

UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNIČKI FAKULTET "MIHAJLO PUPIN"
ZRENJANIN



OPTIMIZACIJA POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

DOKTORSKA DISERTACIJA



MENTOR
PROF. DR ŽIVOSLAV ADAMOVIĆ

KANDIDAT
MR DRAGAN NIKOLIĆ

ZRENJANIN, 2007.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
TEHNIČKI FAKULTET "MIHAJLO PUPIN"

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:
RBR
Identifikacioni broj:
IBR
Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija
TD
Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal
TZ
Vrsta rada: Doktorska disertacija
VR
Autor: Mr Dragan Nikolić
AU
Mentor: Prof. Dr Živoslav Adamović, redovni profesor
MN
Naslov rada: **Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana**
NR
Jezik publikacije: Srpski
JP
Jezik izvoda: Srpski
JI
Zemlja publikovanja: Srbija
ZP
Uže geografsko područje: Srbija
UGP
Godina: 2007.
GO
Izdavač: Autorski reprint
IZ
Mesto i adresa: Đure Đakovića bb, Zrenjanin
MA
Fizički opis rada:
FO (broj poglavlja / strana / tabela / slika / priloga)
8 222 57 69 26
Naučna oblast: Mašinstvo
NO
Naučna disciplina: Analiza mehaničkih oscilacija, tehnička dijagnostika, monitorni sistemi (ekspertni sistemi),
ND
Predmetna odrednica / Ključne reči: Hidroelektrana, mehaničke oscilacije, temperatura, pouzdanost, komponente, sklop, univerzalni model, sigurnost funkcionisanja, pohabanost ležaja.
PO
UDK: 658. 512. 2
Čuva se: U biblioteci Tehničkog fakulteta
"Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Đure Đakovića bb
ČU
Važna napomena:
VN

REZIME: Doktorska disertacija ima za cilj da teoretski i empirijski, kontrolisano, sistematski i kritički ispita hipotezu formiranja modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri izboru najznačajnijih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane. Određenim vrednostima analizirane pouzdanosti određen je univerzalni model optimizacije na osnovu model blok dijagrama i mernih mesta. Njihovim međusobnim uticajem i povezanošću formira se: korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i temperatura, korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva i korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Ovakav model je univerzalnog tipa jer se može primeniti i na složene sisteme, bez obzira na dimenzije komponenti sklopova.

IZ

Datum prihvatanja teme od N- n. veća: 30.08.2004.

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

(Naučni stepen / ime prezime / zvanje / fakultet)

Predsednik:

Prof. dr Miroslav Lambić, redovni profesor,
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin.

Član:

Prof. dr Slobodan Novalušić, redovni profesor,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Član:

Prof. dr Miodrag Zlokolica, redovni profesor,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad.

Član:

Prof. dr Božidar Krstić, redovni profesor,
Mašinski fakultet, Kragujevac.

Mentor:

Prof. dr Živoslav Adamović, redovni profesor,
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin.

**UNIVERSITY U NOVI SAD
TECHNICAL FACULTY "MIHAJLO PUPIN" ZRENJANIN**

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
AN°

Indentification number:
IN°

Document type : Monographic`s publication
DT

Type of record: Word printed record
TR

Contents code: Dissertation
CC

Author: Mr Dragan Nikolić, Ph, M.
AU

Mentor: Prof. Dr Živoslav Adamović, Ph.D.
MN

Title: Optimization of technical dijagnostics of hydroelectric
plants
TI

Language of text: Serbian
LT

Language of abstract: Serbian
LA

Country of publication: Serbia
CP

Publication year: 2007.
PY

Publisher: Author`s reprint
PU

Publ. place: Đure Đakovića bb, Zrenjanin
PP

Physical description:
PD (chapters / pages / table / pictures / additional lists)
8 222 57 69 26

Scientific field: Mechanical engeenering
SF

Scientific discipline: The safety of functioning of technical system, tehcnical
dijagnostics, system monitoring
SD

Subject / Key words: Hydroelektric, Reliabel, Maintenance, Dijagnostics,
Optimal model
UC

Holding data: At library of technical faculty "Mihajlo Pupin" in Đure
Đakovića bb, Zrenjanin
HD

RESUME: The doctorssca dissertacion problems connected to gear choice which have been exited by now have been solved in the paper. This model we can determining optimal model tehncal diagnostic hydro electric plants. It has been done by its general quality estimation well as problem of quality control. That was solved here on the example of gears. One of the aims of the paper is development of personal approach to quality evolution and compound mechanical systems reliability, gear in this case. The evolution process of design solution has been done by computing the value for every gear being analysed and based on that it has been established which gear is better.

N

A -cepted by the Scientific Board on:30.08.2004.

ASB

Defended:

DE

Thesis defend board:

DB

Chairman:

Ph. D. Miroslav Lambić, full professor,
Tehncal faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin.

Member:

Ph. D. Slobodan Navalušić, full professor,
Faculty tehncal scientific, Novi Sad.

Member:

Ph. D. Miodrag Zlokolica, full professor,
Faculty tehncal scientific, Novi Sad.

Member:

Ph. D. Božidar Krstić, full professor,
Mechanical faculty, Kragujevac

Member – Menthor:

Ph. D. Živoslav Adamović, full professor,
Tehncal faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin.

PREDGOVOR

Disertacija pod nazivom "Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana" je rezultat višegodišnjeg rada i istraživanja u oblasti održavanja. Nastavljajući naučno-istraživački rad posle magistarske teze, uočio sam teškoće i nedostatke optimizacije tehničke dijagnostike složenih sistema. Zadnjih godina u svetu je pojačana zainteresovanost za optimizaciju sistema i sve se intenzivnije piše o toj temi. To me je navelo da počnem sa proučavanjem ove problematike. Interesovanje pojedinih institucija za primenu optimizacije tehničke dijagnostike hrabrilo me je na tom putu istraživanja.

Doprinos disertacije je u tome da se, rezultatima u naučnom istraživanju o specifičnim metodama za proučavanje pouzdanosti, zabeleženih otkaza komponenti i izbora najboljih parametara, dobija se univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

U disertaciji je izneta metodologija optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pomoću algoritma koji je dao potpunu metodologiju u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Za određivanje metode rešavanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, predviđene su dve osnovne početne faze i to: evidentiranje broja otkaza n sastavnih komponenti hidroelektrane na osnovu početnog nivoa stanja i analize eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti hidroelektrane.

U procesu optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstavljen je izbor najznačajnijih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenta hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalnih sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza u dva slučaja i to: bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

Formirani univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane je obuhvatio najznačajnije parametre uticaja mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanost ležajeva koji su povezani u matematičkom obliku teorijske i eksperimentalne analize. Takođe, krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranih parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Njihovim međusobnim uticajima i povezanošću, formiraju se korelacije parametara postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Na osnovu korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama, sprovedena je analiza modela u empirijskim istraživanjima.

Disertacija je urađena pod mentorstvom prof. dr Živoslava Adamovića, kome ovom prilikom iskazujem posebnu zahvalnost za podršku, razumevanje i brojne korisne sugestije koje mi je pružio u toku izrade. Posebno se zahvaljujem profesorima dr Miroslavu Lambiću, dr Slobodanu Navalušiću i dr Miodragu Zlokolici koji su čitali rukopis i doprineli finalizaciji disertacije. Svojim primedbama mi je pomogao i pri tome hrabrio prof. dr Božidar Krstić, kome sam takođe najiskrenije zahvalan.

Na kraju, zahvaljujem se direktoru HE "Vrla" Radmilu Nikoliću i direktoru "Đerdap II" Zoranu Kneževiću za podršku pri angažovanju na merenju vibracija hidroagregata. Takođe, se zahvaljujem Aleksandru Ristiću, Marku Pešiću i Dejanu Veljkoviću na angažovanju i sprovođenju merenja temperature ležajeva.

AUTOR
Mr Dragan Nikolić

PREFACE

Dissertation named " Optimization of technical diagnostics of hydro electric plants" is a result of my long term work and research. Having continued the scientific and research work after the M. S. degree I discovered difficulties and flaws of the optimization of complex systems of technical diagnostics. In recent years there is a growing world interest in optimization of the system and more and more works have been written on this topic. This inspired me to start investigating this problem. The interest of certain institutions for the application of the optimization of technical systems encouraged me on that path of my research.

Original significance of dissertation is analyses optimization technical diagnostics of model and configuration special model which making high reliability of work, high security, lowering time of work, planning exploring, failing make remate etc. Also, with this model we can determining optimal model technical diagnostic hydro electric plants.

The methods, analyses and models of the optimization of technical diagnostics are given within this dissertation. Apart from the multiple criteria optimization we are going to present a complex process of the compromise between the criteria and possibilities of limitation expressed by the criteria function at finding the best solution. The space of the criteria function we will track the impact of the parameters on the compromising solution, the results of measuring, analysis up to the probability of creating the risk and its consequences in the hydro plant.

In the process of the optimization of technical diagnostics of hydro electric plants, the mathematical model, which will be utilized in terms of enhancing security and improving the driving characteristics of the system, is created. There is also a selection of diagnostics parameters of the state on the base of certain working conditions according to optimization characteristics which influence the correctness of the solution and which are valid for the optimization and driving capacities of the hydroelectric plants.

Use of a model represents a concept of optimizations with checking of parameters of state it is applied on elements of hydroelectric plants which have continuous change of state parameters in function of time tracking in which can be determined functional dependence between the intensity parameters change and function time. Specific value of this dissertation is development of a model for determination of optimal intervals of developing diagnostic of state of hydroelectric plants on basis of given values of parameters applying developed model showed that he is giving optimal moments of diagnostic of state, and his appliance has a significant reduce of failures in hydroelectric plants.

The dissertation was done with the assistance of mentor prof. dr Zivoslav Adamovic, whom I hereby express special gratitude for support, understanding and numerous useful suggestions which he gave me during the research. I especially thank professors dr Miroslav Lambic and dr Slobodan Navalusic and dr Miodrag Zlokolica who read the script and contributed to the finalization of the dissertation. Prof. dr Bozidar Krstic, whom I am also sincerely grateful to, also helped and encouraged me with his suggestion.

In the end I thank Radomir Nikolic, the director of HE "Vrla" and the director "Đerdap II" Zoran Knezevic for the support in engaging on measuring the vibrations of hydro aggregates. I also thank Aleksandar Ristic, Marko Pesic and Dejan Veljkovic for measuring temperature.

AUTHOR
Mr Dragan Nikolic

S A D R Ž A J

- PREDGOVOR	
- PERFACE	
1.0. UVOD	2
2.0. ISTORIJSKI PREGLED ISTRAŽIVANJA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELKTRANA	6
2.1. Pregled značajnih objavljenih radova iz oblasti optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrana	6
2.2. Pregled dosadašnjih rezultata na uvođenju optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane	8
2.3. Istraživanja uzroka neispravnosti hidroelektrana	9
2.4. Prognoza stanja i greške pri dijagnostici hidroelektrana	12
3.0. METODOLOŠKI KONCEPT	15
3.1. Problem istraživanja	15
3.2. Predmet istraživanja	17
3.3. Hipoteze u istraživanju	19
3.4. Cilj i zadaci istraživanja	21
3.5. Metodologija istraživanja	23
3.6. Organizacija istraživanja	26
3.7. Naučna i društvena opravdanost istraživanja	30
4.0. METODE REŠAVANJA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA	33
4.1. Teorija o optimizaciji postupaka tehničke dijagnostike	33
4.2. Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike primenom analize korisne vrednosti procesa	40
4.3. Određivanje mogućnosti postavljanja dijagnostike	42
4.3.1. Postavljanje dijagnoze stanja	42
4.3.2. Greške u procesu dijagnoze stanja	45
4.3.3. Konstruktivna rešenja podesna za dijagnozu stanja hidroelektrane	47
4.4. Metode rešavanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike	54
4.4.1. Postavljanje i koncept problema optimizacije tehničke dijagnostike	55
4.4.2. Metoda inkorporacije dijagnostičkih parametara stanja	61
4.4.3. Statistička metoda izbora kontrolnih parametara	68
4.4.4. Parametri stanja koji se prate kod hidroelektrane	71
4.5. Zaključna razmatranja	76
5.0. ANALIZA MODELA OPTIMIZACIJE	78
5.1. Modeli i opisivanje problema optimizacije tehničke dijagnostike	78
5.2. Matematički model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana	81

5.3. Granične vrednosti primene modela optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrana.....	83
5.4. Zaključna razmatranja.....	84
6.0. EMPIRIJSKA ISTRAŽIVANJA.....	85
6.1. Postupci i mesta merenja.....	85
6.2. Eksperimentalna istraživanja pri merenju mehaničkih oscilacija hidroelektrane....	92
6.3. Eksperimentalna istraživanja pri merenju radnih temperatura ležajeva hidroelektrane.....	105
6.3.1. Optimizacija pouzdanosti rada sastavnih komponenti hidroelektrane u zavisnosti od promene radnih temperatura – određivanje optimalne radne temperature na ležajevima (N_4 , N_6 i N_7).....	112
6.3.2. Određivanje ekstremne vrednosti parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri merenju radnih temperatura.....	114
6.4. Određivanje optimalne vrednosti zazora pri praćenju pohabanosti ležajeva (N_4 , N_6 i N_7).....	119
6.4.1. Određivanje pohabanosti ležajeva hidroelektrane.....	121
6.4.2. Pohabanost ležajeva (N_4 , N_6 i N_7) bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.....	122
6.4.3. Pohabanost ležajeva (N_4 , N_6 i N_7) sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.....	129
6.4.4. Određivanje ekstremne vrednosti zazora za turbinski ležaj N_7	131
6.5. Matematička zavisnost korelacija.....	136
6.6. Prednosti i mane univerzalnog modela optimizacije primenom postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana.....	142
6.7. Zaključna razmatranja.....	145
7.0. PREZENTOVANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA.....	148
7.1. Zabeležene vrednosti amplituda i frekvenci mehaničkih oscilacija prema mernim mestima hidroelektrane.....	148
7.2. Zabeležene vrednosti radnih temperatura prema mernim mestima hidroelektrane.....	159
7.3. Zabeležene vrednosti pohabanosti ležajeva na mernim mestima hidroelektrane.....	160
7.4. Zaključna razmatranja.....	162
7.5. Vrednovanje rezultata istraživanja za nauku i praktičnu primenu.....	163
7.6. Dokazivanje glavne hipoteze.....	165
8.0. ZAKLJUČAK.....	167
8.1. Rezimei poglavlja.....	171
8.2. Ključni zaključci.....	173
PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA.....	176
LITERATURA.....	179
PRILOZI.....	187

1.0. U V O D

Formiranje univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane je obuhvatilo najznačajnije parametre teorijske i eksperimentalne analize. Takođe, krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti pri analiziranju parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Analizom modela prikazani su podmodeli i korelacije zavisnosti, odrediti ekstremne vrednosti univerzalnih jednačina za slučajeve bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Takođe, konstruisane su krive čije su vrednosti predstavljene na dijagramu zavisnosti korelacija: mehaničke oscilacije i temperature, mehaničke oscilacije i pohabanosti ležaja i temperature i pohabanosti ležaja.

Dijagnostika je kompleksna inženjerska aktivnost koja se oslanja na discipline kao što su projektovanje, testiranje i mnoge druge, a treba da reaguje pri otkazu komponenti sklopova hidroelektrane. Da bi se komponente sklopova dijagnostifikovale, potrebno je odgovarajuća oprema, lista određenih merenja koju treba obaviti, kao i izbor parametara u primeni univerzalnog modela. Ova disertacija na osnovu teoriskih i eksperimentalnih istraživanja predložila je moguća rešenja u vidu podmodela. Analizom pouzdanosti i paralelnom spregom, međusobnim uticajem i povezanošću formiraju se korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike kao predlog za donošenje relativnih odluka za pouzdanost sklopova hidroelektrane.

Tehničkoj dijagnostici, kao savremenoj tehnologiji preventivnog održavanja, sve više se pridaje značaj kao relativno novoj metodi, a veoma korisnoj, koja obuhvata programske sadržaje koji su kvalitativno povezani analiziranim uticajem pojave pouzdanosti, mobilnosti i tehnologijom promene parametara stanja komponenti date hidroelektrane. U disertaciji je analizirano tehničko stanje komponenata sklopova hidroelektrane HE "Vrla - 3" Surdulica i HE "Đerdap - II" kod Kladova.

