe nazivna, ali je ona zbog neravnomerne provodljivosti šipki (pri njihovom oštećenju) nesimetrična što se odražava na rezultatni magnetni fluks u vazдушnom zazoru, a time i na struju statora. Kod manjih opterećenja manje su i struje rotora te je i njihov uticaj na ukupno magnetno polje u vazдушnom zazoru motora i struju statora manji, odnosno teško uočljiv. U praznom hodu struja rotora je mala te je njen uticaj na magnetno polje i struju statora zanemarljiv, tj. teško merljiv. Zbog toga je kontrole motora primenom ove dijagnostičke metode potrebno provoditi pod opterećenjem što bližim nazivnom. Ponekad je, iz tehnoloških razloga u pogonu, teško ispuniti navedeni zahtev što predstavlja ograničavajući faktor primene ove metode.

U savremenim pogonima asinhroni motori se sve češće napajaju preko pretvarača frekvencije. Zbog toga su dijagnostičke kontrole sprovedene kada se motor napaja i preko pretvarača frekvencije i direktno sa krute mreže, kako bi se proverila primenjivost navedene dijagnostičke metode kada se motori napajaju preko pretvarača frekvencije [94]. Amplitude dodatnih harmonika su manje kada se motor napaja preko pretvarača frekvencije nego kada se napaja direktno iz mreže (pri radu na krutoj mreži), pri istom opterećenju. Tako niže amplitude dodatnih harmonika mogu navesti na zaključak o boljem stanju motora nego što je stvarno stanje. Pored toga, promene amplituda dodatnih harmonika sa promenom opterećenja su manje izražene. Zbog toga metoda analize frkvencijskog spektra struje statora daje manje pouzdane rezultate kada se ispituju asinhroni motori koji se napajaju preko pretvarača frekvencije. Što je i normalno za očekivati, jer primena pretvarača frekvencije uzrokuje pojavu dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru struje statora, koje nije jednostavno interpretirati. Ovi harmonici, takođe mogu stvoriti struje koje mogu dovesti do oštećenja ležajeva, zbog toga je potrebno obratiti pažnju na vrednosti ovih harmonika.

Prilikom primene ove dijagnostičke metode sve navedeno treba uzeti u obzir, zbog čega analizu frekvencijskog spektra struje statora treba provoditi oprezno. Preporučuje se, kada je to moguće, a posebno kod manjih motora, da se rezultati dobijeni primenom ove metode provere nekom drugom metodom, na primer metodom analize frekvencijskog spektra vibracija (brzine obrtanja).

Ova metoda je primenjiva za asinhronne motore velikog raspona snaga i primena. Osim toga ne zahteva ugradnju dodatnih mernih članova, niti zaustavljanje pogona.

Podaci prikupljeni pri provođenju ove dijagnostičke metode se čuvaju u računaru te je moguće upoređivati rezultate merenja provedenih u određenom vremenskom periodu na ispitivanom elektromotoru. Na taj način se može pratiti trend stanja motora i ocenjivati uspeh preduzetih remontnih radnji. Praćenje trenda stanja (pogoršanja) pruža mogućnost izbora najpogodnijeg trenutka za popravku ili zamenu delova motora.

Ova savremena dijagnostička metoda, koja koristi dostignuća novih tehnologija merne, računarske i softverske opreme, i koja ne ometa normalan rad pogona ("on-line" metoda) je posebno interesantna za pogone koji se nalaze u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom. Sva merenja, snimanja i obrada podataka se provode izvan prostora ugroženog eksplozivnom atmosferom (napojna ploča motora), tako da nema posebnih zahteva vezanih za izvedbu merne opreme sa stanovišta protiveksplozivne zaštite.

Za ovu dijagnostičku metodu potrebni su spektralni analizatori, koji imaju mogućnost razlučivanja harmonika s razmakom jednakim dvostrukoj frekvenciji klizanja. Ovaj razmak može biti vrlo mali kod "manje" opterećenih motora ili kod velikih motora, kod ovakvih motora se mogu pojaviti problemi oko nedovoljnog razlučivanja.

Uz sva ograničenja koja ima ova metoda, kao i svaka druga metoda, ona je jedna od interesantnijih dijagnostičkih metoda za procenu stanja elektromotora, jer se njom u ranoj fazi i prilično tačno mogu detektovati otkazi kaveza rotora elektromotora i drugi otkazi motora.

Svrha primene ovakvih metoda jeste da se detektuju otkazi motora (npr. kaveza rotora) u početnoj fazi nastanka, kako bi se sprečila dalja oštećenja motora, koja bi mogla dovesti do pojave delotvornih uzročnika paljenja, npr. električne i mehaničke varnice, povećanja temperature i sl., i do nastanka eksplozije.

Na osnovu dobijenih rezultata moguće je planirati dalje aktivnosti vezane uz proveru stanja rotora motora i uopšte celog motora. Umesto skupe i komplikovane demontaže motora, koji su duži niz godina u pogonu, i detaljnog pregleda u radionici ili kod proizvođača, za ispitivane motore je dovoljno pratiti trend stanja i u skladu s tim planirati servisne aktivnosti. Pošto nije potrebna demontaža motora ostvaruju se velike uštede, kako zbog same cene demontaže i dodatnih pregleda, tako i zbog neometanja rada pogona.

Primena metode analize spektra struje statora, kao dijagnostičke metode, kod elektromotora donosi niz prednosti kao što su [94]:

- prepoznavanje otkaza u ranoj fazi nastanka, čime se stvaraju mogućnosti da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreče ozbiljniji otkazi i havarije,
- ispitivanja je moguće provesti u normalnim pogonskim uslovima bez zaustavljanja i ometanja rada pogona,
- na osnovu rezultata ispitivanja moguće je planirati dalje aktivnosti održavanja i servisiranja,
- pravovremenom detekcijom otkaza smanjuju se troškovi održavanja i omogućava pravovremena nabavka rezervnih delova,
- povećava se produktivnost elektromotora i sl.

Analizom frekvencijskog spektra struje statora moguće je detekovati više tipova otkaza, kao što su:

- otkazi ležajeva,
- statički i dinamički ekscentricitet,
- otkazi kaveza rotora (prekidi ili oštećenja šipki kaveza rotora, prekidi ili oštećenja kratkospojnog prstena, povećanje otpora šipki i kratkospojenog prstena zbog nečistoća i poroznosti aluminija),

- mehaničke deformacije zbog termičkih naprezanja,
- eliptičnost statorskog i rotorskog paketa,
- oscilacije brzine obrtanja itd.

2. Kriterijumi za detekciju otkaza asinhronih motora

U ovom delu su objašnjeni kriterijumi za detekciju otkaza ležajeva, dinamičkog i statičkog ekscentriciteta, otkaza namotaja statora, te otkaza kaveza rotora, kao najznačajnijih tipova otkaza asinhronih motora.

a) Kriterijumi za detekciju otkaza ležajeva

Veliki postotak otkaza mašina vezan je upravo za ležajeve mašina. Prema nekim podacima taj procenat se kreće i do 40%. Mogućnost detekcije otkaza motora analizom frekvencijskog spektra struje statora se bazira na činjenici, da svaka pojava nesimetrije vazdušnog zazora, uzrokuje promenu magnetnog polja u vazdušnom zazoru. Pojava nesimetrije (ekscentriciteta) vazdušnog zazora uobičajena je popratna pojava otkaza ležajeva, pa se može očekivati da se otkaz ležajeva odrazi i na frekvencijski spektar struje statora. Vibracije uzrokovane otkazima ležajeva, dovode do pojave dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru struje statora, čije su frekvencije¹²⁰ [66]:

$$f_{le\dot{z}} = |f_1 \pm m \cdot f_v| \quad (5.19)$$

gde je:

$f_{le\dot{z}}$ - frekvencija dodatnih harmonika uzrokovanih otkazom ležajeva

f_1 - frekvencija napona napajanja (mreže)

m - 1, 2, 3,... - celi broj

f_v - frekvencija vibracija uzrokovanih otkazom ležajeva

b) Kriterijumi za detekciju ekscentriciteta motora

Ekscentricitet motora je stanje neravnomernog (nesimetričnog) vazdušnog zazora (rastojanja) između rotora i statora. U slučaju kada postoji ekscentricitet (nesimetrija) vazdušnog zazora između rotora i statora magnetne sile mogu uzrokovati velike probleme. Naime, na strani na kojoj je vazdušni zazor manji, manji je magnetni otpor te su sile kojima stator privlači rotor veće, što uzrokuje dalje smanjenje vazdušnog zazora. Kada nivo ekscentriciteta postane veliki, rezultujuće neuravnotežene radijalne sile magnetnog privlačenja mogu dovesti do struganja (zapinjanja) rotora o paket statora i njihovog oštećenja. Pojava ovakvih oštećenja i mehaničkih varnica koje se mogu pojaviti može biti opasna u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom. Osim ovih problema postojanje ekscentriciteta uzrokuje vibracije i buku. Ovi problemi se rešavaju konstrukcijom motora, ograničavanjem dozvoljenog ekscentriciteta ili učvršćenjem osovine.

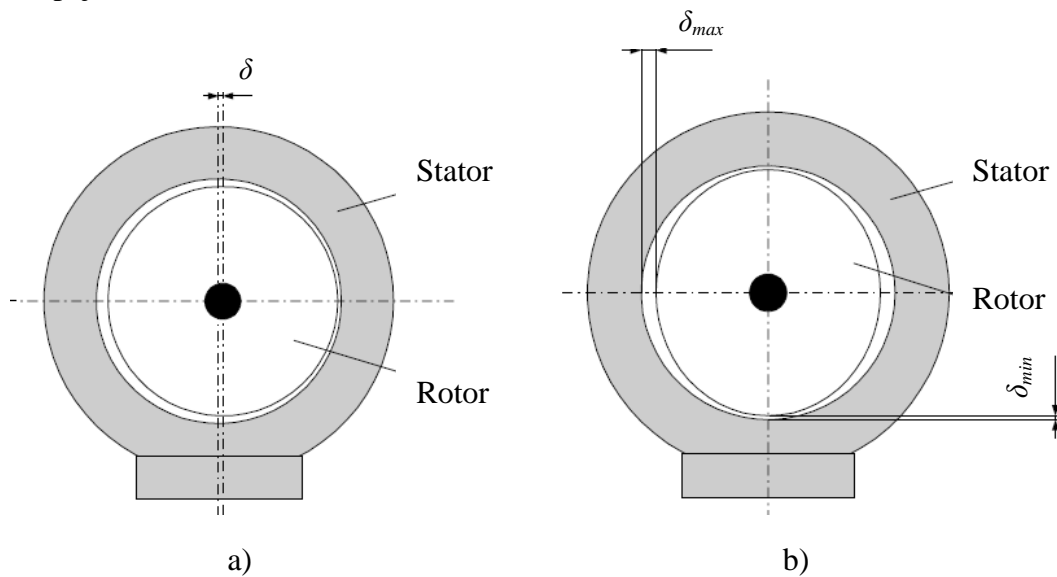
Postoje dva tipa ekscentriciteta: statički i dinamički. Često su u stvarnosti prisutni i statički i dinamički ekscentricitet istovremeno. Određeni nivo statičkog ekscentriciteta postoji čak i kod novih mašina, uzrokovan načinom izrade i načinom montiranja mašine.

U slučaju statičkog ekscentriciteta, mesto smanjenog ili povećanog vazdušnog zazora ne osciluje sa obrtanjem rotora, slika 5.20. a), gde δ predstavlja nepoklapanje ose rotora sa osom provrta statora. Nivo statičkog ekscentriciteta se, ako je osovina rotora dovoljno čvrsto učvršćena, ne menja tokom obrtanja rotora i zato je manje opasan od dinamičkog ekscentriciteta. Zbog toga je „snimanje“ i praćenje promena statičkog ekscentriciteta manje interesantno za dijagnostičke svrhe.

Statički ekscentricitet nastaje u slučaju:

¹²⁰ Gavranić, I., Procjena rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, Doktorska disertacija, Fakultet Elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2010.

- ovalnosti jezgra statora (ekscentričnog provrta statora) i
- nepravilne ugradnje rotora u stator prilikom sklapanja motora, tako da se ose rotora i statora ne poklapaju.



Slika 5.20. a) Statički ekscentricitet, b) dinamički ekscentricitet

U slučaju dinamičkog ekscentriciteta, osa rotora se ne poklapa sa osom rotacije i položaj najmanjeg vazdušnog zazora rotira zajedno s rotorom, slika 5.20. b). Ako se dinamički ekscentricitet na vreme ne uoči, može doći do naglog širenja otkaza i na kraju do prekida rada motora. Dinamički ekscentricitet je opasan, pošto mu se nivo menja tokom rada i u nekim slučajevima može dovesti do struganja rotora o paket statora.

Dinamički ekscentricitet nastaje u slučaju:

- savijene (iskrivljene) osovine rotora,
- oštećenih (istrošenih) ležajeva,
- kada paket rotora nije potpuno cilindričan (necilindričnog rotora),
- kada se osa rotora ne poklapa sa osom rotacije,
- mehaničke rezonancije na kritičnim brzinama itd.

Nivo dozvoljenog ekscentriciteta zavisi od konstrukcije motora te od pogonskih uslova u kojima motor radi. Ekscentricitet vazdušnog zazora do 10% se smatra dopuštenim (mada proizvođači teže smanjenju ekscentriciteta, uglavnom zbog sprečavanja vibracija i buke), gornja granica „prihvatljivog“ ekscentriciteta iznosi 20%, dok je pri 50% -nom ili višem nivou ekscentriciteta motor potrebno isključiti iz pogona.

Nivo dinamičkog ekscentriciteta od 20% znači da se vazdušni zazor dinamički smanjuje, odnosno povećava sa povećanjem brzine obrtanja motora, za 20% nazivne vrednosti u mirovanju. Minimalna i maksimalna vrednost vazdušnog zazora određuju se prema izrazima (5.20) i (5.21)¹²¹ [54].

$$\delta_{\min} = \delta_0 \left(1 - \frac{\Delta\delta}{100} \right) \quad (5.20)$$

$$\delta_{\max} = \delta_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{100} \right) \quad (5.21)$$

¹²¹ Čorak, T., Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001

Zbog postojanja ekscentriciteta (nesimetrije) vazdušnog zazora u frekvencijskom spektru struje statora se stvaraju dodatni harmonici frekvencije:

$$f_{eksc} = f_1 \cdot \left[(k \cdot N_R \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \pm \nu \right] \quad (5.22)$$

gde je:

f_1 - frekvencija napona napajanja statora

N_R - broj žlebova (šipki) rotora

s – klizanje

p - broj pari polova

$k=1, 2, 3, \dots$ - celi broj

n_d - stepen ekscentriciteta, u slučaju statičkog ekscentriciteta je $n_d=0$, a u slučaju dinamičkog ekscentriciteta je $n_d= 1, 2, 3, \dots$

ν - red statorskog vremenskog harmonika koji je prisutan u naponu napajanja motora ($\nu=\pm 1, \pm 3, \pm 5$ itd.)

Frekvencije harmonika koji se pojavljuju kao posledica statičkog ekscentriciteta jednake su frekvencijama utorskih harmonika. Dinamički ekscentricitet stvara dodatne komponente u frekvencijskom spektru u području oko utorskih harmonika. Pojava harmonika ovih frekvencija iskorišćena je za detekciju dinamičkog i statičkog ekscentriciteta on-line metodom (provodi se u normalnom pogonu) analize frekvencijskog spektra struje statora (strujnog signala) motora, koja spada u najpouzdaniju, i danas najčešće korišćenu metodu detekcije ekscentriciteta.

Ako statički i dinamički ekscentricitet postoje u isto vreme, komponente na niskim frekvencijama u blizini frekvencije napona napajanja date su izrazom:

$$f_{eksc} = |f_1 \pm k \cdot f_r| \quad (5.23)$$

gde je:

$k=1, 2, 3, \dots$ - celi broj

f_r - frekvencija obrtanja rotora, u Hz

c) Kriterijumi za detekciju otkaza namotaja statora

Analizom frekvencijskog spektra struje statora moguće je detektovati i otkaze namotaja statora. Suština ove analize jeste da izdvoji harmonike koji su posledica isključivo otkaza namotaja statora i da ih razlikuje od ostalih komponenti. Pod otkazima namotaja statora se prvenstveno misli na međunamotne i međuzavojne kratke spojeve.

Frekvencije harmonika koje je moguće uočiti u spektru struje statora, uzrokovane otkazom namota statora, date su izrazom¹²² [65]:

$$f_{st} = f_1 \left[\frac{n}{p} \cdot (1-s) \pm k \right] \quad (5.24)$$

gde je:

f_{st} - frekvencija harmonika uzrokovanih otkazom namotaja statora

f_1 - frekvencija napona napajanja motora

¹²² Gavrančić, I., Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.

p - broj pari polova

s - klizanje

n - 1, 2, 3, ..., $(2p-1)$

k - 1, 2, 3, ... - celi broj (harmonijski član)

d) Kriterijumi za detekciju otkaza (slomljenih šipki) kaveza rotora asinhronih motora

U slučaju slomljenih (oštećenih) šipki kaveza rotora struja (ili deo struje) koja se ne može zatvoriti kroz slomljene (oštećene) šipke kaveza rotora zatvara se kroz ostale „zdrave“ šipke (i delove prstena) kaveza. Time su „zdrave“ šipke opterećene dodatnim strujama, kojih nema kod neoštećenog kaveza rotora, i na taj način izložene većim termičkim i mehaničkim naprezanjima. Povećanje ovih naprezanja vodi ka oštećenju i „zdravih“ šipki i time širenju oštećenja na sve veći broj šipki, zatim pojave ekscentriciteta koja dovodi do oštećenja ležajeva. Povećane struje u „zdravim“ šipkama uzrokuju lokalna pregrevanja što dovodi do oštećenja i tih šipki. Ovo je naročito opasno u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, jer može dovesti do njenog paljenja i pojave eksplozije. Zbog toga je važna primena dijagnostičkih metoda koje su u stanju da detektuju oštećenja kaveza rotora u početnoj fazi nastanka, u takve metode spada metoda analize frekvencijskog spektra struje statora motora.

Metoda analize frekvencijskog spektra struje statora MCSA (Motor Current Signature Analysis) je dobro razrađena tehnika detekcije otkaza kaveza rotora i oslanja se na upotrebu brze Furijeove transformacije FFT (Fast Fourier Transform) radi identifikacije i evaluacije amplituda dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru snimljene struje statora, koji se pojavljuju u slučaju oštećenja kaveza rotora. Ti dodatni harmonici imaju frekvencije:

$$f_d = f_1(1 \pm 2ks) \quad (5.25)$$

gde je:

$k=1, 2, 3, \dots$ - celi broj (harmonijski član)

s - klizanje

f_1 - frekvencija napona napajanja statora motora

Kada se stator motora napaja iz trofazne naizmjenične mreže, struje koje iz mreže protiču kroz tri namotaja statora (koji su međusobno prostorno i fazno pomereni za ugao $2\pi/3$) stvaraju u vazдушnom zazoru Teslino obrtno magnetno polje, koje rotira sinhronom brzinom:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \text{ ob/min} \quad (5.26)$$

Pod uticajem tog obrnog magnetnog polja u namotaju rotora se indukuje elektromotorna sila, koja stvara struju kroz namotaj rotora, jer je rotor kratko spojen, frekvencija te struje je:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad \text{Hz} \quad (5.27)$$

Iz prethodnog možemo zaključiti da se asinhroni motor ponaša kao transformator sa frekvencijom sekundara koja iznosi f_2 .

Kao rezultat dejstva magnetnog polja struje u namotaju rotora i obrtnog polja statora stvara se obrni moment koji deluje na namotaj rotora, usled čega rotor počinje da se obrće u smeru obrtnog magnetnog polja, brzinom:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (5.28)$$

gde je:

n - brzina obrtanja rotora, u ob/min

p - broj pari polova (rotora i statora), ceo broj

f_1 - frekvencija napona napajanja statora motora, u Hz

n_s - sinhrona brzina (brzina obrtnog magnetnog polja), u ob/min

s - klizanje, u %

Rotor asinhronog motora nikada ne dostiže sinhronu brzinu, jer i kada bi se to desilo, nebi se indukovala elektromotorna sila u rotoru, a time ni stvorila struja u provodnicima namotaja rotora, pa bi obrtni moment bio jednak nuli, usled čega bi rotor usporio. Prema tome, rotor i obrtno magnetno polje se ne obrću istom brzinom (sinhrono), već različitom (asinhrono), pa se zbog toga ove mašine i nazivaju asinhronim mašinama.

Razlika između sinhronne brzine n_s i brzine rotora n naziva se apsolutno klizanje. Kada je motor neopterećen, odnosno u praznom hodu, obrtni moment rotora savladava samo moment usled trenja i ventilacije, koji je relativno mali te se rotor obrće brzinom bliskom sinhronoj brzini. Znači, brzina rotora n je skoro jednaka sinhronoj brzini n_s kada je motor neopterećen, a smanjuje se sa povećanjem opterećenja motora. Odnos apsolutnog klizanja i sinhronne brzine naziva relativno klizanje ili samo klizanje:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (5.29)$$

Vrednost relativnog klizanja s se pri nazivnom opterećenju kreće od 3 do 8% kod motora manjih snaga, a kod motora većih snaga od 1 do 3%.

Kavez rotora asinhronog motora se ne napaja iz spoljašnjeg izvora. Kroz njega protiču samo struje što ih indukuje obrtno magnetno polje stvoreno u vazдушnom zazoru. Ove struje stvaraju obrtno magnetno polje rotora, koje se obrće u smeru obrtanja rotora. U slučaju kada je kavez rotora simetričan (nema oštećenja), u obrtnom magnetnom polju rotora postoji samo direktna komponenta. Ukoliko se u kavezu rotora pojavi nesimetrija iz bilo kog razloga, na primer zbog slomljene jedne šipke, u obrtnom magnetnom polju rotora pojavljuje se i inverzna komponenta. Inverzna komponenta se obrće brzinom klizanja u odnosu na rotor, ali u suprotnom smeru. Kao rezultat pojave ove komponente u namotaju statora se indukuje struja frekvencije¹²³ [140]:

$$f_{dL} = f_1(1 - 2s), \text{ Hz} \quad (5.30)$$

Ovaj harmonik struje, nepoželjan je za mrežu, jer uzrokuje pojavu harmonika momenta na frekvenciji $2sf_1$, koji dovode do oscilacije brzine obrtanja na frekvenciji $2sf_1$. Oscilacija brzine obrtanja delimično smanjuju amplitudu harmonika struje statora na frekvenciji $f_1(1-2s)$, ali uzrokuje pojavu dodatnog harmonika struje statora na frekvenciji $f_1(1+2s)$. Tako se simetrično u odnosu na harmonik struje statora na frekvenciji $f_1(1-2s)$ pojavljuje, približno iste amplitude, i harmonik struje statora na frekvenciji $f_1(1+2s)$ koji je posledica oscilacija brzine obrtanja.

Prema tome, svaka pojava oštećenja (npr. slomljena šipka) kaveza rotora uzrokuje pojavu (povećanje) električne i magnetne nesimetrije rotora, odnosno dovodi do pojave nesimetrije struja rotora i nesimetrije obrtnog magnetnog polja rotora, koje učestvuje u stvaranju ukupnog magnetnog polja u vazдушnom zazoru. Zbog malog vazdušnog zazora kod asinhronih motora i najmanja nesimetrija magnetnog polja može promeniti karakteristike motora, kao što su: struja statora, brzina obrtanja, moment, buka i vibracije. U slučaju nesimetrije rotora struje rotora stvaraju nesimetrično magnetno polje koje se može rastaviti na dve komponente, frekvencija $+sf_1$ i $-sf_1$. Tako narušavanje nesimetrije rotora uzrokuje pojavu dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru struje statora, kojih nema kod neoštećenog (simetričnog) rotora, na frekvencijama¹²⁴ [78]:

$$f_{dL} = f_1(1 - 2s), \text{ Hz} \quad (5.31)$$

¹²³ Matić, D., Detekcija otkaza tipa slomljene šipke kod asinhronih motora primenom metoda računarske inteligencije, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.

¹²⁴ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina metodom spektralne analize struje statora, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, Smederevo, 2012, pp. 3-12.

$$f_{dD} = f_1(1 + s), \text{ Hz} \quad (5.32)$$

U stvarnosti se dodatni harmonici pojavljuju i na višim harmonicima osnovnih harmonika, pa izraz (6.10) dobija oblik¹²⁵ [144]:

$$f_d = f_1(1 \pm 2ks), \text{ Hz} \quad (5.33)$$

Harmonici (izobličenja) prvog reda ($k=1$) su od najvećeg interesa za detekciju slomljene šipke rotora.

Osim dodatnih harmonika frekvencija određenih izrazom (5.26) u frekvencijskom spektru struje statora, asinhronog motora sa oštećenim kavezom rotorom, mogu se uočiti i dodatni harmonici frekvencije¹²⁶ [126]:

$$f_d = f_1 \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right], \text{ Hz} \quad (5.34)$$

gde je:

f_1 - frekvencija napona napajanja motora (mreže)

$k=1, 2, 3, \dots$ - celi broj (harmonijski član)

s - klizanje

p - broj pari polova

Pri provođenju analize frekvencijskog spektra struje statora s ciljem utvrđivanja stanja rotora, s dijagnostičkog stanovišta, najznačajniji su dodatni harmonici struje statora frekvencija $f_1(1 \pm 2s)$ koji su najuočljiviji (imaju najizraženije amplitude). Levi harmonik frekvencije $f_1(1-2s)$ nastaje zbog električne ili magnetne nesimetrije rotora uzrokovane slomljenom šipkom, dok desni harmonik frekvencije $f_1(1+2s)$ nastaje zbog oscilacija brzine obrtanja.

Amplitude dodatnih harmonika zavise od stepena nesimetrije (otećenja), tj. od odnosa broja slomljenih šipki i ukupnog broja šipki. Što je stepen oštećenja kaveza rotora veći (što je više slomljeno šipki) to će i amplitude dodatnih harmonika biti veće. Tako da se na osnovu amplituda dodatnih harmonika može ustanoviti stepen oštećenja (oceniti stanje) kaveza rotora, odnosno moguće je detektovati otkaze kaveza rotora u najranijoj fazi nastanka.

Kako su u stvarnim uslovima amplitude dodatnih harmonika obično znatno manje od amplitude osnovnog harmonika, njihove vrednosti iz frekvencijskog spektra struje statora izražene u amperima je teško očitati, jer se dobija nepregledna slika frekvencijskog spektara iz koje je nemoguće doneti dijagnostički zaključak o stanju motora. Zbog toga se vrši prebacivanje frekvencijskog spektra struje statora u daleko pogodniji logaritamski prikaz, u kome se odnos amplituda dodatnog I_{md} i osnovnog harmonika I_{mo} izražava u %, tako što se amplitudi osnovnog harmonika pridružuje vrednost 100%, dok amplitude dodatnih harmonika poprimaju vrednosti izražene u % osnovnog harmonika, tj:

$$p = \frac{I_{md}}{I_{mo}} \cdot 100, \% \quad (5.35)$$

Takođe, odnos amplituda dodatnog I_{md} i osnovnog harmonika I_{mo} se može izraziti u dB, prema relaciji:

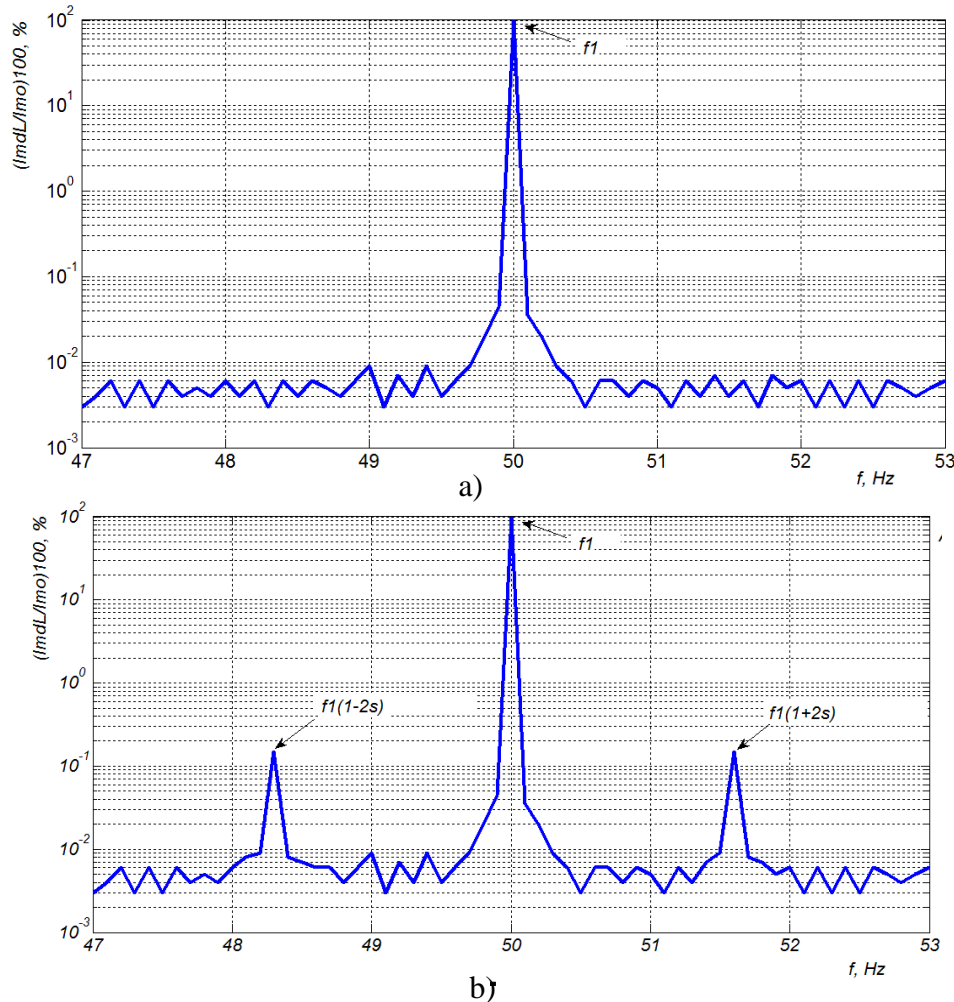
$$A = 20 \cdot \log \frac{I_{md}}{I_{mo}}, \text{ dB} \quad (5.36)$$

¹²⁵ Miletić, A., Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.

¹²⁶ Kompjuterizirana „on-line” dijagnostika elektromehaničkog stanja visoko naponskih asinkronih motora u postrojenjima Petrokemija d.o.o. Kutina, faza II, elaborat br. ZES 621, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, Kutina i Zagreb, studeni 2008.

Na ovaj način se amplitude dodatnih harmonika u frekvencijskom spektru struje normalizuju u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika frekvencije napona napajanja. U praksi se odnos amplituda dodatnog harmonika i osnovnog harmonika uobičajeno kreće u granicama od -30 do -70 dB.

Na slici 5.21., je prikazan amplitudno-frekvencijski spektar struje statora asinhronog motora u okolini frekvencije osnovnog harmonika ($f_1=50$ Hz) za slučaj: a) simetričnog (neoštećenog) kaveza rotora (simetričnog magnetnog polja) i b) nesimetričnog (oštećenog - sa slomljenim šipkama) kaveza rotora (nesimetričnog magnetnog polja). Dodatni harmonici u frekvencijskom spektru struje statora predstavljaju indicaciju nesimetrije rotora: levi harmonik se pojavljuje zbog nesimetrije (slomljenih šipki), a desni zbog oscilacija brzine obrtanja.



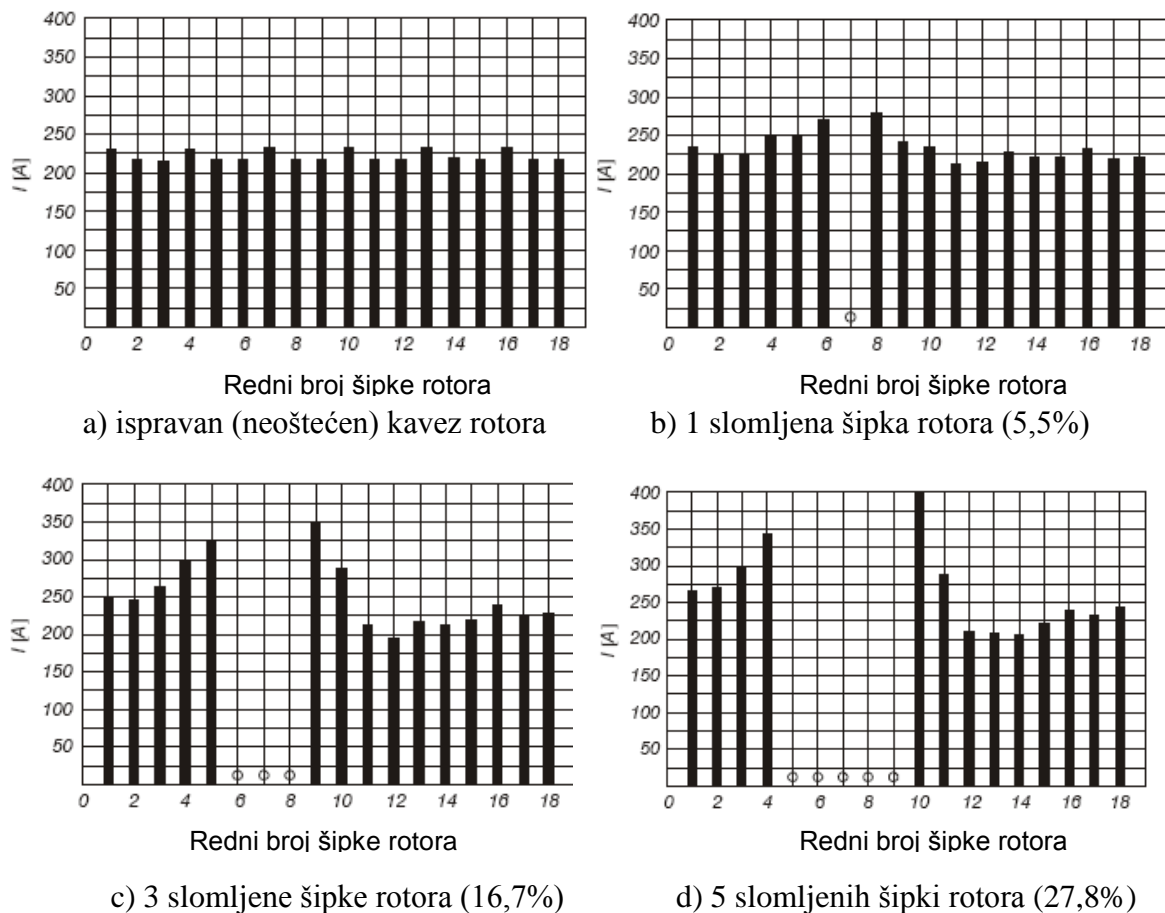
Slika 5.21. Amplitudno-frekvencijski spektar struje statora asinhronog motora u okolini frekvencije osnovnog harmonika ($f_1=50$ Hz) za slučaj: a) simetričnog (neoštećenog) kaveza rotora (simetričnog magnetnog polja) i b) nesimetričnog (oštećenog - sa slomljenim šipkama) kaveza rotora (nesimetričnog magnetnog polja)

Sa stanovišta protiveksplozivne zaštite interesantno je prikazati amplitude indukovanih struja u šipkama rotora (pri oštećenju dela šipki). Na slici 5.22. su prikazane amplitude indukovanih struja u šipkama rotora nazivno opterećenog dvopolnog asinhronog motora. Neznatna odstupanja amplituda kod ispravnog rotora posledica su neravnomernog vazdušnog zazora [94].

Navedenom dijagnostičkom metodom moguće je detektovati oštećenja kaveza rotora motora u početnoj fazi nastanka. Međutim, postoji i veliki broj otkaza koji se manifestuju na isti ili slične načine što otežava primenu ove metode.

Na osnovu rezultata ispitivanja, kao i na osnovu literature koja obrađuje ovu dijagnostičku metodu, može se zaključiti da je ona vrlo primenljiva i pouzdana, posebno kod većih oštećenja kaveza rotora motora. Kod manjih oštećenja kaveza rotora motora (npr. oštećenja jedne šipke ili dela prstena) teže je uočiti promene u frekvencijskom spektru struje statora uzrokovane ovim oštećenjima. Te promene je teško

prepoznati u mnoštvu izobličenja struje (šumova) koja su u pravilu stalno prisutna u postrojenju, a koja su manje izražene u uslovima laboratorijskih ispitivanja. Pored toga amplitude dodatnih harmonika, za isti stepen oštećenja se mogu razlikovati zavisno od snage motora.



Slika 5.22. Amplitude indukovanih struja u šipkama rotora [94]

Amplitude dodatnih harmonika pored toga što zavise od stepena oštećenja kaveza rotora (broja slomljenih šipki) još zavise i od drugih faktora, kao što je npr. snaga motora, tako da se amplitude dodatnih harmonika, za isti stepen otkaza mogu razlikovati zavisno od snage motora.

Vremenski promenljivo opterećenje može u frekvencijskom spektru struje izazvati pomak harmonika, takođe i prenosni mehanizam često u spektru struje stvara dodatne harmonike.

Iskustva iz stvarnih pogona pokazuju da se u nekim specifičnim pogonima (npr. pogon drobilice kamena) mogu pojaviti dodatni harmonici frekvencija bliskih frekvencijama harmonika uzrokovanih oštećenjima kaveza rotora (npr. slomljenim šipkama kaveza rotora).

Sa druge strane neophodno je primetiti da čak i motori koji imaju ispravan rotor, rotor bez otkaza, poseduju određeni stepen nesimetrije rotora zbog nesavršenosti izrade rotora (npr. šipke kaveza rotora nisu izolovane od paketa rotora) i nekih specifičnih konstrukcionih rešenja rotora. U slučajevima kada šipke kaveza rotora nisu izolovane od paketa rotora., posebno kada je kontakt između šipki i paketa dobar, pojavljuju se struje između šipki (kroz željezo rotora). Pojava tih struja može analizu frekvencijskog spektra struje statora učiniti nepouzdanom. Isto tako, i neka specifična konstrukciona rešenja rotora mogu dovesti do pojave dodatnih harmonika, koji su bliski dodatnim harmonicima uzrokovanim otkazima kaveza rotora.). Tako da se u frekvencijskom spektru struje statora mogu pojaviti dodatni harmonici (izobličenja) čije su frekvencije bliske frekvencijama harmonika uzrokovanih oštećenjima kaveza rotora (čije frekvencije ukazuju na stanje otkaza) i kad motor nema slomljenih šipki. Amplitude tih dodatnih harmonika po pravilu nisu velike, ali je važno pratiti trend njihovog porasta, kako bi se one mogle isključiti kao indikator oštećenja (stanja otkaza). Zbog toga se podaci prikupljeni pri provođenju ove metode memorišu u računaru u periodičnim vremenskim intervalima i međusobno porede. Ukoliko se ne uoče promene signala onda to upućuje na to da nije došlo do pogoršanja stanja motora, međutim ukoliko se uoče znatna (dvostruka ili višestruka) povećanja pojedinih spektralnih linija to je siguran znak da oštećenja

motora rastu. Zbog toga je praćenje trenda promene (pogoršanja) stanja presudno u dijagnostici stanja asinhronih motora.

Metode za razlikovanje ispravnog motora od onog koji ima slomljene šipke kaveza rotora

Postoji više metoda za razlikovanje ispravnog motora od onog koji ima slomljene šipke kaveza rotora, koje se mogu podeliti na:

- analitičke metode,
- empirijske metode i
- metode veštačke inteligencije.

Analitičke metode za procenu broja slomljenih šipki rotora. - Na osnovu odnosa amplituda dodatnog harmonika frekvencije $f_{dL}=f_1(1-2s)$ I_{mdL} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} može se doneti zaključak o stanju kaveza rotora.

Nekoliko naučnika je predložilo vezu između odnosa amplituda dodatnog harmonika frekvencije $f_{dL}=f_1(1-2s)$ I_{mdL} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} i odnosa broja slomljenih n i ukupnog broja šipki N .

Bellini je predložio sledeću vezu između navedenog odnosa¹²⁷ [40]:

$$\frac{I_{mdL}}{I_{mo}} = \frac{n}{N} \quad (5.37)$$

gde je:

I_{mdL} - amplituda dodatnog harmonika na frekvenciji $f_1(1-2s)$

I_{mo} - amplituda osnovnog harmonika na frekvenciji napona napajanja f_1

N - ukupan broj šipki kaveza rotora

n - broj slomljenih šipki kaveza rotora

p - broj pari polova motora

Benbouzid je predložio sledeću vezu između navedenog odnosa¹²⁸ [41]:

$$\frac{I_{mdL}}{I_{mo}} = \frac{\sin \alpha}{2p(2\pi - \alpha)}, \quad \alpha = \frac{2\pi \cdot n \cdot p}{N} \quad (5.38)$$

Ako se u izraz (5.30) uvrste amplitude harmonika u dB i vrednost α , dobiće se izraz (5.30), pomoću koga se može proceniti broj slomljenih šipki, u zavisnosti od odnosa amplituda A dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1-2s)$ I_{mdL} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} izraženog u dB:

$$n = \frac{2 \cdot N}{10^{\frac{A}{20}} + 2p} \quad (5.39)$$

Thomson je predložio sledeću vezu između navedenog odnosa [41]:

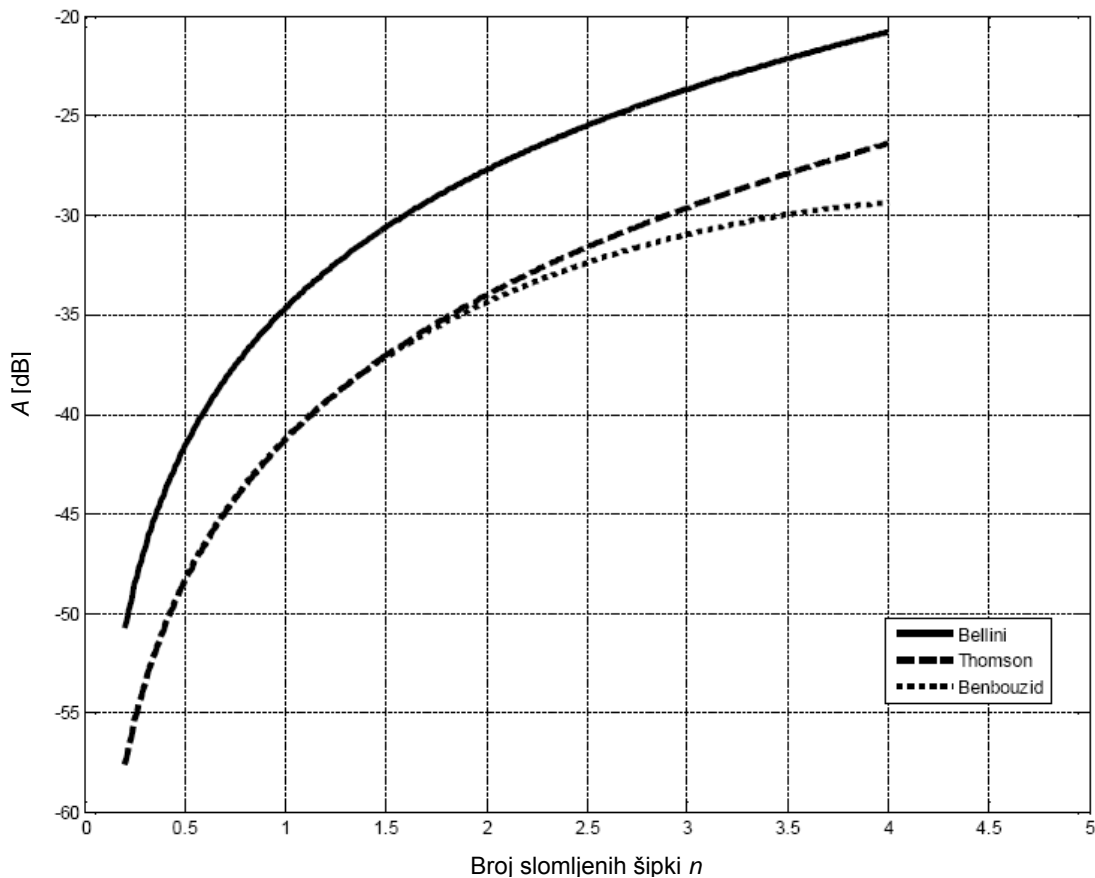
$$\frac{I_{mdL}}{I_{mo}} = \frac{n}{2N - np} \quad (5.40)$$

Procene pomoću jednačina (5.37) i (5.38) su veoma slične, jedina razlika je što je procena pomoću jednačine (5.38) spuštena u odnosu na procenu pomoću jednačine (5.37) za 5 do 8 dB. Procena pomoću

¹²⁷ Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C. and Capolino, G., Advances in diagnostic techniques for induction machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No 12, 2008, pp. 4109 - 4126.

¹²⁸ Benbouzid, M. E. H. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection, IEEE trans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No 5, October 2000. pp. 984 – 993.

jednačine (5.40) se poklapa sa procenom pomoću jednačine (5.38) za slučajeve do 3 slomljene šipke, a nakon toga postoji blago odstupanje, kao što se vidi sa slike 5.23. Navedene jednačine su validne pri nominalnom opterećenju.



Slika 5.23. Procena broja slomljenih šipki rotora

Amplituda levog dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1-2s)$ I_{mdL} monotono raste sa povećanjem broja slomljenih šipki. Amplituda drugog desnog dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1+2s)$ I_{mdD} takođe monotono raste sa povećanjem broja slomljenih šipki na isti način, ali su vrednosti umanjene za oko 5 dB. Značajne promene u amplitudi oba karakteristična harmonika su primetne kada dođe do potpunog loma šipke rotora. Pri pojavi naprsnuća šipke rotora dolazi do male promene otpornosti, a time i do male promene u frekvencijskom spektru stuje statora motora. Ovo čini detekciju naprsnuća šipke rotora izazovnim zadatkom.

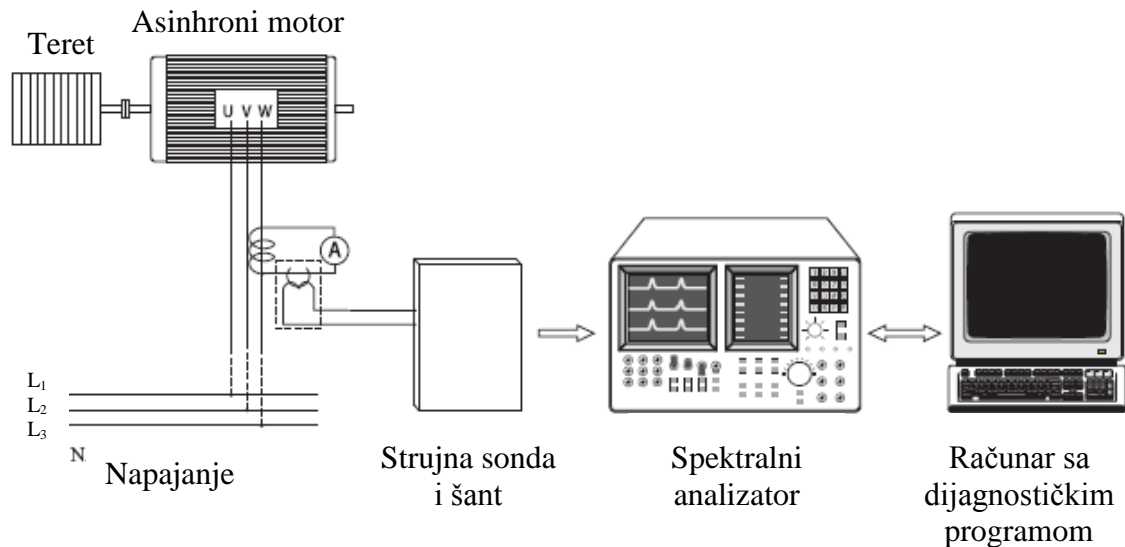
Empirijske metode. - Pored analitičkih metoda (pomoću jednačina (5.37), (5.38) i (5.40)) postoje i empirijske metode koje se mogu koristiti za razlikovanje ispravnog motora od onog koji ima slomljenu šipku. Prema empirijskim metodama na osnovu raznih ispitivanja utvrđena su pravila prema kojima se na osnovu odnosa amplituda A dodatnog harmonika frekvencije $f_{dL}=f_1(1-2s)$ I_{mdL} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} izraženog u dB, može razlikovati ispravan motor od onog koji ima slomljene šipke. Ta pravila su:

1. Prvo pravilo kaže ako je navedeni odnos manji od -50 dB, može se reći da je motor ispravan.
2. Drugo pravilo kaže ako je navedeni odnos manji od -45 dB, može se reći da je motor ispravan (ovo je pokazalo istraživanje sprovedeno na motoru snage 3,6 MW).
3. Treće pravilo (naziva se i pravilo -54/-45 dB), koje se pokazalo kao najpouzdanije, kaže:
 - ako je navedeni odnos manji od -54 dB može se reći da je motor ispravan,
 - ako je navedeni odnos veći od -45 dB može se reći da postoji slomljena šipka na rotoru, i
 - ako se navedeni odnos kreće između -54 dB i -45 dB onda se ne može izvući pouzdan zaključak o stanju motora.

Metode veštačke inteligencije za procenu broja slomljenih šipki kaveza rotora motora. - Pored analitičkih i empirijskih metoda postoje i metode veštačke inteligencije koje se mogu koristiti za razlikovanje ispravnog motora od onog koji ima slomljenu šipku. Tako se često koriste dva tipa neuronskih mreža: Feedforward Backpropagation i Radial Basis Function mreža.

3. Izbor dijagnostičke opreme

Principijelna šema prema kojoj se vrše dijagnostičke kontrole asinhronih motora primenom metode analize frekvencijskog spektra struje statora, prikazana je na slici 5.24. [94].



Slika 5.24. Principijelna šema prema kojoj se vrše dijagnostičke kontrole asinhronih motora primenom metode analize frekvencijskog spektra struje statora [94]

Za dijagnostičke kontrole mašina metodom analize frekvencijskog spektra struje statora koristi se sledeća oprema:

- strujni merni transformator,
- jedan spektralni analizator ili umesto njega sistem (kartica) za akviziciju podataka DAS (Data Acquisition System) koja je utaknuta u ISA ili PCI slot matične ploče računara i
- jedan desktop računar.

Signale pogonskih struja, u svrhu merenja, potrebno je prilagoditi mernim uređajima. U te svrhe koriste se strujni merni transformatori i šantovi.

Šantovi nisu pogodni za merenje velikih struja pošto se pri velikim strujama na šantovima razvijaju veliki gubici koji mogu stvoriti poteškoće. Pored toga daju relativno male signale.

U visokonaponskim uređajima strujni merni transformatori služe i za izolovanje merne opreme od visokih napona. Od strujnih mernih transformatora se kao i od naponskih zahteva što stalniji prenosni odnos i mali fazni pomak. Strujni merni transformatori se susreću u niz izvedbi koje zavise od namene i radnih uslova. U mnogim postrojenjima strujni merni transformatori su stalno ugrađeni i u nekim se slučajevima mogu koristiti u dijagnostičke svrhe. Strujni merni transformatori se koriste za merenje velikih naizmeničnih struja. Korišćenje strujnih mernih transformatora omogućava korišćenje klasične merne opreme za male struje za ovakva specifična merenja. Pored toga njima se štite i osobe uključene u merni proces, jer strujni merni transformatori galvanski odvajaju energetske strujni krug od mernog.

Za kontrolna merenja, kao i u slučajevima kada nije moguće iskoristiti ugrađene strujne merne transformatore, koriste se strujna klešta. Strujna klešta su posebna izvedba strujnih mernih transformatora koja omogućavaju priključenje bez potrebe za prethodnim prekidanjem strujnog kruga. Građena su tako da se željezno jezgro može rasklopiti i njime obuhvati provodnik kroz koga protiče struja. Taj provodnik predstavlja primarni namotaj strujnog mernog transformatora, dok je sekundarni namotaja omotan oko samog jezgra. Strujnim kleštima moguće je brzo izvršiti niz merenja, pošto se jednostavno prebacuju sa

jednog provodnika na drugi. To ih čini vrlo pogodnim za dijagnostička merenja u realnim pogonskim uslovima. Pored toga potrebno je izvršiti prilagođavanje snimanih veličina za kartice za akviziciju podataka DAS (A/D konvertoru), što obuhvata galvansko odvajanje snimane veličine od kartice za akviziciju podataka DAS 50 i njeno pretvaranje u naponski signal dozvoljenog iznosa za ulazni krug kartice za akviziciju podataka DAS 50. Signal strujnih klešta zaključen otporom 100Ω i izolacijskim pojačalom prilagođen je ulaznom rasponu kartice za akviziciju podataka DAS (A/D konvertoru).