Prema istraživanjima treba dati pregled otkaza ležajeva HE "Vrla - 3" Surdulica i HE "Đerdap - II" kod Kladova, urađen prema broju otkaza, najčešćih uzročnika i mera koje treba preduzeti da bi se oni eliminisali. Sam prilaz se čini najadekvatnijim s obzirom na to da su uzroci pojedinih vrsta otkaza mnogobrojni, a da se jedan uzročnik u datim uslovima može različito izraziti.

U analizi pouzdanosti treba koristiti tehničku dijagnostiku kao pomoćno sredstvo jer pruža eksperimentalne podatke na osnovu kojih se mogu zaključiti ekstremne vrednosti u radu komponenti sklopova hidroelektrane. Ona doprinosi određivanju pouzdanosti sa što manjim troškovima proizvodnje, tj. bez zaustavljanja komponenti sklopova hidroelektrane u radu zbog ocene njegovog stanja, eksploatacije i održavanja.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih parametara u određivanju sigurnosti rada sastavnih komponenti hidroelektrane, tj. određivanje optimalne sigurnosti kada je uzeta pouzdanost rada komponenti sklopova na osnovu zabeleženih otkaza.

Proces istraživanja pri izboru univerzalnog modela predstavlja vezu između periodičnosti provere parametara stanja u radu i otkazu sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane. Analizom parametara moguće je razviti model za utvrđivanje optimalnog perioda rada komponenti. Njihov zadatak je provera stanja komponenti i postupaka preventivnog održavanja, kako ne bi došlo do pojave otkaza.

Analiza i razvoj efikasnosti univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstavlja uvođenje najznačajnijih parametara i metoda radi predviđanja i sprečavanja otkaza. Sve aktivnosti preventivnog održavanja povezane su sa njihovim rizikom kao i optimiziranje procesa održavanja, a rezultat je produženje životnog veka komponenti sklopova hidroelektrane.

Pri formiranju modela krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti analiziranjem parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Oni su obuhvatili otkaze usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija, povećanja radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Ovi parcijalni otkazi čine paralelnu spregu i njihov uzajamni uticaj koji određuje pouzdanost rada sastavnih komponenti hidroelektrane.

Za sastavne komponente sklopova hidroelektrane, izvršena je optimizacija postupaka tehničke dijagnostike na pojedinim komponentama sklopova u funkciji izbora najboljih parametara, a obuhvata pouzdanost usled povećanja mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva na pojedinim komponentama sklopova. Na bazi analize, došlo se do uvida u njihovo eksploataciono stanje.

Poslednjih godina javlja se težnja da se optimizacija postupaka tehničke dijagnostike vrši po više kriterijuma što prerasta u složen proces dolaženja do rešenja, odvija se u više faza i nivoa odlučivanja i to:

- definisanje ciljeva, namena komponenti i sklopova,
- matematički opis sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, definisanje načina rada i vrednosti funkcija intenziteta otkaza,
- korišćenje postojećih i novih metoda,
- usvajanje konačnog rešenja ili donošenje konačne odluke,
- ako konačno rešenje nije usvojeno, srediti nove informacije, ponoviti postupak definisanja i izbor novih parametara.

Da bi se održao kvalitet i raspoloživost rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, tj. njihova eksploatacija kao najznačajniji faktor u određivanju sigurnosti funkcionisanja uz pouzdanost rada vrši se praćenje komponenti sklopova u toku proizvodnog vremena (t).

Za određivanje pouzdanosti rada komponenata analiziranih sklopova hidroelektrane korišćeni su podaci o raspoloživosti njihovog rada, tj. otkaza u određenom vremenskom intervalu. Način učešća i donošenja odluke zavisi od načina izbora parametara i uključivanja strukture preferencije u optimizacioni postupak, pri čemu se mogu izdvojiti tri prilaza:

Prvi prilaz je korišćenje više funkcija pouzdanosti komponenata koja sadrži pojedine kriterijume i strukturu preferencije u vidu matematičke funkcije pouzdanosti. U ovom prilazu praktično postoji problem otkrivanja otkaza, kako se može javiti i pitanje usvajanja optimalnog rešenja.

Drugi prilaz je dvoetafni optimizacioni postupak. U prvoj etapi rešava se uzrok otkaza i optimizacioni zadatak uključivanjem samo kriterijumske funkcije pouzdanosti komponenata. U drugoj etapi vrši se izbor parametara i usvaja optimalno rešenje.

Treći prilaz je iterativni optimizacioni postupak, gde se struktura preferencije uključuje postepeno i iterativno. Problem donošenja konačne odluke se javlja u svakoj iteraciji i može se smatrati da je lakši u drugom prilazu. Problem optimizacije postupaka tehničke dijagnostike javlja se na različitim nivoima određivanja pouzdanosti uz primenu odgovarajućih parametara, a njihovim međusobnim uticajem i povezanošću formiraju se korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. U jednom širem zadatku optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, primenom korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama sprovedena je analiza modela u empirijsko istraživanje.

Ovde treba reći da se pri određivanju stvarnog stanja komponenata hidroelektrane uzima rizik, kao proizvod verovatnoće nastanka neželjenog događaja i posledice ovog događaja, potrebno je da se odredi:

- kako se dolazi do rizika,
- kako da se rizik oceni,
- kako da se donese odgovarajuća odluka na bazi rizika.

Jedan od najsloženijih zadataka u procesu korišćenja komponenata sklopova hidroelektrane jeste određivanje njegovog stanja. Postojeće stanje (za svaku sastavnu komponentu hidroelektrane, odnosno za svaki parametar stanja posebno) određuje radnu sposobnost ili sigurnost funkcionisanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Funkcionalna zavisnost modela i vremenskog intervala rada komponenti do otkaza predstavlja određenu sigurnost funkcionisanja sklopova hidroelektrane i to optimalni režim rada sa najboljom pouzdanošću, tj. optimalni rad sa dozvoljenim rizikom. Na osnovu univerzalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada komponenti mogu se praviti koncepti planskog održavanja, koji doprinose boljoj proizvodnosti analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane.

Na osnovu matematičkog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike razvijen je algoritam koji će obuhvatiti odgovarajuće karakteristike sastavnih komponenata hidroelektrane i njenih nedostataka. Takođe, predstavlja vrednost izbora dijagnostičkih parametara optimizacije tehničke dijagnostike za sprovođenje predviđenih postupaka preventivnog održavanja komponenti hidroelektrane.

Formiranje univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane je obuhvatilo najznačajnije parametre teorijske i eksperimentalne analize. Pri njegovom formiranju krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Povećanjem vrednosti mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja određene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine $S_{\eta}(t)_{op}$ i $S_{\eta}(t)_{opt}$ koje obuhvataju sve komponente analiziranih sklopova u radu i u otkazu bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Za konačnu ocenu rada komponente sklopova hidroelektrane neophodno je odrediti odgovarajuću standardnu statističku raspodelu pouzdanosti. Ona je određena na osnovu prenosnih funkcija pouzdanosti rada komponenata bez učešća preventivnog održavanja.

Programom ispitivanja su obuhvaćene apsolutne i relativne vibracije vratila HE "Vrla - 3" u Surdulici i HE "Đerdap - II" kod Kladova. Prve su registrovane na kućištu agregata A, a druge su snimljene selektivno. Tako je data detaljna prezentacija dobijenih rezultata i izvedeno je njihovo poređenje sa preporučenim vrednostima. Predstavljen je opis pripremljene metodologije merenja mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanost ležajeva sa prikazom pojedinih mernih mesta i režimom rada.

Savremena strategija preventivnog održavanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrana se upravo bazira na ocenu njihovog stvarnog stanja koja se izvodi kontinualnim praćenjem i analizom parametara optimizacije. Programom ispitivanja koji treba biti realizovan u određenom periodu moguće je sagledati radnu sposobnost određene intervencije komponenti sklopova hidroelektrane i pravilno funkcionisanje.

Metodologija optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je prikazana algoritmom koji je dao potpunu analizu stanja rada u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Takođe, analizom modela prikazani su podmodeli i korelacije zavisnosti, tj. ekstremne vrednosti univerzalnih jednačina za slučajeve bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Ispitivanja su obavljena sa osnovnim ciljem da se na bazi snimljene vibracione slike hidroagregata dobije optimalno rešenje što će predstavljati širi uvid u njegovo eksploaciono stanje. Najveći deo programa ispitivanja realizovan je u predremontnom periodu, tako da je bilo moguće sagledati pravce određenih intervencija u njemu (detaljnije u poglavlju 7.1.).

Istraživanjem treba prikazati dijagrame izabranih dijagnostičkih parametara promene temperature ležajeva za vreme rada sa opterećenjem i odgovarajućom brzinom. Osnovni pokazatelji odstupanja temperature na ležaju vrši se normalnom-Gausovom funkcijom raspodele (detaljnije u poglavlju 7.2.).

Na osnovu parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike izvršena je analiza pohabanosti ležajeva, a krenulo se sa zabeleženim otkazima na mernim sklopovima hidroelektrane i to bez primene parametara optimizacije. Takođe, izmerene su vrednosti unutrašnjih prečnika ležajeva na vratilu generatora, određene su oblasti rada ležajeva korišćenjem ekstremne standardne devijacije i merodavni zazori (detaljnije u poglavlju 7.3.).

Na osnovu ove zavisnosti određene su vrednosti prenosnih funkcija pouzdanosti bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. U ovim oblastima eksploacionog vremena t vršiće se stalna provera uticaja mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanost ležajeva, jer one predstavljaju siguran i ispravan rad komponenti.

2.0. ISTORIJSKI PREGLED ISTRAŽIVANJA OPTIMIZACIJE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

2.1. PREGLED ZNAČAJNIH OBJAVLJENIH RADOVA IZ OBLASTI OPTIMIZACIJE TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

Pri rešavanju problema i modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroenergetskog sistema koriste se postupci koji su detaljno opisani u postojećoj literaturi. Na nekoliko narednih strana će ukratko biti prikazani samo najznačajniji i najinteresantniji radovi iz ove oblasti.

Dimenberg, F.N., Kolesnikov, K.S., *Vibracii v tehnikе, Spravočnik tom 3, mašinostroenie, Mašinostroenie, Moskva, 1989. U ovoj knjizi je izvršena analiza prikaza osnovnih veličina mehaničkih oscilacija, koje se javljaju u radu sastavnih komponenti hidroenergetskog sistema kao i analize prikupljanja podataka o otkazima koji su nastali usled povećanja mehaničkih oscilacija [39].*

Gertsbakh, I.B., *Models of preventive maintainance, North-Holland, New York, 1987. Ovdе je izvršen prikaz analize modela u preventivnom održavanju i to u održavanju prema stanju komponenti. Modeli su standardnog oblika i obuhvataju uzroke kako bi se sprečile neželjene posledice koje nastaju na sastavnim komponentama tehničkih sistema na kojima nisu sprovedeni osnovni postupci tehnologije preventivnog održavanja [51].*

Brankovski, M., *Issledovanii i ustranii vibracii turbogeneratorov, Energia, Mašinostroenie, Moskva, 1997. U ovoj knjizi izvršen je prikaz analize mašinskih sistema sa aspekta konstruktivnih rešenja, pouzdanosti i pogodnosti rada. U njoj su jasno definisana stanja rada hidroenergetskog sistema koja omogućuju formiranje analize stabla otkaza sastavnih komponenti sistema. Ovakav prilaz omogućuje formiranje univerzalnog stabla otkaza bilo kog mašinskog sistema [29].*

Hill, C., *Anintroduction to Chemical Engineering kintecics and Hidroelektric Diesign, Free University, Amsterdam, 1989. Ova knjiga predstavlja osnovnu analizu mehaničkih oscilacija, koje nastaju pri radu osnovnih sastavnih komponenti hidroelektrane. Takođe, u ovoj knjizi su prikazani svi uzroci nastajanja mehaničkih oscilacija pri radu sistema i za različite slučajeve je data matematička forma analize osnovnih njihovih veličina, kao i uticaj promene parametara temperature ležajeva [57].*

Bercnrealа E.R., *Vibracii gidroagregatov gidroelektričeski stanicii energijii, Mašinostroenie, Moskva, 1989. U ovoj knjizi je razvijen sekvencijalni metod (metod sukcesivnih varijacija) u kome se koristi model optimizacije tehničke dijagnostike pri merenju vibracija, da bi se optimizirala funkcija cilja. Svaka moguća intervencija pri otkazu vodi do optimalnog rešenja uz male računске zahteve, a za linearne funkcije cilja i jednostavnije probleme, rešenje se može dobiti sa primenom računara [25].*

[25]. Bernev, E.R., *Vibracii gidroagregatov gidroelektričeskie v stanicii, Energia, Moskva, 1989.*

[29]. Brankovski, M., *Issledovanje i ustanenie vibracii turbogeneratorov, Energia, Moskva, 1997.*

[39]. Dimenberg, F. N., Kolesnikov, K. S., *Vibracii v tehnikе spravočnik, tom 3, Mašinostroenie, Moskva, 1989.*

[51]. Gertsbakh, I. B., *Model of preventive maintainance, North-Holland, New York, 1987.*

[57]. Hill, C., *Anintroduction to Chemical Engineering Kintecics and hidroelektric Design, Free University, Amsterdam, 1989.*

Barlow, R., *Mathematical theory of Reliability*, North-Holland, New York, 1995. *Rešava problem sistematske kordinacije rada hidro sistema i praćenje oštećenja kliznih ležajeva u datim uslovima i vremenu. Takođe, oštećenja kliznih ležajeva koja su nastala prema vrsti i uzroku pojave otkaza nakon opterećenja. Problem se rešava primenom algoritma pomoću redukovanog gradijenta i šemom gradijentne projekcije bazirane na Lagrangeov množitelj [19].*

Richard, F., *Industrial Engeneering*, North-Holland, New York, 1986. *Objašnjena je analiza uticaja parametara sa aspekta teorije pouzdanosti i uticaja promene temperature ležajeva hidrosistema. Takođe, uticaj habanja sastavnih komponenti u radu sistema i za različite slučajeve je data matematička forma analize njihovih vrednosnih veličina [112].*

Haith, D.A., *Multioegtive Waten Resources Planning*, In *Systems Approach to Water Managment*, A.K. Biswas, Megraw-Hill, New York, 1986. *Daje matematički problem i model nelinearne optimizacije dijagnostike merenja vibracije hidroenergetskog sistema. Kriva snage se konvertuje u superabilnu funkciju pouzdanosti delova i sklopova hidroelektrane. Ako se ovakva nova funkcija smatra konkavnom, funkcija cilja je konveksna, a može se primeniti Lagrangeov postupak [59].*

Gill, E., *Practical Optimization*, London, Academic Press, 1989. *Koristi princip diskretnog maksimuma za rešavanje problema optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrana, dokazujući pritom sposobnost ovog algoritma da uzme u obzir vreme rada hidroelektrana sa definisanim parametrima stanja, mogućnost tretiranja nelinearnih funkcija cilja i nelinearnih jednačina stanja. Algoritam ne zahteva deskritizaciju promenljivih stanja, a odnosi se kako na sistem u uhodavanju tako i na rad sistema posle izvršenog remonta [54].*

Mihalević V.S., *Metodi posledovatelinoi optimizaciji*, Nauka, Moskva, 1991. *Primenjuje model dijagnostike praćenja otkaza kliznih ležajeva i promene temperature u elektroenergetskom sistemu, kod kojih postoji značajno vreme praćenja. Uzimaju se u obzir i varijacija pada i ograničenja prouzrokovana mogućnošću opreme i uslovima rada [82].*

Misra, B.K., *Reliability Optimization of a Serias – Paral, Sistem*, IEEE Trans, on Reliability, No. 4, 1982. *Predstavlja algoritam optimizacije pojedinih dijagnostičkih parametara, vrši optimalno planiranje rada ležajeva uzimajući u obzir stanje hidroelektrane u zavisnosti od radne karakteristike i održavanja. Nalazi da je računski model vrlo efikasan, da je konvergencija monotona i da se dobija globalni optimum [88].*

Sotirović, V., Adamović, Ž., *Metodologija naučno-istraživačkog rada sa statistikom u MS EXCEL-u*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin" Zrenjanin, 2005. *U ovoj knjizi prikazane su sve osnovne metode i postupci naučno-istraživačkog rada. Ona daje objašnjenja: o ulozi istraživanja, metodama istraživanja i strukturama istraživačkog projekta. Sve navedene metode i postupci su korišćeni u izradi ove disertacije [123].*

[19]. Barlow, R., *Mathematical Theory of Reliability*, North-Holland, New York, 1995.

[54]. Gill, E., *Practical Optimization*, London, Academic Press, 1989.

[59]. Haith D.A., "Multiojective Waten Resources Planning", In *Systems Approach to Water Managment*, A.K. Biswas, Megraw-Hill, New York, 1986.

[82]. Mihalević, B.C., *Merodi posledovatelnie optimizaciji*, Nauka, Moskva, 1991.

[88]. Misra, B.K., *Reliability Optimization of a Serias - Paral, Sistem*, IEEE Trans, on Reliability, No. 4, 1982.

[112]. Richard, F., *Industria Engeneering*, Megraw-Hill, New York, 1986.

[123]. Sotirović, V., Adamović, Ž., *Metodologija naučno-istraživačkog rada sa statistikom u MS EXCEL-u*, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.

2.2. PREGLED DOSADAŠNJIH REZULTATA NA UVOĐENJU OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

U našoj zemlji se već niz godina radilo na uvođenju savremenog tehničkog sistema za upravljanje pogonom jedinstvenog elektroenergetskog sistema. Do sada postignuti rezultati se ne mogu zanemariti, ali se za njih ne može reći ni da zadovoljavaju. Razloge za ovakvo stanje najverovatnije treba potražiti u nedostatku finansijskih sredstava, ali i na drugim stranama. Urađeno je pre svega nekoliko pojedinačnih pokušaja vrednih pažnje, od kojih ćemo ovde pomenuti samo one najznačajnije.

Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi" i Mašinski fakultet iz Beograda su napravili "Studiju matematičkog modela optimizacije dijagnostike sistema Đerdap I i II" kod Kladova [86]. Cilj studije je bio razrada kompleksnog matematičkog modela koji je omogućio optimalno praćenje oštećenja vodećih ležajeva kao i merenje apsolutne i relativne vibracije vratila generatora. Takođe, model rešava optimizaciju pojedinih dijagnostičkih parametara i prati stanje ispravnog rada i funkcionisanja komponentata u granicama dozvoljenih odstupanja.

Osnovni ciljevi optimizacije dijagnostike sistema hidroelektrana su:

- potpuno snimanje vibracionog stanja vratila i oštećenja vodećih ležajeva hidroelektrane,
- optimalno obezbeđenje pojedinih dijagnostičkih parametara u radu,
- maksimalno uklapanje rada hidroelektrane u zahteve elektroenergetskih sistema naše zemlje,
- optimalno korišćenje agregata,
- model minimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti.

Pored rešavanja navedenih problema, model zadovoljava i dodatne zahteve, koji se mogu pojaviti u toku eksploatacije:

- proizvodnja prema privremenoj strategiji optimizacije tehničke dijagnostike,
- rad samo jedne elektrane,
- izmena usled ograničenja,
- izmena zahteva za određenu snagu u svakom trenutku.

Institut "Mihajlo Pupin" je u saradnji sa programom za razvoj Ujedinjenih nacija pokrenuo projekat "Primena systemske analize u korišćenju energetske potencijala vodenih resursa Drine i održavanja hidroelektrana". Cilj je da se unaprede metode planiranja i operativni rad hidrosistema, da se proizvodnim službama u hidroelektranama i dispečerskoj službi ZEP-a, omogući sprovođenje aktivnosti neophodnih za godišnje planiranje i replaniranje hidroproizvodnje, kao i operativno dnevno planiranje pomoću računara. Takođe, urađen je model koji obezbeđuje optimizaciju pojedinih dijagnostičkih parametara za određivanje stanja komponenti sklopova hidroelektrane u granicama dozvoljenih odstupanja.

[86]. Minić, S., Model tehničkog održavanja tehničkog sistema prema stanju, Naučno- tehnički pregled, br.8, Beograd, 1994.

2.3. ISTRAŽIVANJE UZROKA NEISPRAVNOSTI HIDROELEKTRANA

Istraživanje uzroka neispravnosti predstavlja jedan od bitnih zadataka dijagnoze, a sprovodi se sa ciljem ukazivanja mesta i uzroka pojava neispravnosti komponenata sklopova hidroelektrane. Zamena sastavnih komponenti i otklanjanje grešaka u montaži predstavlja osnovu za istraživanje uzroka neispravnosti komponenata sklopova hidroelektrane.

Istraživanje neispravnosti se pojavljuje kao delatnost službe razvoja u periodu rada i održavanja komponenata sklopova hidroelektrane. Koordiniran rad ovih službi u svim periodima životnog ciklusa predstavlja neophodan uslov za proces "usavršavanja" komponenti sklopova hidroelektrane. Takođe, ima poseban značaj za proizvođača komponenti sklopova sa gledišta kvaliteta. Interes korisnika takvih sistema je njegova veća pouzdanost u toku rada. Interes proizvođača komponenti sklopova hidroelektrane je da takve nedostatke izražene u procesu eksploatacije otkloni, a učešće službe razvoja u tome je značajno za oba partnera.

Sva ispravna i neispravna stanja sastavnih komponenti sklopova čine skup tehničkog stanja komponenata hidroelektrane. Zadaci provere ispravnosti, provere radne sposobnosti, provere pravilnog funkcionisanja i istraživanja uzroka neispravnosti predstavljaju česte slučajeve opštih zadataka dijagnoze stanja komponenti hidroelektrane.

Istraživanje uzroka neispravnosti komponenti pokazuje potrebu raščlanjivanja hidroelektrane na sastavne komponente sklopova. Broj grupa određuje se pri istraživanju parametara stanja komponenti i zavise od stepena podele komponenti prema sklopovima hidroelektrane. Takav stepen detaljizacije predstaviće dubinsku dijagnozu.

Dubinska dijagnoza se primenjuje kod hidroelektrana ili njenih sastavnih komponenata kada pretrpe havariju ili ako se mesto neispravnosti ne može odmah utvrditi. Može se reći da se dubinska dijagnoza najčešće primenjuje za lokalizaciju neispravnosti u okviru planiranih ispitivanja ili u slučaju havarije, kao i za određivanje količine i obima preventivnog održavanja pre redovnih intervala održavanja.

Pri radu komponenti sklopova hidroelektrane nalaze se u neproverenom stanju, tj. početak pojave neispravnosti. Da bi se odredila koja od neispravnosti je moguća, neophodno je izvršiti niz dijagnostičkih kontrola. Pri kontroli stanja komponenata neophodno je proveriti i kvalitet komponenti hidroelektrane, proizvodnost, druge pokazatelje i uveriti se u ispravnost ili utvrditi moment pojave, mesto i uzrok otkaza komponenti.

Otkazi nastali kod sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane na osnovu povišenih nivoa mehaničkih vibracija, temperature i pohabanost ležajeva evidentirani su kontrolom prikupljanja podataka (detaljnije u poglavlju 3.6.), tj. organizacije toka kontrole nivoa izmerenih veličina stohastičkih signala na izabranim mernim mestima. Na osnovu svih evidentiranih otkaza i analiza sastavnih komponenti sklopova formirano je stablo otkaza sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, (detaljnije u poglavlju 2.3).

Analiza otkaza na sklopove hidroelektrane obuhvatila je primenu metode analize stabla otkaza koji nastaje usled povećanih nivoa mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva analiziranih komponenti sklopova. Ona će biti kasnije iskorišćena u analizi pouzdanosti rada komponenti analiziranih sklopova hidroelektrane (detaljnije u poglavlja 6 i 7).

Pri istraživanju neispravnosti sastavnih komponentata koje ometaju pravilnost funkcionisanja rada komponentata hidroelektrane, pomoću dijagnoze i načina raščlanjivanja sklopova u različitim vremenskim uslovima mogu biti različiti. U zavisnosti od rezultata izmerenih vrednosti donose se odluke o preduzimanju postupaka preventivnog održavanja prema stanju komponenti. Provere se sprovode na osnovu provere parametara stanja komponenti sklopova hidroelektrane, a prate se u svakom trenutku njihovog rada.

Analiza parametara optimizacije je obuhvatila karakter otkaza na sastavnim komponentama sklopova hidroelektrane:

- na gornjem generatorskom ležaju (vodeći) (N_4),
- na donjem generatorskom ležaju (srednji) (N_6),
- na turbinskom ležaju (N_7).

Uvođenjem parametara koji su obuhvatili promenu zazora, smanjuje se uticaj mehaničkih oscilacija, što će biti objašnjeno detaljnije u poglavljima 5, 6 i 7. Takođe, izborom parametara optimizacije smanjiće se uticaj mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva koje se odnose na promenu kvaliteta površina polumeseca bez primena parametara optimizacije. Površina je u kvalitetu obrade IT 7, a sa primenom parametara optimizacije promenen je kvalitet obrade IT 6 (tuširanjem površine polumeseca).

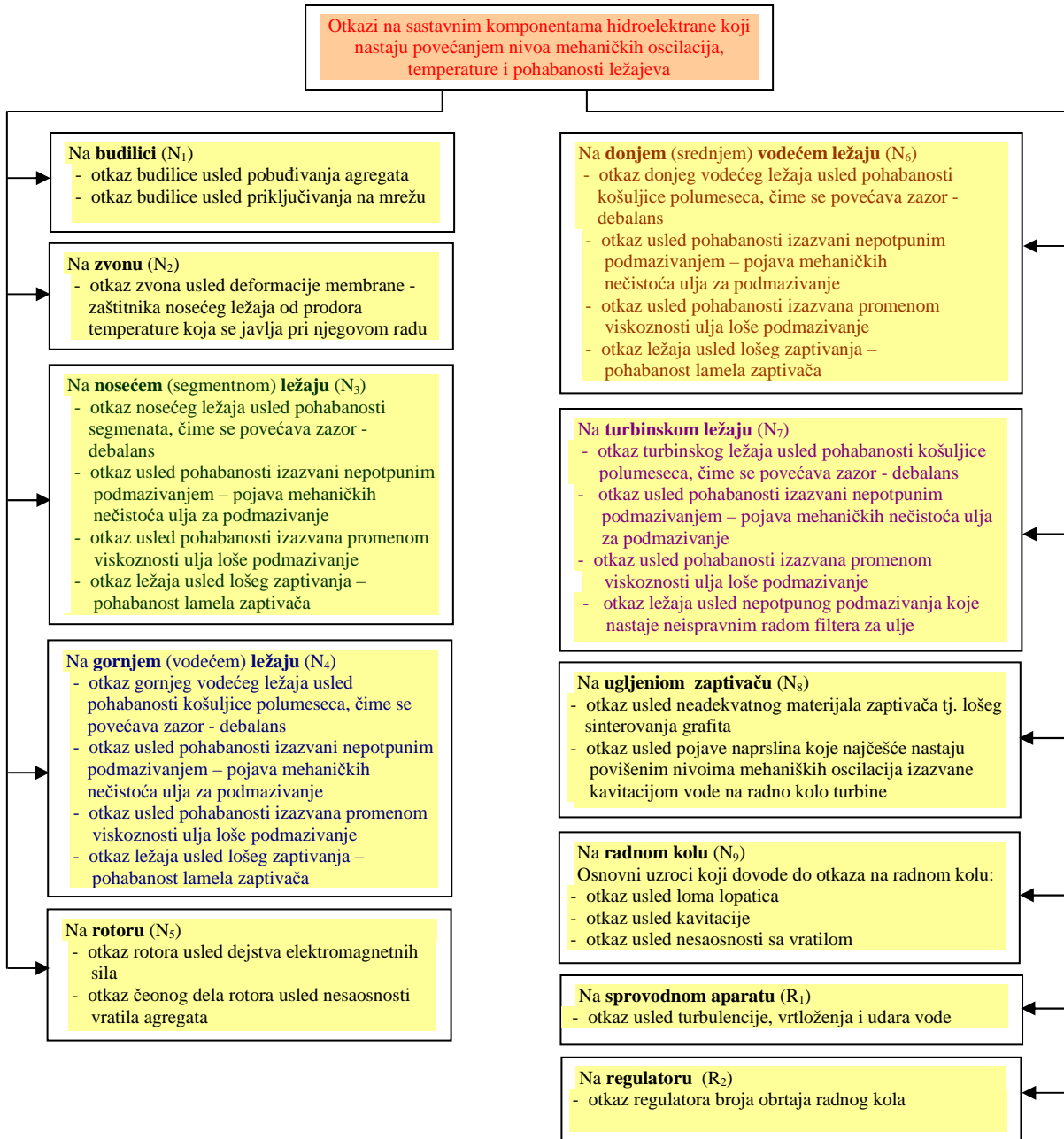
Parametar koji je smanjio uticaj radnih temperatura obuhvatio je svakodnevnu promenu kontrole viskoznosti ulja i obuhvatio je recikliranje (filtriranje, obogaćivanje aditivima) i to na svakih 6000 radnih sati komponenti hidroelektrane, a ne kao bez primene parametra optimizacije jer se tada recikliranje vršilo na 8000 radnih sati.

Otkazi koji su evidentirani nisu obuhvatili sve nabrojane otkaze u stablu otkaza, već su zabeleženi isključivo na sastavnim komponentama N_4 , N_6 , i N_7 , pa se na tim komponentama nalaze merna mesta, a te iste su najopterećenije u radu hidroelektrane.

Na slici 2.1. dati su uzroci otkaza pojedinih komponenti HE "Vrla -3" Surdulica, usled uticaja mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Na osnovu njih se mogu predvideti postupci primene parametara stanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Rezultati broja otkaza slabih mesta koji se dobijaju u eksploatacionim uslovima, poslužiće u analizi sigurnosti funkcionisanja rada analiziranih komponentata sklopova kao i u određivanju njihovih karakteristika pouzdanosti što će biti kasnije prikazano (detaljnije u poglavlju 4).

Sa stanovišta funkcionalnosti i konstruktivnih karakteristika analizirani sklopovi hidroelektrane spadaju u složene tehničke sklopove mašinske tehnologije sa aspekta rukovanja i tehnologije primene parametara stanja komponenti. Konstruktivni deo tehničkih sklopova je izveden sa izradom komponentata koji imaju visoki tehnološki nivo (veoma dobre obrade površina, postojanost kao i stabilnost). Takođe, kao i kod svih tehnoloških sklopova postoje određena slaba mesta.



Slika 2.1. Stablo otkaza na sastavnim komponentama sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica [93]

Analiza otkaza predstavljena je deduktivnom tehnikom u kojoj se specificiraju neželjene posledice koje nastaju usled uticaja povećanih mehaničkih oscilacija, povećanja radnih temperatura, habanja ležajeva i slično, a koje se javljaju u procesima eksploatacionog rada analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane. Analiza je obuhvatila karakter uzroka otkaza glavnih sklopova (odnosi se na analizu sklopa ležaja i vratila rotora – srca hidroelektrane) kao i načine na kojima taj uzrok dovodi do otkaza komponenti.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

2.4. PROGNOZA STANJA I GREŠKE PRI DIJAGNOSTICI HIDROELEKTRANA

Ukoliko su poznate sve veličine stohastičkog uticaja, onda se uz pomoć proračuna verovatnoće mogu izvesti odgovarajući matematički odnosi za prognozu trajanja preostalog vremena korišćenja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Samo jedan podatak očekivane vrednosti trajanja preostalog vremena korišćenja nije dovoljan za praktično korišćenje, pošto na osnovu stohastičkih uticaja mogu da nastupe znatni neplanirani otkazi pri radu komponenti sklopova hidroelektrane. U svakom slučaju potrebna je jedna prognoza koja bi obezbedila određenu pouzdanost rada bez otkaza.

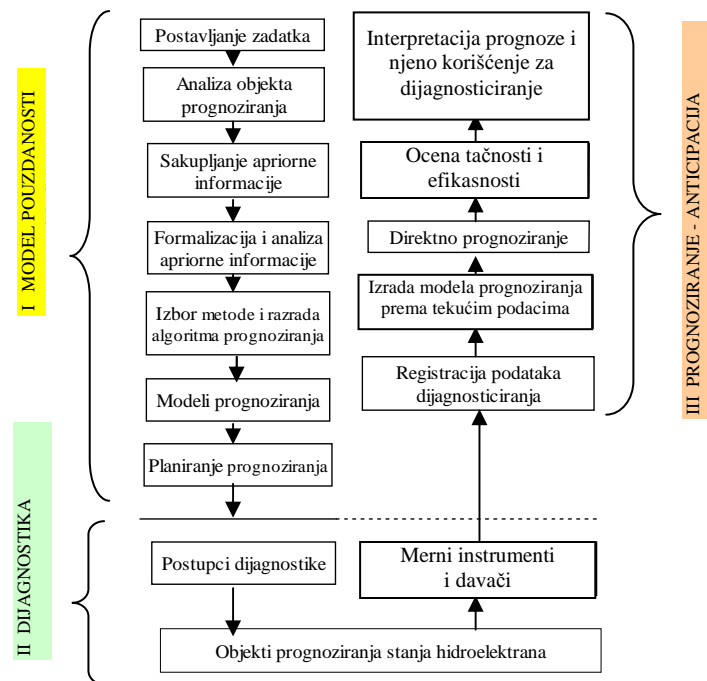
Za praktičnu primenu u mnogim slučajevima je svrsishodno da se ne daje samo jedna prognostička vrednost trajanja rada komponenti preostalog korišćenja sa jednom određenom sigurnošću. Povoljno je da se daje više vrednosti trajanja preostalog korišćenja, koje se mogu postići sa različitom sigurnošću (npr.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

Obrazlaganje mogućnosti prognoze trajanja komponenti preostalog korišćenja pokazuje do kakvih sve komplikacija može da dovede prognoza trajanja korišćenja. Za praktičnu primenu potrebno je da se po mogućstvu koriste proste prognostičke metode, koje odgovaraju najmanjem stepenu informacija o štetnom ponašanju i zahtevima za jednostavno rukovanje.