Pošto računar radi s diskretnim podacima, potrebno je analogni signal strujnih klešta pretvoriti u digitalni, u tu svrhu koristi se spektralni analizator ili kartica za akviziciju podataka DAS (A/D konvertor).

Signal struje, izmeren pomoću strujnih klešta odvodi se na spektralni analizator, gde se izvodi brza Fourierova transformacija (FFT) i dobijeni spektar se odvodi u računar. U računaru se dobijeni frekvencijski spektar analizira i ocenjuje se stanje motora.

Umesto spektralnim analizatorom, Furijeova transformacija snimljenog signala se može provodi i na računaru pomoću kartice za akviziciju podataka DAS 50 ugrađene u stoni računar preko ISA slota na matičnoj ploči računara, kojom se vrši konverzija signala (struje statora motora) iz vremenskog u frekvencijski domen. Ova kartica je izabrana zbog visoke frekvencije uzorkovanja od 1 MHz i četiri kanala što je dovoljno za ovu namenu. Prednosti ovakvog pristupa su pre svega u ceni. Naime, spektralni analizatori su vrlo skupi. Osim toga za primene kada nije potrebna visoka rezolucija diskretizacije, kakvu obično imaju spektralni analizatori, moguće je odabrati jeftiniju karticu sa nižom maksimalnom frekvencijom diskretizacije. Osim toga, kartica za akviziciju podataka DAS 50 se ugrađuje u računar, dok je spektralni analizator dodatni uređaj velike mase i dimenzija, što znatno olakšava rad na terenu i u postrojenjima, kada je potrebno ispitati više dislociranih mašina. Ove prednosti naročito dolaze do izražaja u novije vreme kada su prenosni računari sve pristupačniji i rašireniji [94].

1. Izbor hardverske podrške

a) Izbor hardvera računara

Zahtevi koji se postavljaju za hardversku podršku računaru prvenstveno zavise od softverske podrške koja je potrebna za obradu podataka. Što je softverska podrška računara savremenija to su i zahtevi za hardver računara veći. Zbog toga pre izbora hardvera računara treba prvo izabrati softversku podršku, koja zavisi od zahteva koji se postavljaju pred dijagnostički proces. Kada se govori o računaru treba znati da se mogu koristiti industrijski računari, stoni računari ili prenosni računari (laptop, notebook).

Industrijski računari su konstruisani za primenu u industrijskom okruženju i posebno su zaštićeni od vlage, prašine, temperaturnih promena i mehaničkih udara i što je važnije od pogonskih smetnji (lutajućih struja, rasipnih magnetnih polja itd.). Ovo ih čini najpogodnijim za dijagnostičke kontrole u normalnim pogonskim uslovima.

Stoni računari su osetljiviji na mehaničke udarce i smetnje, ali su pristupačnije cene. Stoni računari su konstruisani za rad u suvim, temperaturno stabilnim sredinama, bez uticaja elektromagnetnih smetnji. Iako zbog nedostataka stonih računara vezanih za otežano prenošenje i rukovanje u pogonima koji ne liče na laboratoriju, mnogi se ipak odlučuju za njih. Naime, cene su im niže u odnosu na industrijske i prenosne računare, a pošto su roba široke potrošnje to je i prodajno-servisna mreža raširenija.

Savremena rešenja predviđaju korišćenje prenosnih računara zbog njihovih malih dimenzija u odnosu na prethodna dva rešenja, što olakšava rukovanje i korišćenje. Pored standardnog laptopa, koriste se i specijalni laptopovi za industrijske uslove. Prikupljanje mernih vrednosti se ostvaruje ili preko PCMCIA kartice ili preko USB – odnosno FireWire interfejsa.

Ovde treba naglasiti da od vrste računara zavisi i dalji izbor opreme za prikupljanje podataka i obradu podataka. Naime, zbog dimenzija je kod prenosnih računara razvijen drugi standard za kartice za akviziciju podataka. Razlika je u vrsti slota na matičnoj ploči računara pa tako postoje kartice za PCI, ISA i PCMCIA slotove. Prve dve vrste (PCI, ISA) slotova se koriste u stonim i industrijskim računarima, dok se PCMCIA slotovi koriste u prenosnim računarima. Prenosni računari su manji i skuplji od stonih, pa su i kartice za njih takođe po dimenzijama manje i skuplje.

Zapis obrađenih podataka iz mernog procesa važan je za kasniju analizu i obradu podataka, u krajnjem slučaju, kao dokaz da je neko merenje sprovedeno. Zapisi se mogu čuvati na bilo kojem mediju za memorisanje podataka pomoću računara. To su čvrsti diskovi računara, diskete, ZIP diskete, kompakt diskovi i sl. Ponekad je dovoljno popunjeni obrazac s obrađenim podacima odštampati i spremiti ga u arhivu.

Opisivanje delova automatizovanog dijagnostičkog modela ide redom od merne veličine preko strujnih mernih transformatora, spektralnog analizatora i IEEE488 kontrolera do računara. Iako je naveden na kraju, računar je najvažniji deo automatizovanog dijagnostičkog modela, jer se pomoću njega provodi automatizacija.

b) Izbor kartice za akviziciju podataka DAS 50

Mnogobrojni proizvođači nude kartice (sisteme) za akviziciju podataka DAS (Data Acquisition System). Kod personalnih računara kartica za akviziciju podataka DAS je utaknuta u ISA slot starijih ili PCI slot novijih računara, dok se u poslednje vreme pojavljuju i USB uređaji koji se jednostavno priključuju na USB port računara i veoma jednostavno instaliraju. Najčešće se radi o multifunkcionalnim karticama, koje raspolažu sa više analognih ulaza i izlaza, više digitalnih ulaza i izlaza i često jednim ili više brojačkih ulaza. Izbor kartica za akviziciju podataka DAS (Data Acquisition Systems) zavisi od više parametara (brzine promene mernih vrednosti, potrebne rezolucije, potrebe za galvanskim odvajanjem, unipolarne ili bipolarne merne vrednosti itd.). Ove kartice poseduju digitalne ulazno/izlazne portove, A/D konvertore, D/A konvertore, releje, tajmere i memoriju. Kartice za akviziciju podataka DAS obavljaju sledeće funkcije:

- procesiranje i konverziju ulaznih analognih signala u digitalni oblik,
- prihvatanje digitalnih ulaznih signala,
- procesiranje digitalnih signala i konverziju u analogni oblik,
- generisanje digitalnih izlaznih signala itd.

Za akviziciju podataka izabrana je kartica za akviziciju podataka DAS 50, to je 12-bitni A/D konvertor koja se ugrađuje preko ISA slot na matičnoj ploči računara. Kartica za akviziciju podataka DAS 50 standardno je podržana od strane programskog paketa TestPoint. Kartica za akviziciju podataka DAS 50 može vršiti pretvaranje brzinom 1 Mb uzoraka/s, i raspolaže sa do 2 MB memorije. U slučaju kada je ugrađena kompletna memorija, moguće je snimiti milion uzoraka pre prebacivanja podataka u računar. Kartica raspolaže sa 4 analogni ulaza. Visinu ulaza moguće je programski izabrati i postoji nekoliko različitih vrednosti: 0 do +5 V, 0 do +10 V, $\pm 2,5$ V, ± 5 V i ± 10 V. Kartica za akviziciju podataka DAS 50 namenjena je brzim snimanjima. Snimanje se može sinhronizovati internim satom ili spoljašnjim signalom. U slučaju korišćenja internog sata moguće je pretvaranje u granicama od 137 Hz do 1 MHz. Okidanje (trigger) se može izvršiti na tri načina: programski izdavanjem komande, spoljašnjim digitalnim signalom ili podesivom vrednošću spoljašnjeg analognog signala. U slučaju korišćenja spoljašnjeg analognog signala, uzima se signal na kanalu 0, a može se izabrati između pozitivnog ili negativnog brida. Podaci se mogu snimati nakon okidanja (post-trigger) u tom slučaju snimanje se pokreće nakon dobijanja signala. Druga opcija je da se podaci kontinualno snimaju (trace about trigger), pa se nakon dobijanja okidnog signala vrši zapis N uzoraka (kod ovakvog načina snimanja moguće je analizirati podatke pre i posle okidanja). Zadnja mogućnost je snimanje signala do trenutka okidanja, kada se snimanje zaustavlja (pre-trigger).

2. Izbor softverske podrške za obradu podataka

Obrada podataka može se vršiti pomoću vlastitih programa napisanih u nekom od programskih jezika za vizuelno programiranje Visual Basic, C++, Delphi, Matlab, TestPoint itd. Međutim, u nekim slučajevima je još uvek povoljnije koristiti gotove programske pakete koji su usmereni na prikupljanje podataka i upravljanje mernim procesom.

Kako napreduje razvoj hardvera i operativnih sistema, tako napreduje i razvoj softvera koji pružaju podršku mernom procesu i omogućavaju jasan prikaz rezultata. Nekad je korisnik morao da bira između dve krajnosti pri izboru programske podrške. Zavisno od stepena znanja o programiranju, korisnik se

mogao odlučiti na pisanje programa u jednom od programskih jezika (npr. C, Basic, Pascal) ili se odlučiti na kupovinu gotovih programa prilagođenih potrebama merenja i mernog procesa. U prvom slučaju se zahtevalo veliko umeće u programiranju, ali se osiguravala maksimalna prilagodljivost programske podrške potrebama korisnika. U drugom slučaju korisnik je bio uskraćen za prilagodljivost programske podrške specifičnim problemima, ali mu je bilo znatno olakšano pisanje programa.

Danas, kad je razvijeno vizuelno programiranje korišćenjem grafičkog korisničkog interfejsa GUI (Graphical User Interface), korisnicima je olakšano pisanje vlastitih programa, čime se potiskuje upotreba gotovih programskih paketa. Vizuelno programiranje pomoću programskih jezika Visual Basic, C++ ili Delphi znatno je olakšano korišćenjem ActiveX korisničkih kontrolnih objekata od Microsofta. ActiveX kontrolni objekti su unapred definisane komponente vizuelnih programskih jezika s kojima je lakše izraditi programsku aplikaciju. Naprimera ActiveX omogućava upravljanje tipkama (engl. buttons), prozorima za unos podataka, prozorima za grafički prikaz podataka, paralelnim i serijskim prenosom podataka itd. Uloga proizvođača softverske podrške koji su pre razvijali korisničke softverske pakete, svodi se danas na razvijanje ActiveX objekata za specifične slučajeve, npr. prikupljanje podataka, analiza signala i sl. Oni su specijalizovani za prikupljanje podataka i upravljanje mernim procesom [94].

Specijalno za potrebe automatizovane merne tehnike razvijeni su grafički programski jezici. Kod ovih programskih jezika program se ne piše u obliku teksta, red po red, već se sastavlja u vidu dijagrama toka na ekranu. Činjenica da postoje brojne programske biblioteke, učinila je da je grafičko programiranje u mernoj tehnici našlo značajnu primenu. Softveri za virtuelnu instrumentaciju omogućavaju korisniku da realizuje uređaj koji najviše odgovara zahtevima i specifičnoj nameni. Ovi programi sadrže biblioteke gotovih grafičkih elemenata koji omogućavaju jednostavnu i brzu realizaciju korisničkog interfejsa i kontrolnog panela instrumenta. Grafički korisnički interfejs (GUI) virtuelnog instrumenta je softverska zamena za prednji panel klasičnog instrumenta. On omogućava interakciju korisnika i aplikacije. Najpoznatiji softver za realizaciju virtuelne instrumentacije je LabVIEW američke firme National Instruments, koji predstavlja standard u oblasti softvera za virtuelnu instrumentaciju. Pomoću računara mogu se kreirati softverski virtuelni instrumenti koji izvršavaju zadatke kao i skupa hardverska instrumentacija, a zahvaljujući web tehnologiji, povezivanjem računara koji nadgledaju mašine za Intranet ili Internet mrežu mogu se daljinski nadgledati parametri mašine preko Interneta korišćenjem web browser-a.

a) Izbor softverskog paketa TestPoint

Softverski paket TestPoint je specijalizovani savremeni programski paket, od proizvođača Keithley, namenjen za izradu softvera za akviziciju (prikupljanje) i obradu podataka, kao i za upravljanje mernim procesom, pomoću kartica za akviziciju podataka DAS i instrumenata s ugrađenim IEEE-488, RS-232 i RS-485 interfejsima. Osim toga pomoću TestPointa se može izvršiti i obrada snimljenog signala, te izvršiti prikaz (prezentacija) snimljenih i obrađenih podataka, kao i izrada ispitnih protokola. Za prikaz rezultata mogu se koristiti grafici, numerički displeji, stupčasti prikazi, prikazi talasnih oblika, prikazi frekvencijskog spektra i grafički prikazi u obliku analognih instrumenata sa kazaljkom. Program ima mogućnost limita pojedinih signala, blokade, alarma itd. Za analizu podataka na raspolaganju su mogućnosti filtriranja, spektralne analize (FFT), zaglađivanja i usrednjavanja krivih itd. Pri obradi krivih na raspolaganju su aproksimacije (interpolacije) pravicima, polinomima, eksponencijalima. Program poseduje i statističke operacije. Za komunikaciju sa korisnikom koji će koristiti završni program na raspolaganju su sklopke, tasteri, klizači, polja za unos podataka itd. Program je od neovlaštenog korišćenja zaštićen ključem, bez koga je rad u programu moguć ali ne postoji mogućnost snimanja izrađenog programa. Za korišćenje izrađene aplikacije nije potreban ključ.

Programski paket TestPoint u sebi sadrži kontrole za upravljanje spoljašnjim uređajima, matematičke funkcije za rad sa promenljivim, vektorima, matricama, funkcije za kreiranje korisničkih interfejsa, izradu protokola merenja i gotove rutine za razmenu i korišćenje podataka iz drugih Windows aplikacija. Program u sebi ima ugrađenu bazu nekoliko stotina najrazličitijih instrumenata i podršku za instrumente sa ugrađenim interfejsima GPIB (IEEE-4888), RS-232 i RS-485. Takođe za prikupljanje podataka program podržava analogne i digitalne kartice A/D i D/A konvertora, digitalne ulazno/izlazne kartice, brze A/D konvertore itd.

Prilikom izrade programa gotovi objekti se mišem, tzv. “drag-and-drop” metodom, odvlače iz skladišta i postavljaju u radni panel gde se međusobno povezuju. Prilikom postavljanja određenog objekta u radni panel, program nudi izbor neke od unapred definisanih naredbi, koje su različite za svaki tip objekta, tako da se pisanje programa svodi na izbor jedne od naredbi. Ovde se koristi vizuelno programiranje, čime je pojednostavljena izrada programa i izbegnuti klasično programiranje, korisnik se ne opterećuje pisanjem koda (naredbi), već ih TestPoint automatski generiše, što ujedno smanjuje i mogućnost greške.

Korišćenjem programskog paketa Testpoint moguće je izrađivati različite programe za vlastite potrebe kao i za dalju distribuciju. Naime, jednom izrađen program, nakon testiranja i završnih uređivanja može se distribuirati kao zaseban program. Tako dobijeni program moguće je instalirati i na računaru na kome nije prethodno instaliran programski paket TestPoint. Na tom računaru program radi isto kao i na onom na kome je program i napravljen, s jedinom razlikom da nije moguće menjati niti ulaziti u sam kod programa. Prednost takvog rada je u tome što je pomoću programskog paketa TestPoint moguće izraditi programe različitih namena koje nakon toga mogu koristiti i oni koji se pre toga nisu susretali sa tim paketom.

b) Izbor programskog paketa Motormonitor

Programski paket Motormonitor namenjen je za detekciju otkaza asinhronih motora u početnoj fazi nastanka primenom metode analize frekvencijskog spektra struje statora. Za provođenje Furijeove transformacije snimljenog signala struje program koristi spektralni analizator. Komunikacija između računara na kome je instaliran ovaj program i spektralnog analizatora ostvaruje se korišćenjem GPIB protokola.

Program Motormonitor sve izmerene amplitude pojedinih harmonika preračunava na nazivno opterećenje motora. Nakon obavljene analize stanja motora, program daje izveštaj o stanju motora, numeričku ocenu stanja, kao i preporuke za dalje aktivnosti održavanja. Program u konačnoj programskoj obradi ocenu stanja kaveza rotora daje merom zvanom indeks stanja (indeks otkaza) prema kriterijumima navedenim u tabeli. 5.9. Na sličan način programski paket Motormonitor obrađuje i snimljene podatke o ekscentricitetu.

Tabela 5.9. Kriterijumi za ocenu stanja kaveza rotora motora na osnovu dobijenog indeksa stanja [5]

Indeks stanja	Ocena stanja kaveza rotora motora
< 0,5	Dobro (bez oštećenja)
0,5 – 1,5	Zadovoljava (stanje još zadovoljavajuće)
1,5 – 2,5	Nezadovoljava (upozorenje, potreban remont (servis))
> 2,5	Nedozvoljeno (motor pred havarijom)

Program ima mogućnost praćenja stanja motora tokom dužeg vremenskog perioda, uz mogućnost izgradnje baze podataka ispitivanih motora. Podaci snimljeni upotrebom programa Motormonitor ostaju sačuvani u računaru te je moguće porediti rezultate više merenja i na taj način pratiti trend promene stanja motora. Praćenje trenda promene (pogoršanja) stanja pruža mogućnost izbora najpogodnijeg trenutka za popravku ili zamenu delova motora.

5.1.14 Predlog mera za zaštitu od smetnji pri radu automatizovanih dijagnostičkih modela uzrokovanih lutajućim strujama

Cilj ovog dela je da predloži mere za zaštitu od smetnji pri radu automatizovanih dijagnostičkih modela uzrokovanih lutajućim strujama prilikom njihovog proticanja kroz razne metalne konstrukcije u objektu. Lutajuće struje se definišu kao povratne struje kroz zemlju i metalne konstrukcije uzrokovane električnim uređajima u normalnom radu ili pri smetnjama. Glavni izvori lutajućih struja su: jednosmerna

električna vuča, sistemi katodne zaštite, uređaji za zavarivanje, dalekovodi visokog napona jednosmerne struje, postrojenja za elektrolizu itd.^{129, 130, 131, 132, 133} [92,93,113,115,117].

Lutajuće struje mogu nastati u samim objektima, a mogu ući i spolja. Lutajuće struje prilikom prostiranja kroz zemlju mogu ući u objekat preko uzemljivača i raznih metalnih konstrukcija u objektu, kao što su: cevi za vodu, cevi za gas, cevi za grejanje, čelična armatura u armirano-betonskoj konstrukciji objekta (temelju, stubovima, pločama), metalni omotači energetskih i informaciono komunikacionih kablova itd.¹³⁴ [74].

Pored lutajućih struja koje spolja mogu ući u objekat, one mogu nastati i u samoj električnoj instalaciji. Tako električne instalacije sa TN-C-S sistemom razvoda pri nesimetričnom ili nepunofaznom opterećenju stvaraju lutajuće struje, koje se preko metalnih konstrukcija nekontrolisano šire kroz celi objekat. Takođe lutajuće struje u objektu mogu nastati i u električnim instalacijama sa TT sistemom razvoda zbog greške u montaži. Pored greški u montaži postoji i niz drugih razloga zbog kojih može doći do spoja neutralnog (N) provodnika sa zaštitnim (PE) provodnikom ili metalnim konstrukcijama i pojave lutajućih struja u objektima, kao što su: loši kontakti spojevi neutralnog (N) provodnika, oštećena izolacija neutralnog (N) provodnika u električnim instalacijama i prijemnicima i sl. [74].

U dostupnoj literaturi su na nedovoljno jasan i precizan način prikazane putanje kojima se lutajuće struje mogu prostirati kroz metalne konstrukcije. Zbog toga je na osnovu istraživanja razmatrane problematike predložena ilustracija raspodele lutajućih struja kroz metalne konstrukcije objekta sa TN-C-S sistemom razvoda električne instalacije, koja je prikazana na slici 5.25., putanje prostiranja lutajućih struja su prikazane isprekidanim linijama [114].

Bez obzira da li su u objekat ušle spolja ili su nastale u samoj električnoj instalaciji lutajuće struje prilikom proticanja kroz metalne konstrukcije u objektu, kao što su: cevi za vodu, cevi za gas, cevi za grejanje, čelična armatura u armirano-betonskoj konstrukciji objekta, metalni omotači energetskih i informaciono komunikacionih kablova itd., mogu uzrokovati različite negativne efekte, kao što su: smetnje i otkazi na računarima i računarskim mrežama, telekomunikacionim sistemima, protivpožarnim i alarmnim sistemima, sistemima video nadzora, zatim postoje opasnosti od požara, korozije i sl. Sve ove negativne efekte dodatno pogoršava pojava viših harmonika struje, čiji su izvori računari, štampači, uređaji za fotokopiranje itd. Ove činjenice dovoljno govore da je ovim problemima potrebno posvetiti određenu pažnju [70].

Negativni efekti lutajućih struja se mogu klasifikovati, kao¹³⁵ [102]:

- elektrolitički
- termički i
- elektromagnetni efekti.

Elektrolitički efekti lutajućih struja se manifestuju u pojavi korozije, tj. elektrolize materijala na mestu gdje struja napušta metalnu konstrukciju¹³⁶ [97].

¹²⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Korozija gasovoda uzrokovana lutajućim strujama jednosmerne električne vuče, Gas, Vol. 18, No 1, Beograd, 2013, pp. 33-38.

¹³⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Oštećenja gasovoda usled dejstva lutajućih struja različitog porekla i njihov uticaj na pouzdanost rada tehničkog sistema, Održavanje mašina, Vol. 8, No 1-2, Smederevo, 2011, pp. 64-70.

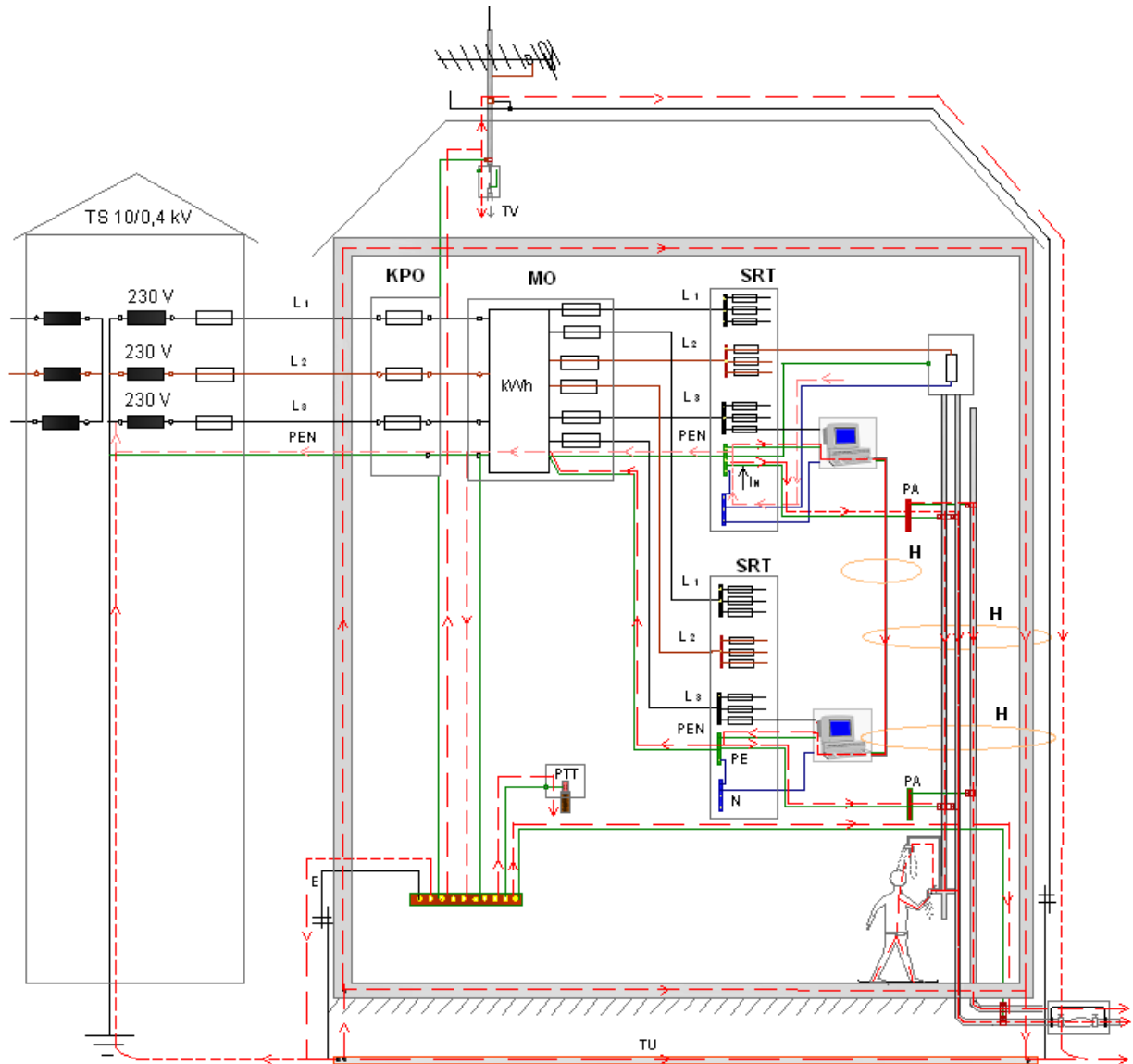
¹³¹ Ilić, B., Savić, B., Katodna zaštita cevovoda u zoni dejstva lutajućih struja, Zbornik radova/II Međunarodni kongres „Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji“, I-51, Jahorina, 09-11.03. 2011, pp. 473-481.

¹³² Ilić, B., Savić, B., Usklađivanje rada katodne zaštite cevovoda u zoni dejstva lutajućih struja sa radom električne instalacije, Zbornik radova/II Međunarodni kongres „Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji“, I-52, Jahorina, 09-11.03. 2011, pp. 482-488.

¹³³ Ilić, B., Tomić, M., Došić, A., Korozija gasovoda izazvana lutajućim strujama, Zbornik radova/I Međunarodni kongres „Inženjerstvo, materijali i menadžment u procesnoj inustriji“, IT-73, Jahorina, 14-16.10.2009, pp. 419-423.

¹³⁴ Ilic, B., Savić, B., Zaštita od strujnih udara uzrokovanih lutajućim strujama, Međunarodna konferencija Bezbednosni inženjering, Novi Sad, 2-3 oktobar, 2014, pp. 281-288.

¹³⁵ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Oštećenja gasovoda uzrokovana elektroenergetskim efektima iz okruženja i njihov uticaj na pouzdanost rada tehničkog sistema, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.



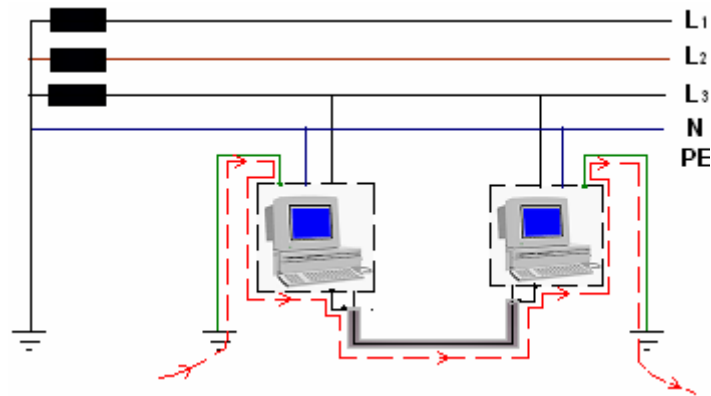
Slika 5.25. Ilustracija raspodele lutajućih struja kroz metalne konstrukcije objekta sa TN-C-S sistemom razvoda električne instalacije, gde je: TS - transformatorska stanica, L₁, L₂, L₃ - fazni provodnici, N - neutralni provodnik, PE - zaštitni provodnik, PEN - zaštitno-neutralni provodnik, PA - provodnici za izjednačenje potencijala, E - zemljovod, KPO - kućni priključni ormarić, MO - meri ormar, SRT - spratna razvodna tabla, H - magnetno polje, TU - temeljni uzemljivač¹³⁷ [70]

Termički efekti se ispoljavaju u pojavi varnice ili pregrevanja konstrukcija kroz koje protiču lutajuće struje. Razlika potencijala stvorena između njih, uzrokovana proticanjem lutajućih struja, uslovljava proticanje neke struje izjednačenja između tih konstrukcija ako se one električno spoje. Ukoliko ta električna veza ide preko neadekvatnih provodnika koji za to nisu ni predviđeni ni dimenzionisani kao što su niskoomski metalni omotači koaksijalnih kablova računarskih mreža, slika 5.26., može doći do njihovog pregrevanja, pa i požara¹³⁸ [116].

¹³⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Predlog mera za zaštitu gasovoda od korozije uzrokovane lutajućim strujama, Gas, Vol. 17, No 4, Beograd, 2012, pp. 5-11.

¹³⁷ Ilić, B., Adamović, Z., Savić, B., Stanković, N., Dangares of stray current to information and communication technologies in electrical installations with TN-C-S system of distribution, Proceedings/19th Telecommunications forum TELFOR, Belgrade, Serbia, November 22-24, 2011, pp. 1020-1023.

¹³⁸ Ilić, B., Savić, B., Uticaj lutajućih struja na informaciono komunikacione tehnologije, Zbornik radova/IX Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infotech 2010, Vol. 9, Ref. D-13, Jahorina, 17-19.03.2010, pp. 413-417.



Slila 5.26. Ilustracija proticanja lutajućih struja kroz omotač koaksijalnog kabla računarske mreže [116]

Poznato je da je fazorski zbir direktnih i povratnih struja kroz napojne vodove jednofaznih i trofaznih prijemnika pri odsustvu struja odvoda jednaka nuli i magnetno polje u okolini takvih vodova na rastojanju manjem od 15-20 cm je zanemarljivo malo. Međutim, pri pojavi struja odvoda upravo te struje u okolnom prostoru stvaraju jako elektromagnetno polje [70,114,116].

Elektromagnetni efekti se manifestuju u indukovanju napona smetnji u vodovima koji se nalaze u blizini metalnih konstrukcija kroz koje protiču naizmjenične lutajuće struje ili u blizini vodova sa strujama odvoda, koji stvaraju jaka elektromagnetna polja. Ova elektromagnetna polja mogu dovesti i do indukovanja napona smetnji u vodovima na štampanim pločama elektronskih uređaja, kao što su monitori i druga računarska oprema i sl. Ako se monitor nalazi u blizini metalnih konstrukcija kroz koje protiču lutajuće struje ili u blizini vodova sa strujama odvoda, koje stvaraju jaka magnetna polja, tada slika na monitoru može značajno da se deformiše („pliva“ ili „treperi“). Poznati su slučajevi, kada se monitor prekrije obojenim pegama različitih nijansi, a ponekad se slika potpuno ili privremeno izgubi, tako da je rad za takvim monitorom otežan, a često i nemoguć [70,114,116].

Takođe, naponi smetnji se mogu indukovati i u informaciono komunikacionim kablovima, koji pogoršavaju ili onemogućavaju prenos informacija tim kablovima. To može dovesti do ometanja ili prekida rada računara, računarskih mreža, ometanja veze računara sa štampačem, uništenja mrežne kartice, uništenja podataka na hard disku, ometanja prenosa telekomunikacionih signala, ometanja rada sistema video nadzora, zatim lažnog aktiviranja protivpožarnih i alarmnih sistema i sl.¹³⁹ [177].

Na osnovu istraživanja uticaja lutajućih struja na računare i druge savremenih informaciono komunikacionih tehnologija, na čijem korišćenju se bazira rad automatizovanih dijagnostičkih modela, predložene su sledeće mere za zaštitu od smetnji pri radu automatizovanih dijagnostičkih modela uzrokovanih lutajućim strujama¹⁴⁰ [114]:

1. U objektima u kojima se očekuje korišćenje automatizovanih dijagnostičkih modela, donosno računara i računarskih mreža treba izbegavati korišćenje TN-C-S i TN-C sistem razvoda, zbog toga što oni mogu uzrokovati lutajuće struje. To su najlošiji ali i najjeftiniji sistemi razvoda, jer imaju jedan provodnik manje nego drugi sistemi razvoda.
2. Prema tehničkim propisima IEC 60364-4-444: 2007 (Električne instalacije niskog napona - Deo 4-44: Zaštita radi ostvarivanja bezbednosti - Zaštita od napona smetnji i elektromagnetskih smetnji) u objektima u kojima se očekuje korišćenje automatizovanih dijagnostičkih modela treba primenjivati TN-S sistem razvoda, zbog njegove elektromagnetne kompatibilnosti, koji ima samo jedno uzemljenje i to po mogućnosti u trafostanici.

¹³⁹ Savić, B., Ilić, B., Opasnosti od požara usled dejstva lutajućih struja, Zbornik radova/II Međunarodna naučna konferencija „Bezbednosni inženjering“, Novi Sad, 21-22.10.2010, pp. 155-162.

¹⁴⁰ Ilić, B., Savić, B., Opasnosti od lutajućih struja po računare i računarske mreže, Zbornik radova/18 Međunarodni IEEE Telekomunikacioni forum TELFOR 2010, Beograd, 23-25.11. 2010, pp. 905-909.

3. Takođe i TT sistem razvoda je znatno povoljniji od TN-C-S sistema razvoda. Prelaz sa TN-C-S na TT sistem razvoda moguće je ostvariti bez polaganja dodatnih provodnika, ali je potrebno u razvodnoj tabli obavezno ugraditi zaštitni uređaj diferencijalne struje, koji će dovesti do dovoljno brzog isključenja napajanja pri probodu faze na metalno kućište prijemnika. Pored toga potrebno je da zaštitni (PE) i neutralni (N) provodnici budu razdvojeni u celoj električnoj instalaciji.
4. Kod izvođenja električnih instalacija treba voditi računa da se ne napravi greška u montaži utičnica, razvodnih tabli ili mernih ormara kojom bi došlo do spoja neutralnog (N) sa zaštitnim (PE) provodnikom ili do zamene njihovih mesta na stezaljkama.
5. Prilikom korišćenja i održavanja električnih instalacija treba voditi računa, da zbog loših kontaktnih spojeva, oštećenja izolacije (mehaničkih, termičkih, hemijskih i sl.) ili vlažnih zidova ne dođe do spoja neutralnog (N) provodnika sa zaštitnim (PE) provodnikom ili sa metalnim konstrukcijama u objektu, kao što su: cevi za vodu, cevi za gas, cevi za grejanje, čelična armatura u betonskoj konstrukciji objekta itd.
6. Treba sprečiti, koliko je to moguće, da u električnim prijemnicima zbog oštećenja izolacije, loših kontaktnih spojeva ili vlage ne dođe do spoja neutralnog (N) sa zaštitnim (PE) provodnikom ili sa metalnim kućištem prijemnika.
7. Izvođenjem izjednačenja potencijala prema tehničkim propisima IEC 60364-5-54: 2002 (Električne instalacije u zgradama - Deo 5-54: Izbor i postavljanje električne opreme - Uzemljenje, zaštitni provodnici i zaštitni provodnici za izjednačenje potencijala) značajno se može smanjiti ulazak lutajućih struja u objekat preko metalnih cevi i metalnih omotača kablova.
8. U područjima gde se često pojavljuju lutajuće struje u zemlji, treba postaviti izolacione umetke u cevovode kako bi se sprečio ulazak lutajućih struja preko njih u objekat.
9. Umesto koaksijalnih i kablova sa upredenim paricama treba koristiti optičke kablove, kroz koje ne mogu proticati lutajuće struje i koji nisu osetljivi na elektromagnetne smetnje, ali su skuplji.
10. Računare i računarsku opremu treba odmicati od metalnih konstrukcija kroz koje protiču lutajuće struje ili između njih postavljati metalne ploče koje su uzemljene.

Znači, pojava lutajućih struja u objektima bilo da su nastale u samom objektu ili su ušle spolja, može dovesti do smetnji, prekida u radu ili oštećenja opreme automatizovanih dijagnostičkih modela, odnosno računara i računarskih mreža. Međutim, primenom predloženih mera zaštite navedene opasnosti se mogu potpuno ili značajno otkloniti [116].

5.1.15 Provera tehničke opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Postavljanje dijagnoze (ocena stanja) kod jednostavnih tehničkih sistema (u slučaju kada se kontroliše samo jedan parametar) se svodi na utvrđivanje vrednosti dijagnostičkog parametra (S) i njegovo poređenje sa normativom. Za tehničke sisteme kod kojih se ocena stanja utvrđuje pomoću diskretnih dijagnostičkih parametara ocenu stanja je moguće postaviti samo u dve varijante i to¹⁴¹ [111]:

- $S < S_g$ – sistem “u radu”,
- $S > S_g$ – sistem “u otkazu”

Postavljanje dijagnoze (ocena stanja) kod složenih tehničkih sistema (u slučaju kada se kontroliše više dijagnostičkih parametara n) je veoma složeno. Svaki dijagnostički parametar može biti povezan sa više strukturnih, a veličina svakog od njih može ukazati na neku neispravnost. Ako je broj dijagnostičkih parametara n , broj mogućih stanja dijagnostikovanog sistema je 2^n . Pri tome se ocena stanja svodi na to da se iz niza mogućih stanja dijagnostikovanog tehničkog sistema izdvoji ono stvarno. Zadatak dijagnostike je

¹⁴¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, Stanković, N., Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

da pored velikog broja dijagnostičkih parametara otkrije mnogobrojne veze između strukturnih parametara X_1, X_2, \dots, X_n i odgovarajućih dijagnostičkih parametara S_1, S_2, \dots, S_n . Analitička zavisnost između strukturnih parametara i dijagnostičkih parametara se može napisati u obliku:

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(S_1, S_2, \dots, S_n) \\ X_2 &= f_2(S_1, S_2, \dots, S_n) \\ &--- \\ X_n &= f_n(S_1, S_2, \dots, S_n) \end{aligned} \quad (5.41)$$

Provera tehničke opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela detaljno je obrazložena u odeljku „6.1.1. Dokazivanje tačnosti prve pomoćne hipoteze” i odeljku „6.1.2. Dokazivanje tačnosti druge pomoćne hipoteze”, u kojima je dokazano da praktična primena novog modela doprinosi porastu nivoa pouzadnosti i raspoloživosti tehničkih sistema.

5.1.16 Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Pri izradi svakog projekata, pa i projekta novog automatizovanog dijagnostičkog modela, važnu ulogu ima provera ekonomske opravdanosti njegove praktične primene (ocena njegove rentabilnosti (profitabilnosti, isplativosti)). Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela, podrazumeva izračunavanje perioda povratka ukupnih troškova investiranja u taj projekat.

U ovoj fazi vrednovanja projekta se ne uzimaju u obzir mogućnosti za finansiranje projekta. Stoga, efekti finansiranja projekta kao što su kamate na dobijeni kredit, porezi, donacije, subvencije itd., se ne uzimaju u obzir prilikom izračunavanja ekonomske opravdanosti projekta, ali se uzimaju u obzir prilikom finansijske analize projekta¹⁴² [106].

Definisanje tačnih ekonomskih ulaznih parametara je veoma važno za tačnu proveru ekonomske opravdanosti realizacije projekta.

Ekonomski vek trajanja projekta predstavlja praktičan vek (period) trajanja opreme, odnosno vek (period) trajanja opreme pre nego što je isplativo da se zameni novom opremom. To je period u kome projekat donosi profit (uštete), koji je planiran i unet u studiju opravdanosti projekta.

Tehnički vek trajanja projekta predstavlja fizički vek (period) trajanja projekta, odnosno period koliko dugo oprema može da radi (tehnički). Utvrđuje se na osnovu fizičkog trajanja opreme neophodne za određeni projekat.

Ukoliko se oprema zamenjuje pre nego što se pohaba kao rezultat raspoloživosti na tržištu nove i efikasnije opreme, tada je ekonomski vek trajanja kraći od tehničkog veka trajanja. Promene standarda i propisa, cena energije, nivoa udobnosti, itd., mogu takođe da dovedu do zamene opreme pre isteka njenog tehničkog veka trajanja. Personalni računar ima tehnički vek trajanja od 7 - 10 godina, ali ekonomski vek trajanja je maksimalno 3 godine. Posle 3 godine, raspoloživi softver zahteva bolji personalni računar za njegovo efikasno korišćenje.

Ukupni troškovi investiranja I_o (ukupna investiciona ulaganja - investicija) obuhvataju sve troškove koji su vezani za troškove investiranja u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela izražavaju se u €. Troškovi investiranja u realizaciju projekta obično obuhvataju troškove projektovanja/planiranja i upravljanja projektom/uverenja o kvalitetu; zatim troškove nabavke opreme, montaže, kontrole i testiranja, obuke, poreze, PDV itd.

¹⁴² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 40-46.

Godišnja neto ušteda (prihod) B_g od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela se ostvaruje kroz smanjenje troškova održavanja, izražava se u €/god.

Ako realizacijom projekta nastaju godišnji dodatni troškovi onda se i oni moraju uzeti u obzir kako bi se dobila godišnja neto ušteda B_g , što se vrši tako što se od godišnjih ušteda B_o oduzmu godišnji dodatni troškovi ΔOM :

$$B_g = B_o - \Delta OM \quad (5.42)$$

gde je:

B_o - godišnja ušteda od realizacije projekta, u €/god

ΔOM - godišnji dodatni troškovi nastali realizacijom projekta (npr. godišnji troškovi održavanja modela i potrošnje električne energije potrebne za rad modela), u €/god

Period otplate (povratka) investicije PB (Payback) u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela predstavlja vremenski period koji je potrebno da prođe da bi se iz budućih prihoda (ostvarenih jednakih godišnjih neto ušteda B_g ($B_1=B_2=\dots=B_n$)) naplatila ukupna investiciona ulaganja u taj projekat. Posle tog vremenskog perioda investicija počinje da zarađuje novac sve dok se ne stigne do ekonomskog veka trajanja. Tada su potrebna nova investiciona ulaganja.

Period otplate (povratka) investicije PB (Payback) u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela može se izračunati ako se ukupni troškovi investiranja I_o u taj projekat podele sa godišnjom neto uštedom B_g ostvarenom realizacijom tog projekta:

$$PB = \frac{I_o}{B_g}, \text{ god} \quad (5.43)$$

Metoda perioda otplate je najjednostavnija metoda za brzu proveru ekonomske opravdanosti realizacije projekta, ali se moraju uzeti u obzir i određena ograničenja, kao što su:

- treba da se koristi samo kada je realna kamatna stopa niska,
- treba da se koristi za period otplate koji je kraći od 4-5 godina,
- metoda ne uzima u obzir vrednost godišnjih ušteda posle perioda otplate.

Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela detaljno je obrazložena u odeljku „6.1.3. Dokazivanje tačnosti treće pomoćne hipoteze” u kome je dokazano da je praktična primena novog modela ekonomski opravdana.

5.2 Rezultati dijagnostičkih kontrola mašina dobijenih praktičnom primenom novog modela u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije

U ovom delu su prikazani neki od rezultata dijagnostičkih kontrola dobijenih praktičnom primenom novog modela, u vremenskom intervalu od dve godine (od 21.12.2012. godine do 21.12.2014. godine), u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji) ito u sledećim preduzećima naše zemlje: u preduzeću za obradu i preradu drveta “Omega profeks” iz Loznice, zatim u preduzeću bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana “Viskoza” iz Loznice i u preduzeću obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure “Rudnici i topionica Zajača” kod Loznice.

U preduzeću za obradu i preradu drveta “Omega profeks” iz Loznice, primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti složenih mašina građenih od elektronskih, električnih, elektromehaničkih i mehaničkih komponenti, kao što su: CNC mašine za kompjutersko rezbarenje i graviranje, koje služe za rezbarenje i graviranje drveta, medijapana, iverice, plastike, šper ploče i drugih materijala; CNC glodalice; CNC Tiplerice, koje tipluju drvo, ivericu i sl., odnosno buše rupe na drvetu i iverici za police, šarke i sl.; Automatske bušilice, koje služe za vertikalno i horizontalno bušenje; Mašine za automatsko rezanje dašćica; Prese za furniranje, koje služe za presovanje

furnira; Kanterice, koje služe za lepljenje trake na ivericu, medijapan i sl.; Giljotine za rezanje furnira, koje služe za rezanje furnira dužina 3000 mm; Mašine za odvojeno rezanje sa kružnom pilom za proizvodnju stolarije; Mašine za izradu greda itd.

Primenom razvijenog novog modela izvršene su automatizovane dijagnostičke kontrole mašina u industrijskim pogonima preduzeća bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i preduzeća obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice. Mašine koje su kontrolisane u ovim preduzećima primenom novog modela su: elektromotorni pogoni cirkulacionih pumpi, ventilatori svežeg vazduha i ventilatori dimnih gasova u toplanama, motori mlinova za ugalj, pogoni tračnih transporterata itd.

Primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole aparata elektroenergetskih postrojenja Elektroprivrede Srbije (EPS-a), kao što su: energetske transformatori, strujni i naponski merni transformatori, rastavljači, provodni izolatori itd.

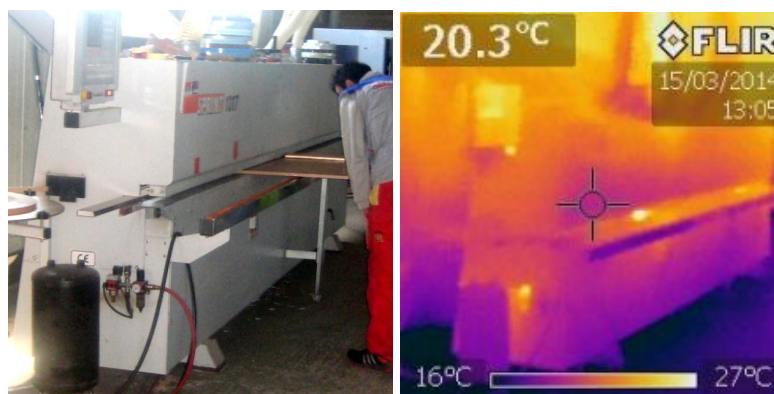
Sve sprovedene dijagnostičke kontrole i proračun veličina urađeni su prema međunarodnim IEC standardima uz korišćenje mnoštva iskustvenih podataka, ali sve u skladu s internim fabričkim standardima. Svaka dijagnostička kontrola donosila je nova iskustva tako da je već posle desetak dana probnih ispitivanja novi dijagnostički model bio spreman za operativnu upotrebu.

Razvijeni novi model je baziran na korišćenju tri dijagnostičke metode: metode termografije, metode analize frekvencijskog spektra vibracija i metode analize frekvencijskog spektra struje statora. U nastavku su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola dobijenih primenom sve tri metode, kako bi se uporedila njihova efikasnost.

1. Rezultati dijagnostičkih kontrola mašina dobijenih metodom termografije

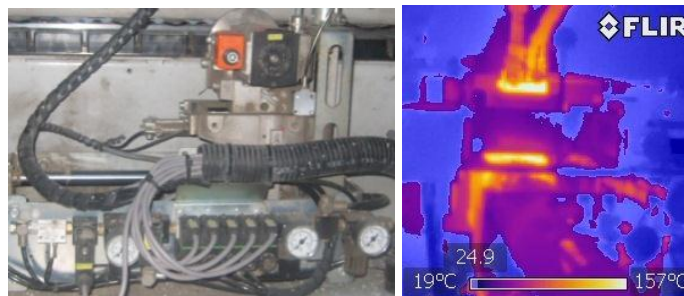
U ovom delu su prikazani rezultati termografskih dijagnostičkih kontrola kompleksnih mašina dobijenih primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela.

Na slici 5.27 je prikazan fotografski i termografski snimak mašine Kanterice, koja služi za lepljenje trake na ivericu, medijapan i sl. Pogon mašine je električni i pneumatski. Ima dva motora, koji skidaju višak iverice i trake sa čela i obrađuju čelo. Glavni motor služi za pogon glavne trake mašine. Optimalna temperatura lepka je od 190-220°C. Stanica za lepak greje lepak, koji lepi traku za ivericu, pneumatika pomera lepak. Na termografskom snimku se ne uočavaju mesta sa povišenim temperaturama što znači da ne postoje pregrevanja na mašini, a time i neispravnosti koje se manifestuju porastom temperature.



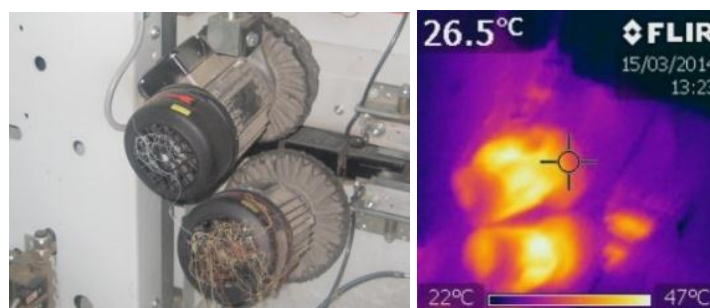
Slika 5.27. Fotografski i termografski snimak Kanterice

Na slici 5.28. je prikazan fotografski i termografski snimak unutrašnjosti Kanterice. Na termografskom snimku se uočavaju mesta sa povišenim temperaturama što znači da postoje pregrevanja, uzrok tih pregrevanja najverovatnije su loši kontakti spojevi provodnika, što je kasnije i potvrđeno prilikom otklanjanja otkaza.



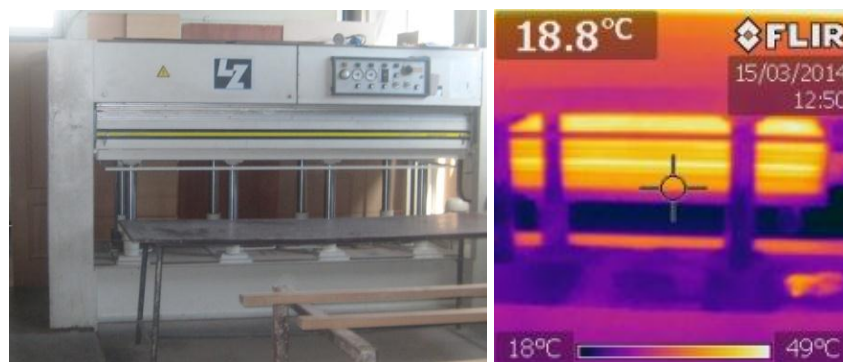
Slika 5.28. Fotografski i termografski snimak unutrašnjosti Kanterice

Sledeća kontrola je vršena na dva ista pomoćna motora Kanterice čiji je fotografski i termografski snimak prikazan na slici 5.29. Pošto su elektromotori istih karakteristika i izloženi istom opterećenju i istim uslovima okoline ocena njihovog stanja vršena je metodom komparacije odnosno poređenja njihovih temperatura. Sa termogramskih snimaka uočeno je da osovina prvog elektromotora ima višu temperaturu od osovine drugog elektromotora (referentnog) za 18°C. Prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6., na osnovu veličine pregrevanja od 18°C, zaključeno je da je stepen defekta osovine elektromotora “2” i preporučeno je da se termografski kontroliše jednom mesečno i otkloniti defekt kada se ukaže prva povoljna prilika.



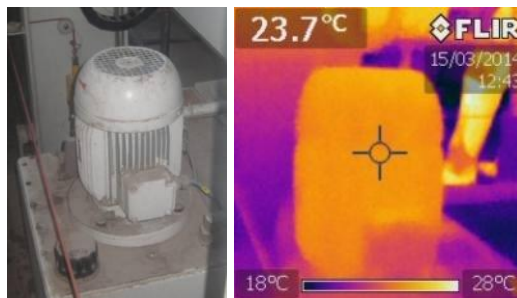
Slika 5.29. Fotografski i termografski snimak pomoćnih motora Kanterice

Na slici 5.30. je prikazan fotografski i termografski snimak prese za furniranje, koja služi za presovanje furnira. Na termografskom snimku se ne uočavaju mesta sa povišenim temperaturama što znači da ne postoje pregrevanja mašine, a time i neispravnosti koje se manifestuju porastom temperature.