Podloge za prognozu trajanja komponenti preostalog korišćenja moraju biti u jednostavnoj formi i lako dostupne, npr. kao tabele ili nomogrami. Jedan merodavan problem za prognozu trajanja preostalog korišćenja jeste dobijanje primarnih podataka o toku oštećenja. Zbog toga je najpre moguća prognoza za tokove vrsta habanja komponenti. Dobijanje primarnih podataka je veoma teško. Pri tome nisu pogodna ispitivanja na ispitnom stolu zbog jakih individualnih rasipanja tokova habanja. Najsvrsishodnija forma sastoji se u obuhvatanju i procenjivanju u praksi prilikom dijagnostičkih postupaka i praćenja stanja komponenti.

Uslovi za praktičnu primenu prognoze trajanja komponenti preostalog korišćenja pored izrade dovoljno tačnih metoda prognoze, jesu primena tačnih postupaka dijagnoze i poznavanja tokova oštećenja. Korišćenje komponenta sklopova hidroelektrane obuhvata nalaze pojedinačnih dijagnostičkih mera i trajanje korišćenja pojedinih komponenti sklopova hidroelektrane (prikaz na slici 2.2.). Takođe, predstavljene su analize izbora metoda, razrada modela prognoziranja i planiranja pri sprovođenju postupaka, kao i parametara koji utiču na dobijanje rezultata dijagnoze stanja komponenti.

Optimalna razmatranja zahtevaju dobro poznavanje statističke metode uz različite pojave kao dobru sposobnost primenjivanja i izbor parametara stanja komponenta bitnih za optimizacionu analizu. Pri tom se određene vrednosti parametara mogu prilagođavati u zavisnosti od dobijanja optimalnih vrednosti u toku rada komponenti sklopova hidroelektrane (npr. promena temperature pri radu ležaja u određenom vremenskom intervalu).



Slika 2.2. Analiza procesa prognoziranja i planiranja tehničkog stanja komponenti hidroelektrane [28]

Zadatak prognoziranja stanja radne sposobnosti komponenti u opštem slučaju sastoji se u sledećem: po dobijanju rezultata dijagnoze stanja komponenti sklopova hidroelektrane treba oceniti njegovu radnu sposobnost u preostalom periodu funkcionisanja. Za ovo se mogu koristiti dva osnovna algoritma prognoziranja:

- ekstrapolacija,
- statistička klasifikacija.

Određivanje algoritama ekstrapolacije vrši se pomoću univerzalnog modela u određenom intervalu vremena (t). Određivanje algoritama statističke klasifikacije zavisi od stanja radne sposobnosti komponenta i parametara koji daju određena rešenja. Analiza procesa određivanja parametara daje optimalno stanje efektivnosti i vrši pripreme optimalnih metoda analize u radu komponenta sklopova hidroelektrane.

Tehničko stanje komponenta sklopova hidroelektrane predstavlja se korelacijom u obliku kriterijumske funkcije stanja rada komponente sklopova hidroelektrane $P(X, t)$, gde je vrednost $X(t)$ jednaka [28]:

$$X(t) = \{x_1(t), \dots, x_3(t), \dots, x_k(t)\}$$

Koja u periodu vremena rada komponenta $[t_0 - t_n]$ u oblasti T_i ima značenje $X(t_0), X(t_1), \dots, X(t_i), \dots, X(t_n)$ u momentima vremena $(t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_n) \in T_i$.

[28]. Brkić, Lj., Benišek, M., Stojković M., Energetska postrojenja, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1991.

Tako se jednačinom (2.1.) pomoću analize modela uvođenja korelacija $S(X, t)$ za značenje $X(t_j)$ određuje značenje funkcija $X(t_{n+1}), \dots, X(t_{n+j}), \dots, X(t_{n+m})$ u intervalima vremena $(t_{n+1}, \dots, t_{n+j}, \dots, t_{n+m}) \in P_i(x)$.

gde je:

- T_i - oblast vremena rada komponenata u budućnosti,
- $X(t)$ - funkcija eksperimentalne analize pri radu komponenata,
- $S(X, t)$ - funkcija uvođenja korelacije stanja komponenata u radu,
- $P_i(x)$ - vrednosti analizirane pouzdanosti.

Za algoritam ekstrapolacije sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane može se napisati jednačinom [28]:

$$X(t_{nj}) = S(X, t_n)X(t_j) \quad i = 1, n; j = 1, m$$

Algoritam statističke klasifikacije može se definisati na sledeći način: analizom modela formiranja korelacija $S(X, t)$ po parametrima $\{x_s\}, s = 1, k, X(t_0)$, treba da se rešenje $P^\lambda(\lambda = 1, \mu)$, gde je P_i^λ - stanje radne sposobnosti komponenti, x_i^n - parametri stanja komponenti [28]:

$$P_i^\lambda(x) = x_0 \div x^1 \quad P_i^\lambda(x) = x^1 \div x^2, \dots$$

ili vremenska vrednost na osnovu modela (do bezotkaznosti rada ležaja):

$$P_i^\lambda(t) = 0 \div T, \quad P_i(t) = T \div 2T$$

Rezultate daju specijalna ispitivanja pri većim probama, u kojima će pomoću češćih promenljivih dijagnostičkih parametara biti najčešće praćene i obuhvaćene izmene stanja radne sposobnosti komponenti sklopova hidroelektrane.

Stanje radne sposobnosti sastavnih komponenata određuje se analizom zadatih parametara, tj. proverom da li se nalaze u dozvoljenim granicama. Posebno se posvećuje pažnja održavanju na bazi rizika, što predstavlja orijentaciju na kvalitet kritičnih komponenti sklopova hidroelektrane najvišeg rizika.

Na osnovu dobijenih konkretnih rezultata primenom pouzdanosti hidroelektrane razvijene su metode koje će dati novi pristup povezanošću osnovnih optimizacionih parametara stanja sastavnih komponenti i njihov štetni uticaj na pouzdanost rada, kao i uticaj na pravilno preventivno održavanje komponenata hidroelektrane.

Ovakva analiza će poslužiti za dalja istraživanja komponenata hidroelektrane, prenosa snage, kao preteča savremenog pristupa preventivnog održavanja. Na osnovu nje se mogu lokalizirati sve neželjene posledice koje se javljaju pri pojavi mehaničkih oscilacija, povećane radne temperature i pohabanosti ležajeva. Izvršice se optimizacija primene pojedinih postupaka tehničke dijagnostike kroz razne oblike dijagnostičkih parametara, a na osnovu toga bi se sprečili otkazi i povećala radna sposobnost komponenata hidroelektrane.

[28]. Brkić, Lj., Benišek, M., Stojković M., Energetska postrojenja, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1991.

3.0. METODOLOŠKI KONCEPT

3.1. PROBLEM ISTRAŽIVANJA

Da bi se odredili svi bitni elementi istraživanja, potrebno je objasniti razvoj komponenti sklopova hidroelektrane kroz vremenske etape i njihov otkaz (objašnjeno u stablu otkaza u drugom poglavlju). U njemu je prikazana analiza pojedinih dijagnostičkih parametara i korelacije koje se definišu algoritmom univerzalnog modela. Takođe, doprinos povećanju optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u radu određenog vremenskog perioda i sigurnost funkcionisanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike vrši izbor parametara iz niza najznačajnijih pri usvajanju kriterijuma i analiza koje se koriste pre formiranja modela. Optimalno rešenje predstavlja kompromis između korelacija i mogućnosti definisanja algoritma, a vrednosti se izražavaju kriterijumskom funkcijom pouzdanosti koja bi za najbolje rešenje dostigla globalni ekstremum, s obzirom na ograničenja koja uslovljavaju mogućnost postizanja optimalnog cilja.

Na osnovu ovakvog praćenja stanja radne sposobnosti komponente hidroelektrane odnosno njihovo funkcionisanje, uzimajući u analizi statističke metode i parametre usled povećanih mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva formira se model njihove zavisnosti korelacija parametara tehničke dijagnostike. Za matematički program neophodno je poznavanje parametra tehničke dijagnostike, koji će analizirane komponente predstaviti kao dinamički sistem, čije se stanje u svakom vremenskom trenutku može definisati vrednošću ulaznih, unutrašnjih i izlaznih parametara.

Izbor metoda i parametara stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane vrši se na osnovu nivoa analiza njihovog funkcionisanja, načina i uslova rada, izračunavanja njihovih funkcija, sastavljanja logičkih šema, veze parametara i faktora koji utiču na radnu sposobnost i analize otkaza (npr. rad komponenti prikazan u stablu otkaza, detaljnije u poglavljima 2 i 3).

Problem istraživanja predstavlja analizu i sprovođenje izbora parametara sa ciljem određivanja sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane. Usled povećanja mehaničkih oscilacija, promene temperature i pohabanost ležajeva sa međusobnim uticajem i povezanošću formiraju se korelacije koje su uzajamno povezane paralelnim spregama u analizi modela empirijskog istraživanja.

Da bi se odredili uticaji promene mehaničkih oscilacija, radne temperature i pohabanost ležajeva u određivanju sigurnosti funkcionisanja sklopova hidroelektrane, neophodno je postaviti pristup u analizi kontrole parametara koji obuhvataju:

- teorijsku analizu,
- eksperimentalnu analizu.

Teorijska analiza obuhvata:

- studiju problema,
- određivanje izbora parametara i vrednost analize funkcija pouzdanosti (računsko određivanje vrednosti na osnovu dobijenih eksploatacionih rezultata),
- rešavanja problema tehničke dijagnostike, koja omogućava prirodu i mesto pojave otkaza.

Eksperimentalna analiza obuhvata:

- globalno poznavanje procesa rada komponenti,
- eksploataciju (dobijanje vrednosti rezultata na izabranim mernim mestima – merenjima),
- identifikacija dobijenih rezultata.

Teorijska analiza sastoji se u:

- studije problema koje obuhvataju matematičko određivanje osnovnih statističkih parametara, a opisuju karaktere slučajnih funkcija pouzdanosti,
- određivanju vrednosti analiza funkcija pouzdanosti koja obuhvata matematičko sračunavanje statističkih parametara i tabelarno prikazivanje,
- određivanju odgovarajuće opreme i liste određenih merenja koja treba obaviti.

Eksperimentalna analiza sastoji se u:

- globalnom povezivanju procesa mehaničkih oscilacija, pohabanosti ležaja i promene temperature na ležaju kod komponenata analiziranih sklopova hidroelektrane,
- eksploataciji koja pokazuje praktična merenja vrednosti mehaničkih oscilacija, povećane temperature i pohabanosti ležajeva prema tačno utvrđenom mernom mestu sa tačno određenom opremom u različitim vremenskim intervalima rada sastavnih komponenti hidroelektrane,
- identifikaciji dobijenih rezultata koja predstavlja tabelarne prikaze vrednosti mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanost ležajeva za određena merna mesta.

Posle izvršene teorijske i eksperimentalne analize vrši se poređenje i pristupa se uvođenju optimalnih vrednosti u univerzalni model. Da bi se smanjio uticaj mehaničkih oscilacija, povećanja radne temperature i pohabanost ležajeva, potrebno je vršiti praćenje rada komponenti sklopova kako bi se povećala njihova sigurnost i funkcionisanje pri radu.

3.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja predstavlja teorijsku i eksperimentalnu analizu, sistematski i naučno formuliše rezultate istraživanja o metodama proučavanja pouzdanosti rada sastavnih komponenti i predstavlja izbor parametara za određivanje optimalne sigurnosti rada. Takođe, obuhvata analizu rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, prvenstveno kroz primenu i sprovođenje najboljih parametara, sa ciljem obezbeđenja optimalne efikasnosti rada hidroelektrane. Optimalna vrednost dobijena metodom analize komponenti daje vrednost radnih parametara koji se mogu prilagoditi i menjati kako bi se obezbedili optimalni uslovi (npr. praćanje promena temperature ležaja) u toku rada.

Problematika istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstavlja analizu modela koja na osnovu formiranja korelacije parametara, određivanja metode rešavanja optimizacije postupaka, obuhvata broj otkaza na osnovu početnog nivoa stanja i eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti. Takođe, uspostavlja direktne odnose povezanošću između zakonitosti promene parametara stanja komponenti i pouzdanosti posmatranih sastavnih komponenti hidroelektrane.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike se definiše strategijom izbora parametara u određivanju stanja sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Takođe, predstavlja pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza i to bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

Formiranjem univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predviđa se mogućnost primene najznačajnijih parametara teorijske i ekperimentalne analize. Na osnovu ocene sposobnosti i određenog kvaliteta optimizacije definišu se granice: sigurnogi i ispravnog rada, optimalnog rada i oblasti rizika.

Upotreba univerzalnog modela efikasno određuje korelaciju praćenja analize koja obuhvata određivanje ekstremne vrednosti radnih parametara, a polazi se od ekstremnih ispitivanja i merenja na mernim mestima kao i dobijanje izmerenih vrednosti potrebnih veličina.

Normalne vrednosti se po pravilu određuju statistički, obradom rezultata merenja na više novih, ispravnih i ispitivanih u određenom periodu. Granične vrednosti parametara stanja komponenti mogu se bazirati na čitavom nizu kriterijuma, od kojih je najuniverzalniji kriterijum minimizacija troškova po jedinici vremena rada, a bazira se na analizi statističkih podataka o otkazima sastavnih komponenti hidroelektrane.

U pogledu strukture sastavnih komponenti hidroelektrane uvodi se održavanje na bazi rizika. Ono je usmereno na upravljanje vekom trajanja kritičnih komponenti složenosti hidroelektrane. Ovde će se analizirati rizici za određene komponente hidroelektrane, a rangiranjem određujemo kritične komponente na koje se treba obratiti posebna pažnja.

Predmet istraživanja se uspešno primenjuje analizom na bazi rizika komponenti sklopova hidroelektrane koja ispunjava određene uslove:

- treba da se na jednostavan, ali i dovoljno precizan način opiše dinamika komponenti koja se analizira, tako da se relativno prostim postupcima može doći do verovatnoće nastanka i posledice otkaza komponenti,
- mora da obuhvati sve parametre važne za problem koji se analizira, ističući posebno one koje imaju najveći značaj,
- mora biti karakteran, tako da se pri svim prekidima dobija uvek isti rezultat,
- treba da bude dovoljno jednostavan, tako da se potrebne analize mogu obaviti u raspoloživom vremenu i sa raspoloživom tehnikom (podrazumevajući i mogućnost modeliranja pojedinih komponenti hidroelektrane, naknadnog povezivanja dobijenih parcijalnih rezultata), odnosno da bi se smanjila verovatnoća datih događaja i prilaza,
- treba da omogući naknadna usavršavanja i / ili uključivanja novih parametara, ako se za to ukaže potreba, kako bi se usmerili na analiziranje i vek trajanja kritičnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Istraživanja obuhvataju određene povezane i kvalitativne uticajne pojave optimizacionih parametara u funkciji pouzdanosti istih, sa ciljem da predvidi preostali radni vek sastavnih komponenti hidroelektrane, na osnovu čega se može sprovesti njihovo preventivno održavanje. Takođe, program obuhvata ispitivanja apsolutne i relativne vibracije vratila sa odgovarajućim režimom neustaljenog i ustaljenog rada, oštećenja ležajeva u datim uslovima rada i promene temperature ležajeva za rad sa opterećenjem i odgovarajućom brzinom.

Sva merna mesta su locirana (npr. na kućištima ležaja agregata) sa određenim mernim pravcima da bi se pratio stohastični proces i pružila izmerene najverodostojnije vrednosti podataka i to:

- relativna vibracija vratila: zona turbinskog ležaja i zona donjeg generatorskog ležaja,
- apsolutna vibracija vratila: kućište turbinskog ležaja, kućište donjeg generatorskog ležaja, kućište gornjeg generatorskog ležaja i kućište nosećeg aksijalnog ležaja,
- praćenje temperature ležajeva,
- pohabanost ležajeva.

Kod ove analize uzeta su 3 merna mesta i to:

- od 7. do 9. komponente, (turbinski ležaj N_7 , ugljeni zaptivač N_8 , radno kolo N_9),
- 5. i 6. komponenta, (rotor N_5 i donji vodeći ležaj N_6) i
- 4. komponenta, (gornji vodeći ležaj N_4).

Na osnovu praćenja stanja određenih sastavnih komponenti sprovede se odgovarajuće analize modela za utvrđivanje optimalnog perioda tehničke dijagnostike hidroelektrane. Univerzalni model omogućuje izradu simulacionih programa kojim se posredstvom računara prikazuju ponašanja i osobine modeliranog procesa primene parametra stanja komponenti. Na taj način se zamenjuje radni proces u eksperimentalni u sistemu praćenja komponenti sklopova hidroelektrane.

3.3. HIPOTEZE ISTRAŽIVANJA

Zadatak istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je da izvrši izbor najboljih parametara pri određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenata hidroelektrane. Takođe, najznačajniji parametri daće optimalno rešenje izraženo prenosnom funkcijom stanja rada na osnovu vrednosti pouzdanosti sastavnih komponenti.

U doktorskoj disertaciji obuhvaćena je glavna hipoteza koja će imati za cilj da se njome postigne viši nivo pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Glavna hipoteza glasi: "Formirati univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike radi postizanja maksimalne pouzdanosti i raspoloživosti hidroelektrane u radu".

Da bi se ovo postiglo, formiran je **univerzalni optimalni model rada komponenti sklopova** prema izabranim parametrima, mernim mestima na osnovu izmerenih vrednosti komponenata sklopova. Na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti određen je model pouzdanosti na osnovu model blok dijagrama na mernim mestima usled uticaja mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Konstrukcijom dijagrama i njihove analize daće mogućnost modelu da je on univerzalnog tipa za sigurnost funkcionisanja svih komponenti sklopova hidroelektrane, njime se određuje optimalna sigurnost pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova.

Optimalna periodičnost primene dijagnostičnih metoda određiće se primenom nove predložene metode analize. Rezultatima eksperimentalnih istraživanja biće dokazana opravdanost primene nove predložene metode sa povezanošću formiranja korelacija parametara postupaka tehničke dijagnostike.

U formiranju univerzalnog modela posmatraće se analizirani sklopovi sa sprovedenim postupcima primene najznačajnijih parametara stanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Pri njegovom formiranju krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane na izabranim mernim mestima primenom **FMER** metode u eksperimentalnim uslovima.

Uticaj korelacije pouzdanosti i mehaničkih oscilacija biće obezbeđen **univerzalnom jednačinom prenosnih funkcija optimalnog rada modela** na osnovu formiranog algoritma monitornog sistema funkcionisanja koji će dati zavisnost određivanja sigurnosti funkcionisanja i vremena rada analiziranih sastavnih sklopova hidroelektrane.

Datim modelom vrši se analiza sigurnosti funkcionisanja sklopova u svakom trenutku, tj. u svakom trenutku eksploatacionog rada njegovih sastavnih komponenti. Na osnovu ovih analiza može se tačno odrediti vreme sigurnog rada sklopa na osnovu čega se mogu isplanirati i sprovesti postupci primene parametra stanja komponenti, čime se produžuje vek komponenti u njihovom radu.

U kategoriji pomoćnih hipoteza svrstane su one bez kojih nije moguće formirati univerzalnu jednačinu optimalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u radu komponenti hidroelektrane.

Pomoćne hipoteze obuhvatiće:

- objašnjenje osnovnog principa rada analiziranih sklopova hidroelektrane iz razloga pravilnog izbora mernih mesta na kojima se mere nivoi mehaničkih oscilacija,
- analizu stabla otkaza sastavnih komponenti analiziranih sklopova na kome su prikazane neželjene posledice,
- analizu određivanja ekstremnih vrednosti amplituda u eksploatacionim uslovima. Na osnovu izmerenih ekstremnih vrednosti amplituda sprovedena je na sastavne komponente sklopova hidroelektrane kojima su sprovedeni postupci primene parametra stanja komponenti,
- analizu otkaza koji su se pojavili na sastavnim komponentama analiziranih sklopova u vremenskom trajanju do 28.08. 2007. god. Na osnovu broja otkaza koji su nastupili u eksploataciji pri radu određiće se iz empirijskih podataka: funkcija gustine otkaza $F_a(t)$, funkcije intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$, funkcije pouzdanosti $P_a(t)$, u slučajevima rada komponenti na kojima su sprovedene analize primene parametara optimizacije stanja komponenti $f_{a-i}(t)$, $\lambda_{a-i}(t)$, $R_{a-i}(t)$,
- analizu funkcija suštine otkaza ($f_a(t)$, $f_{a-i}(t)$), funkcije intenziteta otkaza ($\lambda_a(t)$, $\lambda_{a-i}(t)$) i funkcije pouzdanosti ($P_a(t)$, $P_{a-i}(t)$) određiće se korelacije parametara postupaka tehničke dijagnostike ($P_i(t)$, $P_{i-a}(t)$), koje imaju za cilj dobijanja preciznijih vrednosti pouzdanosti do merodavnih,
- analizom određenih parametara izvršiće se formiranje modela i određivanje prenosnih funkcija pouzdanosti analiziranih sastavnih komponenti sklopova i to metodom blok dijagrama. Analiza će se izvršiti pomoću određenih korekcionih vrednosti pouzdanosti ($P_{i-a}(t)$),
- određivanje statistike raspodele pouzdanosti na osnovu korekcionih vrednosti pouzdanosti rada komponenti sklopova kao krajnje merodavne,
- određivanje korelacija na osnovu analitičkog polinoma višeg stepena $(P-R)(t)$, sprovedeno preko matematičkog programa MATLAB 6.5. Formiranjem potprograma i ove zavisnosti biće prikazane grafičkim putem preko dijagrama (detaljnije u poglavlju 6),
- formiranje algoritma univerzalnog optimalnog modela postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane na izabranim mernim mestima,
- analizom date parametre optimizacije postupaka pomoću kojih se određuje i obezbeđuje zadana pouzdanost komponenti hidroelektrane kako bi se sprečila pojava otkaza (npr. prikaz otkaza ležajeva u toku njegovog životnog veka),
- analizu i zavisnost uticaja radnih parametara na radne i kritične elemente opterećenja sastavnih komponenti hidroelektrane.

Primena univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike preduzeće sprovođenje postupaka primene najboljih parametara u određivanju funkcionisanja koji formuliše način praćenja optimalnog stanja komponenata hidroelektrane. Takođe, odgovarajuće parametre tehničke dijagnostike koji predstavljaju proces iznalaženja i vraćanja na početno stanje rada komponenti.

3.4. CILJ I ZADACI ISTRAŽIVANJA

Cilj disertacije je da se na bazi univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstave najbolji parametri u određivanju zavisnosti merodavne pouzdanosti i sigurnosti funkcionisanja rada sastavnih komponenti hidroelektrane, tako da se na bazi detaljnih analiza vrši:

- provera kvaliteta parametara optimizacije koji će definisati granice sigurnog i ispravnog rada do granice pojave rizika,
- analiza pouzdanosti pri formiranju korelacije parametara postupaka tehničke dijagnostike,
- analiza zabeleženih otkaza i provera stanja rada komponenti sklopova (npr. praćenje promene temperature ležaja),
- redosled organizacije raspodele dijagnosticiranja sastavnih komponenti sklopova,
- identifikuju svih rizika sa stanovišta prekida radnih procesa, bezbednosti, sigurnosti rada komponenti sklopova hidroelektrane i dr.,
- sprovođenje mera koje treba preduzeti da bi se svi značajni rizici smanjili, odnosno da bi se smanjila verovatnoća nastanka otkaza, posledice tih događaja su sa aspekta smanjenja troškova koji se može prihvatiti,

Analizom cilja obuhvatiće se:

- izrada univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sa izborom parametara i optimalnog rešenja koje će kvalitativno analizirati uticaje i pojave pouzdanosti komponenata hidroelektrane,
- primena odgovarajuće statističke metoda u praksi, tj. povećanje optimalne vrednosti sa uvođenjem parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike na sastavne komponente hidroelektrane, radi postizanja maksimalne pouzdanosti,
- rizik koji se smanjuje u zavisnosti od zabeleženih ukupnih otkaza, a samim tim i povećava njegova optimalna vrednost,
- analiza modela za uvođenje korekcionih zavisnosti bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike se najčešće formuliše izborom parametara i metode rešavanja faza evidentiranja pojave otkaza kao i analize eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane. Da bi se pojednostavio matematički problem, vrši se izbor dijagnostičkih parametara stanja sastavnih komponenti hidroelektrane pri određivanju sigurnosti rada u određenom vremenskom intervalu.

Istraživanje optimizacije postupaka tehničke dijagnostike obuhvatiće određene ekstremne vrednosti parametara tehničke dijagnostike, tj. promene radnih temperatura, mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva. Takođe, novim parametrima urađen je model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike koji predstavlja proces iznalaženja i dovođenja stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane u radu.

Osnovni cilj je da se na bazi snimljenih parametara dijagnosticiranja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, radi izvršenja redukcije modela, a na osnovu zavisnosti, odrede vrednosti prenosnih funkcija pouzdanosti bez primene i sa primenom parametara optimizacije. Daljom analizom bi se odredile granice rada komponenti u zavisnosti od merodavne pouzdanosti i vrste raspodele.

Da bi osnovni zadatak bio ispunjen, izvršeno je formiranje monitornog sistema sigurnosti funkcionisanja komponenti sklopova hidroelektrane. Na osnovu njegove metodologije, izvršiće se formiranje univerzalnog optimalnog modela rada analiziranih sklopova prema izabranim mernim mestima, povećanja nivoa mehaničkih oscilacija, promena radne temperature i pohabanosti ležajeva.

Na osnovu analiza, tj. primene univerzalnog modela određeni su uzroci pojave otkaza koje izazivaju promene usled mehaničkih oscilacija, radne temperature i pohabanost ležajeva. Takođe, ovaj model daće i analizu uštede u zameni sastavnih komponenti sklopova i postizanju boljeg kvaliteta proizvodnosti rada komponenta hidroelektrane. Takođe, na osnovu njega predviđa se stanje rada, funkcionalnost komponenta sklopova i njihova mobilnost što dovodi do primene značajnih ušteda u održavanju i proizvodnošću.

U slučaju većih odstupanja proračunskih podataka od stvarnih, a prouzrokovanih naglim ispadima kod komponenta hidroelektrana, treba ponovo ponoviti nove ulazne podatke. Pri tome se univerzalni model u ovom slučaju znatno detaljnije modifikuje sa odgovarajućom izmenom izvora greške koja se unosi pri izboru parametara optimalnosti tehničke dijagnostike.

Izborom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i njene koncepcije, imaće primenu adekvatni model na sastavne komponente hidroelektrane sa pozitivnim efektom, a time povećati pouzdanost, gotovost i ocenu parametara trenutnog stanja pri radu komponenti sklopova.

Određeni postupci pri radu komponenti predstavljaće objektivnu metodologiju koja omogućuje izbor najboljeg parametra u svim mogućim slučajevima pri formiranju modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenta sklopova hidroelektrane.

3.5. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike dobija se različitim metodama koje definišu kriterijume pri izboru parametara prema kojima se određuje optimalno rešenje i pruža najveću gotovost sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Zbog rastuće kompleksnosti i dinamike procesa promene stanja komponenata koji opisuju stohastičke procese parametara stanja komponenti, traži da se za opisivanje ovih procesa, posebno u cilju najpovoljnijih rešenja ili optimizacije, koriste metode teorije verovatnoće i modele koji su za ova razmatranja posebno interesantna.

Metodologija istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenata hidroelektrane je obuhvatila sledeće metode:

- posebne naučne metode i postupci,
- opšte naučne metode,
- metode tehnike i postupci.

Metode koje će se koristiti u ovoj disertaciji su:

- STATISTIČKA METODA

Na osnovu statističke metode utvrđuju se parametri i pokazatelji koji su praćeni u toku analize, pokazatelji preko kojih se najčešće ocenjuje optimalan period postupaka tehničke dijagnostike. Analiziraće se pojedine komponente, podsklopovi i sklopovi hidroelektrane i ponašanje određenih pokazatelja koji su bitni za analizu (npr. merenje temperature ležajeva i pohabanost ležajeva).

- METODA ANALIZE

Predmet proučavanja ove metode je veoma složen i zasniva se na analizi komponenti sklopova hidroelektrane. Razlog primene ove metode istraživanja koristi se pri rastavljanju hidroelektrane na sastavne komponente sklopova. Takođe, vrši se analiza utvrđivanja optimalnog perioda tehničke dijagnostike koji danas egzistira.

Pored ove metode razvijena je verovatnoća nastanka neželjenih događaja, a posledica događaja javlja se:

- dijagnostika komponenti sklopova hidroelektrane na bazi rizika,
- postupci održavanja komponenti sklopova hidroelektrane na bazi rizika.

- MATEMATIČKA METODA

U matematičkoj teoriji sistema ova metoda rešava probleme koji su vezani za komponente sklopova hidroelektrane. Ona uvek pruža mogućnost rešavanja mnogih problema, eksperimentisanja na nekom fizičkom modelu. Znači, da se pri formalizaciji sistema radi o operacionalizaciji matematičke analogije, tj. neki fizički problem se predstavlja matematički.

Matematičko rešavanje metoda predstavlja optimizaciju postupaka tehničke dijagnostike i problem formalizacije strukture hidroenergetskog sistema koji odgovara formalizovanju osnovnih veza strukturnih komponenata, a ujedno upozorava na neusklađenost matematičkog pojma i veze.

- METODA SINTEZE

Zahvaljujući metodi analize otkrivene raznovrsnosti sastavnih komponenata i predmeta, potrebno je nakon toga primeniti metodu sinteze, kako bi se postiglo jedinstvo i celina predmeta, uz primenu informacija stečenih metodom analize. U okviru sinteze podrazumeva se i analiza, jer bez poznavanja komponenata, raznih svojstava nekog predmeta, nije moguće vršiti sintezu, tj. nije moguće shvatiti celinu, jedinstvo i celovitost predmeta analize komponenti.

Posle pojedinačne analize za utvrđivanje optimalnog perioda postupaka tehničke dijagnostike, pomoću metode sinteze došlo bi se do jedinstva tih metoda, odnosno do utvrđivanja sličnosti između određenih metoda. Na osnovu, toga vrši se izbor metoda koja je najkompletnija i daje optimalno rešenje pri utvrđivanju postupaka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane.

- MODELOVANJE

Koristeći neke modele za utvrđivanje optimalnog perioda postupaka tehničke dijagnostike i na osnovu postojećih modela, razvio bi se sopstveni prilaz za utvrđivanje optimalnog perioda postupaka tehničke dijagnostike. U završnom delu rada izvršila bi se uporedna analiza pojedinih komponenti sklopova hidroelektrane (npr. merenje apsolutne i relativne vibracije vratila generatora), iz koje bi trebalo da se vidi vrednost za utvrđivanje optimalnog perioda postupaka tehničke dijagnostike.

Univerzalni model ima za cilj izbor dijagnostičkih parametara koji uslovljavaju poznavanje dozvoljenog nivoa pouzdanosti i određenog analitičkog izraza koji odgovara precizno opisanom stanju komponenti sklopova hidroelektrane.

Model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstavlja specifičan prilaz problematici preventivnog održavanja prema stanju, a odnosi se na koncepciju promene parametara stanja koji predstavlja osnovu za donošenje optimalnog rešenja postupka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane (detaljnije u poglavlju 5).

Prema stepenu savršenstva formiran je univerzalni matematički model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, izražen najznačajnijim parametrima teorijske i eksperimentalne analize, a vrednosti će biti prikazane dijagramima u realnim uslovima rada komponenti određenom tačnošću. Na osnovu toga se može predvideti mogućnost korekcije i promene uslova optimalnosti pri izboru parametara stanja komponenata tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Disertacija predstavlja uređeni univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike koji obuhvata odgovarajuće korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sklopova hidroelektrane kao i analizu programa ispitivanja koja treba biti realizovana u datom periodu, odnosno optimalno rešenje stvarnog stanja sastavnih komponenti na osnovu odgovarajućih dijagnostičkih parametara i vrednosnih veličina.