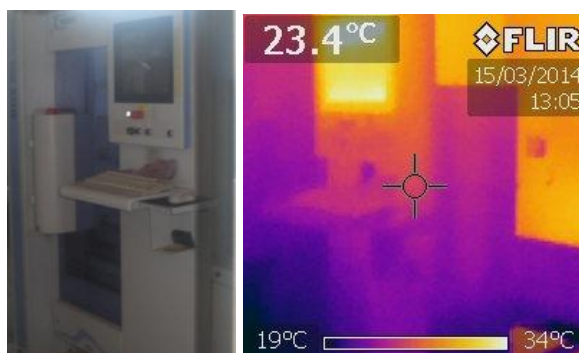
Slika 5.30. Fotografski i termografski snimak unutrašnjeg dela prese za furniranje

Na slici 5.31. prikazan je fotografski i termografski snimak trofaznog asinhronog motora za pogon prese, čije su karakteristike: Δ/Y 400/690 V, 6,9/4 A, 3 kW, $\cos\phi=0,81/0,82$, EUN EBG 380-42-655- 725 V. Na termografskom snimku se ne uočavaju povišene temperature na površini motora, što znači da nema neispravnosti na površini koje bi se manifestovale pregrevanjem.



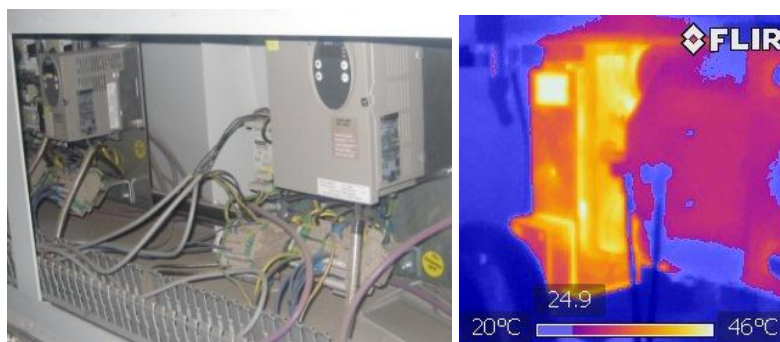
Slika 5.31. Fotografski i termografski snimak elektromotora prese za furniranje

Na slici 5.32. je prikazan fotografski i termografski snimak CNC Tiplerice, koja tipluje drvo, ivericu i sl., odnosno buši rupe na drvetu i iverici za police, šarke i sl. Tiplerica ima električni i pneumatski pogon, sa automatskim samopodmazivanjem. Sadrži alat za glodala i burgije.



Slika 5.32. Fotografski i termografski snimak CNC Tiplerice

Na termografskom snimku prikazanom na slici 5.32. ne uočavaju mesta sa povišenim temperaturama na spoljašnjem delu mašine, međutim u unutrašnjosti CNC Tiplerice se uočava pregrevanje, kao što se vidi sa slike 5.33. Najverovatniji uzrok pregrevanja je loše hlađenje što je kasnije i utvrđeno, jer je otkazao ventilator za hlađenje.



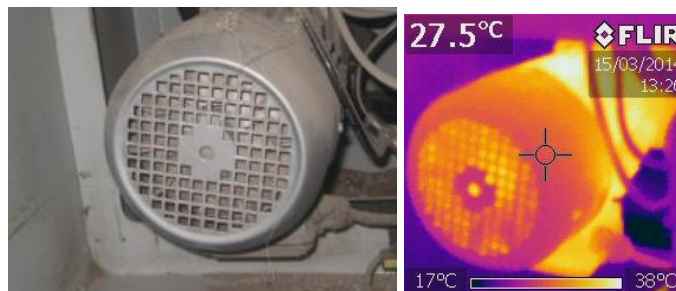
Slika 5.33 Fotografski i termografski snimak unutrašnjosti CNC Tiplerice

Na slici 5.34 je prikazan fotografski snimak giljotine za rezanje furnira CERVA TSA 3050, koja služi za rezanje furnira dužina 3000 mm.



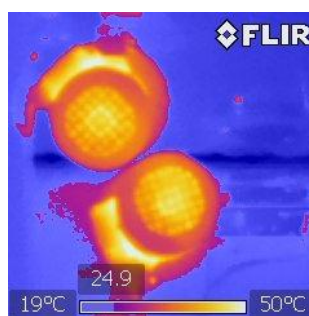
Slika 5.34. Fotografski giljotine za rezanje furnira

Na slici 5.35. je prikazan fotografski i termografski snimak elektromotora giljotine za rezanje furnira sa koga se može uočiti da postoji visoka temperaturu kućišta elektromotora, zbog neadekvatnog protoka vazduha za hlađenje elektromotora, jer ventilator za hlađenje elektromotora koristi topli vazduh iz kućišta motora. Nakon što je dodatnim kanalom na usisu ventilatora doveden vazduh iz okoline došlo je do znatnog sniženja temperature kućišta elektromotora.



Slika 5.35. Fotografski i termografski snimci elektromotora giljotine za rezanje furnira

Termografske kontrole su sprovedene i na dva motora za pogon pumpi, istih karakteristika, koji su bili izloženi istom opterećenju i istim radnim uslovima, čiji je termografski snimak prikazan na slici 5.36. Uočeno je da ležaj donjeg motora ima višu temperaturu nego ležaj gornjeg motora (referentnog elementa) za 8°C. Pošto su u pitanju elektromotori istih karakteristika izloženi istom opterećenju i istim uslovima rada ocena stanja ležajeva vršena je metodom komparacije odnosno poređenja njihovih temperature. Prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6. na osnovu veličine pregrevanja od 8°C zaključeno je da je stepen defekta ležaja donjeg motora „1“ i preporučeno je da defekt treba pažljivo pratiti i planirati njegovo otklanjanje. Najverovatniji uzrok pregrevanja je nesaosnost mašina.



Slika 5.36. Termografski snimak elektromotora za pogon pumpi

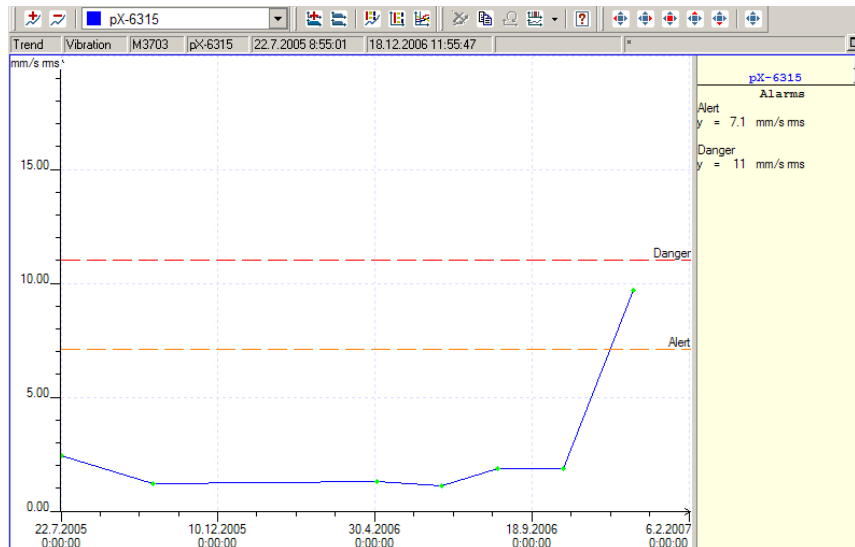
2. Rezultati dijagnostičkih kontrola mašina dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra vibracija

Kao rezultat vibracionih kontrola ležajeva pumpe u toplovodnom sistemu dobijen je frekvencijski spektar brzine vibracija. Uočeno je da izmerene amplitude brzina vibracija na kritičnim frekvencijama za pojedine delova ležaja ne prelaze ili bar ne značajno 0,250 mm/s, ali je uočeno i da postoji trend porasta nivoa vibracija iznad alarmne vrednosti, što se vidi sa slike 5.37., ito na prednjoj strani elektromotora na kojoj se nalazi ventilator, koji služi za sabijanje vazduha. Pošto je utvrđen očigledan trend porasta nivoa vibracija, analizom frekvencijskog spektra vibracija uočeno je da postoji harmonik vibracija na frekvenciji rotacije mašine f_r , na osnovu čega je pretpostavljeno da postoji neuravnoteženost rotora. Nakon otvaranja ventilatora utvrđeno je da su tri lopatice ventilatora oštećene čime je potvrđena tačnost pretpostavke¹⁴³ [94].

Ispitivan je i motor, koji preko regulacione hidrauličke spojnice, pogoni pumpu visokog pritiska. Pri tome je uočen povišen nivo mehaničkih vibracija koje se prigušuju i pojačavaju u ritmu klizanja rotora i uočeno je određeno oscilovanje kazaljke ampermetra u sekundarnom kolu strujnog mernog transformatora. Meranjem na kliznom ležaju prema reduktoru motora pumpe, pri opterećenju od 1,56 MW utvrđeno je da

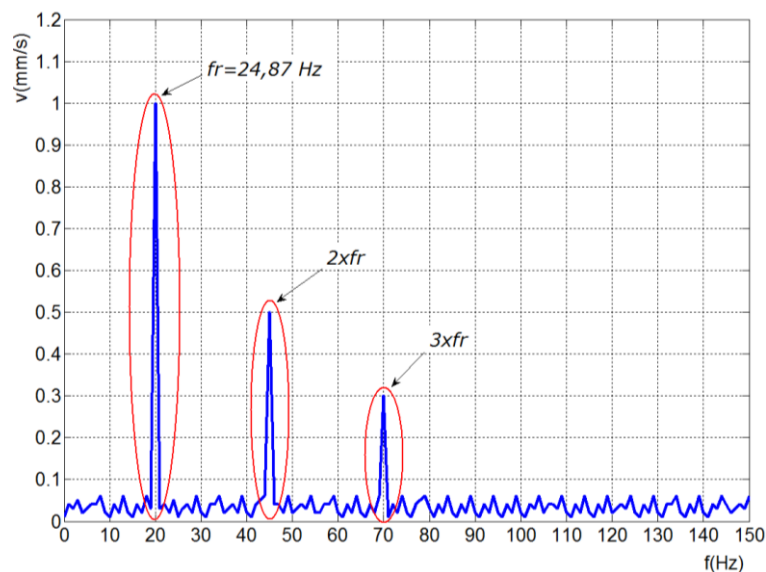
¹⁴³ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

amplituda brzine vibracija varira u opsegu od 2,6 mm/s do 5,7 mm/s pri čemu se promena dešava u ritmu klizanja rotora. Takođe je utvrđeno je da nivo ovih vibracija zavisi od opterećenja. Na osnovu uočenih mehaničkih vibracija, kao i na osnovu rezultata analize frekvencijskog spektra struje statora motora, pri delimičnom opterećenju, pretpostavljeno je da postoje određena oštećenja kaveza rotora motora pumpe (slomljene šipke kaveza), kao i statički ekscentricitet. Nivo oštećenja nije bilo moguće dobro oceniti, jer je motor bio podopterećen, ali je utvrđeno da oštećenja sigurno postoje. Analiza otkaza motora po njegovom otvaranju potvrdila je da postoje tri slomljene šipke kaveza. Pretpostavka je da je uzrok nedovoljno poklapanje osa statora i rotora pri montaži, što je dovelo do oštećenja kaveza rotora zbog povišenog nivoa vibracija.



Slika 5.37. Dijagram trenda porasta vibracija ležaja pumpe [94]

Kao rezultat vibracionih kontrola ležajeva motora za pogon pumpe dobijen je frekvencijski spektar brzine vibracija, koji je prikazan na slici 5.38. U frekvencijskom spektru brzine vibracija uočeno je prisustvo pored osnovnog harmonika na frekvenciji rotacije $1 \times f_r$ i dodatnih harmonika na dvostrukoj i trostrukoj frekvenciji rotacije $2 \times f_r$ i $3 \times f_r$ (gde je $f_r = RPM/60 = (1489 \text{ ob/min})/60 = 24,87 \text{ Hz}$ - frekvencija rotacije, a RPM - broj obrtaja u minuti), što navodi na zaključak da postoji necentriranost elektromotora i pumpe.



Slika 5.38. Frekvencijski spektar brzine vibracija ležajeva motora za pogon pumpe

3. Rezultati dijagnostičkih kontrola kaveza rotora asinhronih motora dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra struje

U ovom delu su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola elektromehaničkog stanja asinhronih motora (kaveza rotora i dinamičkog ekscentriciteta) dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra

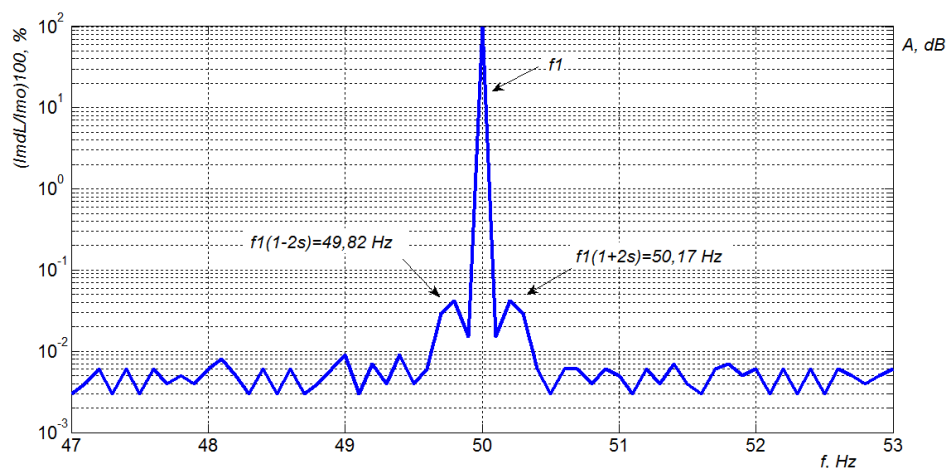
jedne faze struje statora u realnim pogonskim uslovima, prema principijelnoj šemi prikazanoj na slici 5.24. Prikazani su rezultati dijagnostičkih kontrola asinhronih motora napojnih pumpi u toplani (npr. koje služe za cirkulaciju vode kroz kotao u toplani), kao i motora u sistemima toplovođa u realnim pogonskim uslovima, širokog raspona snaga i visokonaponskih (6 kV) i niskonaponskih (400 V).

Prilikom dijagnostičkih kontrola težilo se da motori budu nominalno opterećeni, međutim zbog tehnoloških razloga to nije bilo moguće uvek ostvariti, tako da su motori kontrolisani pod najvećim opterećenjem koje je bilo moguće ostvariti u to vreme. Snimani su oscilogrami struje u jednoj fazi namotaja statora motora u normalnim pogonskim uslovima. Frekvencijski spektar struje jedne faze statora (vidljiv na ekranu spektralnog analizatora i na računaru) sadrži uz harmonike koji su karakteristični za ispravan rotor, superponirane i dodatne harmonike koji su karakteristični za oštećen kavez (npr. oštećene šipke, prstenove ili loše spojeve). Karakteristične frekvencije tih harmonika i njihove amplituda se koriste za ocenu stanja rotora.

Uz direktno snimanje struje motora i poznavanje podataka očitanih s natpisne pločice motora potrebno je i poznavanje podataka koji obično nisu lako dostupni (npr. broj žlebova rotora, struja magnetiziranja i sl.) ili ih je potrebno što tačnije proceniti. Navedeni podaci za ispitivane elektromotore se dobijaju od proizvođača elektromotora.

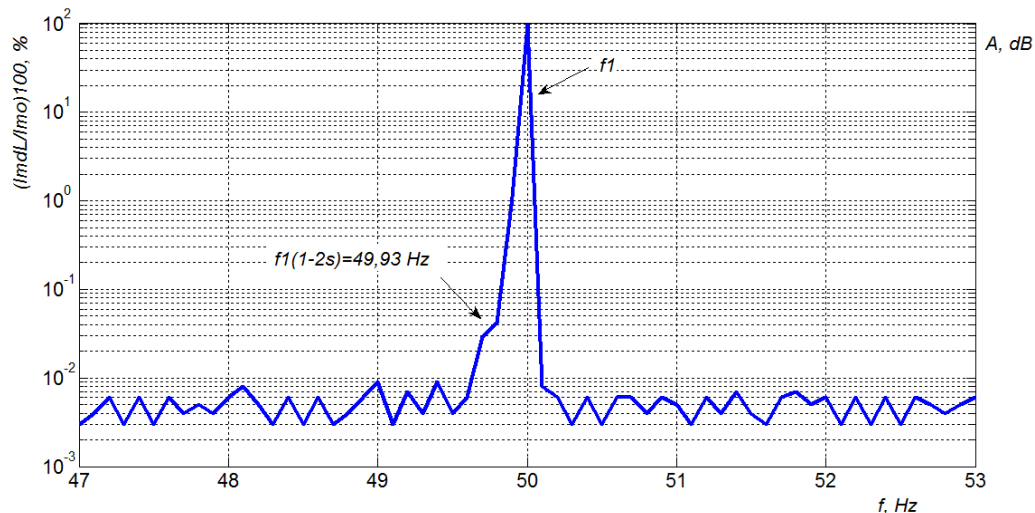
Kontrole pomoću programa Motormonitor su sprovedene u realnim pogonskim uslovima, bez ometanja pogona, a računarske analize rezultata ispitivanja su pretvorene u jednostavne dijagnostičke poruke. Ove poruke omogućile su donošenje odluka o daljim aktivnostima na ispitivanim elektromotorima (npr. dalji pregled "off-line" metodama, te eventualna popravka ili zamena). Računarski postavljene dijagnoze su potvrđivane naknadnim demontažama i detaljnim pregledima ($U-I$ metoda provere otpora, primena penetranata na spojnim mestima i sl.). Nakon popravke detektovanih otkaza ponovo su sprovedene kontrole primenom programa Motormonitor, u većini slučajeva utvrđeno je ispravno stanje rotora, kao i motora uopšte, a indeks stanja je smanjivan (npr. sa početnih 1,85 na 0,12).

Na slici 5.39. je prikazan frekvencijski spektar struje statora elektromotora snage 1,8 MW u okolini frekvencije 50 Hz. Merenje na ovom elektromotoru je sprovedeno pri struji opterećenja 102,3 A. Nazivna struja motora je 200 A. Klizanje motora (dobijeno na osnovu brzine iz programa) iznosilo je $s=0,00173$. Na osnovu klizanja s dobijene su frekvencije dodatnih harmonika $f_1(1-2s)=49,82$ Hz i $f_1(1+2s)=50,17$ Hz. Sa slike 5.39. se može uočiti porast amplituda navedenih dodatnih harmonika. Približan odnos amplituda dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1-2s)$ i osnovnog harmonika frekvencije $f_1=50$ Hz iznosi -47 dB odnosno 1/224 (0,42%). Navedeni odnos upućuje na povećanje otpora spojeva pa čak i na mogućnost jedne slomljene šipke kaveza rotora. Dobijen je indeks stanja rotora 0,65. Isto merenje je izvršeno i pri struji opterećenja 112,1 A, pri čemu je dobijen veći indeks stanja rotora 0,74. Motor bi trebalo ispitati pri većem opterećenju (što bližem nazivnom). Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „U namotu rotora pokazuju se slabi znaci visokootpornih spojeva. Rotor treba ponovo ispitati za 9 meseci. Ako je ovaj motor ima cikluse „teškog pogona“ ponovno ispitivanje treba sprovesti nakon 6 meseci ili nakon 50 zaleta, šta pre prođe“.



Slika 5.39. Spektar struje statora asinhronog motora 1,8 MW u okolini frekvencije 50 Hz

Na slici 5.40. je prikazan frekventijski spektar struje statora elektromotora 600 kW u okolini frekvencije 50 Hz. Merenje na ovom elektromotoru je sprovedeno pri struji opterećenju iznosa 34 A. Nazivna struja motora je 55 A. Sa slike se može uočiti samo dodatni levi harmonik frekvencije blizu osnovne frekvencije $f_1=50$ Hz. Frekvencija tog harmonika iznosi 49,93 Hz. Amplituda ovog harmonika u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika iznosi - 40 dB odnosno 1/100 (1,1%). Program Motormonitor harmonik frekvencije 49,93 Hz nije posmatrao kao frekvenciju značajnu za dijagnostiku stanja rotora. Klizanje motora (dobijeno na osnovu brzine iz programa) iznosi $s=0,00133$ te frekvencija harmonika $f_1(1-2s)$, interesantnog u smislu dijagnostike stanja rotora, iznosi 49,88 Hz. Zbog relativno malog opterećenja motora (i velike snage) klizanje s je malo te je otežano razlučivanje dodatnih harmonika s razmakom jednakim dvostrukoj frekvenciji klizanja. Preporučuje se da se ispitivanje ponovi pri većem opterećenju. Dobijen je indeks stanja rotora 0,32. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „Ovaj namot rotora je u ispravnom stanju (ne pokazuje znakove povećanog otpora spojeva) i treba ga ponovo ispitati (proveriti) za 12 meseci ili nakon 200 zaleta, šta pre prođe“.



Slika 5.40. Frekventijski spektar struje statora asinhronog elektromotora 600 kW u okolini frekvencije 50 Hz

4. Rezultati dijagnostičkih kontrola nivoa dinamičkog ekscentriciteta asinhronih motora dobijenih metodom analize frekventijskog spektra struje

Neki od rezultata dijagnostičkih kontrola nivoa dinamičkog ekscentriciteta asinhronih motora dobijenih primenom programskog paketa Motormonitor sa dijagnostičkim porukama ovog programa prikazani su u tabeli 5.10.

Tabela 5.10. Rezultati merenja nivoa dinamičkog ekscentriciteta elektromotora

Dinamički ekscentricitet, %	Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor
18	Ovo je normalan nivo dinamičkog ekscentriciteta. Zbog toga se može smatrati da je stanje ovog motora zadovoljavajuće. Ponovo ispitivanje treba obaviti za 9-12 meseci od današnjeg datuma.
23	Nivo dinamičkog ekscentriciteta ovog motora može uzrokovati vibracije u ležajevima. Proveriti mehaničke vibracije motora. Ako su one u dozvoljenim granicama, ponovo ispitivanje se mora obaviti najkasnije za šest meseci.
31	Nivo dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započeće razvijanje sekundarnih otkaza. Proveriti mehaničke vibracije motora i uporediti ih sa prethodnim podacima. Motor se mora ponovo ispitati najkasnije za mesec dana.
41	Nivo dinamičkog ekscentriciteta ovog motora započeće razvijanje sekundarnih otkaza. Proveriti mehaničke vibracije motora.

Dijagnostičke poruke programa Motormonitor su u skladu i sa kriterijumima o dopuštenim granicama ekscentriciteta. Ekscentricitet vazdušnog zazora do 10% se smatra dopuštenom, gornja granica

prihvatljivog ekscentriciteta iznosi 20%, dok je pri 50% -nom ili višem nivou ekscentriciteta motor potrebno isključiti iz pogona.

Na osnovu rezultata merenja dinamičkog ekscentriciteta, prikazanih u tabeli 5.13, uočeno je pogoršano stanje dinamičkog ekscentriciteta ili uticaj opterećenja kod određenog broja ispitivanih elektromotora. Zato je predloženo da se, u specijalizovanoj radionici, provede detaljan pregled motora. Pre demontaže motora preporučeno je da se izmere vibracije motora i pumpi. Međutim, u svakom slučaju preporučeno je da se, u roku od 30 dana, ponovnim merenjem izvrši provera stanja dinamičkog ekscentriciteta.

Praćenje trenda stanja kod merenja dinamičkog ekscentriciteta je od posebne važnosti, jer se na osnovu toga mogu se donositi određene odluke o daljim aktivnostima na motorima.

Važno je napomenuti da iz tehnoloških razloga pri ispitivanju motora nije bilo moguće postići opterećenja veća od 44% (na nekim motorima su bila i oko 38%), te je rezolucija za traženje pojedinih dodatnih harmonika bila nedovoljna. Odnos signal/šum takođe je bio nepovoljan kod nekih merenja. Zbog toga je preporučeno da se merenja ponove pri većim opterećenjima (što bližim nazivnim).

Ispitivana su dva asinhrona motora snage $P=5$ kW, napona $U=380$ V, frekvencije $f_1=50$ Hz, brzine obrtanja $n=1322$ o/min ($s=0,11866$), broj žlebova rotora $N_R=51$, $2p=4$, u čijem frekvencijskom spektru struje statora je uočen porast dodatnih harmonika datih izrazom (5.22), pri povećanju statičkog ekscentriciteta sa 10% (prihvatljivo) na 50% (neprihvatljivo). Svi dodatni harmonici f_{eksc} dati izrazom (5.22) nisu nužno vidljivi u frekvencijskom spektru struje statora.

Za $v=\pm 1$ dobija se da je:

$$f_{eksc} = f_1 \cdot \left[(k \cdot N_R \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \pm v \right] = 50 \left[(1 \cdot 51 \pm 0) \cdot \frac{1-0,11866}{2} \pm v \right] = 50 \cdot (51 \cdot 0,44067 \pm v) \quad (5.44)$$

$$= 50 \cdot (22,47417 \pm v) = 50 \cdot (22,47417 \pm 1) = 50 \cdot 21,47417 = 1073,7 \text{ Hz} \quad i \quad f_{eks} = 1173,7 \text{ Hz}$$

Za $v=\pm 2$ dobija se da je:

$$f_{eksc} = 50 \cdot (22,47417 \pm 2) = 50 \cdot 20,47417 = 1023,7 \text{ Hz} \quad i \quad f_{eks} = 1223,7 \text{ Hz} \quad (5.45)$$

Za $v=\pm 3$ dobija se da je:

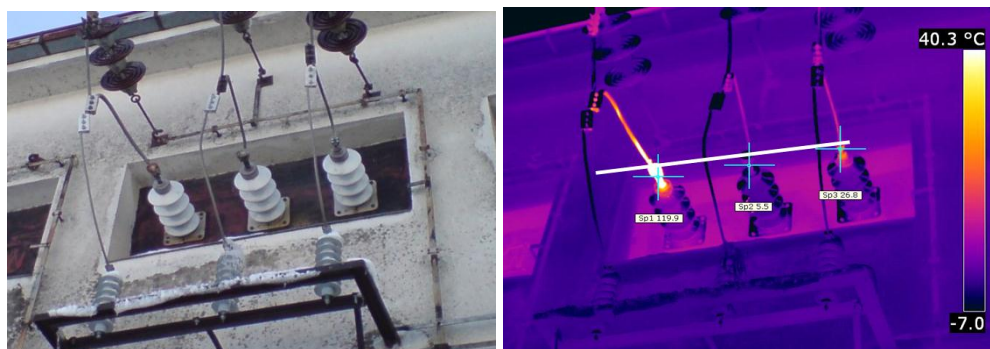
$$f_{eksc} = 50 \cdot (22,47417 \pm 3) = 50 \cdot 19,47417 = 973,7 \text{ Hz} \quad i \quad f_{eks} = 1273,7 \text{ Hz} \quad (5.46)$$

Postojanje žlebnih harmonika vezano je za postojanje statičkog ekscentriciteta motora, a njihove amplitude zavise od nivoa statičkog ekscentriciteta. Uočeno je da je relativna amplituda žlebnog harmonika na frekvenciji 1223,7 Hz za 1,9 puta veća kod drugog motora nego kod prvog motora prve pri približno istom opterećenju, a pri frekvenciji na 1273,7 Hz za 1,38, što znači da je statički ekscentricitet drugog motora veći nego statički ekscentricitet prvog motora. Utvrđeno je da je statički ekscentricitet drugog motora postojao zbog nedovoljnog poklapanja osa statora i rotora.

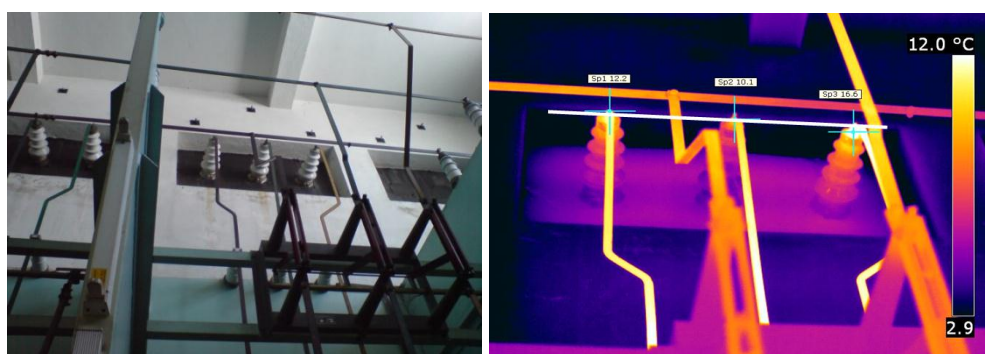
5.3 Rezultati dijagnostičkih kontrola elektroenergetskih postrojenja dobijenih praktičnom primenom novog modela u realnim pogonskim uslovima

U ovom delu su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola aparata elektroenergetskih postrojenja dobijenih primenom razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u realnim pogonskim uslovima. Da bi se utvrdilo da li je opterećenje simetrično vršeno je merenje struja opterećenja u sve tri faze pomoću ampermetara koji su priključivani preko strujnih mernih transformatora. Temperatura atmosfere merena je pomoću termometra, a brzina vetra pomoću aerometra. Merenje prelaznih električnih otpornosti spojeva priključnih stezaljki vršena su $U-I$ metodom pomoću ampermetra i voltmetra u beznaponskom stanju, za vreme otklanjanja utvrđenih defekata.

Na slikama 5.41., 5.42. i 5.43. prikazane su fotografske i termografske slike spoljašnjih i unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani, kao i provodnih izolatora energetskog transformatora na 10 kV strani, respektivno¹⁴⁴ [72].



Slika 5.41. Fotografiska i termografska slika spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani [72]



Slika 5.42. Fotografiska i termografska slika unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani [72]



Slika 5.43. Fotografiska i termografska slika provodnih izolatora transformatora na 10 kV strani [72]

Na osnovu rezultata termografskih dijagnostičkih kontrola formirana je tabela 5.11 u kojoj su navedene: nominalne struje I_n u sve tri faze; izmerene struje opterećenja I_m u sve tri faze u trenucima termografskih snimanja; izmerene temperature priključnih stezaljki T u sve tri faze u trenucima termografskih snimanja; izračunate prema relaciji (5.9) temperaturne razlike ΔT_m koje su bile između toplih priključnih stezaljki i referentnih priključnih stezaljki u trenucima termografskih snimanja pri strujama opterećenja I_m koje su se kretale u granicama $I_m=(0,3-0,6)I_n$; izračunate prema relaciji (5.10) temperaturne razlike $\Delta T_{0,5}$ koje bi bile između toplih priključnih stezaljki i referentnih priključnih stezaljki u trenucima termografskih snimanja pri strujama opterećenja jednakim 50% nominalne struje ($I_m=0,5 \cdot I_n$); na kraju su

¹⁴⁴ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

navedeni ocenjeni stepeni defekata toplih priključnih stezaljki na osnovu izračunatih temperaturnih razlika $\Delta T_{0,5}$ prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6¹⁴⁵ [71].

Tabela 5.11. Ocenjeni stepeni defekata priključnih stezaljki na osnovu izračunatih temperaturnih razlika $\Delta T_{0,5}$ prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6.

Kontrolisane priključne stezaljke	Oznake faza	I_n , A	I_m , A	T , °C	ΔT_m , °C	$\Delta T_{0,5}$, °C	Ocenjeni stepeni defekata priključnih stezaljki
Priključne stezaljke spoljašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani	L ₁	230	101	119,9	114,4	151,2	3
	L ₂	230	101	5,5	-	-	Referentna
	L ₃	230	100	26,8	21,3	28,1	2
Priključne stezaljke unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani	L ₁	230	101	16,6	6,5	8,4	1
	L ₂	230	100	10,1	-	-	Referentna
	L ₃	230	100	12,2	2,1	2,7	Ispravna
Priključne stezaljke provodnih izolatora transformatora na 10 kV strani	L ₁	800	390	10,9	-	-	Referentna
	L ₂	800	391	11,2	0,3	0,3	Ispravna
	L ₃	800	390	33,6	22,7	23,8	2

Nakon sprovedenih termografskih snimanja izvršene su analize termografskih slika (termograma) 5.41., 5.42. i 5.43. i podataka u tabeli 5.11 na osnovu kojih su utvrđena mesta i uzroci defekata i preporučene mere koje služba održavanja treba da sprovede u optimalnom vremenskom periodu kako bi se uočeni defekti pravovremeno otklonili¹⁴⁶ [90].

Iz tabele 5.11 se vidi da su izmerene struje opterećenja I_m u sve tri faze približno iste. Što znači da je u trenucima termografskih snimanja opterećenje bilo približno simetrično, pa bi prema tome iste priključne stezaljke u sve tri faze trebalo da imaju približno iste temperature.¹⁴⁷ [72].

Na osnovu termografske slike 5.41 i tabele 5.11 može se uočiti da priključna stezaljka spoljašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L₂ ima najnižu temperaturu $T=5,5^\circ\text{C}$, pa se zbog toga smatra ispravnom i usvaja kao referentna. Njena temperatura se poredi sa temperaturama priključnih stezaljki u preostale dve faze. Temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L₁ i referentne priključne stezaljke u fazi L₂, pri struji opterećenja $I_m=101$ A u trenutku termografskog snimanja, iznosila je $\Delta T_m=114,4^\circ\text{C}$. Dok je temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L₃ i referentne priključne stezaljke u fazi L₂, pri struji opterećenja $I_m=100$ A u trenutku termografskog snimanja, iznosila je $\Delta T_m=21,3^\circ\text{C}$. Međutim, iz tabele 5.11. se vidi da bi pri struji opterećenja jednakoj 50% nominalne struje ($I_m=0,5 \cdot I_n=0,5 \cdot 230=115$ A) temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L₁ i referentne priključne stezaljke u fazi L₂ bila $\Delta T_{0,5}=151,2^\circ\text{C}$. Na osnovu ove temperaturne razlike stanje priključne stezaljke u fazi L₁ se, prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6., procenjuje kao 3 (havarijski) stepen defekta koga treba hitno otkloniti. Takođe, iz tabele 5.11 se vidi da bi pri struji opterećenja jednakoj 50% nominalne struje ($I_m=0,5 \cdot I_n=0,5 \cdot 230=115$ A) temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L₃ i referentne priključne stezaljke u fazi L₂ bila $\Delta T_{0,5}=28,1^\circ\text{C}$. Na osnovu ove temperaturne razlike stanje priključne stezaljke u fazi L₃ se, prema kriterijumima navedenim u tabeli 5.6., procenjuje kao 2 (razvijeni)

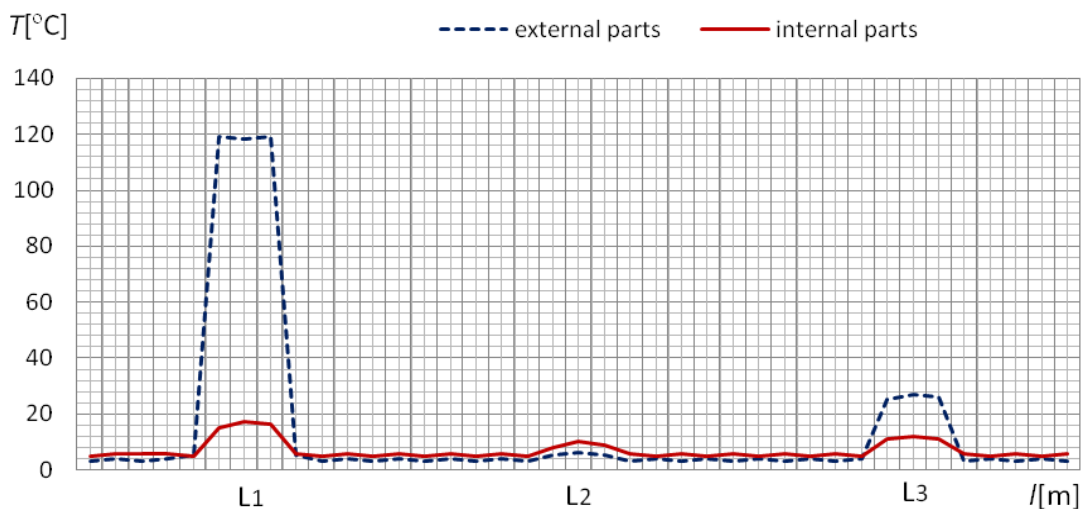
¹⁴⁵ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, Lj., Savic, B., Stankovic, N., Application of the method of thermography in diagnostics of power plants, Proceedings/ II International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection, Zrenjanin, 31st. October, 2012, pp. 157-164.

¹⁴⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetsku efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.

¹⁴⁷ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, Lj., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

stepen defekta, koga treba termografski kontrolisati jednom mesečno i otkloniti kada se za to ukaže prva povoljna prilika. Međutim, pošto je potrebno izvršiti isključenje postrojenja da bi se izvršilo hitno otklanjanje defekta priključene stezaljke u fazi L_1 , predlaže se da se tada izvrši i otklanjanje defekta priključne stezaljke u fazi L_3 . Sa termografske slike 5.41. se uočava da su najviše temperature na spojevima priključnih stezaljki i užadi u fazama L_1 i L_3 . Pažljivim vizuelnim pregledom fotografske slike 5.41. može se uočiti da je spoj priključne stezaljke i užeta u fazi L_1 u veoma lošem stanju, odnosno da je korodirao pa je to najverovatnije i uzrok njegovog pregrevanja. Takođe, može se uočiti da je spoj priključne stezaljke i užeta u fazi L_3 malo korodirao i zaprljan i da nije u tako lošem stanju kao spoj u fazi L_1 ¹⁴⁸ [89].

Analogno prethodnoj analizi, na osnovu termografske slike 5.42. i tabele 5.11 priključna stezaljka unutrašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_2 se usvaja kao referentna. Stanje priključne stezaljke u fazi L_1 se procenjuje kao 1 (početni) stepen defekta, koga treba pažljivo pratiti i planirati njegovo otklanjanje. Dok se stanje priključne stezaljke u fazi L_3 procenjuje kao ispravno i ne zahteva preduzimanje bilo kakvih aktivnosti održavanja. Međutim, pažljivom analizom može se zaključiti da temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L_1 i referentne priključne stezaljke u fazi L_2 od $\Delta T_m = 6,5^\circ\text{C}$ nije posledica defekta priključne stezaljke unutrašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 , nego je posledica prenosa toplote kondukcijom na nju sa priključne stezaljke spoljašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV u istoj toj fazi L_1 , koja ima izuzetno visoku temperaturu od $T = 119,9^\circ\text{C}$. Ovo se takođe može uočiti ako se na slici 5.44. poredi profili temperatura duž linija povučenih na termografskim slikama 5.41. i 5.42. kroz priključne stezaljke na spoljašnjim i unutrašnjim delovima provodnih izolatora na 35 kV strani, respektivno. Vidi se da priključna stezaljka spoljašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 ima znatno višu temperaturu nego priključna stezaljka unutrašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 . Preporučuje se kada se bude vršilo otklanjanje defekta na priključnoj stezaljci spoljašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 , da se tada izvrši kontrola ispravnosti priključne stezaljke unutrašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 . Ova kontrola nije neophodna, ali je poželjna, jer zbog pregrevanja može doći do defekta ove priključne stezaljke [72].

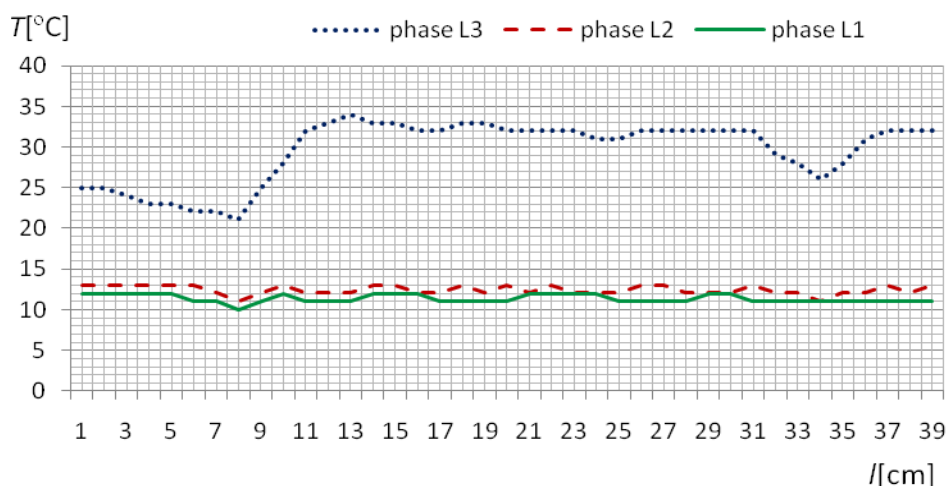


Slika 5.44. Profili temperatura duž linija povučenih na termografskoj slici kroz priključne stezaljke na spoljašnjim i unutrašnjim delovima provodnih izolatora na 35 kV strani, isprekidana linija se odnosi na termografsku sliku 5.41., a puna linija na termografsku sliku 5.42. [72]

Takođe, analogno prethodnim analizama na osnovu termografske slike 5.42 i tabele 5.43. priključna stezaljka provodnog izolatora transformatora na 10 kV strani (koja spaja sabirnicu i provodni izolator) u fazi L_1 se usvaja kao referentna. Stanje priključne stezaljke u fazi L_2 se procenjuje kao ispravno i ne zahteva preduzimanje bilo kakvih aktivnosti održavanja. Dok se stanje priključne stezaljke u fazi L_3 procenjuje se kao 2 (razvijeni) stepen defekta, koga treba termografski kontrolisati jednom mesečno i

¹⁴⁸ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetska efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 3, Beograd, 2014, pp. 17-26.

otkloniti kada se za to ukaže prva povoljna prilika. Pažljivom analizom termografske slike 5.43. (utvrđivanjem načina, pravca i smera prostiranja toplote) može se zaključiti da temperaturna razlika između priključne stezaljke u fazi L_3 i referentne priključne stezaljke u fazi L_1 od $\Delta T_m=22,7^\circ\text{C}$ nije posledica defekta priključne stezaljke u fazi L_3 , već posledica prenosa toplote kondukcijom na nju sa spoja završetka provodnog izolatora sa namotajem transformatora na 10 kV strani u fazi L_3 . Zbog toga je potrebno, kada se ukaže prva povoljna prilika, proveriti kvalitet ovog spoja. Ovo se takođe može uočiti ako se na slici 5.45. posmatraju profili temperatura duž linija povučenih na termografskoj slici 5.43 po dužini provodnih izolatora transformatora na 10 kV strani u sve tri faze. Vidi se da najvišu temperaturu ima spoj završetka provodnog izolatora sa namotajem transformatora na 10 kV strani u fazi L_3 , što znači da je sa tog spoja došlo do prenosa toplote kondukcijom na priključnu stezaljku provodnog izolatora transformatora na 10 kV strani u fazi L_3 ¹⁴⁹ [71].



Slika 5.45. Profili temperatura duž linija povučenih na termografskoj slici 5.43. po dužini provodnih izolatora transformatora na 10 kV strani u sve tri faze

Poznato je za spojeve priključnih stezaljki koji imaju defekte da imaju povećane prelazne otpornosti i povećane Džulove gubitke snage ($P=RI^2$ W) koji dovode do pregrevanja tih spojeva. Što znači da se merenjem prelaznih otpornosti spojeva priključnih stezaljki može utvrditi da li ti spojevi imaju defekte. Zbog toga su u cilju provere rezultata termografskih dijagnostičkih kontrola izvršena merenja prelaznih otpornosti spojeva priključnih stezaljki primenom električne U-I metode. Rezultati ovih merenja navedeni su u tabeli 5.12¹⁵⁰ [72].

Analizom podataka navedenih u tabeli 5.12 može se uočiti da povećane prelazne otpornosti, u odnosu na spojeve referentnih priključnih stezaljki, imaju samo spojevi priključnih stezaljki spoljašnjih delova provodanih izolatora na 35 kV strani u fazama L_1 i L_3 , za 4 odnosno za 2 m Ω . Za ove spojeve priključnih stezaljki je i termografskim kontrolama utvrđeno da imaju defekte. Za spoj priključne stezaljke unutrašnjeg dela provodnog izolatora na 35 kV strani u fazi L_1 , kao i za spoj priključne stezaljke provodnog transformatora na 10 kV strani u fazi L_3 nije izmereno da imaju povećane prelazne otpornosti u odnosu na spojeve referentnih priključnih stezaljki, što znači da su u ispravnom stanju. Time je potvrđena tačnost rezultata termografskih dijagnostičkih kontrola koji su pokazali da su pregrevanja ovih spojeva posledica prenosa toplote na njih sa drugih spojeva koji su imali defekte.¹⁵¹ [80].

¹⁴⁹ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, Lj., Savic, B., Stankovic, N., Application of the method of thermography in diagnostics of power plants, Proceedings/ II International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection, Zrenjanin, 31st. October, 2012, pp. 157-164.

¹⁵⁰ Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.

¹⁵¹ Ilić, B., Adamović, Z., Savić, B., Stanković, N., Procena termičkog stanja elektroenergetske opreme u procesnoj industriji metodom termografije, Journal of Engineering & Processing Management, Vol. 4, No 1, Zvornik, 2012, pp. 163-176.

Tabela 5.12. Izmerene prelazne otpornosti spojeva priključnih stezaljki

Kontrolisani spojevi priključnih stezaljki	Oznake faza	Izmerene prelazne otpornosti spojeva priključnih stezaljki, m Ω
Spojevi priključnih stezaljki spoljašnjih delova provodnog izolatora na 35 kV strani	L ₁	5,883
	L ₂	1,665
	L ₃	3,698
Spojevi priključnih stezaljki unutrašnjih delova provodnih izolatora na 35 kV strani	L ₁	1,663
	L ₂	1,675
	L ₃	1,662
Spojevi priključnih stezaljki provodnih izolatora transformatora na 10 kV strani	L ₁	1,347
	L ₂	1,345
	L ₃	1,351

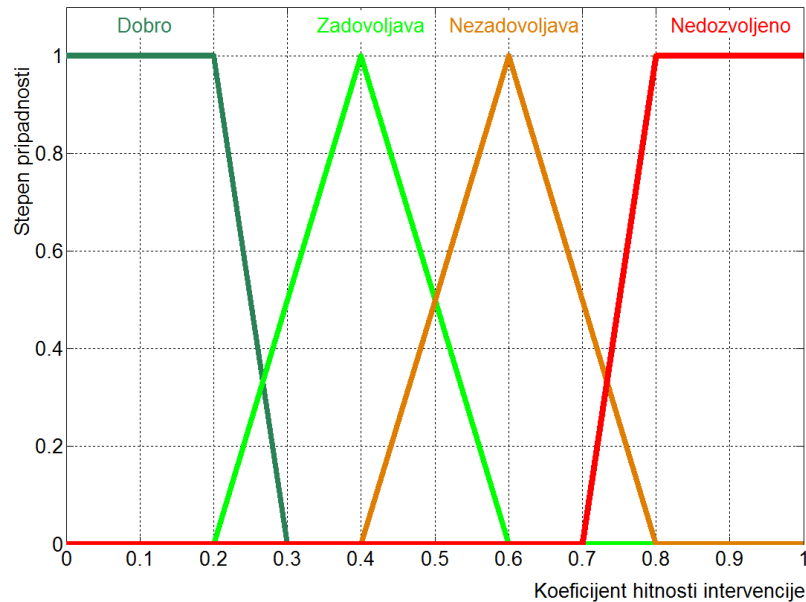
Rezultati specifičnih termografskih dijagnostičkih kontrola elektroenergetskih postrojenja su pokazali da mesta pregrevanja ne predstavljaju uvek i mesta defekta. Pokazano je veoma dobro slaganje rezultata dobijenih ovim kontrolama sa rezultatima dobijenim električnom $U-I$ metodom merenja prelaznih električnih otpornosti spojeva priključnih stezaljki.

Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom ocene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja

Mogućnosti primene fazi logike prilikom ocene stanja tehničkih sistema razmotrene su na konkretnom realnom primeru termografskih kontrola energetskog transformatora koji je pušten u rad pre 23 godina. Karakteristično za ovaj transformator je to što je uočeno ponovo pregrevanje (toplo mesto) na spoljašnjem priključku provodnog izolatora, slika 5.43. Temperatura prethodnog pregrevanja tog mesta iznosila je 17,7°C, a temperatura trenutnog pregrevanja iznosila je 28,4°C. Naponski nivo je 220 kV. Unošenjem ovih podataka na ulaz u fazi kontroler na njegovom izlazu se dobija da vrednost koeficijenta hitnosti intervencije iznosi 0,843 (ima dosta visoku vrednost, njegova maksimalna vrednost je 1), što znači da je na posmatranom mestu potrebna hitna intervencija. Vrednost ovog koeficijenta ujedno pokazuje stepen neispravnosti posmatranog aparata, odnosno pokazuje verovatnoću da je posmatrani aparat u otkazu. Ovo se vidi i sa slike 5.46. na kojoj je prikazan primer preseka funkcija pripadnosti i korišćenja baze pravila [100]. Kada je u pitanju izlazni signal koriste se četiri funkcije pripadnosti fazi skupu koeficijent hitnosti intervencije koje se preklapaju, a koje određuju stepen hitnosti intervencije na tehničkom sistemu, slika 5.46 ito¹⁵² [100]:

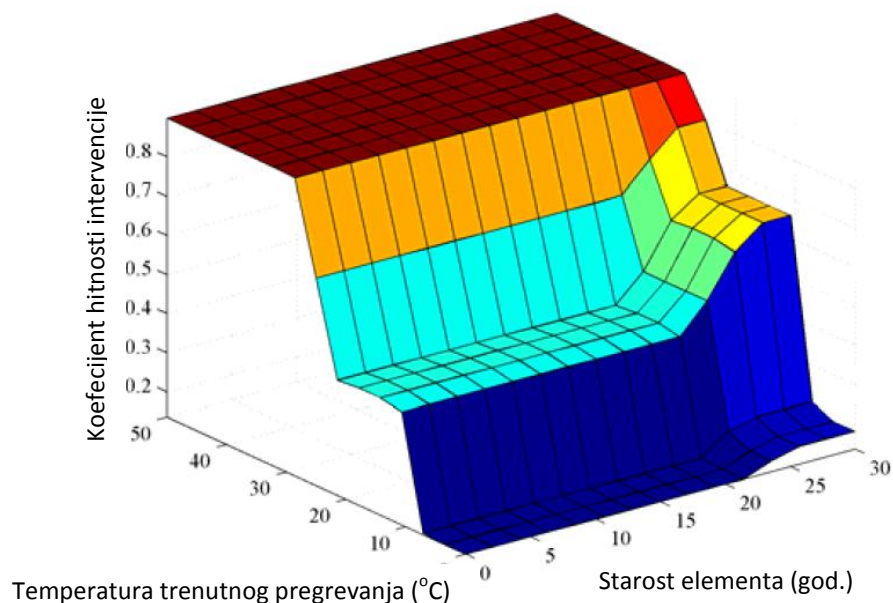
1. Dobro ($0^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 5^{\circ}\text{C}$) – tehnički sistem je ispravan, i može nastaviti normalno da radi.
2. Zadovoljava ($5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 10^{\circ}\text{C}$) - početni stepen defekta, koga treba pažljivo pratiti i planirati njegovo otklanjanje.
3. Nezadovoljava ($10^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{0,5} < 30^{\circ}\text{C}$) - razvijeni stepen defekta, koga treba termografski kontrolisati jednom mesečno i otkloniti kada se ukaže prva povoljna prilika.
4. Nedoizvoljeno ($\Delta T_{0,5} \geq 30^{\circ}\text{C}$) - havarijski stepen defekta koga treba hitno otkloniti.

¹⁵² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom procene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.



Slika 5.46. Četiri funkcije pripadnosti fazi skupu koeficijent hitnosti intervencije (izlazni signal), koje se preklapaju i koje određuju stepen hitnosti intervencije na tehničkom sistemu [100]

Sa grafika (trodimenzionalnih površina) može se zaključiti da vrednost koeficijenta hitnosti intervencije (tj. izlaznog signala) raste sa starenjem elementa, sa porastom temperature prethodnog pregrevanja, sa porastom temperature trenutnog pregrevanja i porastom naponskog nivoa (ulaznih signala), slika 5.47¹⁵³ [99].



Slika 5.47. Grafik zavisnosti hitnosti intervencije od starosti aparata i temperature trenutnog pregrevanja [99]

¹⁵³ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom procene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.

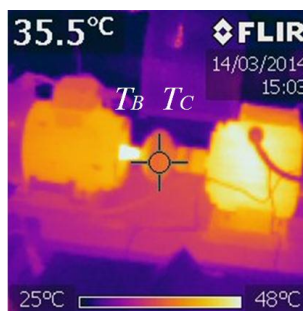
5.4 Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih necentriranosti spojenih mašina dobijenih primenom novog modela u laboratorijskim uslovima

Pored ispitivanja u stvarnim pogonskim uslovima, sprovedena su ispitivanja mašina i u laboratorijskim uslovima. U ovom delu su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih necentriranosti spojenih mašina dobijenih primenom razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u laboratorijskim uslovima. Radi međusobnog poređenja dobijenih rezultata istovremeno su vršene dijagnostičke kontrole primenom sve tri metode: metodom termografije, metodom analize frekvencijskog spektra vibracija i metodom analize frekvencijskog spektra struje statora motora.

1. Rezultati dijagnostičkih kontrola necentriranosti spojenih mašina dobijenih metodom termografije

Poznato je da se pojava necentriranosti spojenih mašina manifestuje uobičajenim simptomima, kao što su: porast stacionarnih temperatura ležaja elektromotora do spojnice i same spojnice, povećanim nivoom vibracija, bukom i sl. Da bi se utvrdio uticaj necentriranosti spojenih mašina na temperaturu ležaja elektromotora do spojnice i spojnice, kao i na potrošnju električne energije izvršena su eksperimentalna istraživanja, za tu svrhu, pripremljenom elektromotoru (pogonskoj mašini) i pumpi (gonjenoj mašini), koji su prvo bili spojeni gumenom spojnicom, a zatim zavrtnjevima. Trofazni asinhroni motor nominalne snage $P_n=15$ kW, nominalnog napona $U_n=3$ kV, nominalne struje $I_n=5$ A, faktora snage $\cos\varphi=0,8$ i frekvencije $f=50$ Hz, korišćen je kao elektromotor. Pumpa je prilikom istraživanja potiskivala vodu u zatvorenom sistemu cevi pri brzini obrtanja elektromotora od $n_n=1492$ ob/min.

Eksperimentalna istraživanja su vršena pri temperaturi okolnog vazduha od 20°C . Na podnožje mašina montirani su odgovarajući mehanizmi kojima su podešavane necentriranosti pomeraja spojenih mašina u koracima od po 25 (1/100 mm). Elektromotor je puštan u pogon pri nominalnom opterećenju i pri tome su vršena termografska snimanja (pomoću termografske kamere FLIR) spojenih mašina i merenja temperatura ležaja elektromotora do spojnice T_B i same spojnice T_C , slika 5.48. Nakon dostizanja stacionarnih temperatura ležaja elektromotora do spojnice T_B' i spojnice T_C' , elektromotor je zaustavljan i ležaj elektromotora do spojnice i spojnica su hlađeni do temperature okoline. Snaga koju je elektromotor uzimao iz mreže merena je pomoću vatmetra za svaku novu vrednost necentriranosti pomeraja spojenih mašina¹⁵⁴ [91,176].



Slika 5.48. Termografska slika spojenih mašina (pogonske i gonjene mašine) [91]

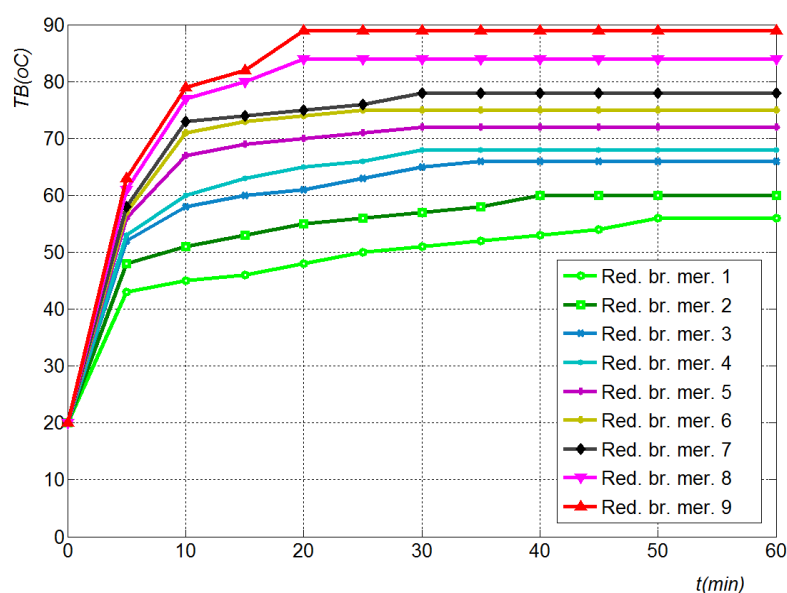
U tabeli 5.13. su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja koji pokazuju promene stacionarnih temperatura ležaja elektromotora do spojnice T_B' i spojnice T_C' , kao i procentualno povećanje potrošnje električne energije p za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom u odnosu na slučaj kada nije postojala necentriranost pomeraja [91].

¹⁵⁴ Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015.

Tabela 5.13. Rezultati eksperimentalnih istraživanja za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom [76]

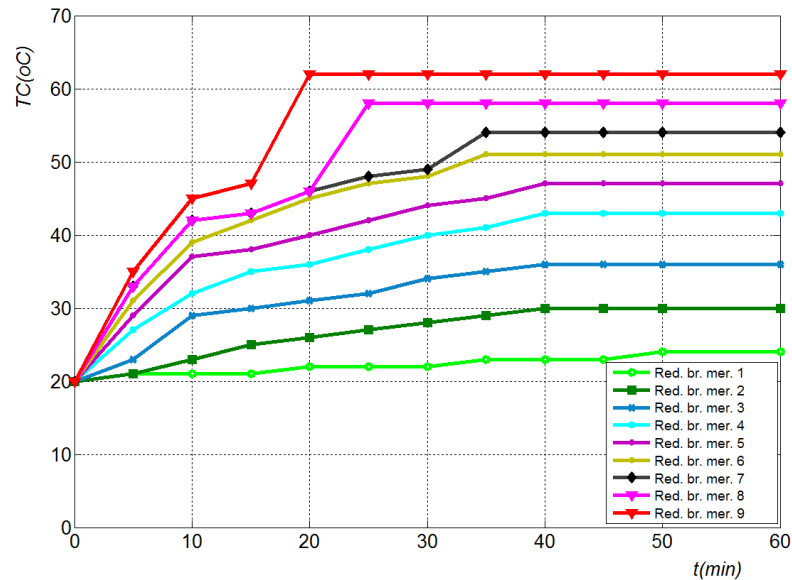
Red. br. merenja	Necentriranosti pomeraja (1/100 mm)	$T_B', ^\circ\text{C}$	$T_C', ^\circ\text{C}$	P, kW	$p=(P/P_n - 1) \cdot 100\%$
1.	0	56	24	15,000	0,00
2.	25	60	30	15,075	0,50
3.	50	66	36	15,150	1,00
4.	75	68	43	15,225	1,50
5.	100	72	47	15,480	3,20
6.	125	75	51	15,705	4,70
7.	150	78	54	16,245	8,30
8.	175	84	58	16,500	10,00
9.	200	89	62	17,550	17,00

Dijagrami promene temperature ležaja elektromotora do spojnice T_B (slika 5.49) i spojnice T_C (slika 5.50) za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom, nacrtani su na osnovu rezultata istraživanja¹⁵⁵ [91].

Slika 5.49. Dijagrami promene temperature ležaja elektromotora do spojnice T_B za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom [91]

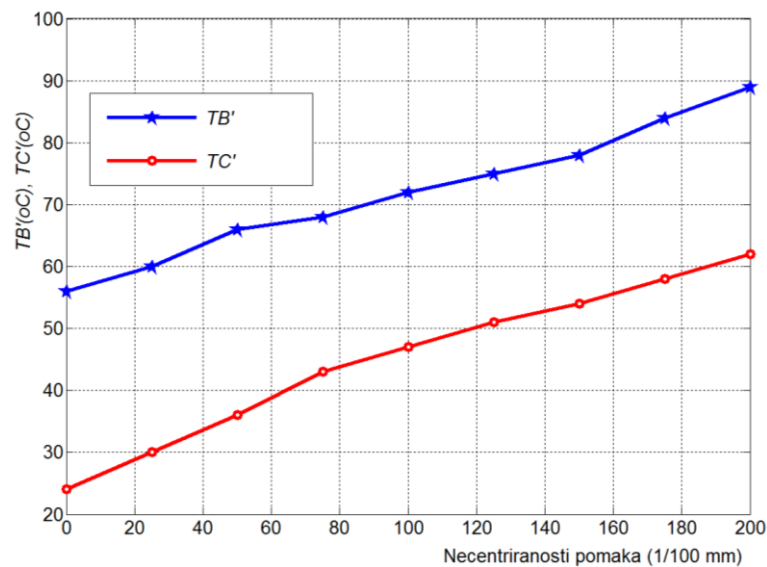
Sa dijagrama prikazanih na slikama 5.49 i 5.50. može se uočiti kada nisu postojale necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom vreme dostizanja stacionarnih temperatura ležaja do spojnice T_B' i spojnice T_C' iznosilo je oko 50 min, a kada su postojale necentriranosti vreme dostizanja ovih stacionarnih temperatura bilo je kraće i kretalo se od 20 do 40 min. Takođe, sa slike 5.50. se može uočiti kada nije postojala necentriranost pomeraja spojenih mašina, spojnica je zadržala skoro temperaturu okolnog vazduha [91].

¹⁵⁵ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015.



Slika 5.50. Dijagrami promene temperature spojnice T_C za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom [91]

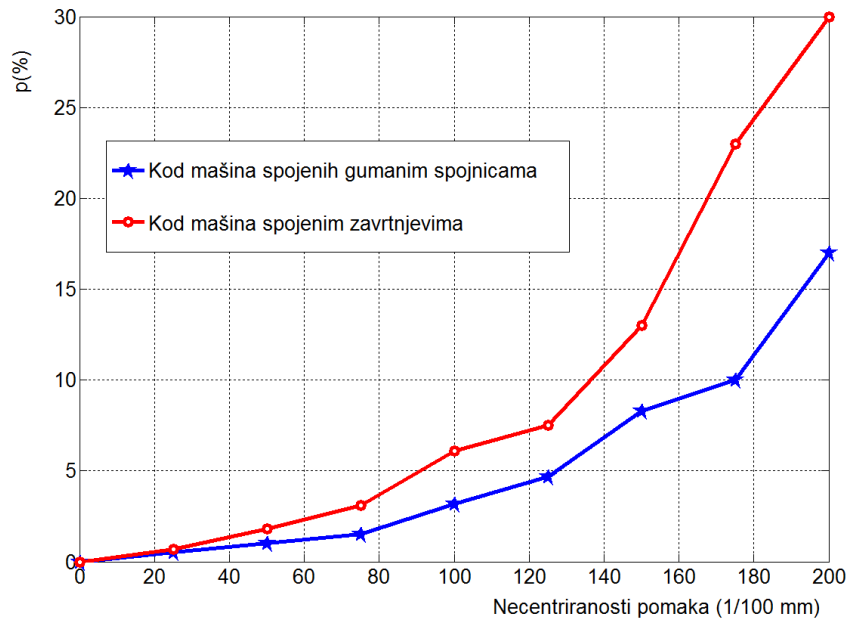
Dijagram promene stacionarnih temperatura ležaja elektromotora do spojnice T_B' i spojnice T_C' za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom, nacrtan je na slici 5.51., na osnovu tabele 5.13 [91].



Slika 5.51. Dijagrami promene stacionarnih temperatura ležaja elektromotora do spojnice T_B' i spojnice T_C' za različite necentriranosti pomeraja mašina spojenih gumenom spojnicom [91]

Sa slike 5.91. se može uočiti da su stacionarne temperature ležaja elektromotora do spojnice T_B' i spojnice T_C' rastu približno direktno proporcionalno necentriranosti pomeraja spojenih mašina. To znači da se na osnovu ovih temperatura može proceniti stepen necentriranosti pomeraja spojenih mašina, ali ne i sama vrednost necentriranosti, odnosno korekzione vrednosti potrebne da bi se mašine dovele u istu osu rotacije [91].

Na osnovu rezultata ekperimentalnih istraživanja, na slici 5.52. je prikazan dijagram procentualnog povećanja potrošnje električne energije p za različite necentriranosti pomeraja u odnosu na slučaj kada nije postojala necentriranost pomeraja: kod mašina spojenih gumenom spojnicom i kod mašina spojenih zavrtnjevima [91].



Slika 5.52. Dijagram procentualnog povećanja potrošnje električne energije p za različite necentriranosti pomeraja [91]

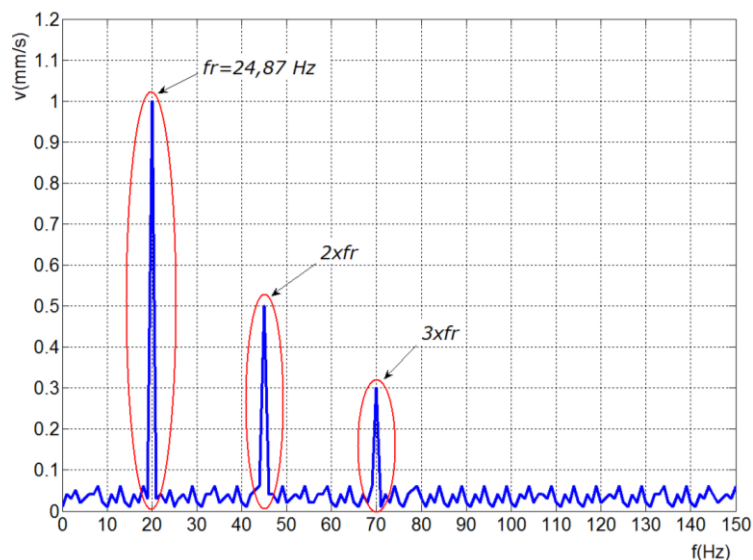
Sa slike 5.52. se može uočiti da je kod mašina spojenih gumanom spojnicom pri necentriranosti pomeraja od 50 (1/100 mm) potrošnja električne energije veća za oko 1%, u odnosu na slučaj kada ne postoji necentriranost pomeraja. Takođe, sa iste slike se može uočiti da je kod mašina spojenih zavrtnjevima, pri necentriranosti pomeraja od 50 (1/100 mm) potrošnja električne energije veća za oko 1,8 u odnosu na slučaj kada ne postoji necentriranost pomeraja. Ovo se objašnjava time da su kod mašina spojenih zavrtnjevima bili intenzivniji tribološki procesi (zbog pojačanog trenja i pojačanog pretvaranja mehaničke u toplotnu energiju) pa su kod njih i veći gubici energije [91].

2. Rezultati dijagnostičkih kontrola necentriranosti spojenih mašina dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra vibracija

Radi verifikacije rezultata termografskih kontrola istovremeno je praćena pojava necentriranosti spojenih mašina vibracionim kontrolama (metodom analize frekvencijskog spektra vibracija). Utvrđeno je da se rezultati dobijeni vibracionim kontrolama dobro slažu sa rezultatima dobijenim termografskim kontrolama spojenih mašina. Tako da se nesaosnost spojenih mašina pored termografskim kontrolama koje ukazuje na pregrevanje spojnice i ležaja do spojnice može dodatno potvrditi analizom frekvencijskog spektra vibracija.

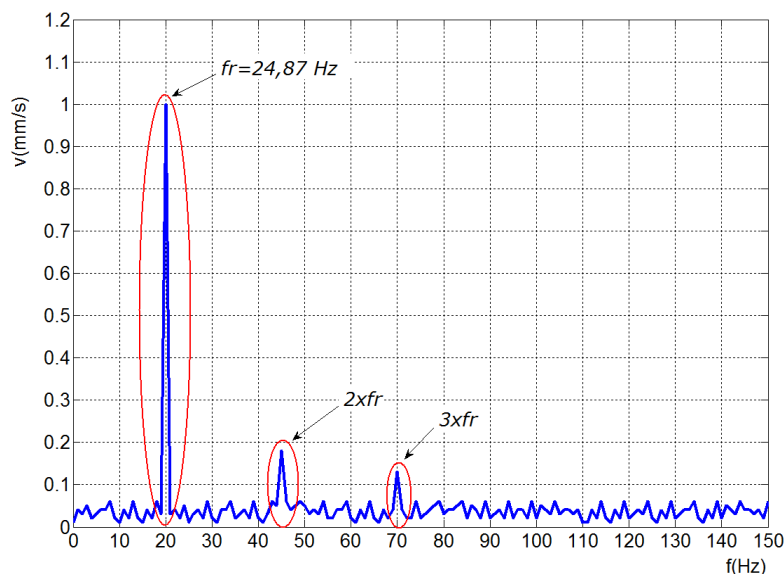
U frekvencijskom spektru brzine vibracija dobijenom kada postoji necentriranost spojenih mašina uočeno je prisustvo pored osnovnog harmonika na frekvenciji rotacije $1 \times f_r$ i dodatnih harmonika na dvostrukoj i trostrukoj frekvenciji rotacije $2 \times f_r$ i $3 \times f_r$ (gde je $f_r = RPM/60 = (1492 \text{ ob/min})/60 = 24,87 \text{ Hz}$ - frekvencija rotacije, a RPM - broj obrtaja u minuti) naročito izraženih u aksijalnom smeru kao što se vidi sa slike 5.53. Pri tome su se amplitude ovih dodatnih harmonika veće što je veća necentriranost spojenih mašina.

U frekvencijskom spektru brzine vibracija dobijenom kada je mala necentriranost pri spajanju elektromotora i pumpe uočeno je da su amplitude i dodatnih harmonika na dvostrukoj i trostrukoj frekvenciji rotacije $2 \times f_r$ i $3 \times f_r$ znatno manje nego kada je velika necentriranost, kao što se vidi sa slike 5.54.



Sika 5.53. Frekvencijski spektar brzine vibracija kada je velika necentriranost velika npr. 175 (1/100 mm)

Iz navedenog se može zaključiti da je primena vibracionih kontrola vrlo bitna i pravilna metoda za detekciju i praćenje necentriranosti mašina pri spajanju, jer se provodi bez zaustavljanja mašine, odnosno tokom eksploatacije. Međutim, iako je primena vibracionih kontrola ispravan način detekcije necentriranosti mašina, ipak se pomoću njih može samo utvrditi da li pri spajanju mašina postoji necentriranost, ali ne i sama veličina necentriranosti, odnosno korekcijske vrednosti potrebne da se mašine mogu dovesti u istu osu rotacije.



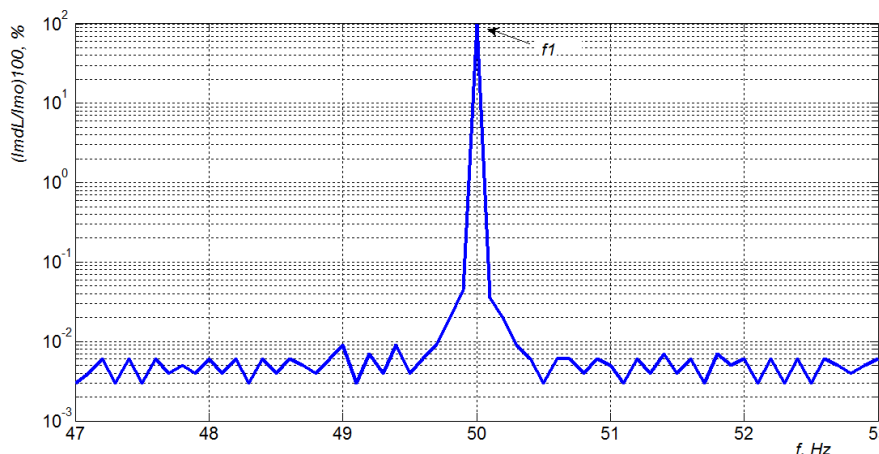
Sika 5.54. Frekvencijski spektar brzine vibracija kada je mala necentriranost npr. 25 (1/100 mm)

3. Rezultati dijagnostičkih kontrola spojenih mašina dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra struje statora motora

Radi poređenja sa rezultatima termografskih i vibrodijagnostičkih kontrola istovremeno je praćena pojava necentriranosti spojenih mašina metodom analize frekvencijskog spektra struje statora. Utvrđeno je da se rezultati dobijeni metodom analize frekvencijskog spektra struje statora ne slažu u potpunosti sa rezultatima dobijenim termografskim vibrodijagnostičkim kontrolama spojenih mašina, jer se necentriranosti spojenih mašina detektuju tek kada postanu značajne. Što znači da se manje nesaosnosti spojenih mašina teže mogu utvrditi metodom analizom frekvencijskog spektra vibracija

Na slici 5.55. je prikazan frekvencijski spektar struje statora trofaznog asinhronog motora koji pogoni pumpu pri maloj necentriranosti pomeraja npr. npr. 25 (1/100 mm). Sa slike se vidi da nema dodatnih harmonika na frekvencijama koje ukazuju na postojanje oštećenja kaveza rotora, datih izrazima

(5.31) i (5.32). Dobijen je indeks stanja rotora 0,44. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „Ovaj namot rotora je u ispravnom stanju (ne pokazuje znakove povećanog otpora spojeva) i treba ga ponovo ispitati (proveriti) za 12 meseci ili nakon 200 zaleta, šta pre prođe“.



Slika 5.55. Frekvencijski spektar struje statora trofaznog asinhronog motora u okolini frekvencije 50 Hz

4. Poređenje rezultata dijagnostičkih kontrola spojenih mašina dobijenih pomoću sve tri metode

Na osnovu rezultata dijagnostičkih kontrola dobijenih primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela koji koristi tri dijagnostičke metode može se zaključiti da su za detekciju necentriranosti spojenih mašina u početnoj fazi nastanka efikasne metoda termografije i metoda analize frekvencijskog spektra vibracija, dok metoda analize frekvencijskog spektra struje statora motora nije dovoljno efikasna, jer necentriranosti detektuje tek kada one postanu značajne.

5.5 Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih primenom novog modela u laboratorijskim uslovima

U ovom delu su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih primenom razvijenog novog modela u laboratorijskim uslovima. Radi međusobnog poređenja rezultata dijagnostičkih kontrola istovremeno su vršene dijagnostičke kontrole primenom sve tri metode.

1. Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra struje

Ovde su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra struje statora pomoću komercijalnog programskog paketa Motormonitor, koga je razvila firma ENTEK, kao i pomoću programskog paketa TestPoint specijalno razvijenog za dijagnostičke kontrole (snimanje i analizu struje statora motora).

Prema principijelnoj šemi prikazanoj na slici 5.24., snimani su i u digitalnom obliku sačuvani signali statorske struje. Obrada i analiza ovih signala vršena je primenom spektralnog analizatora i programskog paketa „Motormonitor“.

Ispitivanja su sprovedena na asinhronom motoru nominalne snage $P_n=600$ kW, nominalnog napona $U_n=3$ kV, nominalne struje $I_n=25$ A, faktora snage $\cos\varphi=0,8$, nominalne brzine $n_n=2950$ ob/min, frekvencije $f_l=50$ Hz.

Struje statora su snimane za ispravan (neoštećen) kavez rotora motora te za tri namerno izazvana stepena oštećenja kaveza rotora motora, dok se opterećenje kretalo u granicama od praznog hoda do 100% nazivnog. Snimanja su vršena pri radu motora na krutoj mreži i na frekvencijskom pretvaraču.

Pre provođenja ispitivanja motor je servisiran i doveden u ispravno stanje. Namerno izazvana oštećenja kaveza rotora su, s ciljem što boljeg približavanja realnim pogonskim stanjima motora, sprovedena na način da simuliraju otkaze ispitivanog motora kakvi se događaju tokom njegove eksploatacije. Oštećenja svih šipki kaveza rotora su sprovedena u blizini prstena nepogonske strane motora. Opis namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora, pri kojima su sprovedena ispitivanja dat je u tabeli 5.14.

Tabela 5.14. Opis namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora pri kojima su sprovedena ispitivanja

Stepen oštećenja kaveza rotora	Opis oštećenja kaveza rotora
0	Ispravan kavez rotora (bez oštećenja)
I	1 slomljena šipka
II	3 slomljene šipke
III	5 slomljenih šipki

Rezultati snimanja struja statora su prikazivani u vremenskom i frekvencijskom domenu. Vremenski domen podrazumeva prikazivanje talasnih oblika struja statora, dok frekvencijski domen podrazumeva prikazivanje frekvencijskog spektra struja statora, koji prikazuje zavisnost amplituda harmonika struje od frekvencije. Rezultati dobijeni snimanjem talasnih oblika struja statora motora za ispravan motor i za tri stepena oštećenja motora, pokazali su da se sa pojavom oštećenja kaveza rotora talasni oblici struja statora izobličavaju te da su ta izobličenja izraženija što su oštećenja veća¹⁵⁶ [75]. Međutim, pošto se analizom talasnih oblika struja statora motora, na osnovu njihovih izobličenja i amplituda, može samo ustanoviti da postoje oštećenja motora, ali ne i njihov uzrok i stepen, izvršeno je prebacivanje rezultata iz vremenskog domena u frekvencijski domen u kome se može doći do mnogo preciznijih zaključaka. Pomoću kartice za akviziciju podataka DAS50 ugrađene u računar vršena je Furijeova transformacija, kojom su snimljeni talasni oblici rastavljeni na harmonike, tako da se na monitoru računara moglo videti da li frekvencijski spektri struja statora, uz harmonike koji su karakteristični za ispravan kavez rotora motora, sadrže superponirane i dodatne harmonike, koji su karakteristični za oštećeni kavez rotora motora (npr. slomljene šipke i prstenove ili loše njihove spojeve), a koji se nalaze na frekvenciji dvostrukog klizanja¹⁵⁷ [82]:

$$f_{dL}=f_1(1-2s) \quad (5.47)$$

$$f_{dD}=f_1(1+2s) \quad (5.48)$$

Na osnovu frekvencija dodatnih harmonika može se utvrditi uzrok otkaza asinhronog motora, a na osnovu amplituda tih dodatnih harmonika može utvrditi stepen oštećenja (oceniti stanje) kaveza rotora motora.

Na osnovu procenjene vrednosti klizanja motora program vertikalnim linijama obeležava pojas u kome se mogu očekivati dodatni harmonici. U obeleženom pojasu program traži maksimum i označava ga kursorom. Ako je vrednost klizanja dovoljno tačno određena, program će u većini slučajeva tačno označiti očekivane dodatne harmonike. U realnim snimanjima procenjena vrednost klizanja može dosta odstupati od stvarne. U takvim slučajevima može se desiti da se dodatni harmonik ne nalazi unutar obeleženog pojasa i program izabere pogrešnu vrednost. Tada, je potrebno ručno odabrati pravu vrednost dodatnog harmonika. Izbor se vrši pomeranjem klizača, čime se automatski menjaju prikazane frekvencije dodatnih harmonika i njihove vrednosti¹⁵⁸ [78].

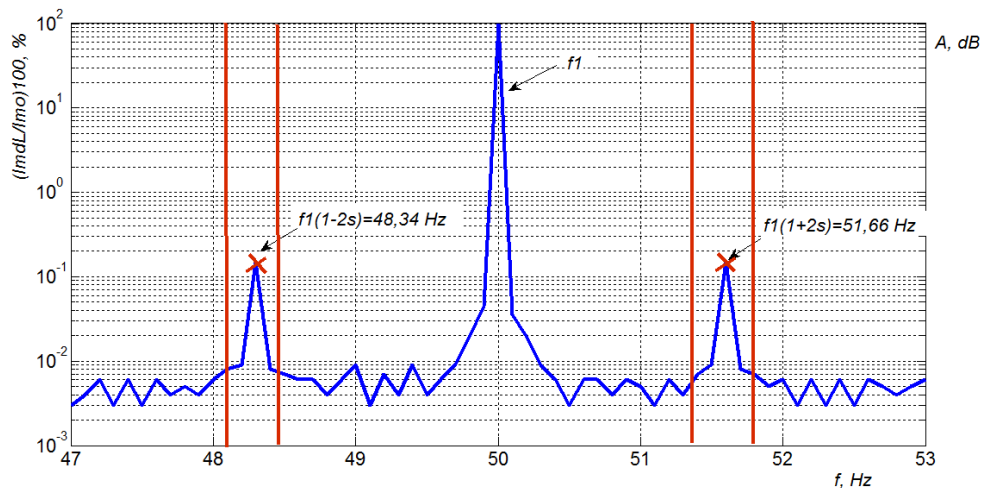
¹⁵⁶ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Primena softverskog paketa Testpoint u dijagnostici stanja asinhronih motora metodom spektralne analize osovinog napona, Info M, Vol. 12, No 45, Beograd, 2013, pp. 42-45.

¹⁵⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Automatizovana dijagnostička ispitivanja mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 11-18.

¹⁵⁸ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina metodom spektralne analize struje statora, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, Smederevo, 2012, pp. 3-12.

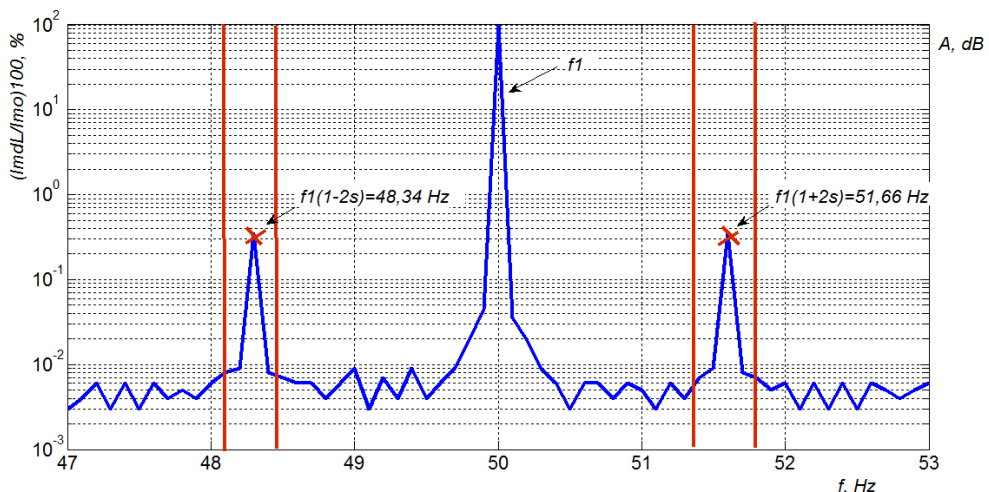
Rezultati dobijeni snimanjem frekvencijskih spektara struje statora za ispravan kavez rotora motora i za motor sa tri stepena oštećenja kaveza rotora, pri nominalnoj struji opterećenja od 25 A prikazani su na slikama 5.56., 5.57. 5.58. i 5.59 [78]. Na osnovu procenjene vrednosti klizanja motora ($s=0,0166$), program je označio da postoje dodatni harmonici na frekvenciji $f_1(1-2s)=48,34$ Hz i na frekvenciji $f_1(1+2s)=51,66$ Hz [78].

Na slici 5.56. je prikazan frekvencijski spektar struje statora za ispravan (neoštećen) kavez rotora motora. Sa slike se vidi da su amplitude dodatnih harmonika frekvencije $f_1(1-2s)=48,34$ Hz i frekvencije $f_1(1+2s)=51,66$ Hz zanemarljive (približno 0,15%) u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika frekvencije f_1 , čime je potvrđeno ispravno stanje kaveza rotora. Dobijeno je da indeks stanja rotora iznosi 0,27. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „Ovaj namot rotora je u ispravnom stanju (ne pokazuje znakove povećanog otpora spojeva) i treba ga ponovo ispitati (proveriti) za 12 meseci ili nakon 200 zaleta, šta pre prođe“.



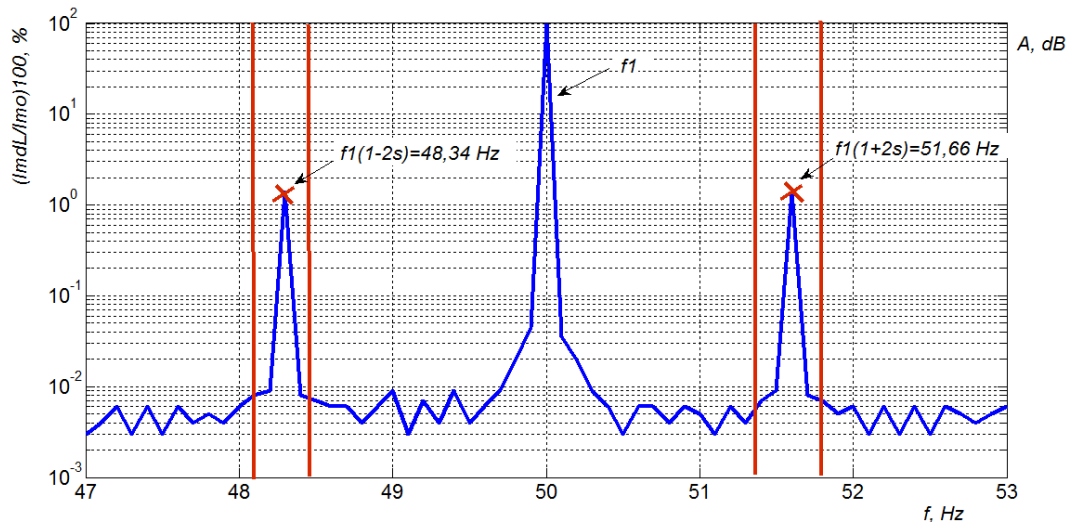
Slika 5.56. Frekvencijski spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz za ispravan (neoštećen) kavez rotora

Na slici 5.57. je prikazan frekvencijski spektar struje statora za I stepen oštećenja kaveza rotora motora. Sa slike se vidi da su amplitude dodatnih harmonika frekvencije $f_1(1-2s)=48,34$ Hz i frekvencije $f_1(1+2s)=51,66$ Hz vrlo male (približno 0,35%) u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika frekvencije f_1 , čime je potvrđeno da je 1 slomljena šipka kaveza rotora. Dobijeno je da indeks stanja rotora iznosi 0,78. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „U ovom namotu rotora pokazuju se slabi znaci visokootpornih spojeva. Rotor treba ponovo ispitati za 9 meseci. Ako je ovaj motor ima cikluse „teškog pogona“ ispitivanje treba provesti ponovo nakon 6 meseci ili nakon 50 zaleta, šta pre prođe“.



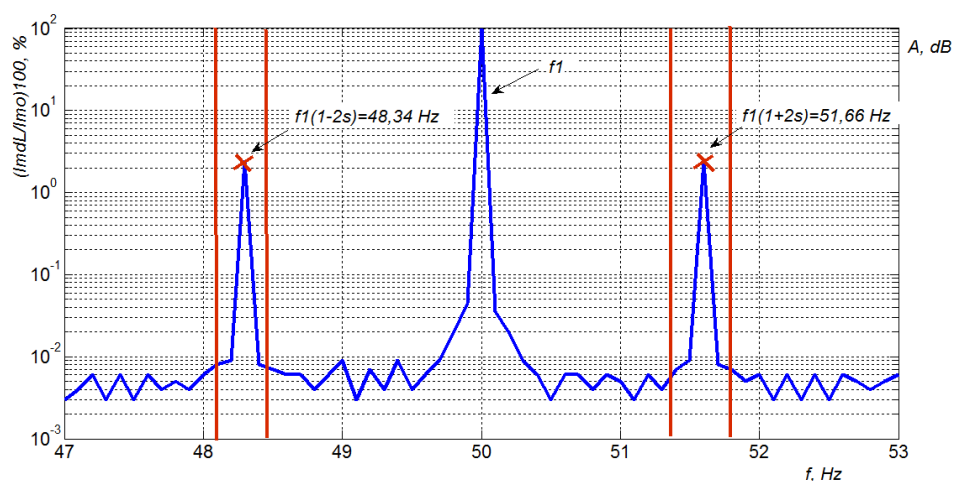
Slika 5.57. Frekvencijski spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz za I stepen oštećenja (1 slomljena šipka) kaveza rotora

Na slici 5.58. je prikazan frekvencijski spektar struje statora za II stepen oštećenja kaveza rotora motora. Sa slike se vidi da su amplitude dodatnih harmonika frekvencije $f_1(1-2s)=48,34$ Hz i frekvencije $f_1(1+2s)=51,66$ Hz male (približno 1,39%) u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika frekvencije f_1 , čime je potvrđeno da postoje 3 slomljene šipke kaveza rotora. Dobijeno je da indeks stanja rotora iznosi 2,04. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „U ovom rotorskom namotu razvilo se više visokootpornih spojeva ili je jedna šipka u prekidu. Ponovno ispitivanje treba provesti u roku od 6 sedmica. Ako je ovaj motor ima cikluse „teškog pogona“ ispitivanje treba provesti ponovo nakon 3 sedmice ili nakon 25 zaleta, šta pre prođe“.



Slika 5.58. Frekvencijski spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz za II stepen oštećenja (3 slomljene šipke) kaveza rotora

Na slici 5.59. je prikazan frekvencijski spektar struje statora u okolini frekvencije 50 Hz, za III stepen oštećenja kaveza rotora motora. Sa slike se vidi da su amplitude dodatnih harmonika frekvencije $f_1(1-2s)=48,34$ Hz i frekvencije $f_1(1+2s)=51,66$ Hz značajne (približno 2,41%) u odnosu na amplitudu osnovnog harmonika frekvencije f_1 , čime je potvrđeno da postoje veća oštećenja (5 slomljenih šipki) kaveza rotora. Dobijeno je da indeks stanja rotora iznosi 2,57. Dijagnostička poruka programskog paketa Motormonitor za ovaj asinhroni motor glasi: „U ovom namotu rotora je više šipki slomljeno. Rizik sekundarnih oštećenja statorskog namota ili ostalih delova motora je neminovan. Preporučuje se da se ovaj motor odmah isključiti iz pogona“¹⁵⁹ [82].



Slika 5.59. Frekvencijski spektar struje statora motora u okolini frekvencije 50 Hz za III stepen oštećenja (5 slomljenih šipki) kaveza rotora

¹⁵⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Automatizovana dijagnostička ispitivanja mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 11-18.

Analizom frekvencijskih spektara struja statora prikazanih na slikama 5.56., 5.57. i 5.58. 5.59. uočeno je da postoje dodatni harmonici smešteni oko frekvencije mreže f_1 na udaljenostima od $\pm 2sf_1$, gde je s – klizanje, čime je potvrđeno da je uzrok otkaza motora oštećenje kaveza rotora. Takođe, analizom je utvrđeno da su amplitude dodatnih harmnika veće što su veća oštećenja kaveza rotora motora [82].

Rezultati laboratorijske provere dijagnostičkih poruka programa Motormonitor za različita stanja (stepene oštećenja) kaveza rotora motora prikazani su u tabeli 5.15. U tabeli su navedeni dobijeni indeksi stanja, odnos amplituda dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1-2s)$ I_{mdl} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} , zatim odnos amplituda dodatnog harmonika frekvencije $f_1(1-2s)$ I_{mdl} i osnovnog harmonika frekvencije f_1 I_{mo} izražen u dB i u %, kao i dijagnostičke poruke i preporuke za ponovna merenja koje je dao program Motormonitor. Važno je napomenuti da dobijeni rezultati zavise od rasporeda slomljenih šipki i ukupnog broja šipki. Poređenjem poznatog stanja kaveza rotora motora i dijagnostičkih poruka uočeno je dobro slaganje ocene stanja dobijene primenom programa Motormonitor sa stvarnim stanjem za svaki namerno izazvani stepen oštećenju kaveza rotora motora. Međutim, dobijene rezultate nije moguće direktno preslikati na elektromotore koji rade u realnim pogonskim uslovima, pošto oni rade u težim uslovima nego što su laboratorijski.

Tabela 5.15. Rezultati laboratorijske provere dijagnostičkih poruka programa Motormonitor zavisno od stanja (stepena oštećenja) motora

Stanje motora	Indeks stanja	I_{mdl}/I_{mo}	$(I_{mdl}/I_{mo}) \cdot 100$, %	$A=20 \cdot \log(I_{mdl}/I_{mo})$, dB	Dijagnostička poruka	Preporuka za ponovno merenje
ispravan rotor	0,28	1/571	0,17	-55,1	ispravan	12 meseci
1 slomljena šipka	0,78	1/268	0,37	-48,6	povećani otpori	9 meseci
3 slomljene šipke	2,04	1/70	1,42	-36,9	slomljeno je više od 1 šipke	6 sedmica
5 slomljenih šipki	2,57	1/41	2,43	-32,3	Odmah isključiti	-

2. Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra vibracija

Ovde su prikazani rezultati dijagnostičkih kontrola dobijenih metodom analize frekvencijskog spektra vibracija koji su pokazali dobro slaganje sa rezultatima dobijenim metodom analize frekvencijskog spektra struje statora čime je potvrđeno da se vibrodijagnostičkim kontrolama mogu identifikovati i uzroci otkaza mašina, koji su električne prirode, kao što su slomljene šipke kaveza rotora.

Na slici 5.60. su prikazani frekvencijski spektri radijalnih vibracija motora za slučaj: a) ispravnog (neoštećenog) kaveza rotora motora, b) 1 slomljene šipke, c) 3 slomljene šipke, d) 5 slomljenih šipki. Frekvencija rotacije iznosi $f_r=2950/60=49,17$ Hz ($n=2950$ o/min), $2sf_1=1,66$ Hz, $f_1=50$ Hz.

U frekvencijskom spektru vibracija motora s oštećenim rotorom (slomljenim šipkama) javljaju se dodatni harmonici čije su frekvencije razmaknute (udaljene) od frekvencije rotacije f_r i njenih višekratnika vf_r za dvostruku frekvenciju klizanja $2sf_1$, tj:

$$f_d = vf_r \pm 2sf_1, \text{ Hz} \quad (5.49)$$

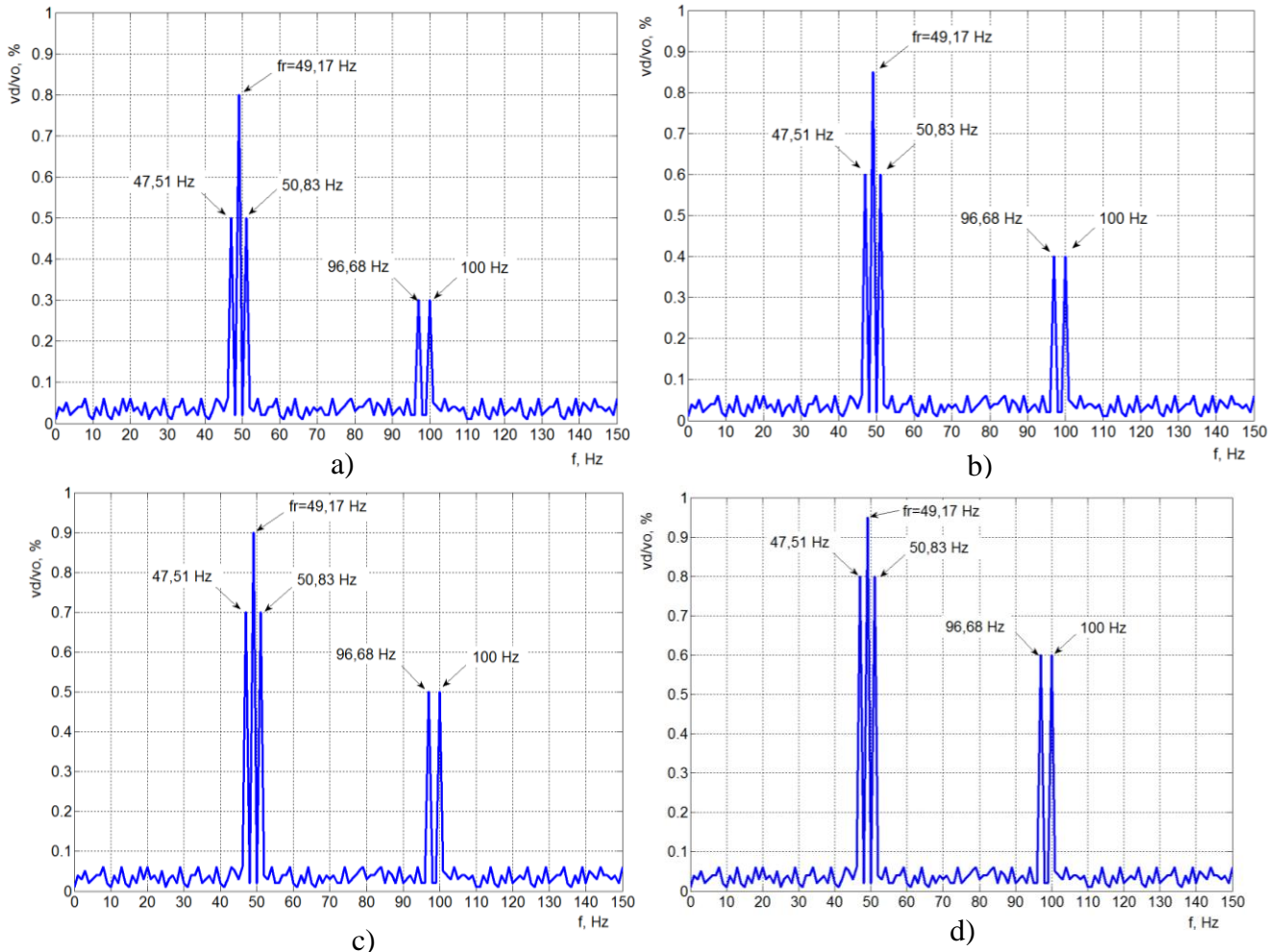
Za $v=1$ dobija se da je:

$$f_d = f_r \pm 2sf_1 = 49,17 \pm 1,66 = 47,51 \text{ Hz i } f_d = 50,83 \text{ Hz} \quad (5.50)$$

Za $v=2$ dobija se da je:

$$f_d = v \cdot f_r \pm 2sf_1 = 2 \cdot 49,17 \pm 1,66 = 98,34 \pm 1,66 = 96,68 \text{ Hz i } f_d = 100 \text{ Hz} \quad (5.51)$$

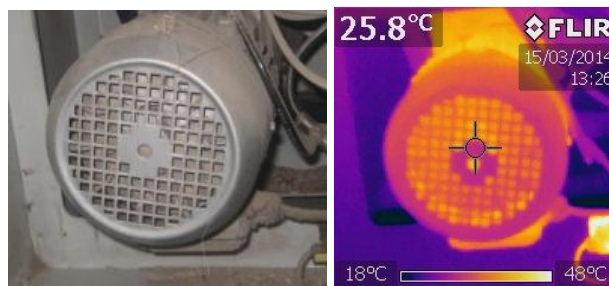
U očno je da su amplitude ovih harmonika veće što su oštećenja kaveza rotora motora veća, što znači da se pomoću ove metode mogu detektovati otkazi kaveza rotora motora u početnoj fazi nastanka.



Slika 5.60. Frekvencijski spektri vibracija motora za slučaj: a) ispravnog kaveza rotora motora, b) 1 slomljene šipke, c) 3 slomljene šipke, d) 5 slomljenih šipki

3. Rezultati dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih metodom termografije

Rezultati dobijeni metodom termografije su pokazali da se ne slažu u potpunosti sa rezultatima dobijenim metodom analize frekvencijskog spektra vibracija i metodom analize frekvencijskog spektra struje statora, jer metoda termografije oštećenja kaveza rotora detektuje u podmakloj fazi kada ona postane značajna, pošto se početna pregrevanja razvijaju u kavezu rotora i skoro ravnomerno prenose na sopljnu površinu motora tako da se na površini motora ne uočavaju pregrevanja. Tek pri većim oštećenjima se uočavaju pregrevanja osovine motora, kao što se vidi sa termografskog snimka prikazanog na slici 5.61.



Slika 5.61. Fotografski i termografski snimak površine elektromotora iz aksijalnog pravca

4. Poređenje rezultata dijagnostičkih kontrola namerno izazvanih oštećenja kaveza rotora asinhronih motora dobijenih pomoću sve tri metode

Na osnovu rezultata dijagnostičkih kontrola dobijenih primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela koji koristi tri dijagnostičke metode može se zaključiti da su za detekciju oštećenja kaveza rotora asinhronih motora u početnoj fazi nastanka efikasne metoda analize frekvencijskog spektra

struje statora motora i metoda analize frekvencijskog spektra vibracija, dok metoda termografije nije dovoljno efikasna, jer oštećenja kaveza rotora detektuje tek u podmakloj fazi kada ona postanu značajna.

5.6 Razvoj sopstvenog modela za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema

Za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih (kompleksnih) tehničkih sistema razvijen je sopstveni model, koji omogućava kvantitativnu analizu pouzdanosti složenih (kompleksnih) tehničkih sistema u industriji. Pomoću ovog modela moguće je vršiti proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem empirijskih i analitičkih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode, a osnove njegovog razvoja opisane su u nastavku.

5.6.1 Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem empirijskih podataka

Funkcija nepouzdanosti (funkcija raspodele otkaza) $F(t)$ se definiše kao verovatnoća da će tehnički sistem otkazati u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$, pod pretpostavkom da je radio ispravno na početku tog vremenskog intervala. Drugačije rečeno, nepouzdanost $F(t)$ je verovatnoća da će trenutak otkaza tehničkog sistema T nastupiti u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$:

$$P(T \leq t) = F(t), t \geq 0 \quad (5.52)$$

Funkcija pouzdanosti $R(t)$ se definiše kao verovatnoća da tehnički sistem neće otkazati (da će raditi ispravno) u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$, odnosno definiše se kao verovatnoća bezotkaznog rada (rada bez otkaza) tehničkog sistema. Drugačije rečeno, pouzdanost $R(t)$ je verovatnoća da će trenutak otkaza tehničkog sistema T nastupiti nakon posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) \quad (5.53)$$

Funkcije nepouzdanosti $F(t)$ i pouzdanosti $R(t)$ se mogu odrediti aproksimativno na osnovu statističkih podataka iz eksperimenata. Ako se žele izračunati pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanosti $F(t)$ tehničkih sistema u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$ potrebno je izvršiti eksperiment nad N jednakih tehničkih sistema koji su izloženi istim uslovima rada. Na početku posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$ stavi se u rad N ispravnih jednakih tehničkih sistema i na kraju tog vremenskog intervala utvrdi se broj tehničkih sistema koji nisu otkazali (koji su ostali da rade ispravno) $n(t)$, dok će $N - n(t)$ predstavljati broj tehničkih sistema koji su otkazali u tom vremenskom intervalu. Proračun pokazatelja pouzdanosti utoliko je tačniji ukoliko se posmatra veći broj tehničkih sistema N . Takođe, kod izbora vremenskog intervala treba voditi računa da broj tehničkih sistema koji su otkazali u posmatranom vremenskom intervalu ne bude premali.