- NAUČNO POSMATRANJE

Ono je obuhvatilo teorijske metode koje su bile neophodne za dobijanje rezultata pouzdanosti i vrednosti nivoa mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanosti ležajeva, jer sve te vrednosti su uvršćene u rezultujući optimalni model koji daje zavisnost frekventne sigurnosti od dužine eksploatacionog vremena rada komponenti analiziranih sklopova. Analiza je sprovedena na modele sa primenom i bez primene parametara stanja komponenti u radu analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane.

- NAUČNI EKSPERIMENT

On je obuhvatio metodologiju rada pri analizi mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva i to statističkom metodom istraživanja koja je sprovedena primenom amplitudno – frekventne analize. Za merenje spektra mehaničkih oscilacija na sastavnim komponentama sklopova hidroelektrane, tj. za sprovođenje frekventne analize korišćeni su savremeni instrumenti za merenje mehaničkih oscilacija – vibrometri, za merenje temperature – termometri.

- NAUČNO ISPITIVANJE

Ono je primenjeno na modelu koji obuhvata zavisnost frekventne sigurnosti rada komponenata analiziranih sklopova čime je definisan radni vek komponenti na osnovu analize stabla otkaza i dobijen algoritam za sprovođenje monitornog stanja sigurnosti funkcionisanja komponenata sklopova hidroelektrane. Konstrukcijom algoritma dobijen je prikaz optimalnog modela primenom parametara stanja komponenata, tj. u odnosu na prikaz stabla otkaza preventivnog održavanja.

Na kraju je izvršena izrada univerzalnog optimalnog modela koji povezuje uticaje mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanosti ležajeva i pouzdanost za sastavne komponente sklopova hidroelektrane. Takođe, model obuhvata algoritam monitornog sistema kojim je opisan postupak njegovog formiranja, a prema izabranim mernim mestima.

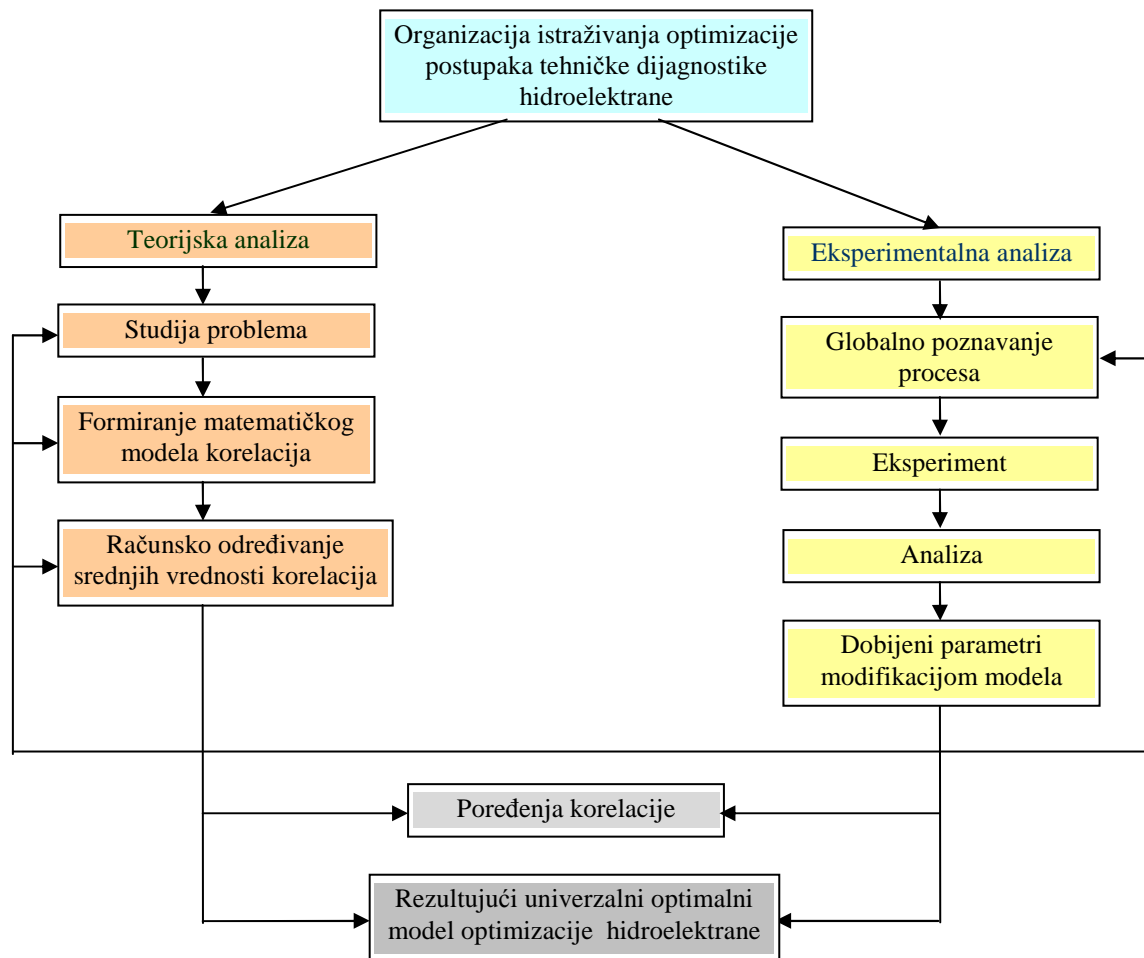
3.6. ORGANIZACIJA ISTRAŽIVANJA

Izbor odgovarajuće metode ispitivanja, opreme za merenje mehaničkih oscilacija, promene radne temperature i pohabanosti ležajeva, vrši se povezivanjem mernih instrumenata na mernim mestima. Informacije i intervencijske promene koje nastaju registruju se dijagramima u cilju postizanja optimalnih modificiranih stanja rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Metodologija analize merenja i kontrole nivoa optimizacije postupaka tehničke dijagnostike na karakterističnim mernim mestima analiziranih sklopova hidroelektrane je obuhvaćena sa dva pristupa i to:

- teorijskom analizom,
- eksperimentalnom analizom.

Analiza merenja i kontrole nivoa optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je interaktivni postupak, pri čemu se prvo postavlja teorijski model, a zatim eksperimentalni (prikaz na slici 3.1.) [93].



Slika 3.1. Metodologija postavljanja pristupa u analizi kontrole organizacije istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Da bi se blagovremeno i tačno vršila stalna kontrola merenja mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja na komponentama sklopova hidroelektrane, neophodno je sprovesti određene analize. Date analize u okviru informacionog sistema održavanja E.P.S. hidroelektrana, prema načelima standarda ISO 9000 su poštovane pri merenju mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanost ležajeva na izabranim mernim mestima kao:

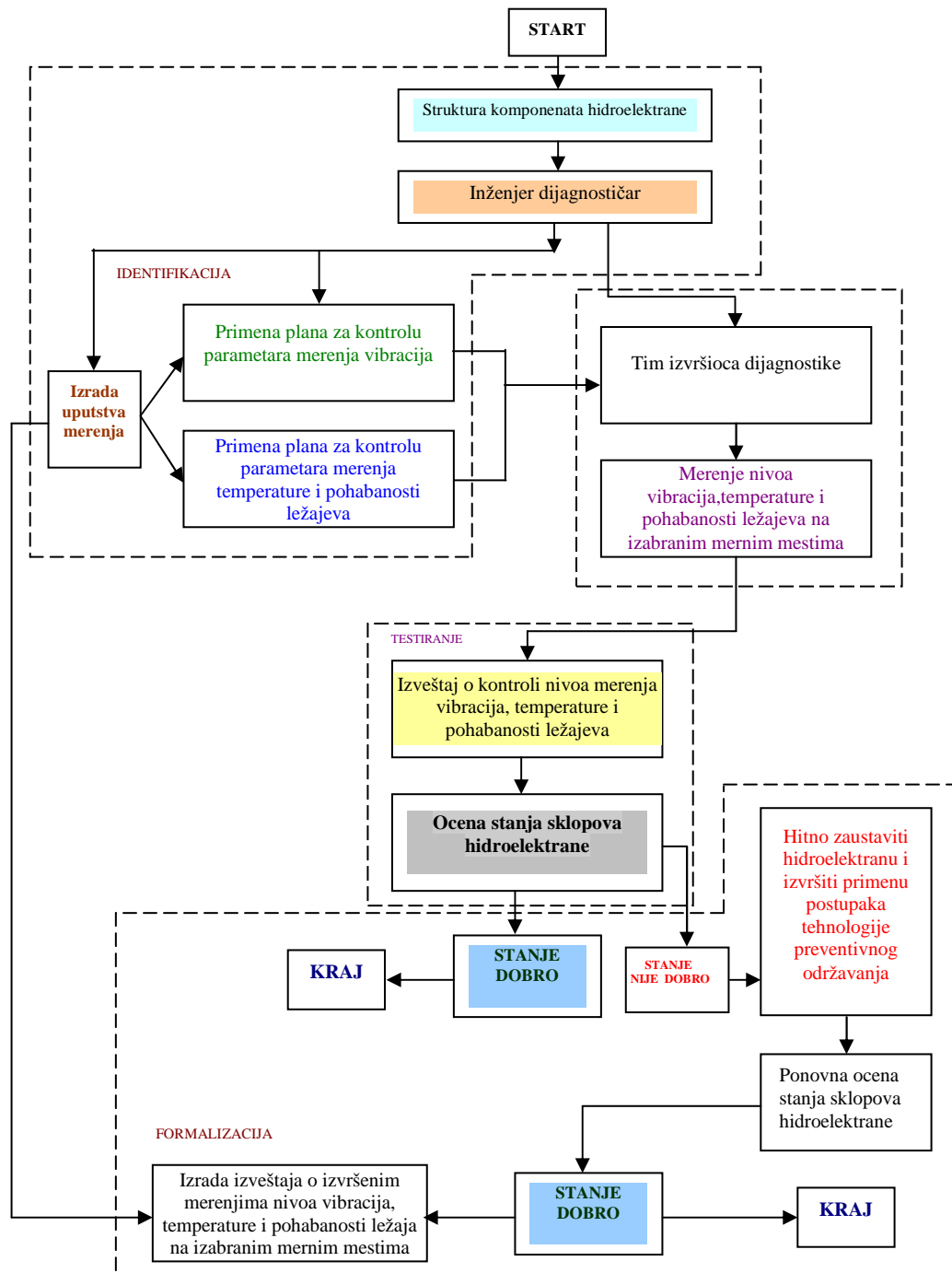
1. predmet područja primene postupka rada, odgovornosti pri radu, potrebnu dokumentaciju, sadržaj aktivnosti za kontrolu nivoa mehaničkih oscilacija, temperature na mernim mestima prema standardu ISO 9000,
2. aktivnosti koje se sprovode sa ciljem ocene trenutnog stanja komponenti hidroelektrane radi preuzimanja aktivnosti održavanja ili radi davanja određenih optimalnih prognoza njenog stanja u budućnosti,
3. proces koji odobrava predstavnik rukovodstva za standardizaciju i kvalitet u saradnji sa sektorom održavanja, koji se nesme menjati ili dopunjavati bez dobijene saglasnosti,
4. odgovornost koja se odnosi na hijerarhijsku strukturnu šemu u načinu rukovođenja pri merenju kontrole mehaničkih oscilacija, radne temperature i pohabanosti ležajeva. Najodgovorniji u lancu pripreme i merenja je inženjer dijagnostičar koji odgovara za: izdavanje uputstva korišćenja uređaja za merenje mehanike oscilacije, temperature i pohabanosti ležaja, izrada tehničke dokumentacije, obezbeđenju stručnih konsultanata (autor je saradivao sa laboratorijom za merenje mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja, Mašinski fakultet, Beograd), izradi izveštaja o izvršenim merenjima sa grafičkim dijagramima, oceni stanja komponenata hidroelektrane na osnovu izvršenih merenja nivoa mehaničkih oscilacija, temperature ležajeva i pohabanost ležajeva.

Na osnovu iznetih vrednosti formiran je blok dijagram organizacije toka kontrole nivoa merenja mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja na izabranim mernim mestima komponenata sklopova hidroelektrane (prikazana na slici 3.2.) [93].

Metodologija rešavanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike obuhvata organizaciju raspodele dijagnosticanja sastavnih komponenti i postavlja osnov u određivanju eksploatacione pouzdanosti rada hidroelektrane. Takođe, obuhvata model pouzdanosti prikazan kao blok model čime se dobija matematička zavisnost optimalne funkcije pouzdanosti rada komponenti sklopova hidroelektrane.

Organizaciona istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane autor je obavio na HE "Vrla - 3" Surdulica i Đerdap – II kod Kladova. Pri čemu su obuhvaćena merenja na HE "Vrla - 3" apsolutne vibracije pomeraja gornjeg generatorskog ležaja agregata A na mernom mestu 1, kao i frekventni spektar relativnih vibracija na vratilu agregata B, turbinskog vodećeg ležaja na mernom mestu 2, $n = 600$ o/min, agregat na mreži $P_A = 10,4$ mV i agregata A na Đerdap - II. Takođe, pregled promene temperature nosećeg ležaja agregata A, HE "Vrla - 3" na mernom mestu 2 u vremenskom intervalu rada do 55000 h. Pregled promena pohabanosti donjeg i gornjeg vodećeg ležaja agregata A, HE "Vrla - 3" na mestu 3 u vremenskom intervalu rada do 56000 h sa opterećenjem i odgovarajućom brzinom (detaljnije u poglavlju 6 i 7).

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.



Slika 3.2. Blok dijagram organizacije toka merenja nivoa vibracija, temperature i pohabanosti ležaja sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica [93]

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Kod nosećeg ležaja pojas ispravnog i sigurnog rada je do $t_N = 56000h$, dok kod vodećih ležajeva vreme je manje i iznosi $t_V = 55000h$. Donja granica eksploatacionog vremena ispravnog i sigurnog rada odnosi se bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, dok se gornja granica odnosi sa primenom parametara optimizacije (detaljnije u poglavlju 6).

Date oblasti u daljoj analizi poslužiće nam kao okvirne u određivanju merodavnih pouzdanosti. Dalja analiza je obuhvatila određivanje sigurnog rada – rada bez rizika u zavisnosti od merodavne pouzdanosti primenom odabrane statističke raspodele prema mernim mestima.

Granice ispravnog rada sastavnih komponenti hidroelektrane su:

- na mernom mestu 1, iznose $t \leq 56000h$,
- na mernom mestu 2, iznose $t \leq 55000h$,
- na mernom mestu 3, iznose $t \leq 53000h$.

Na osnovu datih granica u ovim oblastima eksploatacionog vremena t vršiće se stalna provera uticaja mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanost ležajeva, jer one predstavljaju siguran i ispravan rad komponenti, tj. eksploatacioni rad bez rizika.

3.7. NAUČNA I DRUŠTVENA OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA

Osnovni naučni doprinos obuhvata razvoj univerzalnog modela pouzdanosti koji je prikazan kao blok model sa redosledom organizacije raspodele dijagnostičiranja komponenti sklopova hidroelektrane. Primena je praćena analizom sigurnosti rada sklopova i uvođenjem postupaka izbora parametara stanja komponenti koji direktno utiču na povećanje dužine rada komponente sklopova.

Naučna opravdanost predstavlja istraživanje optimizacije postupaka tehničke dijagnostike izborom najboljih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenta sklopova hidroelektrane. Od idejnih alternativa uzeto je određivanje optimalne sigurnosti pouzdanosti rada komponenti na osnovu zabeleženih otkaza.

Primena univerzalnog modela praćena je optimizacijom postupaka tehničke dijagnostike analiziranih sklopova i prikazana algoritmom koji daje potpunu metodologiju u određivanju sigurnosti funkcionisanja komponenti hidroelektrane. Na ovaj način povećana je produktivnost rada hidroelektrane i opravdanost uvođenja optimizacije modela pri radu komponenta.

Na bazi datih istraživanja rezultati koji predstavljaju naučni i društveni doprinos predmetnoj problematici su omogućili proveru i dokazivanje glavne hipoteze i postavljenih pomoćnih hipoteza ove disertacije. Na osnovu dijagrama eksploatacije, zabeleženi su otkazi već posle 56000 časova rada, a da nijedna komponenta neće imati radni vek duži od 62000 radnih časova. U realnim uslovima praćenja serije rada komponenta je potvrdila vrednost analizirane pouzdanosti jer je došlo do otkaza komponenti nakon 62000 časova rada.