Empirijska funkcija nepouzdanosti $F(t)$, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem otkazati u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$. Može se predstaviti kao odnos između broja tehničkih sistema koji su otkazali $N - n(t)$ (broja neuspešno izvršenih zadataka sistema) u posmatranom vremenskom intervalu i ukupnog broja jednakih tehničkih sistema koji su radili ispravno N (ukupnog broja zadataka sistema) na početku tog vremenskog intervala:

$$F(t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (5.54)$$

gde je:

$n(t)$ - broj tehničkih sistema koji nisu otkazali (koji su ostali da rade ispravno) (broj uspešno izvršenih zadataka sistema) do kraju posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$, to je diskretna slučajna promenljiva koja poprima vrednosti: $n(t) = 0, 1, 2, \dots, N$

$N - n(t)$ - broj tehničkih sistema koji su otkazali (broj neuspešno izvršenih zadataka - broj otkaza koji su se dogodili) u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$

N - ukupan broj posmatranih jednakih tehničkih sistema koji su radili ispravno (ukupan broj zadataka sistema) na početku posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$

Empirijska funkcija gustine verovatnoće otkaza $f(t)$, predstavlja verovatnoću da će tehnički sistem otkazati u jedinici vremena. Može se predstaviti kao odnos između broja tehničkih sistema koji su otkazali $N-n(t)$ (broja neuspešno izvršenih zadataka - broja otkaza koji su se dogodili) u posmatranom vremenskom intervalu i proizvoda ukupnog broja posmatranih jednakih tehničkih sistema koji su radili ispravno na početku posmatranog vremenskog intervala N s dužinom tog vremenskog intervala Δt :

$$f(t) = \frac{N - n(t)}{N \cdot \Delta t} \quad (5.55)$$

Empirijska funkcija pouzdanosti $R(t)$, predstavlja verovatnoću da tehnički sistem neće otkazati u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$. Može se predstaviti kao odnos između broja tehničkih sistema koji nisu otkazali (koji su ostali da rade ispravno) $n(t)$ (broja uspešno izvršenih zadataka sistema) do kraja posmatranog vremenskog intervala i ukupnog broja posmatranih jednakih tehničkih sistema koji su ispravno radili N (ukupnog broja zadataka sistema) na početku tog vremenskog intervala:

$$R(t) = \frac{n(t)}{N}, \% \quad (5.56)$$

Jednačina daje verovatnoću bezotkaznog rada bilo kog od N tehničkih sistema u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$.

Jasno je da je pouzdanost funkcija vremena rada tehničkog sistema, jer što ispitivanje duže traje biće sve više otkaza pa će pouzdanost opadati. Tokom rada sistema pouzdanost se stalno smanjuje, a nepouzdanost stalno raste. Pošto sistem može biti u samo dva stanja (stanje u radu i stanje u otkazu), nema trećeg stanja, tada je zbir pouzdanosti i nepouzdanosti jednak 1:

$$R(t) + F(t) = \frac{n(t)}{N} + \frac{N - n(t)}{N} = 1 \quad (5.57)$$

Ako su kod jednakih tehničkog sistema koji se ispituju poznata vremena između otkaza $t_{riko1}, t_{riko2}, \dots, t_{rikon}$, onda se **empirijsko srednje vreme između otkaza** može izračunati kao aritmetička sredina vremena u radu između otkaza po obrascu:

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{riko_i}, \text{ h} \quad (5.58)$$

gde je :

t_{riko_i} - i -to vreme u radu tehničkih sistema između otkaza (korektivnih održavanja)

n - broj segmenata vremena u radu tehničkih sistema između otkaza (korektivnih održavanja)

Empirijska funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ tehničkih sistema se definiše kao broj otkaza jednakih tehničkih sistema u jedinici vremena u odnosu na trenutni broj ispravnih tehničkih sistema.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{N - n(t)}{N \cdot \Delta t}}{\frac{n(t)}{N}} = \frac{N - n(t)}{n(t) \cdot \Delta t}, 10^{-6} \times \text{ broj otkaza/h} \quad (5.59)$$

Intenzitet otkaza se može izračunati statistički praćenjem tehničkih sistema tokom eksploatacije, to je uslovna gustina verovatnoće da će sistem, koji nije bio u otkazu do trenutka t , otkazati u narednom periodu. Značaj funkcije intenziteta otkaza je što ona pokazuje promenu intenziteta otkaza tokom veka trajanja tehničkih sistema. Na primer, dva sistema mogu imati istu pouzdanost do određenog trenutka vremena, ali se intenziteti otkaza do tog trenutka mogu razlikovati.

Operativna raspoloživost $A_o(t)$ (engl. operation availability) se računa po obrascu:

$$A_0(t) = \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_r + \bar{t}_z} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{zj}} \cdot 100 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \cdot 100\% \quad (5.60)$$

gde je:

MTBM - srednje vreme u radu, tj. srednje vreme između održavanja (korektivnih i preventivnih)

MDT - srednje vreme u zastoju

Sopstvena (unutrašnja, inherentna) raspoloživost $A_i(t)$ (engl. inherent availability) se računa po obrascu:

$$A_i(t) = \frac{\bar{t}_r}{\bar{t}_r + \bar{t}_{ako}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ri} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{akoj}} \cdot 100 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot 100\% \quad (5.61)$$

gde je:

MTBF - srednje vreme između otkaza

MTTR - srednje vreme popravke

5.6.2 Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem analitičkih (teorijskih) relacija

Istraživanja sprovedena u industriji pokazuju da se verovatnoća rada bez otkaza sastavnih delova i/ili sistema, koji podležu slučajnim otkazima, može najbolje opisati eksponencijalnom ili Weibull-ovom raspodelom otkaza tokom eksploatacije kada je intenzitet otkaza konstantan ili raste. Kako je eksponencijalna raspodela specijalan slučaj Weibull-ove to je za proračun pouzdanosti pogodnije koristiti Weibull-ovu raspodelu, kao opštiji oblik raspodele u odnosu na druge raspodele, pošto je podesnija da obuhvati raznovrsnost u pogledu pojave otkaza komponenti. Zbog toga je predloženo da se prilikom proračuna pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema u industriji, primenom softvenog modela, koristi Weibull-ova raspodela. Tako da je razvijeni sopstveni model za proračun pokazatelja pouzdanosti široko upotrebljiv, te se problem svodi na pronalaženje parametara ove raspodele¹⁶⁰ [178].

U teoriji pouzdanosti poznato je da se za elektronske komponente, često može smatrati da imaju konstantan intenzitet otkaza tokom vremena (što olakšava proračun), to odgovara eksponencijalnoj raspodeli vremena rada do otkaza, koja predstavlja specijalan slučaj Weibull-ove raspodele sa parametrom oblika $\beta=1$, pa Weibull-ova raspodela obuhvata i eksponencijalnu raspodelu. Dok se za mehaničke i elektromehaničke komponente, zbog neprestanog habanja u toku rada, može smatrati da im intenzitet otkaza raste tokom eksploatacije. Njihova vremena između otkaza imaju Weibull-ovu raspodelu sa parametrom oblika $\beta>1$ ¹⁶¹ [174].

Funkcija gustine raspodele otkaza se prema osnovnim zakona iz teorije verovatnoće može izraziti kao:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (5.62)$$

Funkcija gustine raspodele otkaza $f(t)$ u slučaju Weibull-ove raspodele glasi:

¹⁶⁰ Savić, B., Ilić, B., Pouzdanost računarskog sistema, Zbornik radova/ XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh, Vol. 11, RSS-6-7, Jahorina, 21-23.03. 2012, pp. 824-829.

¹⁶¹ Savić, B., Ilić, B., Djukić, D., Protection and preventive maintenance of computer information systems, XIII International scientific-professional symposium Infoteh, Vol. 13, Jahorina, 19-21 March, 2014, pp. 897-902.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \quad t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0 \quad (5.63)$$

Funkcija pouzdanosti tehničkog sistema u posmatranom vremenskom intervalu $[0, t]$ u slučaju troparametarske Weibull-ove raspodele vremena rada do otkaza, može se dobiti iz jednačine (5.63) i računa se po obrascu¹⁶² [173]:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad t \geq \gamma, \beta > 0, \eta > 0 \quad (5.64)$$

gde je:

t - dužina posmatranog vremenskog intervala

γ - parametar položaja raspodele

β - parametar oblika raspodele

η - parametar razmere raspodele

$F(t)$ - funkcija raspodele otkaza

Razlikuje se dvoparametarska i troparametarska Weibull-ova raspodela u zavisnosti od broja parametara koji se primenjuju. Svakako je troparametarska opštiji slučaj. Troarametarska Weibull-ova raspodela se koristi kada je vreme minimalnog rada do pojave prvog otkaza značajno, tj. nije malo u odnosu na ukupno vreme rada. Prvi korak primene ove raspodele svodi se na određivanje parametra položaja γ , tj. određivanja vremena minimalnog rada do pojave otkaza, koje se može odrediti na više načina.

Za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema u industriji primenom razvijenog sopstvenog modela korišćena je dvo-parametarska Weibull-ova raspodela, koja predstavlja specijalan slučaj tro-parametarske Weibull-ove raspodele kada je parametar položaja $\gamma=0$, tj. kada postoji mogućnost otkaza odmah na početku posmatranog vremenskog intervala $[0, t]$. Negativna vrednost parametra položaja γ (negativna vremena minimalnog rada do pojave prvog otkaza) značila bi da su se otkazi dogodili pre početka korišćenja sistema.

Oblici grafika funkcija $f(t)$, $R(t)$ i $\lambda(t)$ dosta zavise od vrednosti parametara raspodele γ , β i η . Na oblik funkcije intenziteta otkaza $\lambda(t)$ najveći uticaj ima vrednost parametra oblika β . Kada je $0 < \beta < 1$ funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$ opada sa vremenom, kada je $\beta=1$ funkcija intenziteta otkaza ne zavisi od vremena (eksponencijalna raspodela), a kada je $\beta > 1$ funkcija intenziteta otkaza raste.

Weibull-ova raspodela je veoma složenog oblika, a zavisno od svojih parametara može preći u neku jednostavniju raspodelu. Tako za slučaj kada je $\gamma=0$ i $\beta=1$ ona prelazi u eksponencijalnu raspodelu čiji je parametar razmere u tom slučaju jednak $\lambda=1/\eta$, a za slučaj kada je $\gamma=0$ i $\beta=2$ dobija se tzv. Rajlijeva raspodela, dok za veće vrednosti β Weibull-ova raspodela sve više dobija osobine normalne raspodele¹⁶³ [178].

Srednje vreme između otkaza (korektivnih održavanja) MTBF (Mean Time Between Failure), računa se po obrascu¹⁶⁴ [180]:

$$MTBF = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = - \int_0^\infty t \cdot \frac{dR(t)}{dt} dt = - \int_0^\infty t \cdot R(t) = -tR(t) \Big|_0^\infty + \int_0^\infty R(t) dt = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right), \text{ h} \quad (5.65)$$

¹⁶² Savić, B., Adamović Z., Ilić, B., Grujić, G., Analysis of influence thermographic diagnostic controls in increasing the reliability of computer systems, Proceedings/ International 22th Telecommunications forum TELFOR, Belgrade, Serbia, November 25-27, 2014, pp. 1075-1078.

¹⁶³ Savić, B., Ilić, B., Pouzdanost računarskog sistema, Zbornik radova/ XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh, Vol. 11, RSS-6-7, Jahorina, 21-23.03. 2012, pp. 824-829.

¹⁶⁴ Savić, B., Ilić, B., Stanković, N., Određivanje pouzdanosti računarskih komponenti, XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Zbornik radova, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

gde je:

$$\Gamma\left(\frac{1}{\beta}+1\right) - \text{tzv. gama funkcija od } \left(\frac{1}{\beta}+1\right)$$

Vreme između otkaza TBF (Time To Repair) se dobija iz obrasca za pouzdanost u slučaju dvoparametarske Weibull-ova raspodela (5.64) i računa se po obrascu:

$$TBF = \gamma + \eta \ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5.66)$$

Funkcija intenziteta otkaza $\lambda(t)$, predstavlja količnik funkcije gustine verovatnoće otkaza $f(t)$ i funkcije pouzdanosti $R(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad 10^{-6} \times \text{ broj otkaza/h} \quad (5.67)$$

Lognormalna raspodela se koristi prilikom proračuna vremena popravki *MTTR*. Lognormalna raspodela ima veliku primenu u održavanju sistema. Isto tako, ona je veoma dobra za proučavanje otkaza čiji je uzrok zamor materijala ili postepeno starenje tehničkog sistema tokom upotrebe kada se javlja istrošenost. Normalna raspodela je dvoparametarska raspodela sa parametrima μ i σ ,

Funkcija gustine otkaza u slučaju lognormalne raspodele glasi:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}, \quad t > 0, \mu > 0, \sigma > 0 \quad (5.68)$$

gde su:

μ - srednja vrednost

σ - standardna devijacija

t - dužina posmatranog vremenskog intervala

Srednje vreme popravke MTTR (Mean Time To Repair), zove se i srednje vreme do ponovnog uspostavljanja funkcije tehničkog sistema, računa se po obrascu:

$$MTTR = e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \quad (5.69)$$

Izbor simulacione metode za određivanje parametara dvoparametarske Weibull-ove raspodele popravljivih komponenti složenih tehničkih sistema

U ovom delu je razmotrena primena simulacione metode za određivanje parametara dvoparametarske Weibull-ove raspodele za popravljive komponente složenih tehničkih sistema. Podaci o vremenima pojave otkaza ovih komponenti predstavljaju polaznu osnova za proračun parametara, a rezultati proračuna omogućavaju dobijanje realnije slike o pouzdanosti tehničkih sistema.

Metode određivanja parametara Weibull-ove raspodele su različite po mnogim pitanjima, pre svega primenljivosti ili jednostavnosti primene. Grafičke metode zahtevaju najviše vremena i ne daju precizne rezultate, dok analitičke metode iako precizne ne čine se uvek lako primenljivim. Rešenje za određeni proračun ne postoji kao univerzalno, ali u zavisnosti od konkretnih potreba kombinovanjem metoda te dobijanjem grafoanalitičkih metoda uz adekvatnu primenu računara, mogu se dobiti puno jednostavnija i brža rešenja nego primenom samo jedne metode. Uobičajene metode određivanja parametara raspodele pristupaju podacima o otkazima popravljivih komponenti tako kao da se radi o podacima o otkazima nepopravljivih komponenti, tj. ne uzimaju u obzir popravke sistema (korektivne aktivnosti održavanja) kojima se pouzdanost komponenti podiže na znatno viši nivo, čime se pravi velika greška tako da se dobijaju vrednosti parametara koje su najčešće niže od realnih (ne dobijaju validni rezultati proračuna), pa su ove metode u suštini neprimenljive u slučaju popravljivih komponenti. Takođe, u praksi je čest slučaj da se ne radi o velikom broju otkaza za neku komponentu tehničkog sistema, pa podaci o otkazima predstavljaju neadekvatan izvor podataka ukoliko se koriste uobičajene metode određivanja parametara

raspodele. Zbog toga se preporučuje korišćenje simulacione metode za određivanje parametara raspodele popravljivih komponenti kompleksnih tehničkih sistema, kojom se svi navedeni nedostaci otklonjaju. Ova metoda uvažava porast nivoa pouzdanosti komponenti koji nastaje zbog korektivnih aktivnosti održavanja i na osnovu toga vrši korekciju parametara Weibull-ove raspodele. Takođe ova metoda je primenljiva u slučajevima nedostatka potpune evidencije o otkazima, kao i u slučajevima malog broja otkaza pojedinih komponenti sistema.

Prilikom primene simulacione metode potrebno je definisati samo inicijalne vrednosti parametara dvoparametarske Weibull-ove raspodele ($\gamma=0$), tj. odnos parametra razmere raspodele η i parametra oblika raspodele β , a dalje se simulacijom pouzdanosti velikim brojem iteracija vrši korekcija ovih parametara. Radi fleksibilnosti metode i njene jednostavne primene na kompleksne tehničke sisteme vrše se neke aproksimacije. Srednje vreme do pojave otkaza $MTTF$ izračunava se kao aritmetička sredina svih evidentiranih vremena do pojave otkaza iz baze podataka za određenu komponentu:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N} \quad (5.70)$$

gde je:

n_i - i -to vreme do pojave otkaza određene komponente

N - ukupan broj otkaza određene komponente

Parametar β se aproksimativno određuje na osnovu odnosa $\eta/MTTF$.

Rešavanjem odgovarajućih jednačina dobija se vrednost srednjeg vremena do pojave otkaza $MTTF$, kao i vrednosti parametara Weibull-ove raspodele (parametra oblika β i parametra razmere η) za posmatranu komponentu. Međutim, na ovaj način se ne dobija stvarno stanje popravljivih komponenti, jer po nastanku otkaza u posmatranom vremenskom intervalu, korektivnim aktivnostima održavanja pouzdanost se podiže na znatno viši nivo. Zbog toga se preporučuje primena simulacione metode, kod koje razvijeni softver simuliranjem otkaza i kretanja pouzdanosti za posmatranu komponentu tokom posmatranog vremenskog intervala može da ukaže na odstupanja kod ovakvog inicijalnog proračuna, pa se velikim brojem iteracija može doći do adekvatnih rezultata proračuna parametara raspodele posmatrane komponente. Kao rezultati simulacije dobijaju se vrednosti parametara raspodele $\eta(A)$ i $\beta(B)$ i srednji broj otkaza ($SrSimBrOtkaza$). Ovako dobijeni izlazni podaci o pouzdanosti komponenti sistema u suštini su jako pogodni za grafičko prezentovanje.

5.6.3 Proračun pokazatelja pouzdanosti korišćenjem simulacione Monte Karlo metode

U ovom delu je pokazano kako se simulaciona Monte Karlo metoda može koristiti za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema.

Tokom izrade i eksploatacije različitih tehničkih sistema, srećemo se sa potrebom da nam trebaju podaci koji se odnose na predviđanje kako će se ti sistemi ponašati tokom svoje eksploatacije. To se pre svega odnosi na njihove tehničke osobine kao što su pouzdanost i raspoloživost. Pouzdanost i raspoloživost složenih tehničkih sistema građenih od velikog broja komponenti, koji imaju veliki broj mogućih stanja, teško je (praktično gotovo nemoguće) odrediti pomoću analitičkih izraza, jer zahteva postavljanje i rešavanje velikog broja jednačina. Zbog toga se za proračun pouzdanosti i raspoloživosti složenih tehničkih sistema građenih od elektronskih, elektromehaničkih ili mehaničkih komponenti koristi simulaciona Monte Karlo metoda. Ovom metodom se vrši simulacija životnog veka tehničkog sistema, pomoću raznih programa koji pokušavaju da što vernije prikažu njegove osobine i uslove u kojima radi (uticaje okoline).

Simulaciona Monte Karlo metoda je numerička metoda koja je, zahvaljujući brzom razvoju računara, postala jedna od najmoćnijih i najvažnijih metoda za rešavanje komplikovanih matematičkih problema. Simulaciona Monte Karlo metoda koristi statistiku da matematički modeluje realni proces i zatim utvrđuje verovatnoću mogućih rešenja. Metoda ima nedostatke kao i sve metode bazirane na statistici, a to je da

rešenja nisu egzaktna, tj. skroz tačna nego postoje izvesna odstupanja (devijacije) od njih, kojih moramo biti svesni prilikom korišćenja ove metode. Ali i to je bolje, nego da se na takve podatke čeka po 20 godina, koliko bi bilo potrebno bez simulacije, samo analizirajući podatke dobijene tokom životnog veka nekog sistema.

Osnova od koje se počinje u ovoj metodi su već poznati podaci (to se pre svega odnosi na poznate funkcije gustine raspodele koje opisuju evoluciju datog sistema u vremenu) koji se preko generatora pseudo-slučajnih brojeva generišu i kao takvi ulaze u potrebne proračune.

U nedostatku već gotovih programa, najpogodnije je za ovu simulaciju koristiti neki od programa za tabelarnu obradu podataka, kao što je npr. Microsoft Excel, koji obezbeđuje najlakši i najpregledniji postupak, kao i mogućnost lakog manipulisanja izlaznim vrednostima. Tabelarna struktura programa za obradu podataka omogućava da se proračuni i rezultati organizuju na prirodan i intuitivan način.

5.6.4 Razvoj sopstvenog modela za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema u programu za tabelarnu obradu podataka

U ovom delu prikazan je razvoj sopstvenog modela za proračun pokazatelja pouzdanosti složenih tehničkih sistema. Ovaj model je razvijen u programu za tabelarnu obradu podataka Microsoft Excel koji omogućava lak rad, laku simulaciju koju je lako čitati, kao i ponovo izračunavati po potrebi.

Prilikom primene razvijenog modela, podaci sa kojima se ulazi u ovaj proces su parametri Weibull-ove raspodele vremena do otkaza i parametri Lognormalne raspodele vremena popravki.

Vrednosti parametara Weibull-ove raspodele vremena do otkaza γ , β i η se određuju simulacionom metodom i unose u odgovarajuće ćelije, ito¹⁶⁵ [101]:

- γ - parametar položaja (vreme minimalnog rada tehničkog sistema do pojave otkaza), unosi se u ćeliju C4;
- β - parametar oblika, unosi se u ćeliju C5 (za elektronske i električne komponente je $\beta=1$, a za elektromehaničke i mehaničke komponente je $\beta > 1$);
- η - parametar razmere, unosi se u ćeliju C6; i
- t - posmatrani vremenski interval, unosi se u ćeliju C9.

Vrednosti parametara Lognormalne raspodele vremena popravki μ i σ , se određuju grafoanalitičkim metodama i unose se u odgovarajuće ćelije, ito:

- μ - srednja vrednost, unosi se u ćeliju E4; i
- σ - standardna devijacija, unosi se u ćeliju E5

Empirijsko srednje vreme u radu $MTBM_e$ unosi se u ćeliju C10, dok se empirijsko srednje vreme u zastoju MDT_e unosi u ćeliju C11.

Ukupan broj posmatranih tehničkih sistema N unosi se u ćeliju G4, a broj tehničkih sistema koji nisu otkazali (koji su ostali su da rade ispravno) do kraja posmatranog vremenskog intervala $n(t)$ unosi se u ćeliju G5.

Broj tehničkih sistema koji su otkazali $N-n(t)$ (broj neuspešno izvršenih zadataka - broj otkaza koji su se dogodili) u posmatranom vremenskom intervalu računa se u ćeliji G6, po obrascu: $N-n(t)$, prema Excel-ovom izrazu:

$$= G4-G5 \quad (5.71)$$

Srednje vreme između otkaza $MTBF$ (Mean Time Between Failure) računa se u ćeliji C7, po obrascu (5.65), prema Excel-ovom izrazu:

¹⁶⁵ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Razvoj softvera za simulaciju porasta nivoa pouzdanosti elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.

$$=C4+C6*EXP(GAMMALN(1+1/C5)) \quad (5.72)$$

Izraz je napisan pomoću funkcije GAMMALN, koja vraća prirodni logaritam od funkcije.

Srednje vreme popravke MTTR (Mean Time To Repair) računa se u ćeliji E6, po obrascu (5.69), a prema Excel-ovom izrazu:

$$=EXP(E4+E5^2/2) \quad (5.73)$$

Vreme između otkaza TBF (Time Between Failure) računa se u ćeliji B14, po obrascu (5.66), prema Excel-ovom izrazu:

$$=ROUND(C\$4+C\$6*(LN(1/(1-RAND())))^{(1/C\$5)},0) \quad (5.74)$$

ROUND na početku izraza služi da zaokruži brojeve, jer bi se bez ove funkcije dobili brojevi koji imaju veliki broj decimala. Umesto funkcije raspodele otkaza $F(t)$ koristi se funkcija RAND(), koja ustvari predstavlja suštinu simulacione Monte Karlo metode. Funkcija RAND() generiše uniformnu raspodelu pseudo slučajnih brojeva između 0 i 1, što je od velike pomoći pošto se i pouzdanosti kreće između 0 i 1. Znači, Microsoft Excel sadrži funkciju RAND() (generator pseudo slučajnih brojeva) koja generiše broj koji ima podjednake šanse da bude bilo koji broj između 0 i 1. Tako postoji 25% šansi da se dobije broj koji je manji ili jednak broju 0,25, ili 10% šansi da se dobije broj koji je veći od 0,90 itd. Korišćenjem ovog generatora pseudo slučajnih brojeva, moguće je simulirati različite funkcije raspodele otkaza $F(t)$.

Vreme popravke TTR (Time To Repair) računa se u ćeliji C15, prema Excel-ovom izrazu:

$$=ROUND(LOGINV(RAND(),E\$4,E\$5),0) \quad (5.75)$$

gde takođe ROUND na početku izraza služi da zaokruži brojeve, a funkcija LOGINV za Lognormalnu raspodelu koristi generator pseudo-slučajnih brojeva (funkciju RAND()).

U ćeliju E14 se upisuje trenutak pojave otkaza koji je u datom slučaju jednak vremenu između otkaza TBF iz ćelije B14 (=B14), dok se u ćeliji F15 računa trenutak završetka popravke (trenutak kada se ponovo uspostavi projektovana funkcija) tako što se trenutku pojave otkaza iz ćelije E14 doda vreme popravke TTR iz ćelije C15 (=E14+C15). Ovakav niz se nastavlja dalje, pa se tako u ćeliji E18 računa trenutak pojave otkaza tako što se trenutku završetka popravke iz ćelije F17 doda novo vreme između otkaza TBF iz ćelije B18 (=F17+B18). Ovakav niz se nastavlja dalje i služi nam da posmatramo trenutke pojave otkaza i trenutke završetaka popravki tokom vremena koji su dati u neprekidnom nizu, tj. jedno vreme se dodaje na drugo, te se tako pravi neprekidni vremenski niz. Vreme između otkaza TBF i vreme popravke TTR se tokom simulacije stalno menjaju. Ova vremena pomažu da rezultati simulacije budu pregledniji i lakši za analizu.

Uspešnost iteracije se ocenjuje u koloni H, prema tome da li je vreme između otkaza TBF duže ili kraće od posmatranog vremenskog intervala t . Ako je vreme između otkaza TBF duže od posmatranog vremenskog intervala t iteracija se smatra uspešnom i u odgovarajuću ćeliju se upisuje 1, a ako je kraće iteracija se smatra neuspešnom (otkazom) i u odgovarajuću ćeliju se upisuje 0. Uslov, koji se upisuje u ćeliju H14, je prost i u Excel-u se piše u obliku:

$$=IF(B14<C\$9,0,1) \quad (5.76)$$

Računanje pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema sumira sve navedene rezultate i to na sledeći način.

Pouzdanost koja se dobija korišćenjem analitičkog izraza $R_t(t)$ (5.64) (Teorijska pouzdanost) računa se u ćeliji E7, prema Excel-ovom izrazu:

$$=1-WEIBULL(C9-C4,C5,C6,1) \quad (5.77)$$

Pošto je funkcija WEIBULL ustvari Wejbul-ova funkcija raspodele otkaza $F(t)$ (služi za računanje verovatnoće da će tehnički sistem otkazati u posmatranom vremenskom intervalu), a nama treba pouzdanost (verovatnoća da tehnički sistem neće otkazati u posmatranom vremenskom intervalu) zbog toga je napisano: 1-, a u zagradu se unose potrebni parametri, kao na primer prvi, gde se od posmatranog vremenskog intervala C9 oduzima vreme minimalnog rada tehničkog sistema do pojave otkaza C4.

Pouzdanost koja se dobija korišćenjem empirijskog izraza $R_e(t)$ (5.56) (Empirijska pouzdanost) računa se u ćeliji E8, prema Excel-ovom izrazu:

$$=G5/G4 \quad (5.78)$$

Pouzdanost koja se dobija korišćenjem simulacione Monte Karlo metode $R_s(t)$ (Simulirana pouzdanost) računa se u ćeliji E9, prema Excel-ovom izrazu:

$$=SUM(H14:H3000)/COUNT(H14:H3000) \quad (5.79)$$

Ova pouzdanost se računa kao odnos između sume svih uspešnih iteracija i ukupnog broja iteracija (misija). Ukupan broj iteracija računa se kao zbir svih uspešnih i svih neuspešnih iteracija (otkaza).

Intenzitet otkaza $\lambda_e(t)$ koji se dobija korišćenjem izraza (5.59) računa se u ćeliji E10, prema Excel-ovom izrazu:

$$=(G4-G5)/(G5*C9) \quad (5.80)$$

Sopstvena raspoloživost koja se dobija korišćenjem izraza $A_{ii}(t)$ (5.61) (Teorijska sopstvena raspoloživost) računa se u ćeliji G7 prema Excel-ovom izrazu:

$$=C7/(C7+E6) \quad (5.81)$$

Ova raspoloživost se dobija kao odnos između srednjeg vremena između otkaza $MTBF_e (=C7)$ i zbira srednjeg vremena između otkaza $MTBF_e (=C7)$ i srednjeg vremena popravke $MTTR_e (=E6)$, ova vremena se dobijaju teorijskim proračunom.

Sopstvena raspoloživost koja se dobija (kao prirodna frekvencija) korišćenjem simulacione Monte Karlo metode $A_{is}(t)$ (Simulirana sopstvena raspoloživost) računa se u ćeliji G9, prema Excel-ovom izrazu:

$$=SUM(B14:B3000)/(SUM(B14:B3000)+SUM(C14:C3000)) \quad (5.82)$$

Ova raspoloživost se računa kao odnos između sume svih vremena između otkaza i zbira sume svih vremena između otkaza i sume vremena popravki.

Operativna raspoloživost koja se dobija korišćenjem izraza $A_{oe}(t)$ (5.60) (Empirijska operativna raspoloživost) računa se u ćeliji G8 prema Excel-ovom izrazu:

$$=C10/(C10+C11) \quad (5.83)$$

Ova raspoloživost se dobija kao odnos između srednjeg vremena u radu $MTBM_e (=C10)$ i zbira srednjeg vremena u radu $MTBM_e (=C10)$ i srednjeg vremena u zastoju $MDT_e (=C11)$, ova vremena se dobijaju iz empirijskih podataka.

Na osnovu unesenih podataka prema navedenim izrazima vrši se proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema. Na slici 5.62. prikazan je primer rezultata proračuna pokazatelja pouzdanosti energetskog transformatora primenom razvijenog sopstvenog modela. U Excel-ovoj tabeli je prikazan deo simuliranih događaja (iteracija) i dat je raspored ćelija u kojima se prikazuju rezultati proračuna, tako da se mogu uporediti rezultati dobijeni korišćenjem analitičkih relacija i simulacione Monte Karlo metode, što su ovi rezultati bliži to je simulacija bolje urađena.

Posle određenog broja iteracija primenom simulacione Monte Karlo metode se za navedene ulazne podatke izračunavaju vrednosti za pouzdanost $R_s(t)$ i raspoloživost $A_s(t)$ tehničkih sistema. Vrednost pouzdanosti koja se dobije predstavlja verovatnoću da tehnički sistem neće otkazati u posmatranom vremenskom intervalu t . Ako je pouzdanost neke komponente $R(t)=0,9$, onda postoji verovatnoća od 90% da taj tehnički sistem neće otkazati u posmatranom vremenskom intervalu. Visok nivo pouzdanosti sugerše kratak posmatrani vremenski interval.

Raspoloživost i pouzdanost jednostavnih tehničkih sistema moguće je odrediti korišćenjem analitičkih relacija i simulacione Monte Karlo metode. Poređenjem rezultata proračuna utvrđen je visok stepen njihove podudarnosti, odnosno utvrđeno je da su rezultati dobijeni simulacijom vrlo bliski rezultatima dobijenim analitičkim relacijama. Time je potvrđena ispravnost primene razvojenog sopstvenog softvera za simulaciju pouzdanosti i raspoloživosti složenih tehničkih sistema.

Razvijeni sopstveni model omogućava alokaciju (raspodelu) srednjeg vremena između otkaza za komponente tehničkih sistema i optimizaciju pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, što je veoma važno u procesu projektovanja, proizvodnje i obezbeđenja isplativosti tehničkih sistema.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		Proračun pokazatelja pouzdanosti energetskog transformatora						
3								
4		$\gamma =$	0	$\mu =$	3	$N =$	119	
5		$\beta =$	1.56	$\sigma =$	0.5	$n(t) =$	115	
6		$\eta =$	1350	$MTTR =$	22.7598951	$N - n(t) =$	4	
7		$MTBF =$	1213.36616	$Rt(t) =$	0	$Ait(t) =$	0.981587723	
8		$MTBF_e =$	503700	$Re(t) =$	0.96638655	$Aoe(t) =$	0.989155251	
9		$t =$	17520	$Rs(t) =$	0	$Ais(t) =$	0.981541202	
10		$MTBMe =$	17330	$\lambda_e(t) =$	1.9853E-06			
11		$MDTe =$	190					
12								
13		Vreme između otkaza TBF	Vreme popravke TTR		Trenutak pojave otkaza	Trenutak završetka popravke		Uspešnost iteracije
14		17			17			0
15		197	11		884	28		0
16		902	30		930	914		0
17		947	12		1861	942		0
18		884	30		1826	1891		0
19		108	33		1999	1859		0
20		1111	13		2970	2012		0
21		1300	11		3312	2981		0
22		1664	12		4645	3324		0
23		206	43		3530	4688		0
24		1294	51		5982	3581		0
25		1224	23		4805	6005		0
26		1884	47		7889	4852		0
27		2194	41		7046	7930		0

Slika 5.62. Primer proračuna pokazatelja pouzdanosti energetskog transformatora primenom razvijenog sopstvenog modela

6. Rezultati istraživanja

Osnovni cilj istraživanja realizovanih tokom izrade ove doktorske disertacije bio je da se ispita da li automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

Da bi se ostvario postavljeni cilj, odnosno da bi se dokazala tačnost pomoćnih, a preko njih i glavne hipoteze, na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja, razvijen je novi automatizovani dijagnostički model, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Ovaj model obuhvata korišćenje tri dijagnostičke metode: metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora motora. Pri tome je korišćena savremena dijagnostička oprema, kao što su: računari sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom, termografske kamere, senzori vibracija, spektralni analizatori, strujni merni transformatori, koaksijalni kablovi, kablovi sa upredenim paricama, optički kablovi itd.

Zatim, je u empirijsko-eksperimentalnom delu disertacije izvršena praktična primena tog modela na konkretnom primeru dijagnostičkih kontrola vitalnih komponenti tehničkih sistema (ležajeva mašina, asinhronih motora, priključnih stezaljki itd.) u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji). Dijagnostičke kontrole su bile fokusirane na vitalne komponente tehničkih sistema, zbog toga što su iskustva pokazala da one najbolje odražavaju (oslikavaju) stanje u kome se tehnički sistemi nalaze. Jedan deo empirijsko-eksperimentalnih istraživanja obavljen je u laboratorijskim uslovima.

Empirijsko-eksperimentalni deo istraživanja je sproveden u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijen novi model (od 21.12.2012. godine do 21.12.2014. godine) u sledećim preduzećima naše zemlje: u preduzeću za obradu i preradu drveta "Omega profeks" iz Loznice, zatim u preduzeću bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i u preduzeću obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice.

U preduzeću za obradu i preradu drveta "Omega profeks" iz Loznice, primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti složenih mašina građenih od elektronskih, električnih, elektromehaničkih i mehaničkih komponenti, kao što su: CNC mašine za kompjutersko rezbarenje i graviranje, koje služe za rezbarenje i graviranje drveta, medijapana, iverice, plastike, šper ploče i drugih materijala; CNC glodalice; CNC Tiplerice, koje tipluju drvo, ivericu i sl., odnosno buše rupe na drvetu i iverici za police, šarke i sl.; Automatske bušilice, koje služe za vertikalno i horizontalno bušenje; Mašine za automatsko rezanje daščica; Prese za furniranje, koje služe za presovanje furnira; Kanterice, koje služe za lepljenje trake na ivericu, medijapan i sl.; Giljotine za rezanje furnira, koje služe za rezanje furnira dužina 3000 mm; Mašine za odvojeno rezanje sa kružnom pilom za proizvodnju stolarije; Mašine za izradu greda itd.

Primenom novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole mašina u industrijskim pogonima preduzeća bazne hemijske industrije za proizvodnju veštačke svile, celuloze i celofana "Viskoza" iz Loznice i preduzeća obojene metalurgije za proizvodnju olova i olovo antimonske legure "Rudnici i topionica Zajača" kod Loznice. Mašine koje su kontrolisane u ovim preduzećima primenom novog modela su: elektromotorni pogoni cirkulacionih pumpi, ventilatori svežeg vazduha i ventilatori dimnih gasova u toplanama, motori mlinova za ugalj, pogoni tračnih transportera itd.

Primenom razvijenog novog modela vršene su automatizovane dijagnostičke kontrole aparata elektroenergetskih postrojenja Elektroprivrede Srbije (EPS-a), kao što su: energetski transformatori, provodni izolatori, strujni i naponski merni transformatori itd..

Tokom empirijsko-eksperimentalnog dela istraživanja službe održavanja su vodile evidencije o aktivnostima održavanja velikog broja tehničkih sistema u industriji. Zatim, su relevantni statistički empirijski podaci dobijeni od službi održavanja o aktivnostima održavanja (broju preventivnih i korektivnih aktivnosti održavanja, vremenu u zastoju, vremenu u radu, uzroku otkaza i sl.) na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema u različitim granama industrije uneseni u odgovarajuće

tabele, na osnovu kojih je primenom razvijenog sopstvenog modela izvršen proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model (od 20.12.2010. godine do 20.12.2012. godine) i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model (od 21.12.2012. godine do 21.12.2014. godine). Analizirani su i praćeni statistički podaci koji pokazuju kod kojih tehničkih sistema i zbog kojih komponenti češće dolazi do pojave otkaza. Za dobijanje preciznijih podataka potreban je što duži vremenski interval.

Proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema vršen je korišćenjem razvijenog novog modela u programu za tabelarnu obradu podataka Microsoft Exel, na osnovu sakupljenih empirijskih podataka. Na osnovu tih rezultata u ovom poglavlju izvršena je provera postavljenih hipoteza preko ključnih rezultata istraživanja.

6.1 Ključni rezultati istraživanja

Ključni rezultati istraživanja su prikazani kroz proveru hipotetičkog okvira istraživanja, odnosno kroz dokazivanje tačnosti (verifikaciju) postavljenih pomoćnih (radnih) hipoteza, a preko njih i glavne hipoteze, koja glasi:

„Automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji, bazirana na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća“.

6.1.1 Dokazivanje tačnosti prve pomoćne hipoteze

U ovom delu izvršeno je dokazivanje tačnosti prve pomoćne (radne) hipoteze doktorske disertacije, koja glasi:

„Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju broja otkaza i produženju srednjeg vremena između otkaza *MTBF*, a time i porastu nivoa pouzdanosti tih sistema“.

Da bi se dokazala tačnost ove hipoteze statistički empirijski podaci dobijeni od službi održavanja o aktivnostima održavanja na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema u različitim granama industrije uneseni u tabelu 6.1., na osnovu kojih je primenom razvijenog sopstvenog modela izvršen proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model^{166,167,168} [89,90,91,101,176]. Posmatrani su tehnički sistemi koji su približno istih karakteristika i koji su radili u približno istim uslovima.

¹⁶⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetske efikasnosti elektroenergetskih postrojenja, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 3, Beograd, 2014, pp. 17-26.

¹⁶⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015.

¹⁶⁸ Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress “Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“, Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015

Tabela 6.1. Rezultati proračuna pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema u različitim granama industrije: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model

Posmatrani tehnički sistemi		Broj posmatranih tehničkih sistema N	Broj otkaza $N-n(t)$		Intenzitet otkaza $\lambda_e(t)$, $10^{-6} \times$ broj otkaza/h		Srednje vreme između otkaza $MTBF_e$, h		Pouzdanost $R_e(t)$ %	
			A	B	A	B	A	B	A	B
Mašine u drvenoj industriji	CNC Tiplerice	38	5	4	8,64	6,71	115632	148920	86,84	89,47
	Kanterice	35	6	3	11,8	5,35	84680	186880	82,85	91,42
	Prese za furniranje	39	5	4	8,39	6,25	119136	153300	87,17	89,74
	Automatske bušilice	42	6	4	9,51	6,00	105120	166400	85,71	90,47
	CNC mašine za kompjutersko rezbarenje i graviranje	53	7	5	8,68	5,94	115131	168192	86,79	90,56
	CNC glodalice	55	7	5	8,32	5,70	120137	175200	87,27	90,09
Mašine u hemijskoj i metalurškoj industriji	Mašine spojene gumenim spojnicama	186	19	11	6,49	3,58	153991	278727	89,78	94,08
	Mašine spojene zavrtnjevima	174	26	13	1,00	4,60	99729	216978	85,05	92,52
Aparati Elektroenergetskih postrojenja	Energetski transformatori	119	5	4	2,50	1,98	399456	503700	95,78	96,63
	Naponski merni transformatori	238	15	12	3,83	3,03	260464	329960	93,69	94,95
	Prekidači	241	17	11	4,33	2,72	230851	366327	92,94	95,43
	Strujni merni transformatori	239	16	10	4,09	2,49	244185	401208	93,30	95,81
	Rastavljači	353	28	17	4,91	2,88	203357	346277	92,06	95,18

Na slici 6.1. prikazan je primer rezultata proračuna pokazatelja pouzdanosti mašine Kanterice primenom razvijenog sopstvenog modela.

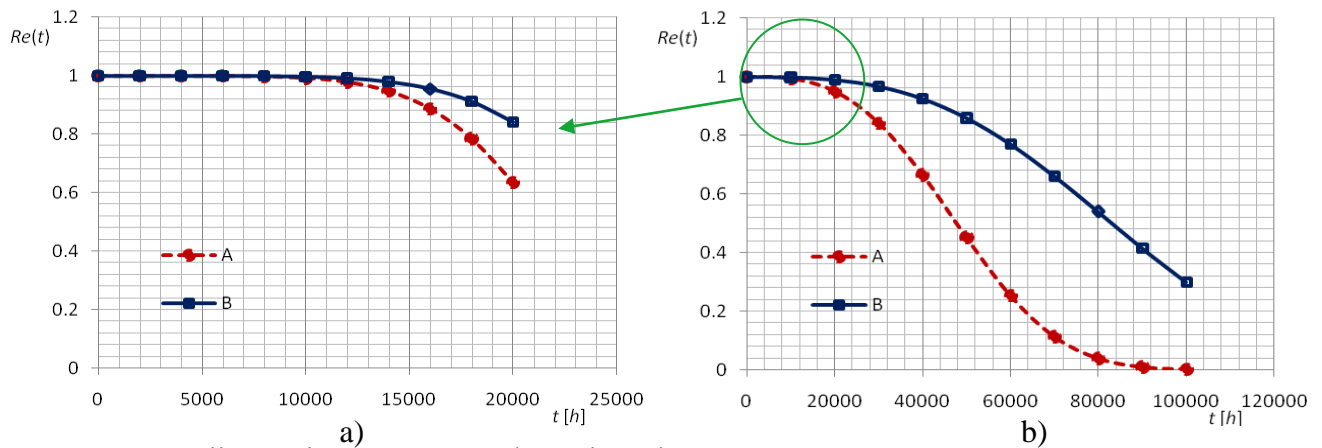
Na osnovu rezultata proračuna prikazanih u tabeli 6.1. nacrtani su dijagrami promene pouzdanosti pojedinih tehničkih sistema mašina Kanterica (slika 6.2), mašina spojenih gumenim spojnicama (slika 6.3.), mašina spojenih zavrtnjevima (slika 6.4.), energetskih transformatora (slika 6.5.) i rastavljača (slika 6.6.) ito: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model; b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina^{169, 170, 171, 172} [90,91,101,176].

¹⁶⁹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetsku efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.

¹⁷⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015. (rad prihvaćen za objavljivanje)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Proračun pokazatelja pouzdanosti mašine Kanterice							
3								
4	$\gamma =$	0	$\mu =$	3	$N =$	35		
5	$\beta =$	6.56	$\sigma =$	0.5	$n(t) =$	32		
6	$\eta =$	650	$MTTR =$	22.7598951	$N - n(t) =$	3		
7	$MTBF =$	605.95513	$Rt(t) =$	0	$Ait(t) =$	0.963799346		
8	$MTBF_e =$	186880	$Re(t) =$	0.91428571	$Aoe(t) =$	0.960045662		
9	$t =$	17520	$Rs(t) =$	0	$Ais(t) =$	0.964212409		
10	$MTBMe =$	16820	$\lambda e(t) =$	5.351E-06				
11	$MDTe =$	700						
12								
13		Vreme između otkaza TBF	Vreme popravke TTR		Trenutak pojave otkaza	Trenutak završetka popravke		Uspešnost iteracije
14		17			17			0
15		588	9		579	26		0
16		776	15		802	594		0
17		208	19		802	821		0
18		579	5		1400	807		0
19		645	34		1452	1434		0
20		546	10		1980	1462		0
21		588	11		2050	1991		0
22		739	12		2730	2062		0
23		694	14		2756	2744		0
24		529	13		3273	2769		0
25		399	11		3168	3284		0
26		459	25		3743	3193		0
27		530	40		3723	3783		0

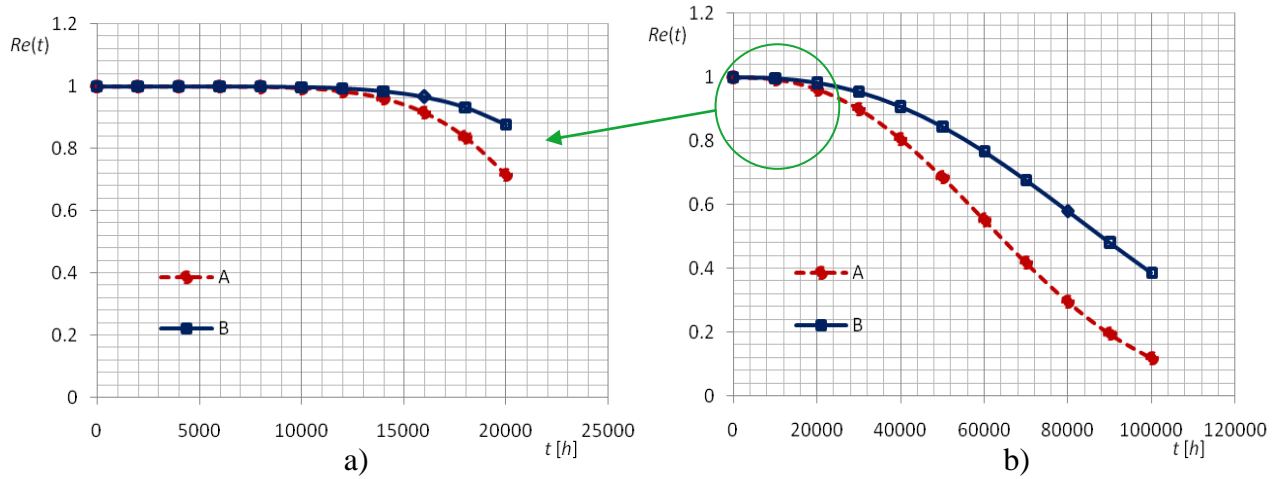
Slika 6.1. Primer rezultata proračuna pokazatelja pouzdanosti mašine Kanterice primenom razvijenog sopstvenog modela



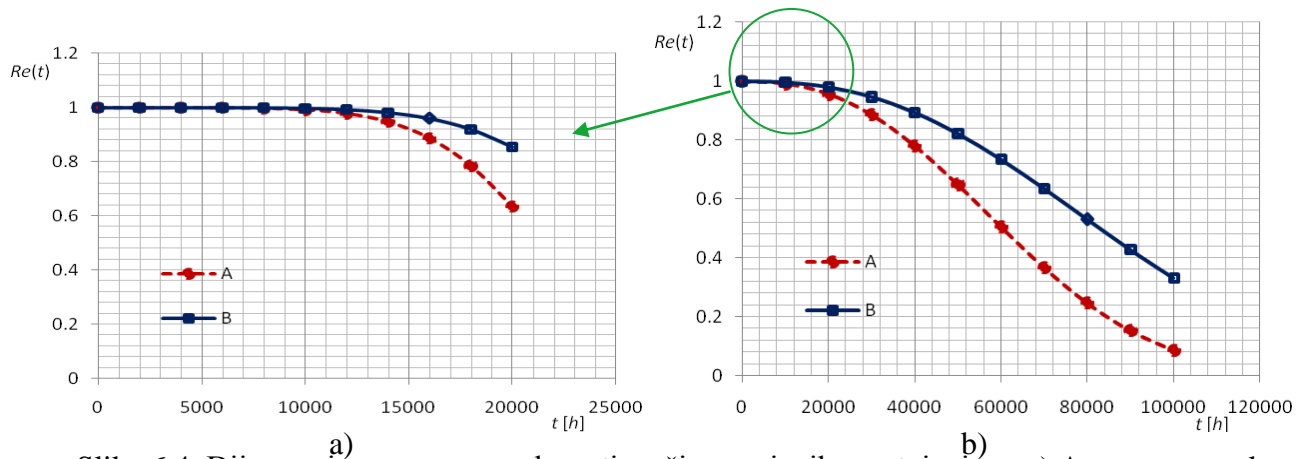
Slika 6.2. Dijagrami promene pouzdanosti mašine Kanterice: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina [90,176]

¹⁷¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Razvoj softvera za simulaciju porasta nivoa pouzdanosti elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.

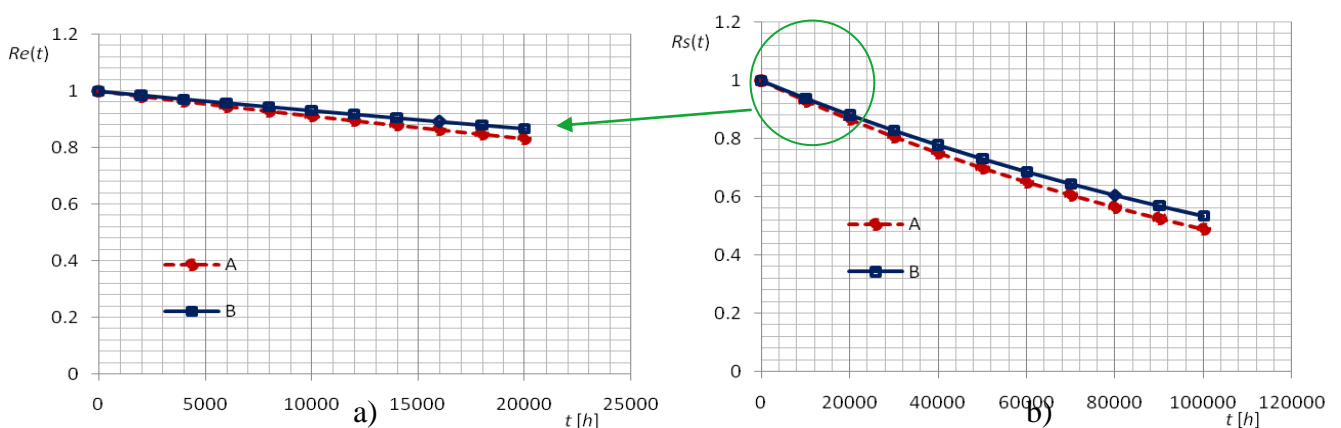
¹⁷² Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress “Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“, Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015.



Slika 6.3. Dijagrami promene pouzdanosti mašina spojenih gumenim spojnicama: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina¹⁷³ [90,176]

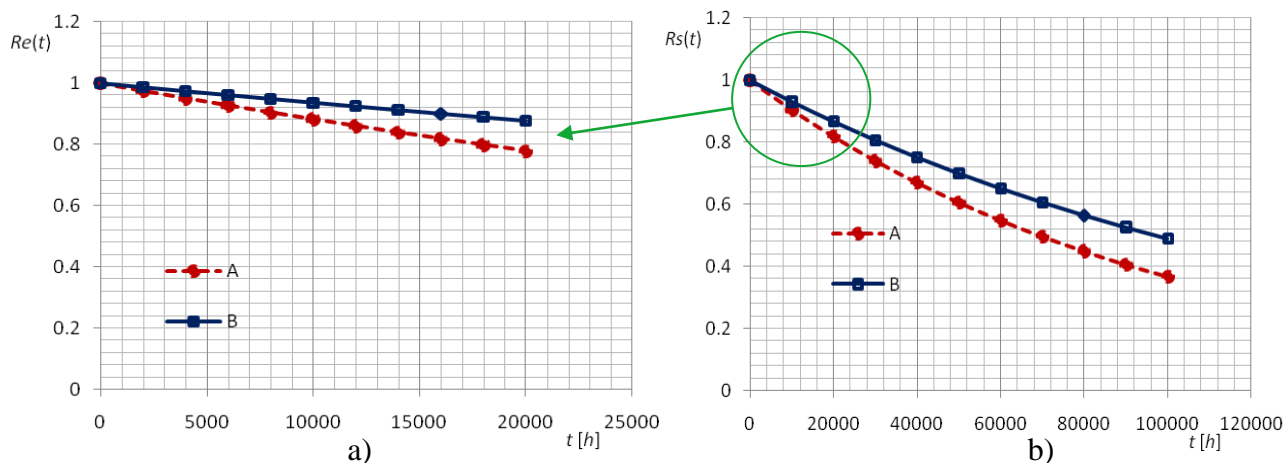


Slika 6.4. Dijagrami promene pouzdanosti mašina spojenih zavrtnjevima: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina



Slika 6.5. Dijagrami promene pouzdanosti energetskih transformatora: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina [90]

¹⁷³Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015.



Slika 6.6. Dijagrami promene pouzdanosti rastavljača: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina [91,101]

Nakon analize i obrade podataka o otkazima tehničkih sistema kada su kontrolisani primenom razvijenog novog modela i kada nisu (kada su klasično održavane), dobijeni su rezultati koji pokazuju da je kod svih tehničkih sistema kada su kontrolisane primenom razvijenog novog modela smanjen broj otkaza i porastao nivo pouzdanosti. Ovo se objašnjava time da su automatizovane dijagnostičke kontrole omogućile da se otkazi tehničkih sistema otkriju u početnoj fazi nastanka, čime su stvoreni uslovi da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti o državanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče mnogi otkazi i produži srednje vreme između otkaza *MTBF* i tako ostvari porast nivoa pouzdanosti tehničkih sistema¹⁷⁴ [101].

Može se uočiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti mašine Kanterice u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model, od svih tehničkih sistema koji su obuhvaćeni istraživanjem, za 9,17% (sa 82,85% koliko je iznosio nivo pouzdanosti kada nisu vršene, na 91,42% koliko je iznosio kada su vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Ovo se objašnjava time da se u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model dešavalo to da su dijagnostičari identifikovali samo jedan uzrok pogoršanja stanja mašine Kanterice npr. debalans rotacionih masa (kao isključivi uzrok pogoršanja stanja mašine), a da pri tome nisu identifikovali i drugi uzrok pogošanja stanja mašine, npr. nesaosnost.

Automatizovanim dijagnostičkim kontrolama u vremenskom intervalu od dve godine, ostvaren je neznatan porast nivoa pouzdanosti energetskih transformatora za oko 0,85% (sa 95,78% koliko je iznosio nivo pouzdanosti kada nisu vršene, na 96,63% koliko je iznosio kada su vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Ovo se može objasniti time da su to aparati sa inicijalno visokom pouzdanošću, tako da kod njih postoje manje mogućnosti za porast nivoa pouzdanosti. Takođe, procena termičkog stanja električnih spojeva u unutrašnjosti energetskih transformatora je složena, jer su ti spojevi prekriveni uljem i porcelanom, a za zagrevanje velikih količina ulja i porcelana za samo nekoliko stepeni potrebna je znatna količina toplote, koja se može razviti samo ako se pojave ozbiljniji defekti. Zbog toga su potrebne kontrole energetskih transformatora i drugim dijagnostičkim metodama, kao što su gasna hromatografija, hemijska analiza ulja i sl. Međutim i neznatan procentualni porast nivoa pouzdanosti energetskih transformatora je značajan, jer je značajnije smanjen intenzitet otkaza sa 2,5 na $1,98 \times 10^{-6}$ broj otkaza/h. Takođe, je produženo srednje vreme između otkaza *MTBF* za 104244 h (sa 399456 na 503700 h). Što znači da je skraćeno vreme u prekidu napajanja potrošača električnom energijom i da je porastao nivo raspoloživosti elektroenergetskih postrojenja.

Takođe, može se uočiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti rastavljača u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model,

¹⁷⁴ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Razvoj softvera za simulaciju porasta nivoa pouzdanosti elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.

od svih aparata elektroenergetskih postrojenja koji su obuhvaćeni istraživanjem, za 3,12% (sa 92,06% koliko je iznosio nivo pouzdanosti kada nisu vršene, na 95,18% koliko je je iznosio kada su vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Što je i razumljivo, jer su to aparati koji imaju nešto niži nivo pouzdanosti, tako da kod njih postoje veće mogućnosti za porast nivoa pouzdanosti. Takođe, kod rastavljača se svi spojevi nalaze u vazдушnom okruženju i svaki njihov defekt se manifestuje pregrevanjem, koje se automatizovanim dijagnostičkim kontrolama lako detektuje u početnoj fazi nastanka, time se stvaraju mogućnosti da se pravovremenim aktivnostima održavanja otklone defekti i tako spreče otkazi i havarije.

Automatizovanim dijagnostičkim kontrolama u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model ostvaren je nešto veći porast nivoa pouzdanosti kod mašina spojenih zavrtnjevima (sa 85,05% na 92,52%), nego kod mašina spojenih gumenim spojnicama (sa 89,78% na 94,08%). Ovo se objašnjava time da mašine spojene zavrtnjevima imaju nešto niži nivo pouzdanosti, jer su kod njih intenzivniji tribološki procesi, tako da kod njih postoje veće mogućnosti za porast nivoa pouzdanosti. Takođe, kod mašina spojenih zavrtnjevima pojave necentriranosti se manifestuju većim pregrevanjima, koja su automatizovanim dijagnostičkim kontrolama lako detektuju u početnoj fazi. To je stvorilo mogućnosti da se pravovremenim otklanjanjem ovih necentriranosti spreče mnogi otkazi i havarije¹⁷⁵ [91].

Može se uočiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti mašina u drvnjoj industriji, a najmanje aparata elektroenergetskih postrojenja, što je bilo i za očekivati jer mašine u drvnjoj industriji imaju niži nivo pouzdanosti zbog otežanih radnih uslova tako da kod njih postoje veće mogućnosti za povećanje nivoa pouzdanosti.

U tabeli 6.2. su prikazani rezultati proračuna pokazatelja pouzdanosti pojedinih komponenti tehničkih sistema u različitim granama industrije.

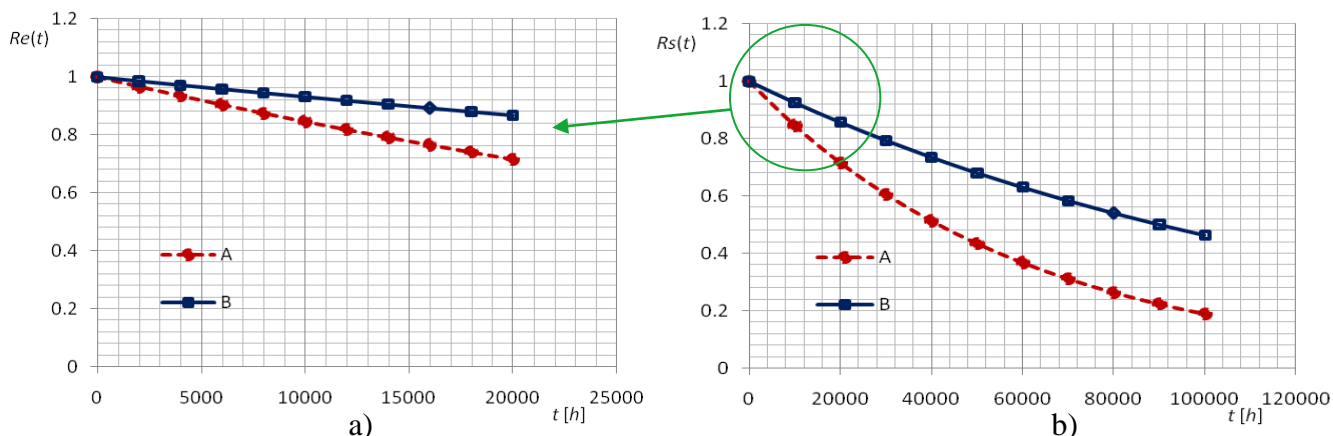
Tabela 6.2. Rezultati proračuna pokazatelja pouzdanosti pojedinih komponenti tehničkih sistema u različitim granama industrije: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model

Vrsta posmatrane komponente		Broj posmatranih komponenti N	Broj otkaza $N-n(t)$		Intenzitet otkaza $\lambda_e(t)$, $10^{-6} \times$ broj otkaza/h		Srednje vreme između otkaza $MTBF_e$, h		Pouzdanost $R_e(t)$ %	
			A	B	A	B	A	B	A	B
Mašinske komponente	Ležajevi	160	45	24	22,30	10,07	44773	99280	71,87	85,00
	Vratila	80	18	11	16,57	10,09	60346	109898	77,50	86,25
	Spojnice	70	15	9	15,56	8,42	64240	118746	78,57	87,14
Električne komponente	Kavez rotora asinhronog motora	80	6	2	4,26	1,46	216080	683280	92,50	97,50
	Namotaji statora asinhronog motora	80	7	3	5,47	2,22	182708	449680	91,25	96,25
	Priključne stezaljke	520	44	10	5,27	1,11	189534	89352	91,53	98,07

Na bazi sprovedene analize rezultata istraživanja uočeno je da su defekti priključnih stezaljki mašina (sa oko 18%) jedan od najčešći uzroka otkaza mašina u vremenskom intervalu od dve godine kada nisu

¹⁷⁵ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015.

vršene automatizovane dijagnostičke kontrole. Takođe, uočeno je da je automatizovanim dijagnostičkim kontrolama ostvaren značajan porast nivoa pouzdanosti priključnih stezaljki, za 6,54% u vremenskom intervalu od dve godine (sa 91,53% koliko je iznosio nivo pouzdanosti kada nisu, na 98,07% koliko je iznosio kada jesu vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Što se objašnjava time da se priključne stezaljke aparata nalaze u vazдушnom okruženju i da se svaki njihov defekt manifestuje pregrevanjem, koje se automatizovanim dijagnostičkim kontrolama lako otkriva u početnoj fazi. Na slici 6.7. su prikazani dijagrami promene pouzdanosti priključnih stezaljki mašina: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina¹⁷⁶ [89].



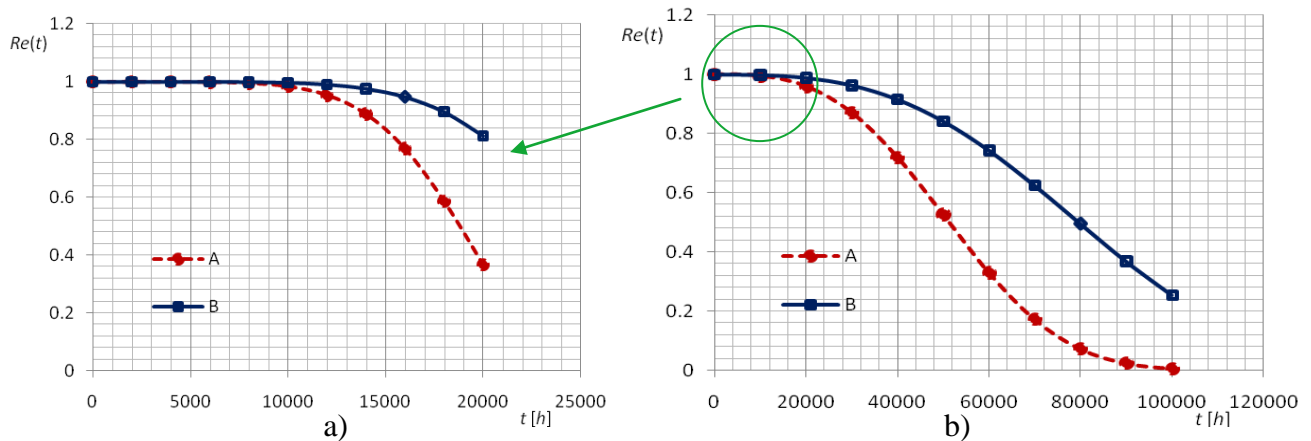
Slika 6.7. Dijagrami promene pouzdanosti priključnih stezaljki: a) A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina [89]

Takođe na osnovu analize rezultata istraživanja uočeno je da su defekti ležajeva (sa oko 32%) najčešći uzroci otkaza mašina u vremenskom intervalu od dve godine kada nisu vršene automatizovane dijagnostičke kontrole. Takođe, uočeno je da je automatizovanim dijagnostičkim kontrolama ostvaren značajan porast nivoa pouzdanosti ležajeva, za 13,13% u vremenskom intervalu od dve godine (sa 71,87% koliko je iznosio nivo pouzdanosti kada nisu, na 85,00% koliko je iznosio kada jesu vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Što se objašnjava time da se njihovi defekti manifestuju pregrevanjem i porastom nivoa vibracija što se automatizovanim dijagnostičkim kontrolama lako detektuje u početnoj fazi. Na slici 6.8. su prikazani dijagrami promene pouzdanosti ležajeva: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina¹⁷⁷ [101].

Na osnovu empirijskih podataka dobijenih od službi održavanja nacrtan je dijagram, prikazan na slici 6.9., koji pokazuje promenu intenziteta otkaza uzorka od 160 ležajeva: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model. Sa ovog dijagrama se može uočiti da je praktična primena novog modela doprinela značajnijem smanjenju intenziteta otkaza $\lambda(t)$, sa oko 22,30 na oko $10,07 \times 10^{-6}$ broj otkaza/h. Ovo se može objasniti time da je praktična primena novog automatizovanog dijagnostičkog modela omogućila pravovremenu detekciju stanja „predotkaza“, odnosno omogućila je da se potencijalni otkazi ležajeva na vreme predvide i po potrebi sprovedu servisne aktivnosti i tako izbegne pojava otkaza.

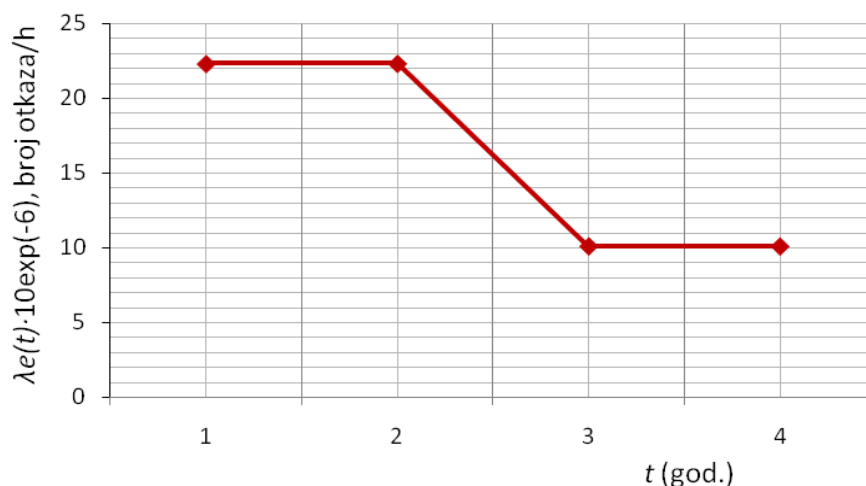
¹⁷⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetska efikasnost elektroenergetskih postrojenja, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 3, Beograd, 2014, pp. 17-26.

¹⁷⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Razvoj softvera za simulaciju porasta nivoa pouzdanosti elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.



Slika 6.8. Dijagrami promene pouzdanosti ležajeva: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, b) predikcija pouzdanosti u vremenskom intervalu od deset godina [101]

Može se uočiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti mašinskih komponenti (naročito ležajeva mašina), što je bilo i za očekivati jer mašinske komponente imaju i niži nivo pouzdanosti tako da kod njih i postoje veće mogućnosti za povećanje nivoa pouzdanosti. Ovo se naročito odnosi na ležajevu mašinu za koje je karakteristično da se mnogi drugi otkazi mašina uzrokuju oštećenja ležajeva koja se manifestuju pregrevanjem i povećanim nivoom vibracija što se lako detektuje u početnoj fazi nastanka primenom predloženog novog automatizovanog dijagnostičkog modela.



Slika 6.9. Dijagram promene intenziteta otkaza $\lambda(t)$ uzorka od 160 ležajeva: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model

Mehaničkim otkazima se smatraju otkazi ležajeva, vratila, spojnice, zupčanika, remena itd. Dok se električnim otkazima smatraju otkazi namotaja rotora i statora motora, priključnih stezaljki, elektronskih sklopova itd. Otkazi zbog mehaničkih komponenti iznose 74%, a električnih samo 26% ukupnog broja otkaza. Može se zaključiti da su češći mehanički otkazi od električnih otkaza. Pouzdane komponente i efektivne mere održavanja mogu smanjiti broj otkaza.

Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela doprinela porastu nivoa pouzdanosti $R(t)$ tehničkih sistema u različitim granama industrije, jer je omogućila da se smanji broj otkaza i produži srednje vreme između otkaza $MTBF$, pošto je omogućila da se:

- predvide moguća stanja u otkazu i da se popravke sumljivih delova provedu pre pojave otkaza i tako izbegnu ozbiljniji otkazi i havarije, i
- da se smanji broj pogrešno donesenih dijagnostičkih odluka i tako smanji broj otkaza.

Praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela omogućila je da se anticipira (predvidi) pojava otkaza i značajno skрати vreme popravke, da se dobiju realnije (kvalitetnije) informacije o stanjima sistema, ostvari brži pristup i analiza parametara od strane metoda veštačke inteligencije (eksperata) i ukaže na degradacione procese. Vremena od detekcije otkaza do potencijalnog ekspertskeg rešenja su skraćena i poboljšan je kvalitet dobijenih informacija.

Na osnovu obrađenih podataka računar je, koristeći metode veštačke inteligencije, vršio ocene stanja tehničkih sistema i donosio dijagnostičke odluke, koje su bile vrlo jasne i jednoznačne. Pored toga, te odluka su i bile pravovremene, što znači da su donošene vrlo brzo, odnosno u najkraćem mogućem roku po završetku kontrola. Na taj način su uzimane u obzir specifičnosti tehnoloških procesa, koji ne trpe suviše duga čekanja, a koja bi mogla nastati zbog sporosti u obradi i analizi rezultata merenja i donošenju odluka o daljim aktivnostima održavanja¹⁷⁸ [173].

Problemi koji su zaista postojali identifikovani su brzo dajući dovoljno vremena za popravku, pre nego što bi se otkaz dogodio. U većini slučajeva otkaz se pronalazio dosta ranije, nego što je postao kritičan. U zavisnosti od vrednosti dijagnostičkih parametara i važnosti komponente, donosila se odluka, da li treba popravku raditi odmah, popravljati kada se ukaže prilika, ili ih pratiti neprekidno, sve dok se ne dostigne neka kritična vrednost dijagnostičkih parametara, ili dok popravka ne bude neophodna.

Na ovaj način se došlo do jednog od ključnih rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije, koji su pokazali da praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema doprinosi značajnijem smanjenju broja otkaza i produženju srednjeg vremena između otkaza *MTBF*, a time i značajnijem porastu nivoa pouzdanosti tehničkih sistema u koje su ugrađene te komponente što im je omogućilo da efikasnije obavljaju funkciju za koju su namenjeni. Čime je dokazana tačnost prve pomoćne (radne) hipoteza.

6.1.2 Dokazivanje tačnosti druge pomoćne hipoteze

U ovom delu je izvršeno dokazivanje tačnosti druge pomoćne (radne) hipoteze doktorske disertacije, koja glasi:

„Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi produženju srednjeg vremena između održavanja *MTBM* i skraćanju srednjeg vremena u zastoju *MDT*, a time i porastu nivoa raspoloživosti tih sistema“.

Da bi se dokazala tačnost ove hipoteze statistički empirijski podaci dobijeni od službi održavanja o aktivnostima održavanja na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema u različitim granama industrije uneseni su u tabelu 6.3. na osnovu kojih je primenom razvijenog sopstvenog modela izvršen proračun operativnih raspoloživosti pojedinih tehničkih sistema: A- u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijen novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijen novi model¹⁷⁹ [176]. Posmatrani su tehnički sistemi, koji su približno istih karakteristika i koji rade u približno istim uslovima.

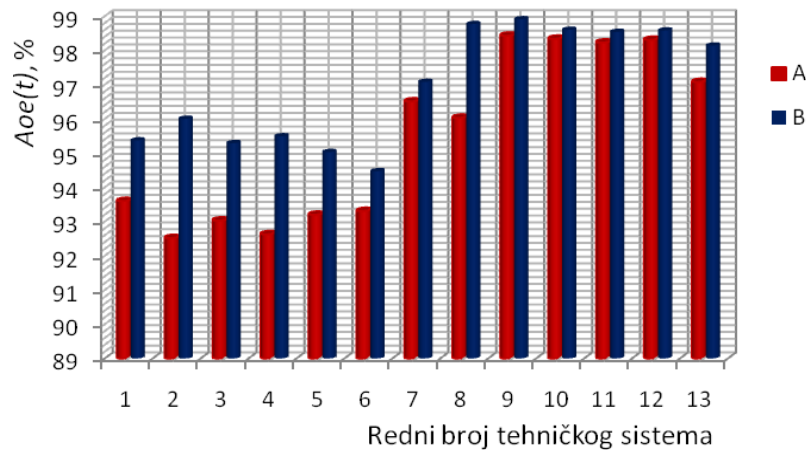
¹⁷⁸ Savic, B., Adamovic Z., Ilic, B., Grujic, G., Analysis of influence thermographic diagnostic controls in increasing the reliability of computer systems, Proceedings/ International 22th Telecommunications forum TELFOR, Belgrade, Serbia, November 25-27, 2014, pp. 1075-1078.

¹⁷⁹ Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress “Engineering, Environment and Materials in Processing Industry“, Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015.

Tabela 6.3. Podaci o aktivnostima održavanja: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model na osnovu kojih su izračunate operativne raspoloživosti tehničkih sistema

Posmatrani tehnički sistem	Broj posmatranih tehničkih sistema	Broj korektivnih aktivnosti održavanja		Broj preventivnih aktivnosti održavanja		Srednje vreme između održavanja $MTBMe$, h		Srednje vreme u zastoju $MDTe$, h		Operativna raspoloživost $Aoe(t)$, %	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Mašine u drvenoj industriji	1. CNC Tiplerice	5	4	3	4	16399	16710	1121	810	93,60	95,37
	2. Kanterice	6	3	2	7	16210	16820	1310	700	92,52	96,00
	3. Prese za furniranje	5	4	3	4	16299	16695	1221	825	93,03	95,29
	4. Automatske bušilice	6	4	3	5	16229	16730	1291	790	92,63	95,49
Mašine u hemijskoj i metalurškoj industriji	5. CNC mašine za kompjutersko rezbarenje i graviranje	7	5	4	6	16329	16650	1191	870	93,20	95,03
	6. CNC Glodalice	7	5	4	6	16349	16595	1171	925	93,31	94,47
	7. Mašine spojene gumenim spojnica	19	11	10	18	16910	17010	610	510	96,51	97,08
Aparati elektroenergetskih postrojenja	8. Mašine spojene zavrtanjima	26	13	12	24	16825	17040	695	480	96,03	98,77
	9. Energetski transformatori	5	4	3	4	17245	17330	275	190	98,43	98,91
	10. Naponski merni transformatori	15	12	11	13	17230	17275	290	245	98,34	98,60
	11. Prekidači	17	11	10	15	17210	17265	310	255	98,23	98,54
	12. Strujni merni transformatori	16	10	9	14	17225	17272	295	248	98,31	98,58
	13. Rastavljači	28	17	16	22	17031	17195	489	325	97,08	98,14

Na osnovu rezultata proračuna nacrtan je dijagram, prikazan na slici 6.10., koji pokazuje promene operativnih raspoloživosti pojedinih tehničkih sistema: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada kada nije primenjivan novi model.



Slika 6.10. Dijagrami promene operativnih raspoloživosti pojedinih tehničkih sistema: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model

Nakon analize i obrade podataka o aktivnostima održavanja kada su tehnički sistemi kontrolisani primenom novog modela i kada nisu, dobijeni su rezultati koji pokazuju da je kod svih tehničkih sistema kada su kontrolisane primenom razvijenog novog modela porastao nivo operativne raspoloživosti. Ovo se može objasniti time da je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za dijagnostičke kontrole vitalnih komponenti tehničkih sistema doprinele da se produži srednje vreme između održavanja *MTBM* i skрати srednje vreme u zastoju *MDT*¹⁸⁰ [27].

Automatizovanim dijagnostičkim kontrolama ostvaren je neznatan porast nivoa raspoloživosti energetskih transformatora u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model, za oko 0,48% (sa 98,43% koliko je iznosio nivo raspoloživosti kada nisu vršene, na 98,91% koliko je je iznosio kada su vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Posmatrano u procentima, ovaj porast nivoa operativne raspoloživosti nije značajan, međutim značajno je to da je skraćeno srednje vreme u zastoju *MDT* za 85 h (sa 275 na 190 h).

Takođe, može se uočiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa raspoloživosti rastavljača u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model, od svih aparata elektroenergetskih postrojenja koji su obuhvaćeni istraživanjem, za 1,06% (sa 97,08% koliko je iznosio nivo raspoloživosti kada nisu vršene, na 98,14% koliko je je iznosio kada su vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Što je i razumljivo, jer su to aparati sa nešto nižim nivom raspoloživosti, tako da kod njih postoje veće mogućnosti za porast nivoa raspoloživosti.

U tabeli 6.4. su navedeni podaci o aktivnostima održavanja pojedinih komponenti tehničkih sistema u različitim granama industrije: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model na osnovu kojih su izračunate operativne raspoloživosti pojedinih komponenti tehničkih sistema.

¹⁸⁰ Adamović, Ž., Ilić, B., Primena dijagnostičkih ispitivanja u cilju povišenja nivoa pouzdanosti i unapređenja energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji, Energetske tehnologije, Vol., No 1-2, Zrenjanin, 2014.

Tabela 6.4. Podaci o aktivnostima održavanja: A - u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model i B - u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan novi model na osnovu kojih su izračunate operativne raspoloživosti pojedinih komponenti tehničkih sistema

Posmatrane komponente	Broj posmatranih komponenti	Broj korektivnih aktivnosti održavanja		Broj preventivnih aktivnosti održavanja		Srednje vreme između održavanja $MTBMe$, h		Srednje vreme u zastoju $MDTe$, h		Operativna raspoloživost $Aoe(t)$, %	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Mehaničke komponente	Ležajevi	45	24	21	42	16070	16600	1450	920	91,72	94,74
	Vratila	18	11	9	16	16210	16570	1310	950	92,52	94,57
	Sojnice	15	9	7	13	16240	16555	1280	956	92,69	94,49
Električne komponente	Kavez rotora asinhronog motora	6	2	3	5	17070	17210	450	310	97,43	98,23
	Namotaji statora asinhronog motora	7	3	2	6	17085	17215	435	305	97,51	98,25
	Priključne stezaljke	44	10	8	40	17140	17230	380	290	97,83	98,34

Na bazi sprovedene analize rezultata istraživanja uočeno je da je automatizovanim dijagnostičkim kontrolama ostvaren značajan porast nivoa raspoloživosti ležajeva, za 3,02% u vremenskom intervalu od dve godine (sa 91,72% koliko je iznosio nivo raspoloživosti kada nisu, na 94,74% koliko je je iznosio kada jesu vršene automatizovane dijagnostičke kontrole). Što se objašnjava time da mnogi otkazi mašina dovode oštećenja njihovih ležajeva koja se manifestuje pregrevanjem i povećanim nivoom vibracija, koje se automatizovanim dijagnostičkim kontrolama lako otkrivaju u početnoj fazi nastanka.

Dobijeni rezultati o raspoloživosti mašina mogu predstavljati dobru osnovu za donošenje odluka o revitalizaciji, rekonstrukciji ili zameni njihovih delova, ali i smernice za buduća projektovanja tehničkih sistema. Tehnički sistemi u praksi ostvaruju raspoloživost iznad 85%.

Na osnovu dobijeni rezultata istraživanja može se zaključiti da je praktična primena novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industrijskim pogonima doprinela porastu nivoa operativne raspoloživosti $A_o(t)$ tehničkih sistema, jer je omogućila:

- produženje srednjeg vremena između održavanja *MTBM*, time što je produženo vreme u kome tehnički sistem radi dobro i istovremeno eliminisani nepotrebni zastoji (popravke), pošto je ostvareno da se popravke izvode samo ona kada je to zaista neophodno.
- skraćanje srednjeg vremena u zastoju:

$$\overline{t_z} = MDT = \overline{t_{ko}} + \overline{t_{po}} = \overline{t_{ako}} + \overline{t_{adko}} + \overline{t_{loko}} + \overline{t_{apo}} + \overline{t_{adpo}} + \overline{t_{lopo}}, \text{ time što je:}$$

- skraćeno srednje vreme korektivnog održavanja $\overline{t_{ko}}$, pošto je ostvarena detekcija otkaza u početnoj fazi nastanka, čime su stvoreni uslovi da se:
 - preduzimanjem pravovremenih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije (da se izabere najpovoljniji trenutak za popravku ili zamenu delova tehničkih sistema i da se popravke sumljivih delova izvode pre nego što dođe do otkaza),
 - pripremi proizvodni proces za planirani zastoj,
 - planiraju druge popravke za vreme planiranog zastoja,
 - planira i pripremi potrebna radna snaga za provođenje aktivnosti održavanja,
 - pravovremeno obezbede (nabave) rezervni delovi itd.
- skraćeno srednje vreme klasičnog preventivnog održavanja $\overline{t_{po}}$, pošto su aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja (popravke) preduzimane (izvođene) samo onda kada je to zaista bilo neophodno na osnovu stvarnog stanja tehničkih sistema, čime je ostvareno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja.

Na ovaj način se došlo do jednog od ključnih rezultata istraživanja sprovedenih tokom izrade ove disertacije koji pokazuju da je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinela produženju srednjeg vremena između održavanja tehničkih sistema *MTBM* i skraćanju srednjeg vremena u zastoju *MDT*, a time i porastu nivoa operativne raspoloživosti tih sistema što im je omogućilo da efikasnije obavljaju funkciju za koju su namenjeni. Čime je dokazana tačnost druge pomoćne (radne) hipoteza.

6.1.3 Dokazivanje tačnosti treće pomoćne hipoteze

U ovom delu izvršeno je dokazivanje ispravnosti treće pomoćne (radne) hipoteze, koja glasi:

„Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju troškova održavanja (smanjenju troškova za radnu snagu (smanjenju broja i obima aktivnosti korektivnog i preventivnog održavanja), smanjenju troškova uzrokovanih zastojima proizvodnog procesa, smanjenju potrošnje rezervnih delova i maziva itd.), a time i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća, čime se obezbeđuje ekonomska opravdanost investiranja u praktičnu primenu ovog modela“.

Da bi se dokazala tačnost ove hipoteza prvo su izračunati ukupni troškovi investiranja u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela, a zatim je izračunata godišnja neto ušteda B_g od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja (direktnih i indirektnih).

6.1.3.1 Ukupni troškovi investiranja u praktičnu primenu novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Ukupni troškovi investiranja I_o (ukupna finansijska sredstva koja je potrebno uložiti) u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema obuhvataju¹⁸¹ [106]:

- troškove nabavke dijagnostičke opreme (hardverskih konfiguracija računara, termografske kamere, senzora, kablova, softvera za obradu podataka i donošenje dijagnostičkih odluku i sl.), kao što je navedeno u tabeli 6.5.
- troškove ugradnje dijagnostičke opreme i puštanja u rad novog modela, kao što je navedeno u tabeli 6.6.
- troškove edukacije dijagnostičara koji će raditi sa novim modelom i nabavke literature, kao što je navedeno u tabeli 6.7.

Tabela 6.5. Troškovi nabavke dijagnostičke opreme

Vrsta troška	Iznos troška, €
Nabavka hardverskih konfiguracija računara	7.000
Nabavka DAQ utičnih kartica	300
Nabavka multipleksera	200
Nabavka strujnih mernih transformatora	400
Nabavka koaksijalnih kablova	2.000
Nabavka optičkih kablova	3.100
Nabavka termografske kamere sa softverom za obradu termografskih slika - ThermaCAM Researcher	9.000
Nabavka OneproDVX merno akvizicionih sistema sa odgovarajućm softverskom podrškom za donošenje dijagnostičkih odluka metodom analize frekvencijskog spektra vibracija	6.000
Nabavka softvera (programskog paketa Motormonitor) za obradu podataka i donošenje dijagnostičkih odluka metodom analize frekvencijskog spektra struje	4.500
Nabavka senzora vibracija	2.500
Troškovi nabavke dijagnostičke opreme	35.000

Tabela 6.6. Troškovi ugradnje dijagnostičke opreme i puštanja u rad novog modela

Vrsta troška	Iznos troška, €
Ugradnja dijagnostičke opreme i instaliranje softvera	4.500
Puštanje u rad novog modela	1.500
Troškovi ugradnje dijagnostičke opreme i puštanja u rad novog modela	6.000

¹⁸¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 40-46.

Tabela 6.7. Troškovi edukacije dijagnostičara koji će raditi sa novim modelom i nabavke literature

Vrsta troška	Iznos troška, €
Edukacija dijagnostičara za dijagnostičke kontrole metodom termografije, metodom analize frekvencijskog spektra vibracija i metodom analize frekvencijskog spektra struje statora	2.500
Edukacija dijagnostičara za opštu dijagnostiku	1.000
Edukacija dijagnostičara za korišćenje i održavanje savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija ugrađenih u novi automatizovani dijagnostički model	1.000
Nabavka literature	500
Troškovi edukacije dijagnostičara koji će raditi sa novim modelom i nabavke literature	5.000

U tabeli 6.8. su prikazani ukupni troškovi investiranja u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog modela

Tabela 6.8. Ukupni troškovi investiranja u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog modela

Vrsta troška	Iznos troška, €
Nabavka dijagnostičke opreme	35.000
Ugradnja dijagnostičke opreme i puštanje u rad novog modela	6.000
Edukacija dijagnostičara koji će raditi sa novim modelom i nabavka literature	5.000
Ukupni troškovi investiranja I_o u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog modela	46.000

6.1.3.2 Godišnja neto ušteda od praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja

Godišnja neto ušteda (prihod) B_g od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela se ostvaruje kroz smanjenje godišnjih troškova održavanja (direktnih i indirektnih) i izražava se u €/god.

U direktne troškove održavanja spadaju svi troškovi koji su direktno povezani sa fizičkim izvršenjem radova održavanja, kao što su: troškovi ljudskog rada utrošenog na održavanje, troškovi trošenja alata i troškovi za upotrebene materijale, kao što su rezervni delovi, maziva, materijali za čišćenje, brušenje, konzerviranje, zatim troškovi dopune raznih ispražnjenih ili zbog radova izgubljenih medija i sl. Znači, u direktne troškove spadaju: troškovi rada, alata, rezervnih delova, maziva i sl.¹⁸² [111].

U indirektno troškove održavanja spadaju svi troškovi uzrokovani zastojima u proizvodnom procesu zbog nekog otkaza ili neke planirane aktivnosti na održavanju. Ovi zastoji mogu dovesti do smanjenja prodaje, smanjenja kvaliteta proizvoda, gubitaka tržišta itd. Da bi se neki zastoj mogao smatrati uzrokom indirektnih troškova održavanja, potrebno je da bude posledica procesa održavanja [1].

Praktična primena razvijenog novog modela doprinela je smanjenju godišnjih troškova održavanja, jer je omogućila:

1. Smanjenje godišnjih troškova za radnu snagu, time što je:
 - a) smanjen godišnji broj i obim aktivnosti korektivnog održavanja, pošto je ostvareno smanjenje broja otkaza (popravke sumljivih delova izvođene su pre nego što bi se dogodio otkaz i smanjen je broj pogrešno donesenih dijagnostički odluka),

¹⁸² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, Stanković, N., Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

- b) smanjen godišnji broj i obim aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja (remonta), pošto je ostvareno da se aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja preduzimaju samo onda kada je to zaista bilo neophodno na osnovu stvarnog stanja tehničkih sistema, jer je omogućeno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja.
2. Smanjenje godišnje potrošnje rezervnih delova i maziva, time što se dobijao bolji uvid u stvarno stanje delova tehničkih sistema i maziva, što je omogućilo da se zamenjuju tek onda kada su bili potpuno istrošeni.
3. Smanjenje godišnjih troškova uzrokovanih zastojeima proizvodnog procesa, time što je skraćeno srednje vreme u zastoju mašina *MDT*.

1. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova za radnu snagu

Manji broj i obim aktivnosti korektivnog i klasičnog preventivnog održavanja tehničkih sistema, dovodi do smanjenja broja radnih sati potrebnih za aktivnosti korektivnog i klasičnog preventivnog održavanja, a time i do smanjenja broja zaposlenih na održavanju i troškova za radnu snagu.

a) Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova za radnu snagu zbog smanjenja broja i obima aktivnosti korektivnog održavanja

Ključna prednost praktične primene novog modela je u tome što je doprinela da se otkazi detektuju u početnoj fazi nastanka, čime su stvoreni uslovi da se preduzimanjem pravovremenih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu.

Vremenski trend razvoja otkaza kod sistema se može pažljivo pratiti i na osnovu toga planirati održavanje, a u skladu sa planskim zastojeima. Troškovi popravke tehničkog sistema koji je otkazao tokom rada mogu biti čak i do deset puta veći nego troškovi predviđene, planske popravke istog tehničkog sistema¹⁸³ [109]. Takođe, praktična primena razvijenog novog modela doprinela je smanjenju broja pogrešno donesenih dijagnostičkih odluka. Na taj način je smanjen broj otkaza, a time i broj i obim aktivnosti korektivnog održavanja.

U vremenskom intevalu od dve godine kada nije primenjivan novi model često je dolazilo do otkaza ležajeva mašina jedina mera koja je predlagana bila je hitna zamena ležajeva, a da pri tome nije identifikovan stvarni uzrok otkaza. Nakon zamene kotrljajnih ležajeva nivo vibracija je bio znatno manji u odnosu na prethodno stanje. Međutim, čak i kada su ležajevi bili ispravno montirani na vratilo, ponavljala se ista situacije za svega nekoliko meseci. Dijagnostičkim kontrolama su opet identifikovana oštećenja ležajeva i predlogana njihova zamena. Smena ovih radnji (identifikovanje oštećenja ležajeva i njihova zamena) su trajali sve dok nije identifikovan stvarni uzrok koji dovodio do dinamičkih opterećenja ležajeva daleko većih od projektovanih, usled čega je dolazilo do njihovih prevremenih otkaza. Ovakav pristup i čini jednu od osnovnih razlika između klasičnog održavanja prema stanju i proaktivnog održavanja.

Pored toga dešavalo se da dijagnostičkim kontrolama nisu identifikovani svi uzroci otkaza mašina, često se, na primer, dešavalo da su dijagnostičari identifikovali samo jedan uzrok pogoršanja stanja mašine Kanterice u drvnoj industriji npr. debalans rotacionih masa (kao isključivi uzrok problema na kontrolisanoj mašini), a da pri tome nisu identifikovali i drugi uzrok pogošanja stanja mašine, npr. nesaosnost. U takvim situacijama angažovana je ekipa za dinamičko uravnotežavanje u sopstvenim osloncima, nivo vibracija najčešće nije snižavani zbog toga što je prethodno neophodno otkloniti nesaosnost. Čak i da kada je ekipa zadužena za balansiranje, posle nekoliko pokušaja balansiranja, konstatovala prisutnu nesaosnost, tada se morala angažovati ekipa za dovođenje uparenih vratila u osu. Osim, dužeg od planiranog i prijavljenog, vremena potrebnog za izvršenje korektivnih aktivnosti, troškovi održavanja osim zbog zaustavljanja pogona rasli su i zbog troškova angažovanja ekipe za otklanjanje nesaosnosti.

¹⁸³ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji automatizovanom dijagnostikom, Zbornik radova/I Naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 25.10.2013.

Tako je u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan novi model zabeleženo ukupno 58 aktivnosti korektivnog održavanja, od toga u 18 slučajeva što su pogrešno donesene dijagnostičke odluke o stanjima mašina, jer nisu identifikovani stvarni uzroci otkaza. Dok je u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model došlo do znatnog smanjenja broja aktivnosti korektivnog održavanja na 39, kao i broja ležajeva koji su zamenjeni, jer nisu donošene pogrešne dijagnostičke odluke, pošto su identifikovani stvarni uzroci otkaza mašina (bilo da su električne bilo da su mehaničke prirode), koji su doveli do čestih otkaza ležajeva na pojedinim mašinama.

Pored navedenog ostvarene su i uštede značajnijim smanjenjem troškova angažovanja usluga spoljašnjih servisa, eksperata/servisera za dijagnostiku.

b) Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova za radnu snagu zbog smanjenja broja i obima aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja

Praktična primena razvijenog novog modela omogućila je da se identifikuje i popravljaju samo ono što treba da se popravlja (što zahteva popravku) pošto se dobijao bolji uvid u stvarno stanje tehničkih sistema, a da se ne popravljaju ispravne komponente, jer je omogućeno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja tehničkih sistema. Na taj način je produženo srednje vreme između održavanja tehničkih sistema *MTBM* i skraćeno srednje vreme u zastoju *MDT* potrebno za popravku, jer su eliminisani nepotrebni zastoji.

Praktična primena razvijenog novog modela doprinela je da su se, u zavisnosti od rezultata sprovedenih automatizovanih dijagnostičkih kontrola, u potpunosti mogle eliminisati ili odložiti pojedine ili sve aktivnosti koje su bile sprovedene u okviru klasičnog preventivnog održavanja, čime su značajno smanjeni troškovi održavanja.

Na primer, u periodu od dve godine kada nije primenjivan novi model sprovedene su aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja (remonti) na 160 ležajeva mašina iste vrste i namene. Ove aktivnosti su vršene prema unapred utvrđenim vremenskim intervalima, bez obzira da li jeste ili nije bilo potrebe za njima, što je zahtevalo veliki broj radnih sati za angažovane radnike, dugo vreme zastoja i troškove rezervnih delova, ulja, maziva, alata i sl.¹⁸⁴ [103]

Dok su u periodu od dve godine kada je primenjivan novi model aktivnosti održavanja sprovedene samo na onim ležajevima mašinama za koje su rezultati automatizovanih dijagnostičkih kontrola pokazali da je potrebno, dok na ostalim ležajevima nisu sprovedene aktivnosti održavanja. Na taj način se prešlo sa klasičnog preventivnog održavanja, sa fiksiranim vremenskim intervalima provođenja aktivnosti održavanja, na održavanje prema stanju, koje je bazirano na stvarnom stanju tehničkih sistema [109].

Ovakav način održavanja, očito, traje znatno kraće, zahteva angažovanje manjeg broja radnika, jeftiniji je i njime se znatno produžava srednje vreme između održavanja *MTBM*. Kod njega nema potrebe za rastavljanjem, reizgradnjom, ili reparacijom komponenti, koje su i dalje ispravne. Ovaj tip popravki nije bez značaja i cene i može dovesti do smanjenja proizvodnje i do 30%. Čak se ne može ni garantovati da će komponenta bolje raditi posle popravke, pošto uzrok otkaza nije utvrđen¹⁸⁵ [112].

Uzimajući u obzir da troškovi rada zaposlenih na održavanju mašina iznose 10 €/h, mogu se izračunati godišnji troškovi održavanja kada nije i kada jeste primenjivan razvijeni novi model, kao što je prikazano u tabeli 6.9.

Na osnovu rezultata istraživanja prikazanih u tabeli 6.9. može se uočiti da je praktična primena novog modela doprinela smanjenju broja radnih sati potrošenih na aktivnosti korektivnog i preventivnog održavanja, a time i smanjenju godišnjih troškova za radnu snagu za 13.000 €.

¹⁸⁴ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja mašina u procesnoj industriji, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

¹⁸⁵ Ilić, B., Petrov, T., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 11-16.

Tabela 6.9. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova za radnu snagu

Način ostvarene uštede	Godišnji troškovi kada nije primenjivan novi model, €	Godišnji troškovi kada je primenjivan novi model, €	Godišnje uštede, €
Smanjenjem broja i obima aktivnosti korektivnog održavanja	23.000	15.000	8.0000
Smanjenjem broja i obima aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja	19.000	14.000	5.0000
Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova za radnu snagu			13.000

2. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem potrošnje rezervnih delova i maziva

Praktična primena novog automatizovanog dijagnostičkog modela doprinela je smanjenju potrošnje rezervnih delova i maziva čak za 55%, jer se dobijao bolji uvid u stvarno stanje delova tehničkih sistema i maziva, što je omogućilo da se zamenjuju tek onda kada su bili 100% (potpuno) istrošeni, tj. kada su dali svoj maksimum.

Sledeći primer zamene kotrljajnih ležajeva, ilustruje prednosti primene održavanja prema stanju baziranog na automatizovanim dijagnostičkim kontrolama, u odnosu na klasično preventivno održavanje. Kotrljajni ležajevi imaju predviđeni radni vek te se, prema pravilima klasičnog preventivnog održavanja, njihova zamena planira pre isteka tog vremena. Međutim, većina ležajeva traje mnogo duže nego što je propisano, te ako bi se izvršila njihova zamena prema predviđenom radnom veku, mnogi ležajevi bi se zamenili nepotrebno ranije, čime bi se značajno povećavali troškovi održavanja. Sprovedeno istraživanje, koje se odnosilo na zamenu ležajeva prema koncepciji klasičnog preventivnog održavanja, pokazalo je da je samo 25% zamenjenih ležajeva bilo u fazi oštećenja koja su mogla izazvati katastrofalne posledice. Dakle, 75% ležajeva je nepotrebno zamenjeno [94].

Pored toga neki ležajevi traju kraće, nego što je propisano zbog teških radnih uslova, jer radni vek ležajeva zavisi od radnih uslova i ispravnosti montaže (ležaj će značajno kraće trajati, ako je pogrešno montiran)¹⁸⁶ [94].

Pored navedenog izbegavaju se učestale zamene delova mašina, zbog toga što je smanjen broj pogrešno donesenih dijagnostičkih odluka, jer je ostvarena identifikacija uzroka otkaza mašina, bilo da su električne, bilo da su mehaničke prirode¹⁸⁷ [105]. Ako se ne primenjuju adekvatne dijagnostičke kontrole onda se otkazi ležajeva ne mogu detektovati na vreme, pa može doći i do oštećenja osovine, tako da se pored ležajeva mora zameniti i osovina. Praktičnom primenom razvijenog sopstvenog automatizovanog dijagnostičkog modela otkazi ležajeva mašina su detektovani u ranoj fazi nastanka i samo su oni zamenjivani. U tabeli 6.10. su navedene godišnje uštede ostvarene smanjenjem potrošnje rezervnih delova i maziva.

Tabela 6.10. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem potrošnje rezervnih delova i maziva

Način ostvarene uštede	Godišnji troškovi kada nije primenjivan novi model, €	Godišnji troškovi kada je primenjivan novi model, €	Godišnje uštede, €
Smanjenje potrošnje rezervnih delova	19.000	12.900	6.100
Smanjenje potrošnje maziva	3.100	2.200	900
Godišnje uštede ostvarene smanjenjem potrošnje rezervnih delova i maziva			7.000

¹⁸⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

¹⁸⁷ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena metoda veštačke inteligencije u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

3. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova uzrokovanih zastojsima proizvodnog procesa

Praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela doprinela je smanjenju troškova uzrokovanih zastojsima proizvodnog procesa, jer je omogućila skraćenje srednjeg vremena u zastoju MDT , time što je:

- skraćeno srednje vreme korektivnog održavanja $\overline{t_{ko}}$, pošto je ostvarena detekcija otkaza u početnoj fazi nastanka, čime su stvoreni uslovi da se:
 - preduzimanjem pravovremenih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije (da se izabere najpovoljniji trenutak za popravku ili zamenu delova mašina i da se popravke sumljivih delova izvode pre nego što dođe do otkaza),
 - pripremi proizvodni proces za planirani zastoj,
 - planiraju druge popravke za vreme planiranog zastoja,
 - planira i pripremi potrebna radna snaga za provođenje aktivnosti održavanja,
 - pravovremeno obezbede (nabave) rezervni delovi itd.
- skraćeno srednje vreme klasičnog preventivnog održavanja $\overline{t_{po}}$, pošto su aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja (popravke) preduzimate (izvođene) samo onda kada je to zaista bilo neophodno na osnovu stvarnog stanja tehničkih sistema, jer je ostvareno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja.

U tabeli 6.11. su navedene godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova uzrokovanih zastojsima proizvodnog procesa.

Tabela 6.11. Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova uzrokovanih zastojsima proizvodnog procesa

Način ostvarene uštede	Troškovi kada nije primenjivan novi model, €	Toškovi kada je primenjivan novi model, €	Godišnje uštede, €
Smanjenje troškova uzrokovanih zastojsima zbog aktivnosti korektivnog održavanja	48.000	30.000	18.000
Smanjenje troškova uzrokovanih zastojsima zbog aktivnosti klasičnog preventivnog održavanja	32.000	20.000	12.000
Godišnje uštede ostvarene smanjenjem troškova uzrokovanih zastojsima proizvodnog procesa			30.000

4. Izračunavanje godišnje neto uštede od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela kroz smanjenje troškova održavanja

Godišnja ušteda B_o od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja (direktnih i indirektnih), dobija se tako što se od godišnjih troškova održavanja kada nije primenjivan novi automatizovani dijagnostički model oduzmu godišnji troškovi održavanja kada je primenjivan taj model, kao što je prikazano u tabeli 6.12 [112].

Godišnji troškovi održavanja kada nije primenjivan novi automatizovani dijagnostički model iznose 144.100 €, dok godišnji troškovi održavanja kada je primenjivan novi automatizovani dijagnostički model iznose 94.100 €. Što znači da su praktičnom primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela godišnji troškovi održavanja smanjeni za 34,8%, odnosno ostvarena je godišnja ušteda B_o od 50.000 €.

Tabela 6.12. Godišnja ušteda B_o od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja

Način ostvarene uštede	Godišnji troškovi održavanja kada nije primenjivan novi model, €	Godišnji troškovi održavanja kada je primenjivan novi model, €	Godišnje uštede, €
Smanjenje troškova za radnu snagu	42.000	29.000	13.000
Smanjenje potrošnje rezervnih delova i maziva	22.100	15.100	7.000
Smanjenje troškova uzrokovanih zastojima proizvodnog procesa	80.000	50.000	30.000
Godišnja ušteda od realizacije projekta (praktične primene) novog modela automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja B_o			50.000

Godišnji troškovi održavanja kada nije primenjivan novi automatizovani dijagnostički model iznose 144.100 €, dok godišnji troškovi održavanja kada je primenjivan novi automatizovani dijagnostički model iznose 94.100 €. Što znači da su praktičnom primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela godišnji troškovi održavanja smanjeni za 34,8%, odnosno ostvarena je godišnja ušteda B_o od 50.000 €.

Pošto realizacijom projekta nastaju godišnji dodatni troškovi ΔOM (godišnji troškovi održavanja modela i potrošnje električne energije potrebne za rad modela) koji nisu zanemarljivi, to se i oni moraju uzeti u obzir kako bi se dobila godišnja neto ušteda B_g , kao što je prikazano u tabeli 6.13.

Tabela 6.13. Godišnji dodatni troškovi ΔOM (godišnji troškovi održavanja modela i potrošnje električne energije potrebne za rad modela)

Vrsta troška	Iznos troška, €
Održavanje novog modela u toku njegove eksploatacije	1.200
Potrošnja električne energije potrebne za rad novog modela	800
Godišnji troškovi održavanja i potrošnje električne energije potrebne za rad modela ΔOM	2.000

Godišnja neto ušteda (prihod) B_g od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja, dobija se tako što se od godišnjih ušteda B_o oduzmu godišnji dodatni troškovi ΔOM :

$$B_g = B_o - \Delta OM = 50.000 - 2.000 = 48.000 \text{ €/god} \quad (6.1)$$

Znači, godišnja neto ušteda B_g od realizacije projekta (praktične primene) ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja iznosi 48.000 €/god.

6.1.3.3 Provera ekonomske opravdanosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Provera ekonomske opravdanosti realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela, podrazumeva izračunavanje perioda povratka ukupnih troškova investiranja I_o u taj projekat [112].

Iz tabele 6.8. se vidi da ukupni troškovi investiranja I_o (ukupna investiciona ulaganja) u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćene stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema iznose 46.000 €, a iz jednačine (6.1) se vidi da godišnja neto ušteda preduzeća B_g od realizacije projekta (praktične primene) novog automatizovanog dijagnostičkog modela ostvarena kroz smanjenje troškova održavanja iznosi 48.000 €/god.