Optimalna razmatranja zahtevaju dobro poznavanje metoda uz različite pojave izbora naboljih parametara bitnih za optimizacionu analizu. Vrednosti parametara mogu se prilagođavati u zavisnosti od dobijanja optimalne vrednosti u toku rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane. Analiza dobijenih rezultata predstavlja naučnu opravdanost i suštinu modela, sa proverom izabranog parametra određuje se kontinualno praćenje promene koje opisuje radno stanje posmatrane komponente sklopa hidroelektrane.

Izbor modela određuje proveru parametra kao i određivanje pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova. Povezivanjem dijagnostičkih parametara preko izvođenja i procesa dekompozicije istih stvari se ukupna dijagnostička slika o komponentama hidroelektrane, različitosti pojave otkaza po mestu, vrsti i načinu nastanka, učestalosti i vremenu trajanja. Upotrebom ovog modela razvijen je algoritam koji predstavlja optimum korišćenja i definisanja parametara koji se menja u funkciji vremena i prikuplja podatke o vremenu rada do pojave otkaza sastavnih komponenti hidroelektrane.

Metodologija istraživanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike prikazana je algoritmom koji daje potpunu metodologiju u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalnih sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza u slučaju bez primene parametara optimizacije tehničke dijagnostike i sa primenom parametara optimizacije tehničke dijagnostike.

Od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane formira se univerzalni model. Obuhvaćeni su otkazi usled povećanih nivoa mehaničkih oscilacija, povećanja radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Ovi parcijalni otkazi čine paralelnu spregu i njihov uzajamni uticaj određuje pouzdanost rada sastavnih komponenti hidroelektrane.

Dobijeni rezultati određenih vrednosti analizirane pouzdanosti predstavljaju model pouzdanosti na osnovu model blok dijagrama na mernim mestima mehaničkih oscilacija, optimizacija pouzdanosti na osnovu radnih temperatura i optimizacija pouzdanosti na osnovu pohabanosti ležajeva. Takođe, obuhvaćene su vrednosti merodavne pouzdanosti usled povećanja nivoa mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Postupci njihovih međusobnih uticaja i povezanošću formiraju se korelacije parametara postupka tehničke dijagnostike hidroelektrane:

1. K_1 – korelacija parametara optimizacije mehaničke oscilacije i temperatura,
2. K_2 – korelacija parametara optimizacije mehaničke oscilacije i pohabanosti ležajeva,
3. K_3 – korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Metodologije koje na osnovu korelacija parametara optimizacije uzajamno su povezane paralelnim spregama i sprovedene analizom modela primenjuju se u empirijskom istraživanju. Tako da je ovaj model univerzalnog tipa jer se može primeniti kako na jednostavne, tako i na složene sisteme bez obzira na dimenzije komponenti sklopova.

Model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sa primenom izabranih novih dijagnostičkih parametara stanja ima preventivni karakter. Preventivni karakter obezbedićemo stalnim praćenjem parametara stanja hidroelektrane, radi blagovremenog otkrivanja promena dozvoljene vrednosti parametara stanja ili otkrivanje granične vrednosti parametara stanja pri kojoj se javlja otkaz.

Univerzalni model je obuhvatio analizu podmodela 1, 2 i 3 i uvođenju korelacionih zavisnosti smena, unošenja vrednosti, amplituda oscilovanja i frekvenci. Dobijene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine, bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i takođe su dobijene vrednosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

Dobijena empiriska istraživanja su obuhvatila u prvom delu formiranja modela blok dijagrama pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija. Objasnjene su karakteristike uređaja za merenje mehaničkih vibracija, a zatim se pristupilo matematičkoj formi određivanja konačnog izraza univerzalne jednačine optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u određivanju zavisnosti merodavne pouzdanosti nivoa amplituda i kružnih frekvencija.

Naučna opravdanost daljom analizom istraživanja je obuhvatila određivanje ekstremnih vrednosti radnih temperatura ležajeva i njenu optimizaciju. Na osnovu eksploatacionih podataka utvrđenih ekstremnih vrednosti radnih temperatura ležajeva formiran je interval statističkog skupa ($68^{\circ}\text{C} \leq T_i \leq 71^{\circ}\text{C}$) i određeni pokazatelji eksploatacione raspodele. Takođe, izvršena je ocena sposobnosti provere parametara tehničke dijagnostike pri merenju temperatura, a pri tome su konstruisani dijagrami promene parametara stanja komponenata u funkciji raspodele odstupanja temperature ležajeva.

Na osnovu izbora parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike uzeta je analiza pohabanosti ležajeva, a krenulo se sa zabeleženim otkazima na mernim sklopovima hidroelektrane i to bez primene parametara optimizacije zabeležene su vrednosti unutrašnjih prečnika ležajeva. Takođe, na osnovu aritmetičkih sredina i idealne vrednosti zazora određene su njegove ekstremne vrednosti. Početni parametri su poslužili za određivanje merodavnih zazora, određivanje oblasti sigurnog i ispravnog rada kao i oblast rizika.

Naučna i društvena opravdanost istraživanja predstavlja formiranje univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane koji će obuhvatiti najbolje parametre teorijske i eksperimentalne analize, tj. parametre uticaja mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanost ležajeva koji su povezani u matematičkom obliku. Na osnovu toga se povećala procentualna sigurnost funkcionisanja komponenti sklopova hidroelektrane, a time Elektroprivreda Srbije postiže uštede u proizvodnji električne energije.

4.0. METODE REŠAVANJA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

4.1. TEORIJA O OPTIMIZACIJI POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE

Metode rešavanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike predstavljaju u teoriji i praksi analize rešenja čiji kvalitet i stepen egzaktnosti zavisi od kvaliteta i stepena odabranih, tj. korišćenih parametara. Sama primena neadekvatnih parametara ne rezultuje u suštini najbolja rešenja. Odstupanja od optimalnog rešenja su moguća i realna zbog nepravilne procene i izbora glavnih uticajnih parametara.

Optimizacioni parametri sa aspekta promenljivosti na konkretnim slučajevima smatraju se povoljnim, ako se analiziraju komponente sklopova hidroeledrone ili sam proces tih parametara i pri tome daju najbolje rezultate. Najveća postignuta vrednost smatra se najboljom. Ako parametar ima najbolju vrednost, onda sa spregom analize pouzdanosti druge komponente nudi rešenje koje ima maksimalnu vrednost.

Optimalna vrednost dobijena izborom parametara može se predstavljati maksimumom ili minimumom neke funkcije pouzdanosti komponenata. Pri tome vrednosti radnih promenljivih, koje se prilagođavaju ili menjaju, mogu obezbediti optimalnu vrednost određenih parametara, tj. uzimaće se kao optimalni uslovi.

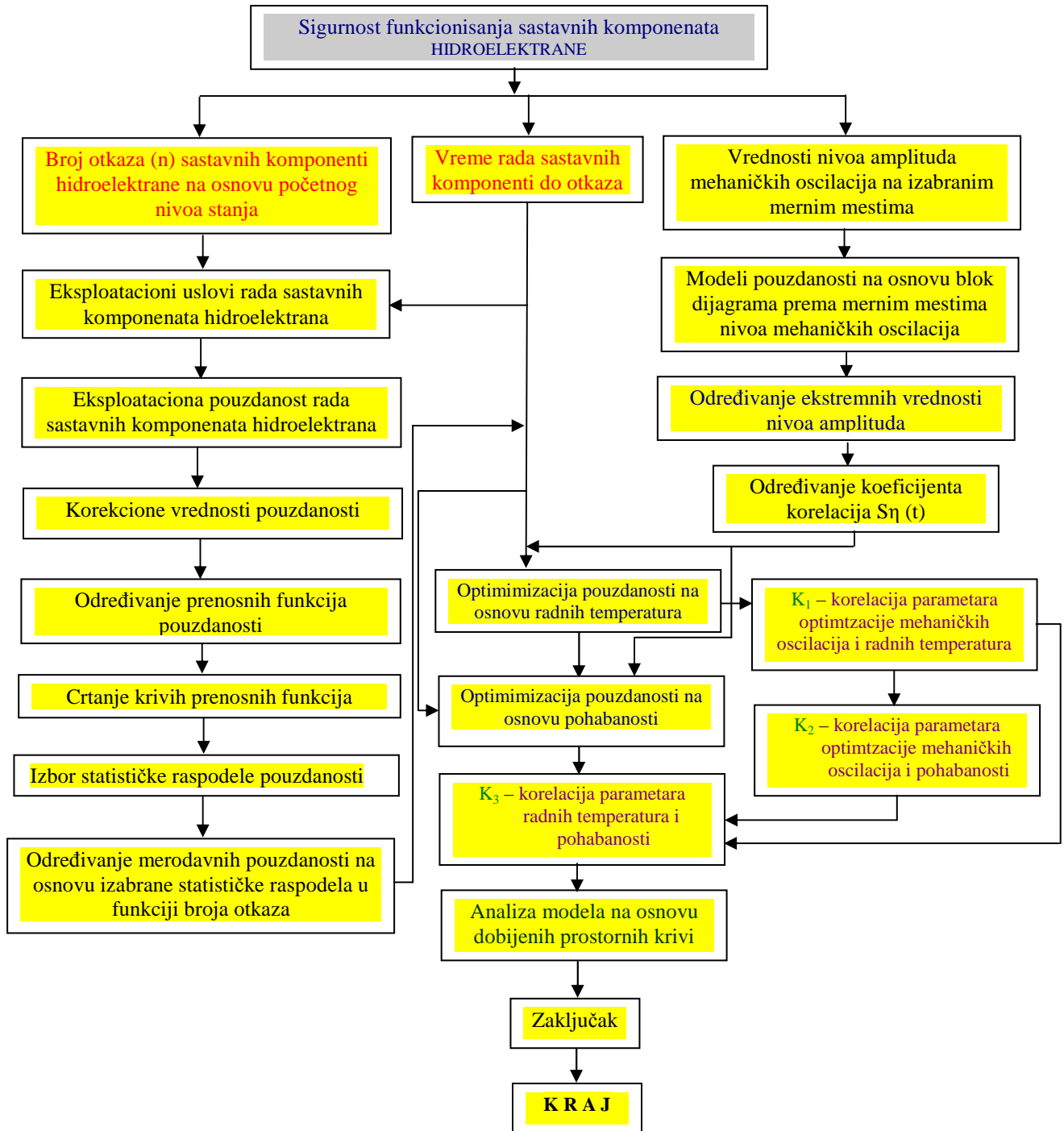
Neke zavisnosti optimizacionih kriterijuma mogu biti linearni ili približno linearni, stalno rastući ili opadajući, bez izraženog maksimuma ili minimuma funkcije. Tako neki optimum izražene vrednosti raste ili opada sa rastom ili padom uticajne veličine. Taj rast ili pad se odvija do granica mogućeg za određene parametre komponenata hidroeledrone.

Optimizaciona razmatranja zahtevaju dobro poznavanje matematičkih metoda uz različite pojave kao, dobru sposobnost identifikovanja ključnih parametra bitnih za optimizacionu analizu sastavnih komponenata sklopova.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljeg parametra između više mogućih alternativa. To znači da važe za svaku komponentu sklopa hidroeledrone posebno, što govori da organizovanje optimalnog procesa primene parametra stanja komponenti uključuje više komponenata sklopova, predstavlja problem koji treba posebno da se izučava i rešava. Reč je o tome da se stanje hidroeledrone iskaže preko stanja sastavnih komponenti sklopova.

Za određivanje optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroeledrone potrebno je imati obimne informacije, kako za hidroeledranu u celini tako za sve važne sastavne komponente sklopova. Same informacije mogu se obezbediti primenom savremene informatičke tehnologije, tj. metode primene parametra stanja komponenti pomoću računara. Na slici 4.1. je prikazan algoritam metodologije optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroeledrone HE "Vrla - 3" Surdulica [93].

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroeledranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

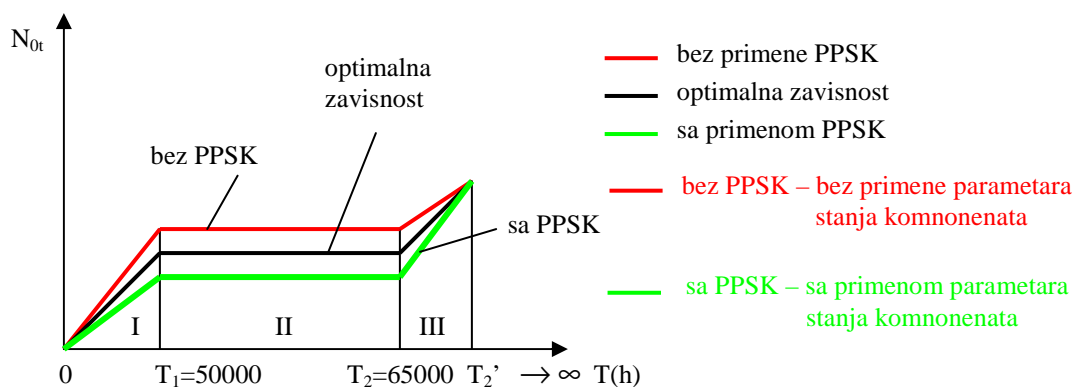


Slika 4.1. Algoritam metodologije optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica [93]

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Analizirani sklopovi u početku eksploatacije nisu imali veći broj otkaza već njihove sastavne komponente, dolazilo se do nepreciznosti u njihovoj montaži koje dovode do određenih zastoja i može se reći da ovo nisu rani otkazi u uhadavanju sklopova već nedostaci pri puštanju hidroelektrane u njen eksploatacioni rad.

Od uhadavanja stanja rada komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, postepeno dolazi do nestabilnog rada (npr. habanje komponenti sklopova), a u sprezi sa tim i do povećanja otkaza pojedinih njihovih komponenti. Prvi otkazi se javljaju preko 50000 h rada na sastavnim komponentama analiziranih sklopova hidroelektrane. Od perioda 16.03. 2006. god. do 30.08. 2006. god. dolazi do intenzivnog rasta otkaza njihovih sastavnih komponenti, pa se za ovaj period može reći da je on period njihovog nestabilnog rada (prikaz na slici 4.2.). Ovo se može prikazati dijagramom primene optimalne zavisnosti broja otkaza N_{ot} u funkciji eksploatacionog vremena rada komponenta (t) (prikaz u tabelama 4.1. i 4.2.).



Slika 4.2. Oblasti primene optimalne zavisnosti broja otkaza komponenti HE "Vrla - 3" Surdulica u funkciji njihovog vremena eksploatacionog rada i to bez primene i sa primenom parametara stanja komponenti (PPSK)

Na prikazanoj slici 4.2., mogu se uočiti tri oblasti optimalne zavisnosti u kojima nastaju otkazi bez primene i sa primenom parametara stanja komponenti hidroelektrane i to:

- I - oblast pri uhadavanju komponenti sklopa $0 \div T_1$,
- II - oblast uhadanog rada komponenti sklopa $T_1 \div T_2$,
- III - oblast nestabilnog rada komponenti sklopa $T_2 \div \infty$.

Na osnovu broja evidentiranih otkaza koji su nastali (npr. pohabanost sastavnih komponenta sklopova), izvršena je procedura određivanja pouzdanosti iz eksploatacionih uslova svakog analiziranog sklopa.

Može se konstatovati da su u tabelama 4.1. i 4.2. prikazane sastavne komponente hidroelektrane (prikaz na slici 4.3.): budilica N_1 , zvono N_2 , sprovodni aparat R_1 , regulator R_2 , i imaju minimalan broj otkaza iz tog razloga u tabelarnom pregledu nisu evidentirani (njihova pouzdanost je bila maksimalna $R_{N_1} = R_{N_2} = R_{R_1} = R_{R_2} \approx 1,0$).

Analiza otkaza sastavnih komponenti analiziranih sklopova biće skoncentrisana na oblasti njihovog nestabilnog rada jer tada dolazi do njihovog inteziviranja. Ako sa T_1 – obeležimo vreme do kada se analizirani sklop uhadava, a sa T_2 – vreme do koga je analizirani sklop imao rad bez otkaza (eksploataciono – siguran rad) onda je svaki interval vremena posle T_2 interval nestabilnog njegovog rada $T_2' > T_2$, tj. interval rada sa rizikom.