Period otplate (povratka) investicije PB (Payback) u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela se može izračunati ako se ukupni troškovi investiranja I_o u taj projekat podele sa godišnjom neto uštedom B_g ostvarenom realizacijom tog projekta:

$$PB = \frac{I_o}{B_g} = \frac{46.000}{48.000} = 0,958 \text{ god.} \quad (6.2)$$

Na osnovu ovog podataka može se zaključiti da će se investicija I_o u realizaciju projekta (praktičnu primenu) novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema vratiti (isplatiti) nakon skoro godinu od godišnjih neto ušteta B_g koje će se ostvariti kroz smanjenje troškova održavanja preduzeća. Čime je dokazana (potvrđena) tačnost treće pomoćne hipoteze disertacije.

Pored navedenih ušteta, znatno veće uštede se ostvaruju smanjenjem troškova koje bi uzrokovale havarije, a koje su sprečeni zahvaljujući tome da su automatizovanim dijagnostičkim kontrolama defekti otkriveni u početnoj fazi nastanka. Sprečavanjem samo jedne havarije izbegavaju se troškovi koji mogu nekoliko puta veći od troškova investiranja u razvijeni novi model.

Potrebno je napomenuti da realizacija projekta (praktična primena) razvijenog novog modela u izvesnoj meri povećava troškove održavanja samo u prvoj godini njegove primene zbog ukupnih troškova investiranja u projekat (troškova nabavke dijagnostičke opreme, troškova edukacije dijagnostičara i s.), ali se ta investiciona ulaganja vraćaju nakon skoro godinu kroz uštede koje će se ostvariti smanjenjem troškova održavanja.

Novi automatizovani dijagnostički model, na pokazanom primeru štedi vreme i novac, skraćuje vreme zastoja mašine i smanjuje broj angažovanog ljudstva. Rezultati istraživanja pokazuju da se korišćenjem ovog modela i do 75% svih mehaničkih otkaza može detektovati u početnoj fazi nastanka.

6.1.4 Dokazivanje tačnosti glavne hipoteze

Na osnovu rezultata istraživanja, koji su potvrdili tačnost pomoćnih (radnih) hipoteza, dokazana je i tačnost glavne hipoteza istraživanja, koja glasi:

„Automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji, bazirana na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća“.

6.2 Poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima sličnih istraživanja

Kvantifikacije uticaja automatizovane dijagnostike složenih tehničkih sistema na porast nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao i na smanjenje ukupnih troškova i ekonomičnije poslovanje preduzeće, su veoma retke u praksi. U ovom delu izvršeno je poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima sličnih istraživanja.

Prvo je izvršeno poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima daljinskog održavanja linija za proizvodnju drvenih panela u jednom preduzeću u Italiji. Ovo preduzeće je 2001. godine uvelo daljinsko održavanje linija za proizvodnju drvenih panela, kao i sistem daljinskog upravljanja rezervnim delovima i stalnu obuku kadrova preko Interneta, u cilju poboljšanja efikasnosti proizvodnje. Postrojenje je radilo 16 sati dnevno (u dve smene), troškovi zbog zastoja u proizvodnji su iznosili oko 750 \$/h. Uvođenje daljinskog održavanja zahtevalo je ugradnju novih senzora radi prikupljanja potrebnih podataka o stanjima mašina, kao što su: ugaona brzina osovine, temperatura, jačina struje i vibracije. Rad na hardveru podrazumevao je ulaganja u vrednosti od 130.200 \$, dok je godišnja naknada za usluge proizvođača za savetovanje, obuku i nabavku rezervnih delova iznosila oko 9.300 \$.

Primena sistema daljinskog održavanja linije za proizvodnju drvenih panela u ovom preduzeću doprinela je značajnijem skraćivanju vremena u zastoju linija za proizvodnju drvenih panela, a time i značajnijem porastu nivoa njihove raspoloživosti, smanjenju troškova zbog smanjenja aktivnosti korektivnog održavanja, smanjenju troškova zbog zastoja proizvodnje i smanjenju troškova za rezervne delove, a time i smanjenju ukupnih troškova održavanja, kao što se vidi iz tabele 6.14. Sve ovo omogućilo je da se investicija u primenu daljinskog održavanja isplati za 3 godine.

Tabela 6.14. Uštede ostvarene primenom daljinskog održavanja linija za proizvodnju drvenih panela

Način ostvarene uštede	Ostvareni efekti, %
Smanjenje troškova zbog smanjenja aktivnosti korektivnog održavanja	67
Smanjenje troškova zbog zastoja u proizvodnji	55
Smanjenje troškova za rezervne delove	28
Smanjenje ukupnih troškova održavanja	62

Poređenjem rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima daljinskog održavanja linija za proizvodnju drvenih može se zaključiti da je u oba slučaja ostvareno značajnije smanjenje ukupnih troškova održavanja. Ovo se može objasniti time da su u pitanju tehnološke linije visoke složenosti, koje zahtevaju ekspertska znanja i koje sadrže veliki broj komponenti koje utiču na troškove održavanja tih linija, tako da kod njih postoje mogućnosti za značajnije smanjenje troškova održavanja.

U ovom delu izvršeno je poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor koja obuhvata 6 trafostanica 20/0,4 kV sa 5 daljinski upravljivih 20 kV linijskih rastavnih sklopki. Ugrađena oprema za sistem daljinskog nadzora i upravljanja omogućava isključenje rastavljača snage u beznaponskoj pauzi ciklusa rada zaštite i automatsko ponovno uključanje, što skraćuje vreme trajanja prekida u napajanju potrošača električnom energijom. Naravno, pored te lokalne automatike, projektovani sistem daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom pruža i sve ostale (standardne) prednosti u smislu poboljšanja pokazatelja kvaliteta isporučene energije, povećanja pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskog sistema, optimizacije rada mreže, povećanja energetske efikasnosti, automatizacije rada u dispečarskim poslovima i održavanju itd. Daljinske komande su korišćene i u slučaju manipulacija vezanih za planirane radove na održavanju opreme.

Primena pilot projekta sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor omogućila je bržu detekciju i otklanjanje otkaza, tako da je to vreme skraćeno za čak 30-50% u odnosu na period pre njegove primene. To je rezultat opremanja rasklopne opreme sa SDU uređajima koji su u stanju da na osnovu izmerenih struja i napona otkaza odrede lokaciju otkaza. Projektovani nivo raspoloživosti elektroenergetskih sistema je visok (iznad 99%), međutim rezultati primene ovog pilot projekta pokazuju da se daljinskim nadzorom i upravljanjem može ostvariti još viši nivo raspoloživosti. U toku probnog pogona od jula 2006. do februara 2007. godine bilo je 96,87% uspešnih daljinskih komandi (pri čemu samo 81,94% uspešnih daljinskih komandi iz prvog pokušaja), kao i više otkaza RTU-ova što se manifestovalo kao pokazatelj pouzdanosti sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor od 98,45%. Sve su to pokazatelji značajno niže vrednosti od nekih standardnih, ili pak projektovanih. Raspoloživost RTU-ova manju od 0,999 danas je teško opravdati¹⁸⁸ [37].

Poređenjem rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor može se zaključiti da su u slučaju distributivne mreže ostvareni manji porasti nivoa pouzdanosti i raspoloživosti sistema. Ovo se može objasniti time da su električne komponente u elektrodistributivnoj mreži projektovane sa inicijalno visokim nivoom pouzdanosti, tako da kod njih postoje manje mogućnosti za povećanje nivoa pouzdanosti.

Takođe, u ovom delu izvršeno je poređenje rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije sa rezultatima primene sistema za daljinsko praćenje dijagnostičkih sistema za besprekidno napajanje telekomunikacionih uređaja na 15 baznih stanica mobilne telefonije. Prosečan broj sati na mesečnom nivou prekida u napajanju baznih stanica koje su obuhvaćene istraživanjem pre primene daljinskog praćenja parametara iznosio 225,1 h, dok je u periodu primene iznosio 50,4 h. U toku

¹⁸⁸ Bajčetić, P., Mijatović, V., Cvetic, V., Simendić, Z. Analiza rada sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor, 28. Savetovanje JUKO CIGRE, Rb. 5-13, 30.9-5.10.2007, Vrnjačka Banja.

eksperimentalnog perioda (deset meseci) evidentirano je 54 odlazaka na lokacije, dok je tokom 2008. godine pre primene sistema za daljinsko praćenje vitalnih parametara SBN zabeleženo 98 intervencija. Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da je prosečno za preko 33% smanjen broj odlazaka na teren. Troškovi praktične primene se mogu vratiti nakon perioda od 3 godine kroz ostvarene uštede primenom tog modela¹⁸⁹ [195]. Dok vremenski period povratka investicionih ulaganja u razvijeni novi automatizovani dijagnostički model iznosi skoro godinu dana.

6.3 Uticaj automatizovanih dijagnostičkih modela na pouzdanost tehničkih sistema

Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole tehničkih sistema u industrijskim pogonima vrlo značajne, jer su omogućile da se dobijanjem pravovremenih i preciznih informacija o stanjima vitalnih komponenti tehničkih sistema otkazi detektuju u početnoj fazi nastanka, čime su stvoreni uslovi da se preduzimanjem pravovremenih odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu.

Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da primena automatizovanih dijagnostičkih modela u dijagnostici stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema doprinosi porastu nivoa pouzdanosti svih tehničkih sistema u koje su ugrađene te komponente. Na porast nivoa pouzdanosti složenih tehničkih sistema automatizovanim dijagnostikom utiče specifičnost pojedinih grana industrije, tip proizvodnje, kvalitet instalisane opreme (od koga je proizvođača) itd. Tehnički sistemi u industriji su zbog svoje funkcije projektovani sa visokim nivoom pouzdanosti tako da neznatno procentualno povišenje nivoa pouzdanosti sistema, u značajnoj meri doprinosi kvalitetu proizvoda i njegovoj konkurentnosti na tržištu.

Na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti mašina u drvenoj industriji, a najmanje aparata elektroenergetskih postrojenja, što je bilo i za očekivati jer mašine u drvenoj industriji imaju niži nivo pouzdanosti zbog otežanih radnih uslova tako da kod njih postoje veće mogućnosti za povećanje nivoa pouzdanosti.

Takođe na osnovu rezultata istraživanja može se zaključiti da su automatizovane dijagnostičke kontrole najviše doprinele porastu nivoa pouzdanosti mašinskih komponenti (naročito ležajeva mašina), što je bilo i za očekivati jer mašinske komponente imaju niži nivo pouzdanosti tako da kod njih i postoje veće mogućnosti za povećanje nivoa pouzdanosti. Ovo se naročito odnosi na ležajeva mašina za koje je karakteristično da mnogi drugi otkazi mašina uzrokuju oštećenja ležajeva koja se manifestuju pregrevanjem i povećanim nivoom vibracija koja se lako detektuju u početnoj fazi nastanka primenom predloženog novog automatizovanog dijagnostičkog modela.

Značaj kvalitetne i pravovremene (rane) detekcije i identifikacije otkaza u kompleksnim pogonima, koja se ostvaruje primenom automatizovane dijagnostike, je od izuzetne važnosti, jer omogućava da se preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku¹⁹⁰ [91]:

- smanji broj otkaza i poveća nivo pouzdanosti pogona;
- skрати vreme u zastoju (prekida u radu) pogona i poveća nivo raspoloživosti;
- spreče veći otkazi i havarije, a time i veliki materijalni troškovi (finansijski gubici);
- spreče dodatna oštećenja i ugrožavanje rada celokupnog pogona;
- spreče opasnosti po ljude i okolinu;

¹⁸⁹ Voskresenski, V., Daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, doktorska disertacija, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, 2011.

¹⁹⁰ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015. (rad prihvaćen za objavljivanje)

- spreče eksplozije i požari (smanji rizik da pogon postane uzročnik paljenja eksplozivne atmosfere, kada se nalazi u prostoru ugroženom eksplozivnom atmosferom);
- smanji potrošnja rezervnih delova i maziva;
- olakša nabavka rezervnih delova;
- smanje aktivnosti klasičnih preventivnih održavanja;
- smanje aktivnosti korektivnih održavanja;
- ostvari optimalnije planiranje aktivnosti održavanja;
- smanje troškovi održavanja itd.

6.4 Tačnost statističke obrade podataka

Neizbežan pratilac statističkih istraživanja su i greške koje mogu biti slučajne i sistematske. Slučajne greške nemaju poseban uticaj na kvalitet prikupljenih podataka, dok sistematske uvek utiču na kvalitet prikupljenih podataka. Kvalitet prikupljenih podataka zavisi od specifičnosti istraživanja, metoda istraživanja, uslova istraživanja, ponašanja i stavova osoblja koje prikuplja podatke i sl. Za istraživanja, koja su sprovedena tokom izrade ove disertacije, izvršena je obuka osoblja za prikupljanje podataka.

Statistički uzorak se koristi kada je nemoguće sprovesti potpuno posmatranje osnovnog skupa. To je reprezentativni deo osnovnog skupa na osnovu koga se donose zaključci o karakteristikama osnovnog skupa. Uzorak će biti reprezentativan ako je dovoljno veliki i ako je po svojoj strukturi sličan statističkom skupu. U istraživanjima sprovedenim tokom izrade ove disertacije za statistički uzorak izabrani su tehnički sistemi koji su sličnih karakteristika i koji su izloženi sličnim pogonskim uslovima.

6.5 Tačnost dijagnostičkih odluka donesenih primenom novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Dijagnostika tehničkih sistema je merno-ocenjivački postupak koji je izložen uticaju različitih smetnji, zbog čega se greške u dijagnostici tehničkih sistema ne smeju zanemariti. Greške mogu biti slučajne i sistematske, i mogu se podeliti na greške u proceni stanja tehničkog sistema i greške u prognoziranju preostalog vremena korišćenja tehničkog sistema.

Greške u dijagnostici tehničkih sistema mogu nastati zbog [3]:

- nedovoljnog broja ili pogrešno izabranih dijagnostičkih parametara,
- greški pri merenju dijagnostičkih parametara (greški mernih instrumenata, pogrešnog očitavanja, uticaja dijagnostičkih uslova itd.);
- greški pri raspoređivanju direktnih i indirektnih parametara stanja, jer između direktnih i indirektnih parametara po pravilu postoji samo jedna statistička veza, tako nastaje jedna oblast rasipanja raspoređivanja usled stohastičkih uticaja smetnji;
- pogrešnog dijagnostičkog nalaza;
- greški pri utvrđivanju graničnih vrednosti dijagnostičkih parametara;
- nedovoljnog uzimanja u obzir uslova korišćenja tehničkih sistema;
- nepridržavanja propisanih vremenskih intervala dijagnostičkih kontrola;
- greški pri utvrđivanju intenziteta habanja u zavisnosti od vremena korišćenja tehničkog sistema;
- neočekivanih promena dijagnostičkih uslova;
- neočekivanih promena uslova korišćenja tehničkih sistema;
- ne uzimanja u obzir nekih uzroka oštećenja (npr. zamora materijala);
- greški pri uzimanju u obzir vremena korišćenja tehničkog sistema;

- greški zbog neusaglašavanja procene tehničkog stanja pojedinih delova tehničkog sistema sa procenom tehničkog stanja celog tehničkog sistema;
- greški u vođenju evidencije o održavanju tehničkih sistema;
- subjektivnih grešaka dijagnostičara (pri merenju) itd.

Pošto greške u dijagnostici tehničkih sistema imaju odlučujući uticaj na efikasnost dijagnostičkog procesa, to je potrebno u svakom konkretnom slučaju utvrditi veličinu tih grešaka. Veličina grešaka često postaje najvažniji kriterijum prilikom izbora dijagnostičkih postupaka.

Ako se automatizovana dijagnostika vitalnih komponenti složenih tehničkih sistema, posmatra kroz četiri faze, onda se u okviru svake faze mogu pojaviti greške, ito [3]:

1. Greške koje nastaju prilikom stvaranja dijagnostičkih signala, koje mogu nastati zbog:

- nepoznatih uticaja dijagnostičkih uslova,
- greški pri merenju dijagnostičkih parametara,
- vremenski promenljivih dijagnostičkih uslova i
- vremenski promenljivih dijagnostičkih parametara stanja.

2. Greške koje nastaju prilikom prenošenja dijagnostičkih signala od mesta gde je ugrađen senzor u tehnički sistem do računara. Kvalitet sadržaja dijagnostičkog signala se može vrednovati kroz uticaj smetnji na taj signal, jer smetnje neminovno uzrokuju greške u procesu dijagnostike, nastaju zbog smetnji u kanalima za prenos dijagnostičkih signala:

- nepoznat sastav ili građa kanala dijagnostike i
- umnožavanje kanala dijagnostike pojavom sličnih struktura.

3. Greške koje nastaju prilikom obrade dijagnostičkih signala su ustvari greške mernih uređaja (mernih instrumenata, senzora, pojačavača i filtera mernog signala).

4. Greške koje nastaju prilikom ocene mernog signala radi utvrđivanja tehničkog stanja sistema, nastaju zbog:

- uticaja parametara stanja i uslova dijagnostike na merne signale, a koji nisu uzimani u obzir prilikom dijagnostičkog procesa,
- subjektivnih grešaka osoblja koje registruje merne veličine,
- netačno ponovljenih zakonitosti stvaranja mernih signala i
- ocenjivanja signala.

U odnosu na klasični dijagnostički proces kod razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela posebno je izražena mogućnost grešaka zbog smetnji u prenosu podataka, što je detaljno obrazloženo u delu „5.1.14. Predlog mera za zaštitu od smetnji pri radu automatizovanih dijagnostičkih modela uzrokovanih lutajućim strujama“, gde je navedeno da se to može sprečiti korišćenjem električnih instalacija sa TN-S ili TT sistemom razvoda, zatim upotrebom optičkih kablova koji su skuplji ali su i otporniji na elektromagnetne smetnje uzrokovane lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima i sl., dok je mogućnost subjektivnih grešaka znatno manja.

Tokom istraživanja realizovanih izradom ove disertacije vodilo se računa o tome da se ne naprave navedene greške, tako da nije uočena pojava značajnijih grešaka prilikom praktične primene razvijenog novog modela.

6.6 Prednosti praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela u odnosu na klasičnu dijagnostiku

Prednosti praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u odnosu na klasičnu dijagnostiku, su¹⁹¹ [103]:

1. Moguće je istovremeno i često ili neprekidno praćenje većeg broja dijagnostičkih parametara.
2. Dijagnostički proces se znatno pojednostavljuje i ubrzava, tako da se izveštaji o sprovedenim dijagnostičkim kontrolama mogu dobiti odmah nakon sprovedenih kontrola, jer se aktivnosti prikupljanja, obrade i analize podataka, kao i donošenja odluka o daljim aktivnostima održavanja vrše automatski, odnosno računar upravlja celokupnim dijagnostičkim procesom, tj. rezultati računarske obrade i analize rezultata kontrola se pretvaraju u jednostavne dijagnostičke poruke o daljim aktivnostima održavanja na kontrolisanom tehničkom sistemu (npr. dalji pregled "off-line" metodama, eventualna popravka ili zamena delova i sl.).
3. Ostvaruje se značajnije skraćanje vremena potrebnog za dijagnostičke kontrole, što još više opravdava investiciju u jedan ovakav model. Smanjuje se broj radnika potrebnih za dijagnostičke kontrole i njihova uloga se preusmerava na nadgledanje dijagnostičkog procesa, dok se kod klasične dijagnostike koriste analogni instrumenti, pa je potrebno imati više ispitivača.
4. Merne veličine se očitavaju gotovo istovremeno kada se vrši njihovo merenje, što povećava tačnost merenja.
5. Izbegavaju se grube greške prilikom preračunavanja izmerenih veličina tokom prikupljanja podataka, čime se značajno smanjuje merna nesigurnost.
6. Moguće je pratiti trend promene (pogoršanja) stanja tehničkih sistema, što pruža mogućnost izbora najpogodnijeg trenutka za popravku ili zamenu delova sistema, jer se podaci prikupljeni provođenjem dijagnostičkih kontrola čuvaju u računaru pa je moguće upoređivati rezultate više merenja i na taj način pratiti trend promene stanja, što je presudno u dijagnostici stanja tehničkih sistema. Na primer stabilan, odnosno nepromenjen signal vibracija, upućuje na to da u ležajevima mašina nije došlo do promena, odnosno pogoršanja. Ukoliko se periodičnim kontrolama uoči znatno (dvostruko ili višestruko) povećanje pojedinih spektralnih linija vibracija to je siguran znak da oštećenja ležajeva mašina rastu.
7. Izabrani dijagnostički parametri se mogu istovremeno koristiti i u sistemima daljinskog nadzora i upravljanja (u SCADA sistemima), čime se izbegava potreba za ugradnjom novih senzora i druge dijagnostičke opreme itd.
8. Dijagnostičke kontrole se mogu provoditi u normalnim pogonskim uslovima, bez prekidanja ili ometanja rada pogona (čak i uz eventualno prisustvo eksplozivne atmosfere pošto se kontrole izvode daleko od mašina, tj. u neugroženom prostoru), što obezbeđuje tačniji i pouzdaniji uvid u stanje sistema.
9. Moguće je detektovati mesto, uzrok i stepen oštećenja itd.

Ukratko, prednosti praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u odnosu na klasičnu dijagnostiku su u tome što se dijagnostički proces znatno pojednostavljuje i ubrzava, tako da se izveštaji o sprovedenim dijagnostičkim kontrolama mogu dobiti odmah nakon sprovedenih kontrola, zatim značajno se smanjuje mogućnost grešaka u dijagnostičkom procesu i smanjuje se broj radnika potrebnih za kontrole. Na ovaj način se povećava brzina i pouzdanost dijagnostičkih kontrola, čime se povećava njihova efikasnost.

¹⁹¹ Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja mašina u procesnoj industriji, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva”, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.

6.7 Ograničenja novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Rezultati razvoja i praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema pokazali su da pored navedenih prednosti ovaj model ima i određena ograničenja (nadostatke), kao što su [94]:

- potrebna je edukacija osoblja (naročito u informatičkom pogledu), koje je zaduženo za automatizovanu dijagnostiku;
- potrebno je određeno vreme da osoblje koje je zaduženo za automatizovanu dijagnostiku stekne dovoljno iskustva;
- osoblje koje je zaduženo za automatizovanu dijagnostiku mora primenjivati i pratiti nove trendove razvoja najsavremenijih informaciono komunikacionih tehnologija, koje se naglo razvijaju, pošto se razvijeni novi model bazira na njihovoj primeni;
- potrebna su veća početna ulaganja u praktičnu primenu razvijenog novog modela;
- moguće su smetnje u prenosu podataka, tj. moguće su smetnje u radu računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija uzrokovane lutajućim strujama, rasipnim magnetni poljima i sl.;
- razvijeni novi automatizovani dijagnostički model je složene arhitekture pa su uvek moguće i neke neočekivane situacije itd.

6.8 Mogućnosti modifikacije novog automatizovanog dijagnostičkog modela

Predloženo rešenje automatizovanog dijagnostičkog modela se odlikuje velikom fleksibilnošću, veoma je ekonomično, a praktična realizacija se može obaviti u relativno kratkom vremenu.

Razvijeni model je fleksibilan tako da se može prilagoditi različitim situacijama, može se (uz eventualne modifikacije) ugraditi u sisteme daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA sisteme), tako da se se iste veličine mogu koristiti za nadzor, upravljanje i dijagnostiku, čime se izbegava potreba za ugradnjom novih senzora i druge dijagnostičke opreme¹⁹² [94].

Uz manje modifikacije model je primenljiv i u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, kao što su gasovodna i naftovodna postrojenja itd., tako se ovaj model može koristiti za daljinsko praćenja (npr. preko GPRS mreže) stanja opreme na gasovodima i na naftnim platformama.

Razvijeni novi model se uz određene modifikacije vezane za bežični prenos podataka može primeniti za praćenje stanja objekata koji su mobilni (pokretni), kao što su: automobili (električni i klasični), avioni, helikopteri, brodovi itd. Tako proizvođači električnih automobila mogu, još u fazi njihove probne proizvodnje mogu uočiti komponente koje su sklone otkazima.

Takođe, uz određene modifikacije vezane za bežični prenos podataka razvijeni model se može primeniti za automatizovanu dijagnostiku tehničkih sistema obnovljivih izvora energije koji se nalaze na udaljenim i nepristupačnim lokacijama, kao što su npr. vetrogenenerati na pučinama i nepristupačnim kopnenim predelima^{193, 194} [6,158].

Softverska podrška razvijenom novom automatizovanom dijagnostičkom modelu veoma je važna u smislu efikasnosti dijagnostičkog procesa. Zbog toga je konstantno poboljšanje softverskih rešenja veoma važno radi kvalitetnijeg praćenja dijagnostičkih parametara i efikasnijeg donošenja dijagnostičkih odluka,

¹⁹² Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.

¹⁹³ Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, M., Vulović, S., Meza, S., Jurić, S., Obnovljivi izvori energije: Energija, obnovljivi izvori energije, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

¹⁹⁴ Petrovic-Gegic, A., Ilic, B., Savic, B., Analysis of the impact of various factors on the efficiency of the photovoltaic panels, XIII International scientific-professional symposium Infoteh, Vol.13, Jahorina, 19-21 March, 2014, pp. 315-320.

odnosno radi povećanja pouzdanosti čitavog dijagnostičkog procesa, a time i pouzdanosti tehničkih sistema čiji se vitalni dijagnostički parametri prate.

Mogućnosti modifikacije razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela predstavljaju osnovu za predloge nastavka daljih istraživanja koji su izneti u poglavlju 8. "Predlozi za nastavak daljih istraživanja".

6.9 Tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti

Budućnost održavanja moguće je sagledati na osnovu analize pravaca razvoja tehničkih sistema u budućnosti s jedne strane i koncepcija održavanja s druge strane.

Mogući pravci (tendencije) razvoja tehničkih sistema u budućnosti su¹⁹⁵ [1]:

- dalja automatizacija funkcije upravljanja tehničkim sistemima (alatne mašine bez radnika, poljoprivredna mehanizacija bez poslužioaca, vozila bez vozača, tenkovi bez posade, podmornice i brodovi bez posade itd.),
- robotizacija svih "nehumanih" poslova koji se realizuju u zagađenoj okolini sa monotonim i zamornim ciklusom,
- razvoj i primena memorijskih jedinica za pamćenje u sistemu veštačke inteligencije itd.

Na osnovu trenutnih ekonomskih trendova, trenutno prisutnih informaciono-komunikacionih tehnologija i predviđenih događanja u različitim industrijskim granama, moguće su sledeće situacije u vezi održavanja [1]:

- U budućnosti će definitivno manje ljudi biti angažovano na poslovima prikupljanja podataka o stanjima mašina i njihovoj analizi. Ekonomski trendovi, grupisanje manjih firmi u globalne multinacionalne korporacije, geografsko izmeštanje razvoja i menadžmenta u odnosu na proizvodnju su samo neke od činjenica koje idu u prilog ovoj tvrdnji.
- S obzirom na postojanje centralizovane baze podataka u koju se smeštaju podaci sa svih udaljenih lokacija, izvođenje zaključaka o jednoj grupi mašina moguće je iskoristiti za analizu identičnih ili sličnih mašina koje se nalaze u drugim pogonima (lokacijama).
- Podaci sa mašine će direktno biti prosleđivani dijagnostičarima za razliku od dosadašnje prakse (periodični odlasci u pogon - snimanje dijagnostičkih signala - povratak u kancelariju - prebacivanje podataka u računar radi analize - analiza podataka). Ovde treba naglasiti da će pri pojavi kompleksnijeg problema na mašini, dijagnostičar ipak morati otići do nje i izvršiti dodatna merenja, odnosno dodatnim tehnikama ispitivanja potvrditi svoje pretpostavke. Ipak konkretni pristup će varirati od fabrike do fabrike.

U ogromnim poslovnim sistemima (sa stotinama mašina) će u početku sigurno biti primenjivana kombinacija tradicionalnog i modernog pristupa: kritične mašine će biti opremljene sistemima za neprekidnu dijagnostiku čiji se signali ili gotovi zaključci prenose u udaljeni dijagnostički centar, dok će se stanje glavnih mašina i mašina za održavanje proizvodnje i dalje pratiti klasičnim metodama povremene dijagnostike.

Savremene dijagnostičke metode i sve šira upotreba računara omogućili su korišćenje dijagnostike u sve većem broju pogona. Zbog toga su, današnje tendencije razvoja savremenih automatizovanih dijagnostičkih sistema usmerene na primenu softverske podrške bazirane na korišćenju metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka, kao što su: ekspertske sistemi, fazi logika, neuronske mreže, web tehnologije, tehnologije mobilnih softverskih agenata, genetički algoritmi itd. U

¹⁹⁵ Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

slučajevima kada ne postoji mogućnost korišćenja metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih odluka onda te odluke donosi čovek¹⁹⁶ [84].

U budućnosti se može očekivati i sve veća primena mobilnih softverskih agenata i web tehnologija koji poseduju niz prednosti u odnosu na klasične on-line sisteme za daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara. Razvoj pametnih (engl. smart) senzora i sve šira upotreba inteligentnih softverskih agenata su trendovi u oblasti prediktivnog održavanja. Mikroprocesorski čipovi postaju sve snažniji, manji i jeftiniji, pa ih proizvođači ugrađuju u senzore u cilju povećanja funkcionalnosti i pouzdanosti. Radi se o ugrađivanju sposobnosti: auto kalibracije, daljinskog pripremanja, neograničenog podešavanja opsega i skaliranja, daljinskog povećanja osetljivosti, samodijagnostici, kao i održavanja tačnosti i linearnosti. Pomenuta poboljšanja će omogućiti smanjenje troškova akvizicije podataka i održavanja po mernoj tački. Tehnologija softverskih agenata koja automatski izvodi koristan rad kao asistent čoveku može lako biti integrisana u postojeće okruženje automatizacije sistema, predstavlja obećavajući alat za poboljšanje pouzdanosti mašina i smanjenje troškova održavanja [3].

Sledeća generacija dijagnostičkih i prognostičkih sistema će se verovatno više fokusirati na razne aspekte neprekidnog praćenja i automatizovane dijagnostike i prognostike. U sledećoj generaciji dijagnostičkih i prognostičkih sistema će se zahtevati sledeći pravci u istraživanju:

- Unapređenje sistema u prikupljanju tačnih informacija, posebno informacija dobijenih tokom događaja. Ove informacije bi bile od neprocenjive važnosti za izgradnju, kao i za validaciju automatizovanog dijagnostičkog modela.
- Razvoj naprednih senzorskih tehnika za robusno on-line prikupljanje podataka.
- Razvoj metoda ili alata za ekstrahovanje, obradu i interpretaciju informacije u formi znanja.
- Razvoj efikasnih i brzih on-line algoritama za obradu signala.
- Razvoj pristupa robusnoj detekciji i dijagnostici otkaza na kompleksnim sistemima.
- Razvoj brzih i preciznih pristupa u prognostici.
- Razvoj automatizovanih dijagnostičkih modela koji uključuju više kategorija akcija održavanja.

¹⁹⁶ Ilić, B., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Blaženović, R., Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost: automatizovana dijagnostika postrojenja obnovljivih izvora energije, povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema automatizovanim dijagnostikom, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.

7. Zaključak

Problem istraživanja u ovoj disertaciji bio je da se ispita uticaj automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na pouzdanost i raspoloživost tih sistema u procesu eksploatacije, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća.

Osnovni cilj istraživanja realizovanih tokom izrade ove doktorske disertacije bio je da se ispita da li automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

Da bi se ostvario postavljeni cilj, odnosno da bi se dokazala tačnost pomoćnih, a preko njih i glavne hipoteze, na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja, razvijen je novi automatizovani dijagnostički model, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija. Ovaj model obuhvata korišćenje tri dijagnostičke metode: metodu termografije, metodu analize frekvencijskog spektra vibracija i metodu analize frekvencijskog spektra struje statora. Pri tome je korišćena savremena dijagnostička oprema, kao što su: računari sa odgovarajućom hardverskom i softverskom podrškom, termografske kamere, senzori vibracija, spektralni analizatori, strujni merni transformatori, koaksijalni kablovi, kablovi sa upredenim paricama, optički kablovi itd.

Zatim, je u empirijsko-eksperimentalnom delu disertacije izvršena praktična primena tog modela na konkretnom primeru dijagnostičkih kontrola vitalnih komponenti tehničkih sistema (ležajeva mašina, asinhronih motora, priključnih stezaljki itd.) u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji).

Tokom empirijsko-eksperimentalnog dela istraživanja službe održavanja su vodile evidencije o aktivnostima održavanja velikog broja tehničkih sistema u industriji. Zatim, su relevantni statistički empirijski podaci dobijeni od službi održavanja o aktivnostima održavanja (broju preventivnih i korektivnih aktivnosti održavanja, vremenu u zastoju, vremenu u radu, uzroku otkaza i sl.) na posmatranom validnom uzorku tehničkih sistema uneseni u odgovarajuće tabele, na osnovu kojih je primenom razvijenog novog modela izvršen proračun pokazatelja pouzdanosti tehničkih sistema u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model (od 20.12.2010. godine do 20.12.2012. godine) i u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model (od 21.12.2012. godine do 21.12.2014. godine). Na osnovu tih rezultata potvrđena je tačnost pomoćnih (radnih) hipoteza, a preko njih i glavne hipoteze istraživanja, odnosno utvrđeno je da ovaj model doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

7.1 Dokazivanje glavne hipoteze

Glavna hipoteza disertacije, koja glasi: „Automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji, bazirana na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.“, proverena je dokazivanjem (verifikacijom) sledećih pomoćnih (radnih) hipoteza:

1. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju broja otkaza i produženju srednjeg vremena između otkaza *MTBF*, a time i porastu nivoa pouzdanosti tih sistema.

Istraživanja su pokazala da je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti validnog uzorka tehničkih sistema u različitim granama industrije doprinela značajnijem smanjenju broja otkaza vitalnih komponenti tih sistema i produženju srednjeg vremena između otkaza *MTBF*, a time i značajnijem porastu nivoa pouzdanosti mašina u koje su ugrađene te komponente. Što je dokazano poređenjem nivoa pouzdanosti tehničkih sistema u različitim granama industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj) u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model i u vremenskom intervalu od dve godine kada je primenjivan razvijeni

novi model. Ovo je detaljno obrazloženo u delu disertacije „6.1.1. Dokazivanje tačnosti prve pomoćne hipoteze“.

2. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi produženju srednjeg između održavanja *MTBM* i skraćanju srednjeg vremena u zastoju *MDT*, a time i porastu nivoa raspoloživosti tih sistema.

Istraživanja su pokazala da je praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u različitim granama industrije doprinela produženju srednjeg između održavanja *MTBM* i značajnijem skraćanju srednjeg vremena u zastoju *MDT*, a time i porastu nivoa raspoloživosti tih sistema. Što je dokazano poređenjem nivoa raspoloživosti tih sistema u različitim granama industrije u vremenskom intervalu od dve godine kada nije primenjivan razvijeni novi model i u vremenskom intervalu dve godine kada je primenjivan razvijeni novi model. Ovo je detaljno obrazloženo u delu disertacije „6.1.2. Dokazivanje tačnosti druge pomoćne hipoteze“.

3. Primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji doprinosi smanjenju troškova održavanja (smanjenju troškova za radnu snagu (smanjenju broja i obima aktivnosti korektivnog i preventivnog održavanja), smanjenju troškova uzrokovanih zastojima proizvodnog procesa, smanjenju potrošnje rezervnih delova i maziva itd.), a time i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća, čime se obezbeđuje ekonomska opravdanost investiranja u praktičnu primenu novog modela.

Poređenjem troškova investiranja u praktičnu primenu razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u industriji i godišnje neto uštede koja se ostvaruje njegovom primenom zaključeno je da će se troškovi investiranja u praktičnu primenu razvijenog novog modela isplatiti nakon skoro godinu dana njegove primene. Ovo je detaljno obrazloženo u delu disertacije „6.1.3. Dokazivanje tačnosti treće pomoćne hipoteze“.

Na ovaj način su sprovedenom tehno-ekonomskom analizom, na konkretnom primeru praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije, dokazane merljive finansijske koristi od njegove primene.

Praktična primena razvijenog novog modela doprinela je da se postignu pozitivni efekti u pogledu¹⁹⁷ [91]:

1. **Porasta nivoa pouzdanosti tehničkih sistema**, jer je smanjen broj otkaza i produženo srednje vreme između otkaza *MTBF*.
2. **Porasta nivoa raspoloživosti tehničkih sistema**, jer je produženo srednje vreme između održavanja *MTBM* i skraćeno srednje vreme u zastoju *MDT*.
3. **Smanjenja direktnih i indirektnih troškova održavanja**, jer:
 - su smanjeni troškovi za radnu snagu, time što je smanjen broj i obim aktivnosti korektivnog i klasičnog preventivnog održavanja, čime su stvorene mogućnosti za smanjenje broja zaposlenih na održavanju.
 - se izbegavaju učestale zamene delova mašina, time što je smanjen broj pogrešno donesenih dijagnostičkih odluka pošto je ostvarena identifikacija uzroka otkaza mašina, bilo da su električne bilo da su mehaničke prirode.
 - je smanjena potrošnja rezervnih delova i maziva čak za 70%., pošto se dobijao bolji uvid u stvarno stanje delova tehničkih sistema i maziva, što je omogućilo da se zamenjuju tek onda kada su bili 100% istrošeni, tj. kada su dali svoj maksimum.

¹⁹⁷ Ilic, B., Adamovic, Z., Savic, B., Influence automated diagnostic testing reliability of technical systems in process industry, Proceedings/III International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Jahorina, 04.03-06.03.2013, pp. 542- 551.

- je ostvareno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja tehničkih sistema, pošto je omogućeno da se izabere najpovoljniji trenutak za popravku ili zamenu komponenti tehničkih sistema, time što se dobijao bolji uvid u stvarno stanje tehničkih sistema.
 - su smanjene potrebne zalihe (lager) rezervnih delova i maziva, bez straha da u kritičnom momentu neće biti na raspolaganju odgovarajući rezervni delovi. Sa unapređenim dijagnostičkim kontrolama, koje daju mogućnost predviđanja i ranog upozoravanja na otkaze, manje rezervnih delova treba držati u zalihama (na lageru). Npr. redovnim kontrolama stanja kotrljajnih ležajeva mogu se detektovati defekti ležajeva u ranoj fazi nastanka tako da se ima dovoljno vremena za pravovremenu nabavku novog ležaja, a istovremeno nema potrebe da se drži rezervni ležaj u skladištu. Zalihe rezervnih delova u skladištu predstavljaju mrtav kapital, pa je poželjno smanjiti njihovu količinu vodeći računa o tome da rokovi dostave pojedinih rezervnih delova ponekad mogu biti jako dugi.
 - je ostvareno optimalnije iskorišćenje resursa preduzeća, pošto je ostvareno optimalnije planiranje aktivnosti održavanja i optimalnije angažovanje materijalnih resursa (rezervnih delova).
 - su povećani prihodi, sa većom zaposlenošću sistema i prihodi su veći. Sa manje intervencija na ispravnim komponentama i bržim intervencijama na komponentama koje su neispravne, troškovi održavanja se drastično smanjuju i čak teže nekoj minimalno mogućoj vrednosti.
 - su smanjeni troškova zbog ispada (nerada) sistema iz rada – troškovi interventnih isključenja sistema su čak i do deset puta veći, nego troškovi planiranog održavanja. Ovo je ostvareno preciznim definisanjem problema i minimiziranjem vremena potrebnog za predviđeno preventivno održavanje. Napori u održavanju su direktno usmereni na utvrđivanje uzroka otkaza, a ne na traganje za otkazom.
 - su sprečeni ozbiljniji otkazi i havarije, a time i troškovi i opasnosti po ljude i okolinu.
4. **Unapređenja energetske efikasnosti tehničkih sistema, odnosno smanjenja potrošnje energije**, jer su detektovani defekti u početnoj fazi, čime su stvorene mogućnosti da se pravovremenim preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja spreči dalji razvoj defekata, a time i povećana potrošnja energije. Posebno velike uštede u potrošnji energije su ostvarene izbegavanjem havarija, što je postignuto pravovremenom detekcijom potencijalnih uzroka havarija^{198, 199} [7,8].
 5. **Smanjenja škarta u proizvodnji**, jer su praćenjem (merenjem) dijagnostičkih parametara (npr. vibracija) na mašinama na vreme uočeni trendovi njihovog povećanja i pravovremeno preduzete odgovarajuće aktivnosti održavanja, kojima je sprečeno smanjenje kvaliteta proizvoda, odnosno škarta u proizvodnji.
 6. **Poboljšanja kvaliteta proizvoda**, jer je podizanjem nivoa održavanja proizvodne opreme poboljšan kvalitet proizvoda.
 7. **Smanjenja opasnosti i štetnosti po ljude i okolinu** (povećanja sigurnosti na radu radnog osoblja i okruženja (drugih delova tehničkog sistema), kao i zdravlja radnog osoblja), jer su pravovremenom detekcijom potencijalnih uzroka otkaza sprečene havarije i tragedije većih razmera, kao što su eksplozije i požari, i kobne posledice za ljude i okruženje.
 8. **Smanjenja zagađenja (zaštite) životne sredine (povoljnijih ekoloških efekata)**, jer su sprečene havarije koje mogu uzrokovati ekološke katastrofe, odnosno dovesti do proizvodnje ili ispuštanja materija štetnih po okolinu.

¹⁹⁸ Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Vulović, M., Meza, S., Energetska efikasnost: Energetska efikasnost, energija i ekologija, održivi razvoj, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.

¹⁹⁹ Adamović, Ž., Ilić, B., Jovanov, G., Vulović, S., Cvetković, S., Energetska efikasnost: zelena energija, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Beograd, 2013.

9. **Produženja radnog veka tehničkih sistema**, jer su pravovremenom detekcijom otkaza stvoreni uslovi da se preduzimanjem odgovarajućih aktivnosti održavanja u tehnološki najpovoljnijem trenutku spreče ozbiljniji otkazi i havarije, i tako produži radni vek tehničkih sistema.
10. **Smanjenja ukupnih troškova proizvodnje**, jer je ostvareno smanjenje ukupnih troškova održavanja, unapređenje energetske efikasnosti, smanjenje škarta u proizvodnji, smanjenje zaliha (lagera) rezervnih delova itd.
11. **Povećanja produktivnosti tehničkih sistema**, jer je ostvareno produženje vremena ispravnog stanja tehničkih sistema (proizvodne opreme), koje bitno utiče na ostvarivanje željene produktivnosti.
12. **Povećanja profitabilnosti**, jer su uložena sredstva u proces proizvodnje u najvećem obimu revalorizovana kroz smanjenje troškova održavanja, efikasnije korišćenje energije i duži radni vek tehničkih sistema.
13. **Ekonomičnijeg poslovanja preduzeća**, jer je ostvareno smanjenje ukupnih troškova preduzeća, povećanje produktivnosti i profitabilnosti itd.

Ukratko, praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema u različitim granama industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji) doprinela je da se postignu pozitivni efekti u pogledu: porasta nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, smanjenja troškova održavanja i ekonomičnijeg poslovanja preduzeća, kao i u pogledu povećanja sigurnosti osoblja na radu i okoline, poboljšanja energetske efikasnosti, zaštite (smanjenja zagađenja) životne sredine itd.

7.2 Naučni doprinos disertacije

Istraživanja sprovedena tokom izrade ove doktorske disertacije pokazala su svu kompleksnost i značaj razmatranja problematike uticaja automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na nivo pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao i na ukupne troškove i ekonomičnije poslovanje preduzeća, čime je ostvaren konkretan doprinos istraživanjima u oblasti automatizovane dijagnostike i održavanja tehničkih sistema.

Naučni doprinos istraživanja koja su sprovedena tokom izrade ove disertaciji ogleda se u dobijenim rezultatima istraživanja, koji su potvrdili tačnost postavljenih hipoteza i predstavljaju značajan naučni doprinos, koji se ogleda u sledećem:

- predložen je novi pristup dijagnostici stanja tehničkih sistema, odnosno razvijen je novi automatizovani dijagnostički model za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema, baziran na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija, koji doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća, što je potvrđeno praktičnom primenom tog modela na konkretnom primeru praćenja stanja tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji);
- izvršena je komparativna analiza, odnosno utvrđene su sličnosti i razlike između već realizovanih automatizovanih dijagnostičkih modela u cilju razvoja (projektovanja) što ekonomičnijeg i efikasnijeg novog automatizovanog dijagnostičkog modela;
- predložene su mere za sprečavanje smetnji prilikom rada automatizovanih dijagnostičkih modela (odnosno smetnji pri radu računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija) uzrokovanih lutajućim strujama, rasipnim magnetnim poljima i sl.,
- razvijen je algoritam za donošenje dijagnostičkih poruka primenom fazi logike, kao metode veštačke inteligencije;
- razvijen je sopstveni model za proračun pokazatelja pouzdanosti kompleksnih tehničkih sistema, proračun pokazatelja pouzdanosti vršen je korišćenjem analitičkih i empirijskih relacija, kao i simulacione Monte Karlo metode;

- rezultati dobijeni primenom razvijenog novog modela upoređeni su rezultatima sličnih istraživanja;
- navedene su prednosti i ograničenja razvijenog novog modela;
- predočene su mogućnosti praktične primene razvijenog novog modela;
- naučnim predviđanjem predočene su tendencije razvoja automatizovane dijagnostike u budućnosti, koja bi na najefikasniji i najekonomičniji način omogućila praćenje stanja kompleksnih tehničkih sistema;
- prezentovana su brojna istraživanja u području automatizovane dijagnostike, publikovana u časopisima i na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja;
- ova disertacija predstavlja koristan literaturni izvor za buduća istraživanja u području automatizovane dijagnostike itd.

Originalnost ove doktorske disertacije proizilazi iz činjenice da je na osnovu teorijsko-empirijskih saznanja razvijen originalni automatizovani dijagnostički model i da se zatim, empirijsko-eksperimentalnim istraživanjima i vrlo studioznom analizom rezultata istraživanja, došlo do originalnih zaključaka i novih saznanja, odnosno dokaza da automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u različitim granama industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji) doprinosi porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju preduzeća.

U disertaciji je ostvareno povezivanje teorije sa praksom, uspostavljanjem veze između teorijski razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela i njegove praktične primene u realnim pogonskim uslovima. Posebnu vrednost u ovoj disertaciji imaju rezultati empirijsko-eksperimentalnih istraživanja koja su sprovedena na pažljivo odabranom validnom aproksimativnom uzorku vitalnih komponenti tehničkih sistema.

Rezultati istraživanja do kojih se došlo tokom izrade ove disertacije pokazuju da ova doktorska disertacija predstavlja značajan naučni doprinos u području teorije i prakse (rešavanja konkretnih praktičnih problema) održavanja tehničkih sistema, koji su valorizovani objavljivanjem tih rezultata u odgovarajućim publikacijama.

Privredni doprinos istraživanja koja su sprovedena tokom izrade ove disertaciji ogleda se u dobijenim rezultatima istraživanja, koji predstavljaju značajan doprinos praksi, odnosno rešavanju konkretnih praktičnih problema u oblasti održavanja tehničkih sistema.

Sa naučnog aspekta značajna je i mogućnost praktične primene novog automatizovanog dijagnostičkog modela. Postavljeni ciljevi i hipoteze su dokazani na konkretnom primeru praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela za praćenje stanja vitalnih komponenti tehničkih sistema u realnim pogonskim uslovima različitih grana industrije (drvnoj, hemijskoj i metalurškoj industriji), čime je dokazana mogućnost njegove veoma široke praktične primene.

Ovaj model je posebno pogodan za dijagnostiku stanja kritičnih mašina gde se proces proizvodnje ne sme prekidati, jer svaki prekid procesa, a posebno neplanski može uzrokovati velike troškove, kao i opasnosti po ljude i okolinu²⁰⁰ [79].

Razvijeni novi model je naročito pogodan za praktičnu primenu u procesnoj industriji, kao što je: crna i obojena metalurgija (npr. proizvodnja železa i čelika, topionice i sl.); prehrambena industrija (npr. proizvodnja šećera); industrija celuloze i papira; proizvodnja i prerada nafte i gasa (rafinerije i petrohemija), proizvodnja i prerada nemetala i građevinskih materijala (npr. proizvodnja cementa); bazna hemijska industrija (proizvodnja i prerada hemijskih proizvoda - baznih i drugih hemikalija, farmaceutskih proizvoda, hemijskih vlakana, plastične mase, boja i lakova, đubriva, agrohemijskih i dr.) itd., gde zbog

²⁰⁰ Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Razvoj modela automatizovanog dijagnostičkog sistema i njegov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 1-2, Banja Luka, 2012, pp. 20-40.

otkaza samo jednog dela tehničkog sistema (npr. kritične mašine) može doći do zastoja cele proizvodne linije, a time i do velikih troškova, ekoloških šteta i ugrožavanja bezbednosti ljudi.

Takođe, razvijeni novi model ima mogućnosti praktične primene u različitim granama industrije, kao što je: teška industrija (crna i obojena metalurgija, metaloprerađivačka, mašinska (industrija saobraćajnih sredstava (automobilska industrija, aeronautička industrija, brodogradnja, industrija šinskih vozila, avionska industrija), industrija poljoprivrednih mašina, industrija alata, elektrotehnička industrija i sl.) i bazna hemijska industrija) i laka industrija (tekstilna, drvna i prehrambena, industrija gume, industrija kože i obuće itd.).

Razvijeni novi automatizovani dijagnostički model, uz eventualne modifikacije, ima mogućnosti široke praktične primene u različitim proizvodnim privrednim delatnostima, kao što su: industrija, energetika (elektroenergetika (proizvodnja, prenos i distribucija električne energije proizvedene iz neobnovljivih i obnovljivih izvora), prerada i transport energenata (čvrstih, tečnih i gasovitih, npr. naftovodi, gasovodi i sl), rudarstvo, poljoprivreda i proizvodno zanatstvo. Znači, model je primenjiv ne samo za dijagnostiku stanja složenih tehničkih sistema u različitim granama industrije, nego i u različitim proizvodnim privrednim delatnostima.

Objektivno, svestrano i potpuno sagledane su sve mogućnosti praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u različitim granama industrije, uzimajući u obzir sve njegove prednosti i ograničenja, što može doprineti unapređenju postojeće prakse održavanja tehničkih sistema, u cilju postizanja veće efikasnosti održavanja. Pored toga, očekuje se da će neposredna primena saznanja stečenih ovim istraživanjima doprineti da se u industriji naše zemlje primenjuju svetski standardi i prate trendovi u oblasti održavanja tehničkih sistema.

Prikupljanjem specifičnih podataka, mernih vrednosti iz eksperimentalnih ispitivanja i sticanjem određenih iskustava proširena su saznanja o tehničkim sistemima koja mogu biti korisna za donošenje odluka o daljim aktivnostima održavanja. Tako se npr. prikupljanjem i statističkom obradom velikog broja podataka o aktivnostima održavanja tehničkih sistema može doći do zaključaka koji će pokazati od kojih su proizvođača ti sistemi ili njihovi delovi najpouzdaniji i preporučiti nabavka od njih.

Rezultati istraživanja pokazuju i da strategiju privrednog razvoja, koja se odnosi na održavanje tehničkih sistema, treba usmeriti na razvoj i primenu savremene automatizovane dijagnostike, što podrazumeva edukaciju odgovarajućih kadrova i angažovanje drugih privrednih kapaciteta kojima će se to postići, kao što je npr. proizvodnja dijagnostičke opreme.

Ne postoji univerzalni model koji se može primeniti za sve slučajeve u praksi, već svaka konkretna situacija zahteva specifična rešenja, koja zavise od: uslova njihovog rada, karakteristika tehničkog sistema koji se dijagnostikuje, hardverske i softverske konfiguracije tih sistema, specifičnosti tehnološkog procesa, potrebne brzine i sigurnosti prenosa podataka, obučenosti dijagnostičara, troškova eksploatacije itd.

Tako praktična primena razvijenog novog modela može omogućiti rukovodstvima preduzeća da poboljšaju upravljanje tehničkim sistemima u preduzećima uz optimalnije troškove proizvodnje i identifikaciju kritičnih komponenti sistema.

Usled smanjene ekonomske moći privrede naše zemlje, investicione mogućnosti za izgradnju izuzetno skupih novih industrijskih pogona svedene su na minimum. U takvoj situaciji jedno od rešenja je u primeni automatizovane dijagnostike vitalnih komponenti složenih tehničkih sistema, koja zahteva relativno mala investiciona ulaganja, a može omogućiti pouzdano, kvalitetno i neprekidno funkcionisanje tehničkih sistema, a time optimalnije i racionalnije iskorišćenje postojećih resursa preduzeća.

Praktična primena razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela podrazumeva:

- Poznavanje principa na kojima se zasnivaju korišćene dijagnostičke metode kao i principa funkcionisanja i konstrukcije opreme za automatizovanu dijagnostiku.
- Usmeravanje dijagnostičkih kontrola na visoko rizične tehničke sisteme čiji otkaz dovodi do dugotrajnih zastoja.
- Uspostavljanje sistema za prikupljanje, obradu i analizu podataka o otkazima (način nastajanja, obim, trajanje, uzrok itd.).

Teorijski doprinos ove doktorske disertacije se ogleda u tome da je prikupljanjem i proučavanjem relevantne domaće i međunarodne literature izvršena sinteza brojnih saznanja do kojih su došli eminentni stručnjaci u ovoj oblasti. Tako da ova disertacija predstavlja značajan prilog literaturi, jer je veoma mali broj radova koji se bave ovom problematikom. Ova disertacija može predstavljati koristan literaturni izvor za dalja istraživanja u oblasti održavanja tehničkih sistema kod nas i u svetu, naročito za stručnjake koji žele projektovati automatizovane dijagnostičke modele bazirane na korišćenju računara i drugih savremenih informaciono komunikacionih tehnologija. Deo rezultata istraživanja dobijenih tokom izrade ove disertacije prezentovan je u monografijama i radovima koji su publikovani u časopisima i na konferencijama međunarodnog i nacionalnog značaja.

Društveni doprinos ovih istraživanja se ogleda u njihovoj široj društvenoj aktuelnosti i značaju, jer napredak nauke i tehnike značajno utiču na ekonomski i ukupni društveni razvoj i progres. Ovakva istraživanja doprinose smanjenju troškova održavanja, smanjenju potrošnje energije i smanjenju škarta u proizvodnji, a time i smanjenju ukupnih troškova i ekonomičnijem poslovanju naših preduzeća, čime se konkurentnost industrije i privrede naše zemlje može podići na viši nivo. Takođe, ovakva istraživanja doprinose smanjenju opasnosti po ljude i okolinu, unapređenju energetske efikasnosti, zaštiti životne sredine, smanjenja škarta u proizvodnji itd.

7.3 Pitanja koja disertacija „otvara“

Sprovedena istraživanja nesumnjivo su pokazala da automatizovana dijagnostika tehničkih sistema u industriji ima pozitivne efekte na porast nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća. Međutim, ostala su i neka otvorena pitanja, koja su razmotrena u nastavku.

Jedno od otvorenih pitanja je da li ugradnju dijagnostičke opreme, puštanje u rad i održavanje razvijenog (projektovanog) novog automatizovanog dijagnostičkog modela u nekom preduzeću, treba poveriti proizvođačima dijagnostičke opreme (jer najveći broj proizvođača dijagnostičke opreme nudi i usluge njene ugradnje i puštanja u pogon) ili to treba poveriti sopstvenom kadaru preduzeća. U prilog prvom rešenju ide činjenica da proizvođači dijagnostičke opreme poseduju dovoljan broj eksperata i iskustvo u radu sa opremom za automatizovanu dijagnostiku, a istovremeno se obezbeđuje efikasnija isporuka neophodnih rezervnih delova u toku održavanja automatizovanog dijagnostičkog modela. Sa druge strane ovakvo rešenje zahteva veća novčana ulaganja i podrazumeva veću zavisnost od proizvođača dijagnostičke opreme prilikom korišćenja automatizovanog dijagnostičkog modela.

Jedno od otvorenih pitanja jeste i pitanje kadrovske politike. U službama održavanja obično postoji dovoljan broj visoko obučenog osoblja, čija je uloga važna kod redovnog održavanja pogona, pa se postavlja pitanje da li je racionalnije rešenje prebaciti ih u službu koja će se baviti samo automatizovanom dijagnostikom, jer nije beznačajno njihovo poznavanje tehničkih sistema u pogonu koji održavaju.

Takođe, jedno od otvorenih pitanja jeste kolike su mogućnosti masovnije praktične primene razvijenog novog modela, kao dela koncepcije održavanja prema stanju, u industriji naše zemlje s obzirom na to da on zahteva relativno veća početna finansijska ulaganja, ako se zna da je ekonomska moć privrede naše zemlje slaba.

Dobijeni rezultati su pokazali prednosti praktične primene razvijenog novog automatizovanog dijagnostičkog modela u odnosu na tradicionalnu (klasičnu) dijagnostiku. Međutim, postavlja se pitanje punih efekata njegove primene, jer oni značajno zavise od toga sa kakvim znanjima, raspolaže osoblje koje nadzire dijagnostički proces, jer pored dijagnostičkog znanja treba da poseduje i znanja vezana za korišćenje računara i drugih savremenih informaciono-komunikacionih tehnologija. Takođe, se postavlja pitanje mogućnosti razvoja novih softverskih rešenja baziranih na primeni metoda veštačke inteligencije prilikom donošenju dijagnostičkih odluka.

Rezultati istraživanja su pokazali da postoje i otvorena pitanja vezana za automatizovanu dijagnostiku geografski udaljenih tehničkih sistema, odnosno izbora najpovoljnijeg načina prenosa podataka na daljinu.

8. Predlozi za nastavak daljih istraživanja

Aktuelnost razmatrane problematike uticaja automatizovane dijagnostike tehničkih sistema u industriji na nivo pouzdanosti i raspoloživosti tih sistema u procesu eksploatacije, kao i na ukupne troškove i ekonomičnost poslovanja preduzeća, i rezultati istraživanja dobijeni tokom izrade ove doktorske disertacije, pokazuju da postoji još mogućnosti i potrebe za nastavkom istraživanja. Generalno posmatrano rezultati ovih istraživanja stvorili su dobru osnovu za dalja istraživanja, predlozi za nastavak istraživanja se mogu formulisati na sledeće načine.

Razvijeni novi automatizovani dijagnostički model je koncipiran tako da se termografske kontrole kritičnih mašina provode prema unapred utvrđenim vremenskim intervalima – jednom mesečno. Dalja istraživanja bi mogla ići u pravcu utvrđivanja optimalnih intervala termografskih kontrola vitalnih komponenti kritičnih mašina u industriji.

Softverska podrška automatizovanoj dijagnostici tehničkih sistema je veoma važna u smislu efikasnosti dijagnostičkog procesa. Zbog toga bi dalja istraživanja mogla ići u pravcu razvoja softvera koji bi doprineo kvalitetnijem praćenju dijagnostičkih parametara i efikasnijem donošenju dijagnostičkih odluka, odnosno porastu nivoa pouzdanosti i raspoloživosti tehničkih sistema čiji se vitalni parametri prate.

Brzina i kvalitet prenosa podataka je bitan faktor u realizaciji računarom upravljanih dijagnostičkih kontrola tehničkih sistema. Dalja istraživanja u ovoj oblasti bi mogla ići u pogledu iznalaženja rešenja najoptimalnijeg medijuma i načina prenosa podataka (bežični, žični (bakarni provodnici, optički kablovi), Ethernet, Internet, GPRS itd.).

Dalja istraživanja bi mogla ići u pravcu provere hipoteze da automatizovna dijagnostika složenih tehničkih sistema doprinosi unapređenju energetske efikasnosti tih sistema, odnosno da doprinosi smanjenju gubitaka energije.

Dalja istraživanja bi mogla ići u pravcu provere tehno-ekonomske opravdanosti praktične primene automatizovane dijagnostike tehničkih sistema obnovljivih izvora energije koji se nalaze na udaljenim i nepristupačnim lokacijama, kao što su npr. vetrogeneratori na pučinama i nepristupačnim kopnenim predelima.

Dalja istraživanja bi mogla ići i u pravcu provere tehno-ekonomske opravdanosti primene automatizovane dijagnostike električnih automobila, u cilju identifikacije komponenti koje su sklone otkazima i uzroka njihovih otkaza.

Takođe, dalja istraživanja bi mogla ići u pravcu provere tehno-ekonomske opravdanosti primene automatizovane dijagnostike u okviru sistema daljinskog nadzora i upravljanja (SCADA sistema) složenim tehničkim sistemima.

9. Literatura

- [1] Adamović, Ž., Ilić, B., Nauka o održavanju tehničkih sistema, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.
- [2] Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Stanković, N., Vulović, M., Tehnička dijagnostika elektrana i toplana: Pouzdano održavanje termoelektrana, hidroelektrana, solarnih elektrana, vetroelektrana i toplana, Društvo za tehničku dijagnostiku – Adam institut, Smederevo, 2014.
- [3] Adamović, Ž., Ilić, B., Bursać, Ž., Vibrodijagnostičko održavanje mašina i postrojenja: Nova metodologija održavanja mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.
- [4] Adamović, Ž., Otić, G., Ilić, B., Proaktivno održavanje mašina i postrojenja, Srpski akademski centar, Novi Sad 2014.
- [5] Adamović, Ž., Ilić, B., Savić, B., Jevtić, M., Termografija pouzdana dijagnostička metoda, Pan Book, Novi Sad, 2011.
- [6] Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, M., Vulović, S., Meza, S., Jurić, S., Obnovljivi izvori energije: Energija, obnovljivi izvori energije, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.
- [7] Adamović, Ž., Ilić, B., Vulović, S., Vulović, M., Meza, S., Energetska efikasnost: Energetska efikasnost, energija i ekologija, održivi razvoj, Srpski akademski centar, Novi Sad 2013.
- [8] Adamović, Ž., Ilić, B., Jovanov, G., Vulović, S., Cvetković, S., Energetska efikasnost: zelena energija, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Beograd, 2013.
- [9] Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
- [10] Adamović, Ž., Radovanović, Lj., Tasić, I., Tehnička dijagnostika: izabrani primeri iz prakse, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2012.
- [11] Adamović, Ž., Adamović, M., Tehnička dijagnostika, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2008.
- [12] Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Paunjorić, P., Teledijagnostika mašina, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.
- [13] Adamović, Ž., Stanković, N., Savić, B., Pouzdanost mašina i postrojenja, Stylos art, Novi Sad, 2011.
- [14] Adamović, Ž., Tasić, I., Stanković, N., Ašonja, A., Održavanje kliznih ležišta, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2011.
- [15] Adamović, Ž., Ašonja, A., Milošević, D., Vibrodijagnostika i tribodijagnostika mašina, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [16] Adamović, Ž., Bursać, Ž., Erić, S., Vibracije i buka: uzroci, dijagnostika, zaštita, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- [17] Adamović, Ž., Tehnologija održavanja, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2009.
- [18] Adamović, Ž., Totalno održavanje, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.
- [19] Adamović, Ž., Milošević, Ž., Osnovi teorije mehanizama i robota, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
- [20] Adamović, Ž., Metodologija naučno-istraživačkog rada, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2011.
- [21] Adamovic, Z., Computerized maintenance management systems and preventive maintenance, 4th International Symposium on Intelligent manufacturing systems, Sakarya, 6-8 September, 2004, pp. 192-198.
- [22] Adamovic, Z., Expert systems for maintenance of technic systems, Manufacturing and management in 21th century, Skopje, 16-17 September, 2004.

- [23] Adamovic, Z., Malic, D., Miladinovic, Z., Analysis of the impact of time and maintenance strategy on availability of complex technical system, 4th International Symposium of Industrial Engineering, Belgrade, 10-11 December, 2009, pp. 100-105.
- [24] Adamovic, Z., Malic, D., Reliability monitoring of technical systems by means of a PC-software, Proceedings/6th International Symposium series on Tools and Methods of Competitive Engineering, Vol. 2, Chapter 6, Ljubljana, Slovenia, 18-22 April, 2006.
- [25] Adamovic, Z., The development of maintenance of technical systems in European industry, 9th International Symposium, Timisoara (Romanija), 15-16 November, 2007.
- [26] Adamović, Z., Machine condition monitoring system and predictive maintenance applications, Proceedings/European Conference on Tribology and Final conference COST 532, Ljubljana, Slovenija, 12-15 June, 2007, pp. 1045-1051.
- [27] Adamović, Ž., Ilić, B., Primena dijagnostičkih ispitivanja u cilju povišenja nivoa pouzdanosti i unapređenja energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji, Energetske tehnologije, Vol., No 1-2, Zrenjanin, 2014.
- [28] Adamović, Ž., Ristić, S., Radovanović, D., Kompjuterski integrisano održavanje, Društvo za tehničku dijagnostiku Srbije, Beograd, 2004.
- [29] Abu-Rub, H.; Moin Ahmed, S.; Iqbal, A.; Toliyat, H.A.; Rahimian, M.M.; Incipient bearing fault detection for three-phase Brushless DC motor drive using ANFIS, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, 5-8 September 2011, pp. 620-625.
- [30] Ai, X., Nixon, H. P.: A bearing life prediction model for debris damaged rolling element bearing surfaces, Presented at 1999 ASME/STLE International Tribology Conference, Kissimmee, Fla, 1999.
- [31] Antonelli, A., Boccaletti, C., Duni, G., Fabbri, G., Remote control and monitoring of an induction motor, Proceedings/20th International Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, Faro (Portugal), 2007.
- [32] Antonino-Daviu, J., Aviyente, S., Strangas, E.G., Riera-Guasp, M., Roger-Folch, J., Perez, R.B., An EMD-based invariant feature extraction algorithm for rotor bar condition monitoring, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, 5-8 September 2011, pp. 669-675.
- [33] Antonino-Daviu, J., Aviyente, S., Strangas, E., Riera-Guasp, M., A scale invariant algorithm for the automatic diagnosis of rotor bar failures in induction motors, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 27-30.06.2011, pp. 496-501.
- [34] Antunović, N., Nikšić, P., Primena i značaj nadzorno-dijagnostičkog sistema u RITE Gacko, XL naučno stručni skup: Održavanje mašina i opreme, 18-26.6.2015, pp. 304-309.
- [35] Ašonja, A., Adamović, Ž., Održavanje kotrljajnih ležajeva, Duga knjiga, Sremski Karlovci, 2010.
- [36] Awadallah, M. A., Morcos, M. M., Automatic diagnosis and location of open-switch fault in brushless DC motor drives using wavelets and neuro-fuzzy systems, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No 1, 2006, pp. 104-111.
- [37] Bajčetić, P., Mijatović, V., Cvetić, V., Simendić, Z. Analiza rada sistema daljinskog nadzora i upravljanja srednjenaponskom distributivnom mrežom u elektrodistribuciji Sombor, 28. Savetovanje JUKO CIGRE, Rb. 5-13, 30.9-5.10.2007, Vrnjačka Banja.
- [38] Ban, D., Automatizirano ispitivanje velikih asinkronih strojeva za termoelektrane, V savjetovanje CIGRE, Cavtat, 4-8 studeni 2001, pp. 101-109.
- [39] Batkauskas, V., Batkauskas, V., Adaptation of a Remote Control System for Data Exchange using a Mobile Data Channel, Electronics and electrical Engineering, Vol. 75, No 3, Kaunas, 2007.

- [40] Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C. and Capolino, G., Advances in diagnostic techniques for induction machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No 12, 2008, pp. 4109 - 4126.
- [41] Benbouzid, M. E. H. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Fault Detection, IEEE trans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No 5, October 2000. pp. 984 – 993.
- [42] Betta, G., Liguori, C., Paolillo, A., Pietrosanto, A., A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No 6, 2002, pp. 1316-1322.
- [43] Bianchini, C., Immovilli, F., Cocconcelli, M., Rubini, R., Bellini, A., Fault Detection of Linear Bearings in Brushless AC Linear Motors by Vibration Analysis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No 5, 2011, pp. 1684-1694.
- [44] Bouman, E. Morskieft, E. Haar, P. Pieters, SIL Classification for Intelligent Motor Control Systems in Accordance with the ATEX Directive, Proceedings/5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, Weimar, 2008, pp. 144-149.
- [45] Briz, F.; Degner, M. W.; Diez, A. B.; Guerrero, J.M.; Online diagnostics in inverter-fed induction machines using high-frequency signal injection, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No 4, 2004, pp. 1153-1161.
- [46] Brković A., Jeremić, B., Todorović, P., Proso, U., Primena termovizije kao alata za unapređenje proaktivnog održavanja u WCM konceptu, 36. Nacionalna konferencija o kvalitetu, Kragujevac, 20-22 maj 2009.
- [47] Callaway, E., H.: Wireless sensor networks, architectures and protocols, Auerbach Publications, A. CRC Press Company, 2004.
- [48] Carullo, S.P., Nwankpa, C.O., Experimental validation of a model for an information-embedded power system, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No 3, 2005, pp. 1853-1863.
- [49] Ceban, A., Pusca, R., Romary, R., Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis, IEEE trans. on Industrial Electronics, Vol. 59, No 5, May 2012. pp. 2082-2093.
- [50] Chetwani, S. H., Sharma, M. K., Shah, M.K., Multi-Technology NDE Approach to Motor Condition Monitoring, 03.01.2009.
- [51] Comolli, L.; Saggin, B.; Evaluation of the sensitivity to mechanical vibrations of an IR Fourier spectrometer, Review of Scientific Instruments, Vol. 76, No 12, 2005, pp. 123112-123112-8.
- [52] Concari, C., Franceschini, G., Tassoni, C., Differential Diagnosis Based on Multivariable Monitoring to Assess Induction Machine Rotor Conditions, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No 12, 2008, pp. 4156-4166.
- [53] Čukić, N., Kisić, S., Mandić-Lukić, J., Bezbednost SCADA sistema, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, March 2012., pp. 396 -400
- [54] Čorak, T., Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [55] Davidson, E. M., McArthur, S. D. J., McDonald, J. R., Cumming, T., Watt, I., Applying multi-agent system technology in practice: automated management and analysis of SCADA and digital fault recorder data, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No 2, 2006, pp. 559-567.
- [56] Denić, D., Randelović, I., Živanović, D., Računarski merno-informacioni sistemi u industriji, Elektronski fakultet, Niš, 2005.
- [57] Donghyun Choi, Hakman Kim, Dongho Won, Seungjoo Kim, Advanced Key-Management Architecture for Secure SCADA Communications, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No 3, 2009, pp. 1154-1163.

- [58] Doosoo Hyun, Jongman Hong, Sang Bin Lee, Kwonhee Kim, Wiedenbrug, E.J., Teska, Automated Monitoring of Airgap Eccentricity for Inverter-Fed Induction Motors Under Standstill Conditions, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No 3, 2011, pp. 1257-1266.
- [59] Ferdous, R., Khan, F. I., Veitch, B., Amyotte, P. R., Methodology for computer – aided Fault Tree Analysis, Trans IChemE, Process Safety and Environmental Protection 85 (B1), 2007, pp. 70-80.
- [60] Finley, W. R., Hodowanec, M. M., An analytical approach to solving motor vibration problems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No 5, 2000, pp. 1467-1480.
- [61] Fiser, R., Lavric, H., On-line Detection and Diagnostics of Induction Motor Rotor Faults Using Spectral Analyses of Stator Current, 5th International Symposium: Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering, Kuressaare (Estonia), 14-19 January, 2008.
- [62] Frosini, L., Bassi, E., Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No 1, 2010, pp. 244 - 251.
- [63] G. B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein, R.D. Endicott, M.W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No 4, Dec. 1988, pp. 873-879.
- [64] Gašparac, I., Vražić, M., Sustav motrenja rotacijskih strojeva, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.
- [65] Gavranić, I., Dijagnostika protueksplozijski zaštićenih elektromotornih pogona, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.
- [66] Gavranić, I., Procjena rizika primjene elektromotornih pogona u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, Doktorska disertacija, Fakultet Elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2010.
- [67] Goble, W. M., Control Systems Safety Evolution and Reliability, 2009.
- [68] Harris, T. A., Rolling bearing analysis, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [69] Hill, J. L., System architecture for wireless sensor networks, Ph. D. Dissertations, University of California, Berkeley, 2003.
- [70] Ilic, B., Adamovic Z., Savic, B., Stankovic N., Dangares of stray current to information and communication technologies in electrical installations with TN-C-S system of distribution, Proceedings/19th Telecommunications forum TELFOR, Belgrade, Serbia, November 22-24, 2011, pp. 1020-1023.
- [71] Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, Lj., Savic, B., Stankovic, N., Application of the method of thermography in diagnostics of power plants, Proceedings/ II International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection, Zrenjanin, 31st. October, 2012, pp. 157-164.
- [72] Ilic, B., Adamovic, Z., Radovanovic, LJ., Savic, B., Stankovic, N., Thermographic investigations of power plant elements, Proceedings/5th International Symposium on Industrial Engineering, Belgrade, Serbia, June 14-15, 2012, pp. 291-296.
- [73] Ilic, B., Adamovic, Z., Savic, B., Influence automated diagnostic testing reliability of technical systems in process industry, Proceedings/III International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Jahorina, 04.03-06.03.2013, pp. 542- 551.
- [74] Ilic, B., Savic, B., Zaštita od strujnih udara uzrokovanih lutajućim strujama, Međunarodna konferencija Bezbednosni inženjering, Novi Sad, 2-3 oktobar, 2014, pp. 281-288.
- [75] Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Primena softverskog paketa Testpoint u dijagnostici stanja asinhronih motora metodom spektralne analize osovinskog napona, Info M, Vol. 12, No 45, Beograd, 2013, pp. 42-45.
- [76] Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Automatizovana termografska ispitivanja kliznih i kotrljajnih ležajeva, Tehnička dijagnostika, Banja Luka, Vol. 4, No 1-2, pp. 10-19, 2012.

- [77] Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Automatizovana vibroakustička ispitivanja kliznih i kotrljajnih ležajeva, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, pp. 13-24, Smederevo, 2012.
- [78] Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina metodom spektralne analize struje statora, Menadžment znanja, Vol. 7, No 1-2, Smederevo, 2012, pp. 3-12.
- [79] Ilić, B., Adamović Ž., Savić, B., Stanković, N., Razvoj modela automatizovanog dijagnostičkog sistema i njegov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 1-2, Banja Luka, 2012, pp. 20-40.
- [80] Ilić, B., Adamović, Z., Savić, B., Stanković, N., Procena termičkog stanja elektroenergetske opreme u procesnoj industriji metodom termografije, Journal of Engineering & Processing Management, Vol. 4, No 1, Zvornik, 2012, pp. 163-176.
- [81] Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, M., Savić, B., Automatizovani dijagnostički sistemi komunikacionih uređaja, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [82] Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Automatizovana dijagnostička ispitivanja mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 11-18.
- [83] Ilić, B., Adamović, Ž., Jevtić, N., Primena metoda veštačke inteligencije prilikom donošenja dijagnostičkih zaključaka o stanjima mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 11, No 3, Beograd, 2012, pp. 33-40.
- [84] Ilić, B., Adamović, Ž., Kenjić, Z., Blaženović, R., Obnovljivi izvori energije i energetska efikasnost: automatizovana dijagnostika postrojenja obnovljivih izvora energije, povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema automatizovanom dijagnostikom, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2013.
- [85] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Ašonja, A., Automatizovani dijagnostički sistemi gasovoda, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [86] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Automatizacija termografskih dijagnostičkih kontrola elektroenergetskih postrojenja primenom fazi logike kao metode veštačke inteligencije, Drugi naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.
- [87] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Poređenje energetske efikasnosti i troškova održavanja električnih i drugih automobila, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 4, Beograd, 2014, pp. 15-23.
- [88] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Predlog originalnog modela teledijagnostike električnih automobila, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 4, Beograd, 2014, pp. 39-49.
- [89] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetske efikasnosti elektroenergetskih postrojenja, Tehnička dijagnostika, Vol. 13, No 3, Beograd, 2014, pp. 17-26.
- [90] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Grujić, G., Uticaj termografskih dijagnostičkih kontrola na pouzdanost i energetske efikasnosti elektroenergetskih postrojenja, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.
- [91] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Janjić, N., Impact of monitoring of tribological processes by IR thermographic inspections on the reliability and energy efficiency of coupled machines, Journal of the Balkan Tribological Association, Sofia, Bulgaria, Vol. 21, No 4, 2015. (rad prihvaćen za objavljivanje)
- [92] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Korozija gasovoda uzrokovana lutajućim strujama jednosmerne električne vuče, Gas, Vol. 18, No 1, Beograd, 2013, pp. 33-38.
- [93] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Oštećenja gasovoda usled dejstva lutajućih struja različitog porekla i njihov uticaj na pouzdanost rada tehničkog sistema, Održavanje mašina, Vol. 8, No 1-2, Smederevo, 2011, pp. 64-70.

- [94] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Paunjorić, P., *Automatizovani dijagnostički sistemi električnih mašina*, Srpski akademski centar, Novi Sad, 2012.
- [95] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Poređenje energetske efikasnosti električnih i drugih automobila*, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.
- [96] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Povećanje energetske efikasnosti i pouzdanosti postrojenja u procesnoj industriji automatizovanom dijagnostikom*, Zbornik radova/XXXVI Majski skup održavalaca Srbije - „Merenje indikatora performansi održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 31.05.2013.
- [97] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Predlog mera za zaštitu gasovoda od korozije uzrokovane lutajućim strujama*, Gas, Vol. 17, No 4, Beograd, 2012, pp. 5-11.
- [98] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Predlog originalnog modela teledijagnostike i daljinskog nadzora električnih automobila*, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: Vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.
- [99] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom procene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom*, Drugi naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 12. Decembar 2014.
- [100] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Primena fazi logike kao metode veštačke inteligencije prilikom procene stanja aparata elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom*, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.
- [101] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Razvoj softvera za simulaciju porasta nivoa pouzdanosti elektroenergetskih postrojenja termografskom dijagnostikom*, XI Konferencija „Tehnička dijagnostika termoelektrana, solarnih elektrana, toplana i hidroelektrana“, Vrnjačka Banja, 07.11.2014.
- [102] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Oštećenja gasovoda uzrokovana elektroenergetskim efektima iz okruženja i njihov uticaj na pouzdanost rada tehničkog sistema*, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [103] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Primena automatizovanih dijagnostičkih sistema u dijagnostici stanja mašina u procesnoj industriji*, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [104] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Primena metoda veštačke inteligencije u dijagnostici stanja ležajeva mašina u procesnoj industriji*, Tehnička dijagnostika, Vol. 5, No 1-2, Banja Luka, 2013, pp. 32-38.
- [105] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Primena metoda veštačke inteligencije u dijagnostici stanja ležajeva mašina*, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [106] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina*, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 40-46.
- [107] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., *Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji*, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02. 06.2012.
- [108] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., *Unapređenje energetske efikasnosti i pouzdanosti tehničkih sistema zgrada automatizovanim dijagnostičkim ispitivanjima*, Tehnička dijagnostika, Vol. 6, No 1-2, Banja Luka, 2014, pp. 17-24.

- [109] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Unapređenje energetske efikasnosti tehničkih sistema u industriji automatizovanom dijagnostikom, Zbornik radova/I Naučno-stručni skup „Energetska efikasnost“, Novi Beograd, 25.10.2013.
- [110] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Uticaj automatizovane dijagnostike na energetske efikasnost i pouzdanost tehničkih sistema zgrada, Tehnička dijagnostika, Vol. 12, No 2, Beograd, 2013, pp. 26-33.
- [111] Ilić, B., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Tehno-ekonomska analiza efekata primene novog modela automatizovanog dijagnostičkog sistema u dijagnostici stanja ležajeva mašina, Zbornik radova/XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [112] Ilić, B., Petrov, T., Adamović, Ž., Savić, B., Stanković, N., Vrste i uzroci oštećenja kliznih i kotrljajnih ležajeva mašina u procesnoj industriji, Tehnička dijagnostika, Vol. 4, No 3-4, Banja Luka, 2012, pp. 11-16.
- [113] Ilić, B., Savić, B., Katodna zaštita cevovoda u zoni dejstva lutajućih struja, Zbornik radova/II Međunarodni kongres „Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji“, I-51, Jahorina, 09-11.03. 2011, pp. 473-481.
- [114] Ilić, B., Savić, B., Opasnosti od lutajućih struja po računare i računarske mreže, Zbornik radova/18 Međunarodni IEEE Telekomunikacioni forum TELFOR 2010, Beograd, 23-25.11. 2010, pp. 905-909.
- [115] Ilić, B., Savić, B., Usklađivanje rada katodne zaštite cevovoda u zoni dejstva lutajućih struja sa radom električne instalacije, Zbornik radova/II Međunarodni kongres „Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji“, I-52, Jahorina, 09-11.03. 2011, pp. 482-488.
- [116] Ilić, B., Savić, B., Uticaj lutajućih struja na informaciono komunikacione tehnologije, Zbornik radova/IX Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh 2010, Vol. 9, Ref. D-13, Jahorina, 17-19.03.2010, pp. 413-417.
- [117] Ilić, B., Tomić, M., Došić, A., Korozija gasovoda izazvana lutajućim strujama, Zbornik radova/I Međunarodni kongres „Inženjerstvo, materijali i menadžment u procesnoj inustriji“, IT-73, Jahorina, 14-16.10.2009, pp. 419-423.
- [118] Introduction aux reseaux locaux industriels, <http://slideplayer.fr/slide/502492/>, 2015
- [119] Ilonen, J.; Kamarainen, J.-K.; Lindh, T.; Ahola, J.; Kalviainen, H.; Partanen, J.; Diagnosis tool for motor condition monitoring, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No 4, 2005, pp. 963-971.
- [120] Jankowski, T. A., Prenger, F. C., Hill, D. D., O'Bryan, S. R., Sheth, K. K., Brookbank, E. B., Hunt, D. F.A., Orrego, Y. A., Development and Validation of a Thermal Model for Electric Induction Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No 12, 2010, pp. 4043 – 4054.
- [121] Jeftenić, B., Ristić, L., Bebić, M., Štatkić, S., Jevtić, D., Mihajlović, I., Rašić, N. Realizacija rada sistema tračnih transportera sa daljinskim upravljanjem, Integritet i vek konstrukcija, Vol. 10, No 1, 2010, pp. 21-30.
- [122] Jie Liu, Wang, W., Golnaraghi, F., An Enhanced Diagnostic Scheme for Bearing Condition Monitoring, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No 2, 2010, pp. 309-321.
- [123] Jongman Hong, Doosoo Hyun, Sang Bin Lee, Ji-Yoon Yoo, Kwang-Woon Lee, Automated Monitoring of Magnet Quality for Permanent-Magnet Synchronous Motors at Standstill, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No 4, 2010, pp. 1397-1405.
- [124] Kang, P., Birtwhistle, D., Condition monitoring of power transformer on-load tap-changers. I. Automatic condition diagnostics, IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No 4, 2001, pp. 301-306.

- [125] Kezunović, A. Xu, X., Won, D., Improving circuit breaker maintenance management tasks by applying mobile agent software technology, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Vol. 2, 2002, pp. 782-787.
- [126] Kompjuterizirana „on-line” dijagnostika elektromehaničkog stanja visoko naponskih asinkronih motora u postrojenjima Petrokemija d.o.o. Kutina, faza II, elaborat br. ZES 621, Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb, Kutina i Zagreb, studeni 2008.
- [127] Kovačević, D., Miladinović, N., Milić, S., Polužanski, V., Kožić, J., Dijagnostički centar i opšti principi informacionih tehnologija u daljinskom nadzoru i dijagnostici stanja opreme u elektroenergetici, Infoteh, Vol. 10, Ref. D-17, Jahorina, mart 2011, pp. 354-357.
- [128] Kulić, F., Jeličić, Z., Francuski, Lj., Lendak, I., Zarić, S., Jedno rešenje sistema daljinskog nadzora i upravljanja vodovodnim sistemom upotrebom bežične komunikacije, Vodoprivreda, Vol. 39, No 5-6, Beograd, 2007, pp. 303-309.
- [129] Komunikacija u industrijskim sistemima, Elektronski fakultet Niš, 2015.
- [130] Kusunoki, K., Imai, I., Negi, T., Matsuda, N., Ushijima, K., Proposal and Evaluation of a Method of remote Access to FA Controllers via the Internet, Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 85, No 6, 2002.
- [131] Landry, M., Leonard, F., Landry, C., Beauchemin, R., Turcotte, O., Brikci, F., An Improved Vibration Analysis Algorithm as a Diagnostic Tool for Detecting Mechanical Anomalies on Power Circuit Breakers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No 4, 2008, pp. 1986-1994.
- [132] Lazić, M., Organizacija daljinskog nadzora uređaja energetske elektronike telekomunikacionih sistema, IV Međunarodni naučno-stručni Simpozijum Infoteh, Jahorina, mart 2005.
- [133] Ličen, H., Zuber, N., Prediktivno održavanje rotirajuće opreme na bazi merenja i analize mehaničkih vibracija, Tehnička dijagnostika, Vol. 6, No 1, Beograd, 2007, pp. 13-20.
- [134] Ličen, H., Zuber, N., Proaktivno održavanje hidroturbinske opreme primenom 01db-Metravib OneproD koncepta, Tehnička dijagnostika, Vol. 7, No 1, Beograd, 2008. pp. 13-20.
- [135] Local Area Network, <http://book.tsp.edu.rs/mod/page/view.php?id=795>, 2015
- [136] Lukić, I., Praćenje stanja i dijagnostika otkaza kliznih ležaja, XXXV Konferencija Majski skup održavalaca Srbije: „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [137] Mandić, G., Osnovni principi infracrvene termografije, Integritet i vek konstrukcija, Vol. 6, No 1-2, Beograd, 2006, pp. 15-23.
- [138] Man-Yong, C.I, Jung-Hak, P., Ki Soo, K., Won-Tae, K., Application of Thermography to analysis of thermal stress in the NDT for compact tensile specimen, 12th A-PCNDT 2006 – Asia-Pacific Conference on NDT, Auckland (New Zealand), 5-10 November 2006.
- [139] Marković-Petrović, J., Stojanović, M., Analiza servisa daljinskog upravljanja u telekomunikacionim mrežama u elektroprivredi, 19 Međunarodni IEEE Telekomunikacioni forum TELFOR, Beograd, 22-24.11.2011.
- [140] Matić, D., Detekcija otkaza tipa slomljene šipke kod asinhronih motora primenom metoda računarske inteligencije, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [141] McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Hossack, J. A., McDonald, J. R., Automating power system fault diagnosis through multi-agent system technology, 37th International Conference on Proceedings of the Annual Hawaii, 5-8 January 2004, pp. 8.
- [142] Mercurio, A., Di Giorgio, A., Cioci, P., Open-Source Implementation of Monitoring and Controlling Services for EMS/SCADA Systems by Means of Web Services— IEC 61850 and IEC 61970 Standards, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No 3, 2009, pp. 1148-1153.
- [143] Mijailović, V., Nahman, J., Pouzdanost sistema za distribuciju električne energije, Akademska misao, Beograd, 2009.

- [144] Miletić, A., Dijagnostičke metode i kriteriji za ocjenu elektromehaničkog stanja asinkronog stroja, Magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2002.
- [145] Milić, S., Miladinović, N., Daljinski monitoring temperature u elektroenergetskim sistemima, VIII Međunarodni naučno-stručni Simpozijum Infoteh, Vol. 8, Ref. D-11, Jahorina, mart 2009, pp. 333-336.
- [146] Milošević, D., Adamović, Z., Ašonja, A., System reliability in energetics, Serbian academic center, Novi Sad, 2012.
- [147] Min-Chun Pan, Po-Ching Li, Yong-Ren Cheng, Remote online machine condition monitoring system, Measurement, Vol. 41, No 8, 2008, pp. 912-921.
- [148] Mikro Kontrol, Nadzorno-upravljački sistem tehnološke linije konvertora 3, u US Steel Serbia, Smederevo 2015.
- [149] Mitić, D., Plavšić, B., Analiza prenosa podataka u sistemu za daljinski nadzor i upravljanje uređajima energetske elektronike, 17 Međunarodni IEEE Telekomunikacioni forum TELFOR, Beograd, 2009.
- [150] Mobley, R. K., An Introduction to Predictive Maintenance, Butterworth Heinemann, Boston, 2002, pp.459.
- [151] Mol, T., Productive Safety Management, Butterworth Heinemann, Oxford, 2003, pp. 435.
- [152] N. M. Elkasabgy, A. R. Eastham and G. E. Dawson, "Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine", IEEE trans. on Industry Applications, Vol. 28, No 1, January/February 1992, pp. 165 - 171.
- [153] Nandi, S., Toliyat, H. A., Xiaodong Li; Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No 4, 2005, pp. 719-729.
- [154] Novinc, Ž., Halep, A., Tehnička dijagnostika i monitoring u industriji, Kigen, Zagreb 2010.
- [155] Pašagić, V., Mužević, M., Kelenc, D., Infrared Thermography in Marine Applications, Brodogradnja, Vol. 59, 2008, pp. 123-130.
- [156] Pažameta, D., Pavliša, S., Daljinski nadzor i upravljanje sustavom katodne zaštite preko VPN/GPRS mreže i optičkog komunikacijskog sustava, Zagreb, 2010 pp. 23-29.
- [157] Petitfrere, C. Proust, Analysis of ignition risk on mechanical equipment in ATEX, Proceedings of the 4th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, Paris, 2007, pp. 147-155.
- [158] Petrovic-Gegic, A., Ilic, B., Savic, B., Analysis of the impact of various factors on the efficiency of the photovoltaic panels, XIII International scientific-professional symposium Infoteh, Vol.13, Jahorina, 19-21 March, 2014, pp. 315-320.
- [159] Pineda-Sanchez, M., Riera-Guasp, M., Antonino-Daviu, J.A., Roger-Folch, J., Perez-Cruz, J.; Puche-Panadero, R., Diagnosis of Induction Motor Faults in the Fractional Fourier Domain, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 59, No 8, 2010, pp. 2065-2075.
- [160] Profibus (process field bus), <http://www.icpdas.com/root/product/solutions/industrial>, 2015.
- [161] Queiroz, C., Mahmood, A., Tari, Z., SCADA Sim—A Framework for Building SCADA Simulations, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 2, No 4, 2011, pp. 589-597.
- [162] Radaković, Z., Jovanović, M., Specijalne električne instalacije, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [163] Radovanovic, Lj., Adamovic, Z., Maintenance diagnostic model for ventilation mill of thermal power plant, Proceedings/I International Conference – Process Technology And Environmental Protection, pp. 167-172, Zrenjanin, 7th December, 2011.
- [164] Radovanović, Lj., Adamović, Ž., Speight, J., G., Risk analysis for increasing safety in power plants, Energy source, Part B: Economics, Planning and policy, USA, 2011.

- [165] Ramović, R.: Pouzdanost sistema: elektronskih, telekomunikacionih i informacionih, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2005.
- [166] Rautee, J., Lienesch, F., Liew T., Safety improvements of non-sparking and increased safety motors, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, Weimar, 2008, pp. 179-187.
- [167] Rodolfo, V., Scaburri, A., Proper Maintenance for Electrical Plants in Hazardous Areas with Potentially Explosive Atmosphere, Proceedings of the 5th Petroleum and Chemical Industry Conference Europe - Electrical and Instrumentation Applications, Weimar, 2008, pp. 77-81.
- [168] Rogres, L., Bichard, S., Thermographu-expectations and achievementand analisys of present rolles and in minent changes, National Coference on Condition monitoring, London, 1983.
- [169] Roth, P., Diagnosis od automata failures, IBM Journal od Research and Development, 10, 1966.
- [170] Rumbak, S., Istraživanje učinaka oštećenja kotrljajnog ležaja u eksplozivnoj atmosferi, Doktorska disertacija, Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [171] Rumbak, S., Bratko, S., Dijagnostička ispitivanja u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, Bilten Ex-Agencije Vol. 35, No 1, Zagreb, 2007, pp. 80-88.
- [172] S. Chen and R. Živanović, Modeling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques, European Transactions on Electrical Power, 2009.
- [173] Savić, B., Adamovic Z., Ilic, B., Grujic, G., Analysis of influence thermographic diagnostic controls in increasing the reliability of computer systems, Proceedings/ International 22th Telecommunications forum TELFOR, Belgrade, Serbia, November 25-27, 2014, pp. 1075-1078.
- [174] Savić, B., Ilic, B., Djukic, D., Protection and preventive maintenance of computer information systems, XIII International scientific-professional symposium Infoteh, Vol. 13, Jahorina, 19-21 March, 2014, pp. 897-902.
- [175] Savić, B., Ilić, B. Stanković, N., Tehnologija održavanja i informacione tehnologije, Održavanje mašina, Vol. 8, No 1-2, Smederevo, 2011, pp. 71-78.
- [176] Savić, B., Ilić, B., Analysis effects IR thermographic diagnostic inspections on reliability and energy efficiency coupled machines, IV International Congress "Engineering, Environment and Materials in Processing Industry", Proceedings, pp. 168-175, Jahorina, 04.03-06.03.2015.
- [177] Savić, B., Ilić, B., Opasnosti od požara usled dejstva lutajućih struja, Zbornik radova/II Međunarodna naučna konferencija „Bezbednosni inženjering“, Novi Sad, 21-22.10.2010, pp. 155-162.
- [178] Savić, B., Ilić, B., Pouzdanost računarskog sistema, Zbornik radova/ XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum Infoteh, Vol. 11, RSS-6-7, Jahorina, 21-23.03. 2012, pp. 824-829.
- [179] Savić, B., Ilić, B., Primena termografske dijagnostike računara u informacionim sistemima u okviru koncepcije održavanja prema stanju, XXXVII Majski skup održavalaca Srbije „Nova koncepcija održavanja: vibrodijagnostičko održavanje tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 30.05.2014.
- [180] Savić, B., Ilić, B., Stanković, N., Određivanje pouzdanosti računarskih komponenti, XXXV Konferencija „Poslovnih komunikacija i proizvodnog inženjerstva“, Zbornik radova, Vrnjačka Banja, 01-02.06.2012.
- [181] Savić, B., Stanković, N., Analiza vibracija elektromotora u radu i preduzimanje mera u cilju njihovog umanjavanja i otklanjanja, Savetovanje - Majski skup održavalaca Srbije, Vrnjačka Banja, maj 2005.
- [182] Seungdeog Choi, Akin, B., Rahimian, M. M., Toliyat, H.A., Performance-Oriented Electric Motors Diagnostics in Modern Energy Conversion Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No 2, 2012, pp. 1266-1277.

- [183] Shane, M., Johnson, Infrared thermography and thermoelastic stress analysis of composite materials and structural systems, A Thesis Georgia Institute of Technology, August 2006.
- [184] Smart-instruments-fieldbus-ethernet, <http://www.slideshare.net/idctechnologies/smart-instruments-fieldbus-ethernet-and-wireless>, 2015
- [185] Song, J. H., Noh, H. G., Akira, S. M., YU, H. S., Kang H. Y., and Yang, S. M., Analysis of effective nugget size by infrared thermography in spot weldment, International Journal of Automotive Technology, Vol. 5, No 1, 2004, pp. 55-59.
- [186] Stanković, M., Adamović, Ž., Savić, B., Ilić, B., Tehnička dijagnostika parnih turbina na bazi rizika, Zbornik radova/XXXVI Majski skup održavalaca Srbije - „Merenje indikatora performansi održavanja tehničkih sistema u kompanijama“, Vrnjačka Banja, 31.05.2013.
- [187] Stanković, N., Adamović, Ž., Ilić, B., Savić, B., Značaj tehničke dijagnostike za pouzdan rad parnih turbina, Tehnička dijagnostika, Vol. 12, No 1, Beograd, 2013, pp. 20-30.
- [188] Stegic, M., Vrankovic, N., On-line Vibration Monitoring the Stator End-windings on Turbogenerators, EEDEEQ, Zagreb, 2001, pp. 22-25.
- [189] Stević, Z., Rajčić, M., Antić, V., Damjanović, Z., Računarski upravljani termovizijski sistem za monitoring i dijagnostiku stanja u elektrodistributivnim postrojenjima, V Međunarodni naučno-stručni Simpozijum Infoteh, Vol. 5, Ref. D-2, Jahorina, mart 2006, pp. 225-229.
- [190] Stipetic, S., Kovacic, M., Hanic, Z., Vrazic, M., Measurement of Excitation Winding Temperature on Synchronous Generator in Rotation Using Infrared Thermography, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No 5, 2012, pp. 2288-2298.
- [191] Šaranović, I., Novak, J. Dijagnostika vibracionog stanja hidroturbina primjenom koncepata veštačke inteligencije, I Međunarodni naučno-stručni Simpozijum Infoteh, Vol. 2, Ref. C-11, Jahorina, mart 2002, pp. 215-218.
- [192] Švalić, S., Boras, I., Infracrvena termografija, Fakultet Strojarnstva i brodogradnje sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [193] Timčenko, V., Pernić, G., Vučurević, V., Dimitrijević, M., Primena GSM/GPRS komunikacije u sistemima upravljanja i daljinskog nadzora, 15 Međunarodni IEEE Telekomunikacioni forum TELFOR, Beograd, novembar 2007.
- [194] Ummenhofer, T., Medgenberg, J., On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints, International Journal of Fatigue, Vol. 31, No 1, 2009, pp. 130-137.
- [195] Voskresenski, V., Daljinsko praćenje dijagnostičkih parametara i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema, doktorska disertacija, Tehnički fakultet “Mihajlo Pupin” Zrenjanin, 2011.
- [196] Wang, M. H., Application of extension theory to vibration fault diagnosis of generator sets, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, No 4, 2004, pp. 503-508.
- [197] Wang, W., Tse, P.W., Lee, J., Remote machine maintenance system through Internet and mobile communication, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 31, No 7-8, 2007, pp. 783-789.
- [198] Wedler, G., Brink, A., Maierhofer, Ch., Röllig, M., Weritz F., and Wiggerhauser, H., Infrared Thermography in Civil Engineering - Quantitative Analysis by Numerical Simulation, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 2003.
- [199] Wiedenbrug, E. J., Ramme, A., Matheson, E., von Jouanne, A., Wallace, A. K., Modern online testing of induction motors for predictive maintenance and monitoring, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No 5, 2002, pp. 1466-1472.
- [200] Williams, T. et al., Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing, Mechanical systems and signal processing, Vol. 15, No 5, pp. 979-993, 2001.

- [201] Yao, A.W.L, Strombeck S.D., Chi J.S.C., Development of a mobile manufacturing system with PDA and PLC, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 25, 2005, pp. 723-729.
- [202] Zuber, N., Ličen, H., Mogućnosti primene metoda veštačke inteligencije u automatizaciji vibrodijagnostičkih metoda, Tehnička dijagnostika, No 2, Beograd, 2011.
- [203] Zuber, N., Šostakov, R., Implementacija daljinskog monitoringa mašina po stanju, Konferencija „Održavanje 2012“ Zenica, B i H, 13. - 16 juni 2012.
- [204] Zuber, N., Šostakov, R.: Daljinski monitoring stanja rotirajućih mašina, Tehnička dijagnostika, Beograd, vol. 11, br. 1, str. 9-16, 2012.
- [205] Žarković, M., Automatizacija termovizijskog postupka za monitoring i dijagnostiku elemenata prenosne mreže Srbije, master rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd. 2011.
- [206] Žarković, M., Stojković, Z., Automatizacija termovizijskog postupka u monitoringu i dijagnostici elemenata prenosne mreže, Infoteh-Jahorina, Vol. 11, mart 2012.

Biografija kandidata



Mr Božo M. Ilić, dipl. inž. el. tehn., rođen 07.01.1966. god., u Trnovici, opština Zvornik, Republika Srpska, BiH. Oženjen, otac dve ćerke. Živi u Loznici, radi u Zvorniku.

Osnovnu školu završio u Kozluku, opština Zvornik, 1981. Srednju elektrotehničku školu završio u Tehničkom školskom centru Zvornik, 1985. Elektrotehnički fakultet smer elektroenergetski upisao 1986. u Tuzli, gde je među prvima u generaciji diplomirao 1991., naziv diplomskog rada: "Specijalni električni uređaji za funkcionisanje rotornog bagera". Postdiplomske studije upisao 2000. na Tehnološkom fakultetu u Zvorniku, gde je prvi u generaciji magistrirao 2004., naziv magistarske teze: "Uticaj lutajućih struja na metalne elemente tehničko-tehnološkog sistema". Senat Univerziteta u Novom Sadu mu je 2012 god., odobrio izradu doktorske disertacije, pod nazivom: „Automatizovani dijagnostički modeli i njihov uticaj na pouzdanost tehničkih sistema“.

Od 1991 godine radi kao profesor elektrotehničke grupe predmeta. Radio je u srednjim školama u: Loznici (1991-1993), Zaječaru (1993-1994), Krupnju (1991-1998). Trenutno radi u Tehničkom školskom centru Zvornik (1998-).

Predmeti u srednjoj školi koje je predavao ili predaje: Sistemi automatskog upravljanja, Automatsko upravljanje elektromotornim pogonima, Automatsko upravljanje razvodnim postrojenjima, Elementi automatizacije, Baze podataka, Električne mašine, Tehnologija izrade mašina, Tehnologija izrade kablova, Osnove elektrotehnike, Električne instalacije, Elektromotorni pogoni, Električna merenja, Razvodna postrojenja, Električne mreže, Električni aparati, Električni uređaji na motornim vozilima, Elektronika, Električna oprema itd.

Objavio je:

- 1 rad u međunarodnom časopisu sa SCI liste,
- 24 rada u naučno-stručnim časopisima nacionalnog značaja,
- 22 rada na naučno-stručnim konferencijama nacionalnog značaja (1 uvodno predavanje),
- 21 rad na naučno stručnim konferencijama međunarodnog značaja i
- 12 monografija nacionalnog značaja.

Objavio je radove u časopisima nacionalnog značaja: Tehnička dijagnostika (10), Održavanje mašina (5), Menadžment znanja (4), Gas (2), Info M (1), Energetske tehnologije (1) i Journal of Engineering & Processing Management (1).

Objavio je radove na konferencijama nacionalnog značaja: Majski skup održavalaca Srbije (2011, 2012, 2013 i 2014) i Energetska efikasnost (2013 i 2014).

Objavio je radove na konferencijama međunarodnog značaja: Telfor (2010, 2011 i 2014), Infotech (2009, 2010, 2011, 2012 i 2014), International Symposium on Industrial Engineering - Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade (2012), International Conference InSITE (2011), Inženjerstvo, ekologija i materijali u procesnoj industriji (2009, 2011, 2013 i 2015), Bezbednosni inženjering (2010 i 2014), International Conference - Industrial Engineering and Environmental Protection (2012).

Posedovanje licenci i sertifikata:

- licenca za izradu tehničke dokumentacije, elektro faza instalacije slabe i jake struje i elektroenergetskih postrojenja i nadzor nad izvođenjem ovih radova, izdata u Banja Luci 2004.
- licenca za izvođenje i nadzor nad izvođenjem elektro faze, instalacije slabe i jake struje i elektroenergetskih postrojenja, izdata u Banja Luci, 2004.
- položen stručni ispit za profesora elektrotehničke grupe predmeta u Banja Luci, 1999.

- licenca za obrazovno-vaspitni rad od Ministarstva prosvjete Republike Srpske u Banja Luci, 2005.
- dodeljeno stručno zvanje savetnik od Ministarstva prosvjete Republike Srpske u Banja Luci, 2000.
- ECDL-European Computer Driving Licence (Windows, Word, Excel, Access, Power Point, Outlook), sertifikat za rad na računaru, u Zvorniku, 2004.
- sertifikat za srednji nivo znanja Engleskog jezika, Certificate of Attendance Intermediate, "SEAL" u Zvorniku, 2007.
- sertifikat Ministarstva prosvete Republike Srpske o završenoj naprednoj informatičkoj obuci, 2011.

Poznavanje jezika

- engleski (srednji nivo, pohađao kurseve),
- ruski (srednji nivo, učio tokom školovanja)

Član je uređivačkog odbora 4 naučno-stručna časopisa nacionalnog značaja: Tehnička dijagnostika (Beograd), Tehnička dijagnostika (Banja Luka), Održavanje mašina i Menadžment znanja.

Član Društva za Tehničku dijagnostiku Srbije.

Predsednik upravnog odbora i zastupnik udruženja „Srpska akademija energetske efikasnosti“.

Predsednik skupštine udruženja „Srpska akademija inženjerstva održavanja“.

e-mail: bozoilic66@gmail.com

Web adresa: www.bozoilic.com