U tabeli 4.1. izvršen je prikaz svih otkaza koji su nastali usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija, povišene temperature i pohabanost ležajeva na mernim mestima analiziranih sklopova hidroelektrane HE "Vrla - 3" Surdulica, tj. njihovih sastavnih komponenti. Tabela 4.1. predstavlja zabeležene otkaze na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenti hidroelektranata.

Datum	Broj otkaza na mernim mestima sklopova hidroelektrane HE "Vrla - 3"				
	N_3	N_4	N_6	N_7	
01-31.08. 1995.	Generalni remont				
16.03.1998.	Bez primene parametara tehničke dijagnostike	12	11	19	15
20.03.1998.		09	08	10	11
06.04.1998.		10	12	09	14
19.04.1998.		11	17	10	16
24.04.1998.		12	12	12	14
09.05.1998.		10	12	16	12
21.05.1998.		11	14	12	13
30.05.1998.		13	13	13	11
02.06.1998.		10	11	09	08
10.06.1998.		08	12	16	12
01-31.08. 2000.	Generalni remont				
11.03.2003.	Sa primene parametara tehničke dijagnostike	09	07	13	10
14.03.2003.		07	08	07	08
08.04.2003.		08	10	05	08
17.04.2003.		10	15	06	11
29.04.2003.		09	10	07	10
10.05.2003.		07	10	10	07
22.05.2003.		10	11	07	08
07.06.2003.		08	10	08	07
15.06.2003.		07	09	06	05
21.07.2003.		06	08	11	07
01-31.08. 2006.	Generalni remont				

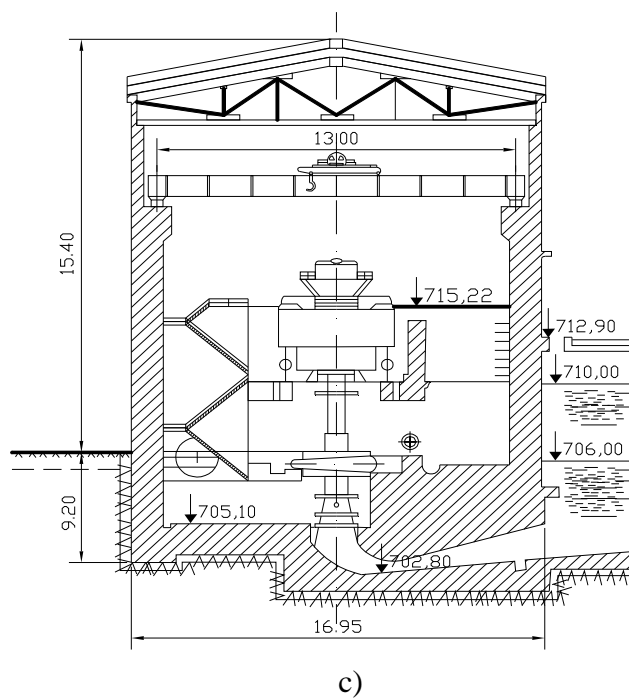
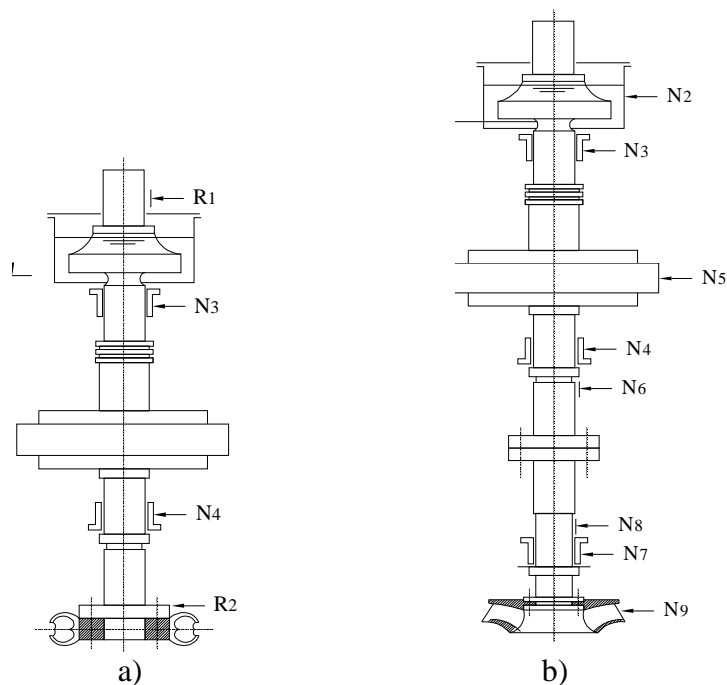
Tabela 4.1. Broj otkaza na mernim mestima sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica

Može se konstatovati da su u tabelama 4.1. i 4.2. prikazane sastavne komponente: N_1 do N_9 , R_1 i R_2 imale otkaze u vremenu do 29.08. 2004. god., nakon upotrebe univerzalnog modela gotovo nisu imale niti jedan otkaz (njihova pouzdanost je bila maksimalna).

Analiza broja otkaza analiziranih usled povećanog nivoa mehaničkih oscilacija, promene temperature i pohabanost ležaja na sastavnim komponentama analiziranih sklopova hidroelektrane (prikaz na slici 4.3.) u posmatranom vremenu eksploatacije je pokazala da su se prvi otkazi pojavili oko 50000 h njihovog rada i to na sastavnim komponentama na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenata i blizu 58000 h rada onima na kojima su ovi postupci sprovedeni.

Iz tabele 4.3. proizilazi da postoje tri grupe rizika otkaza i to:

- I grupa – grupa visokog rizika otkaza u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: turbinski ležaj (N_7), gornji vodeći ležaj (N_4), noseći ležaj (N_3), donji vodeći ležaj (N_6),
- II grupa – grupa srednjeg rizika u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: budilica (N_1), ugljeni zaptivač (N_8), radno kolo (N_9),
- III grupa – grupa niskog rizika otkaza u koju spadaju sledeće sastavne komponente analiziranih sklopova: regulator (R_2), sprovodni aparat (R_1), rotor (N_5), zvono (N_2).



Slika 4.3. Raspored i numeracija mernih mesta merenja vibracija, temperatura i pohabanost ležaja HE "Vrla - 3" Surdulica, a i b) raspored mernih mesta (budilica N₁, zvono N₂, noseći ležaj N₃, gornji vodeći ležaj N₄, rotor N₅, donji vodeći ležaj N₆, turbinski ležaj N₇, ugljeni zaptivač N₈, radno kolo N₉, sprovodni aparat R₁, regulator R₂) c) presek HE "Vrla - 3" Surdulica

Na osnovu rangiranja prema vrednostima otkaza sastavnih komponenti analiziranih sklopova dobijene su grupe rizika u kojima su svrstane komponente prema broju nastalih otkaza čime u analizi sigurnosti funkcionisanja treba vršiti češća merenja na mernim mestima koja obuhvataju rad navedenih komponenti, tabela 4.2.

R.B.	Naziv sastavne komponente sklopa	Broj otkaza na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenata	Broj otkaza na kojima su primenjeni parametri stanja komponenata
1	Budilica (N ₁)	32	11
2	Zvono (N ₂)	24	12
3	Noseći ležaj (N ₃)	106	81
4	Gornji vodeći ležaj (N ₄)	123	98
5	Rotor (N ₅)	27	15
6	Donji vodeći ležaj (N ₆)	126	80
7	Turbinski ležaj (N ₇)	127	82
8	Ugljeni zaptivač (N ₈)	48	15
9	Radno kolo (N ₉)	26	12
10	Sprovodni aparat (R ₁)	13	4
11	Regulator (R ₂)	16	2

Tabela 4.2. Broj ukupnih otkaza na sastavnim komponentama analiziranih sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenata i onima na kojima su sprovedeni

U tabeli 4.2., izvršen je prikaz svih otkaza koji su nastali usled povećanja nivoa mehaničkih vibracija, temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih sklopova hidroelektrane, tj. njihovih sastavnih komponenti, na kojima nisu sprovedeni parametri stanja komponenti, kao i otkazi na kojima su primenjeni parametri stanja komponenti (upotrebom univerzalnog modela na sastavnim komponentama sklopova hidroelektrane, detaljnije u poglavlju 5).

4.2. OPTIMIZACIJA POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE PRIMENOM ANALIZE KORISNE VREDNOSTI PROCESA

Metode optimizacije postupaka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane pomoću vrednosne analize izbora naboljih parametara vrše se primenom algoritma za određene procese (ocenjene na osnovu sistema ciljeva) izračunavanja ekstremne vrednosti rada komponenti i omogućuju kvantitativno upoređenje tih vrednosti, a njihov raspored rada se vrši po određenom redosledu.

Ova analiza predstavlja neposredni postupak optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, daje osnovu za pokušaj pronalaženja najznačajnijih parametara i najboljeg rešenja iz određenog broja varijanti. Može se koristiti u modifikovanom obliku kombinovano sa konstruisanjem uz pomoć morfološkog pregleda u cilju iznalaženja najpovoljnije kombinacije.

Kao osnova za analizu korisne vrednosti služi matrica korisne vrednosti parametara, a njeno postavljanje se vrši sistematski u sledećim međustepenima [73]:

- postavljanje sistema ciljeva (npr. praćenje mehaničkih vibracija - poglavlje 7.1.),
- određivanje faktora odmeravanja (npr. merenje temperature ležajeva - poglavlje 7.2.),
- postavljanje matrica veličina cilja (npr. pohabanost ležaja - poglavlje 7.3.),
- postavljanje matrica vrednosti cilja.

Sastavljanje svih kriterijuma ocenjivanja, utvrđivanje i određivanje adekvatnog cilja koji u suštini obuhvata sve relevantne osobine i varijante koja se ocenjuje, predstavlja prvi stepen analize izbora parametara korisne vrednosti. Izbor parametara vrši se na osnovu ukupnog broja otkaza komponenti, dok se ostali parametri mogu odrediti pouzdanošću rada i nalaženja rešenja ili u toku realizacije sistema ciljeva.

Postavljanje ciljeva izbora parametara vrši se uz odgovarajuće vođenje računa o razlikama između:

- određenih zahteva,
- minimalnih zahteva.

Određeni zahtevi se po pravilu, ne procenjuju, niti uvode u optimiziranje, oni čine ispunjenje zahteva za apsolutnu nepogodnost i konstrukcije komponenata. Slične posledice se mogu javiti umanjnjem minimalnih zahteva. Minimalni zahtevi se mogu podvrgnuti ocenjivanju, samo u slučaju ako su prekoračene unapred date minimalne vrednosti parametara stanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Od broja izabranih parametara koji se uzimaju u obzir prilikom procenjivanja, zavisi i složenost sistema ciljeva. Po pravilu, bolje je kod manje kompleksnih hidroenergetskih sistema, glavni cilj podeliti na više kompleksnih međuciljeva, nego ga posmatrati kao jedinku. Poželjno je, radi pospešivanja rezultata optimizacionih razmatranja i međuciljeve podeliti na uticajne komponente sklopova, sve dok se na kraju ne dođe do dovoljno fine podele. Međuciljevi i niži ciljevi su obuhvaćeni pojmom delimičnih ciljeva.

[73]. Lee, F., Gardner, J., Thomson, G., Maintainability aspectsof process plant pipe joints, proc, Imashe Vol.201, No. A1, London, 1991.

Mogućnost korišćenja kompleksnih sistema ciljeva je bazirana postavljanjem većeg broja matrica korisne vrednosti. Na osnovu njihovog povezivanja (npr. preko faktora odmeravanja i provere temperature ležajeva) kasnije se donose odluke.

Procedura zahteva da se nakon postavljanja ciljeva i izbora metoda još jednom ispituju svi delimični ciljevi sa aspekta izbora parametara njihove relevantnosti i da eliminišu nebitne podatke o pojavi otkaza. Zatim se (npr. nakon uspostavljanja potpunog sistema ciljeva) adekvatnim uređajem odmerava i utvrđuje procena koja predstavlja ekstremnu vrednost parametra relativnog značaja.

Pri tome je pravilo odmeravanja vrednosti koje su od istog značaja kao i pravilo određivanja tačaka. Ovde se, takođe mora voditi računa o tome da odmeravanje dobijenih vrednosti odgovaraju merilima odgovornih lica, odnosno kriterijuma primene merenja i načina izvođenja (npr. merenje temperature ležajeva).

Matrice vrednosti ciljeva nastaju iz matrice veličina ciljeva prikazanih komponentata, a prezentuju se u obliku tabela. Smatra se da je iz praktičnih razloga jednostavnije matricu vrednosti ciljeva korišćenja parametara obuhvatiti zajedno sa matricom korisne vrednosti. Pri tome matrica korisne vrednosti služi kao osnova za uporedno ocenjivanje svih postojećih vrednosti parametara. U ovu matricu se uvodi pojam delimična korisna vrednost, a označava proizvod vrednovanja koji je dodeljen svakom novom parametru.

Odgovarajućom algoritmizacijom korisne vrednosti mogu se za sve varijante obuhvaćene matricom korisne vrednosti izračunati ekstremne vrednosti parametara. Ovi parametri korisne vrednosti omogućuju kvantitativno upoređenje varijanti i njihovo rangiranje. U procesu algoritmizacije korisne vrednosti moguće je koristiti različite algoritme, ali pri ocenjivanju tehničkih proizvoda uobičajna je primena pravila sabiranja. Ovim putem se korisna vrednost jedne varijante dobija iz zbira svih delimično korisnih vrednosti.

U cilju olakšavanja ili umanjenja ovakvih posledica potrebno je rezultate analize korisne vrednosti kritički razmotriti pre konačnog prihvatanja. U tom smislu se preporučuje još jedno tačno ispitivanje svih glavnih grupa varijanti. Isto tako, važno je odluku ne donositi bezuslovno prema najvećoj ukupnoj korisnoj vrednosti već je moguće odluku donositi prema pravilu zadovoljavajućeg rešavanja. Po ovom pravilu se iz nekog ograničenog polja rešenja daljim ispitivanjem pronalazi najbolje rešenje. U suštini, pravilo zadovoljavajućeg rešenja može biti značajno kao sporedan uslov kod pravila maksimalne koristi.

Najbolje rešenje daje varijanta koja ima najznačajnije parametre i najveću korisnu vrednost, pri čemu sve njene delimične vrednosti prelaze određenu minimalnu vrednost. Ovo pravilo (maksimalne koristi ispravno zadovoljavaju data rešenja) ima smisla kombinovati kod vrlo kompleksnih sistema sa obimnim matricama korisnih vrednosti. Pri tome pojedinačno ocenjivanje ima veoma mali uticaj na ukupan rezultat. U tom slučaju se pogodni algoritmi mogu lako programirati.

4.3. ODREĐIVANJE MOGUĆNOSTI POSTAVLJANJA DIJAGNOSTIKE

4.3.1. POSTAVLJANJE DIJAGNOZE STANJA

Pri utvrđivanju dijagnoze sastavnih komponenata sklopova hidroelektrana, tj. u slučaju kada se kontroliše više dijagnostičkih parametara, dijagnoza se svodi na utvrđivanje veličine dijagnostičkog parametra (S) i upoređivanjem sa normativom.

Za komponente sklopova hidroelektrane kod kojih se dijagnoza utvrđuje pomoću diskretnih dijagnostičkih parametara moguće su samo dve varijante dijagnoze i to:

$S < S_r$ – sistem "u radu",

$S > S_o$ – sistem "u otkazu".

Postavljanje dijagnoze za pojedine sastavne komponente sklopova hidroelektrane, kod kojih se koristi veći broj dijagnostičkih parametara, veoma je složeno. Svaki dijagnostički parametar može biti povezan sa više strukturnih, a veličina svakog od njih može ukazati na neku neispravnost. To znači da ako je broj dijagnostičkih parametara n , broj mogućih stanja dijagnosticiranog sistema je 2^n . Pri tome, postavljanje dijagnoze se svodi na to da se iz niza mogućih dijagnosticiranih stanja izdvoji ono stvarno.

Analiza funkcija gustine pojava stanja u otkazu i intenziteta otkaza pokazuje da se one razlikuju i da funkcija intenziteta otkaza u odnosu na funkciju gustine pojave stanja u otkazu brže menja na osnovu kojih se određuju oblasti pouzdanosti rada komponenata kao i oblast njihovog smanjenja.

Analiza stabla otkaza (detaljnije u poglavlju 2.3.) je prikazala važne događaje koji su nastali usled povećanih nivoa vibracija ili temperature. Zabeležene vrednosti otkaza su poslužile za određivanje pouzdanosti rada sastavnih komponenti analiziranih sklopova.

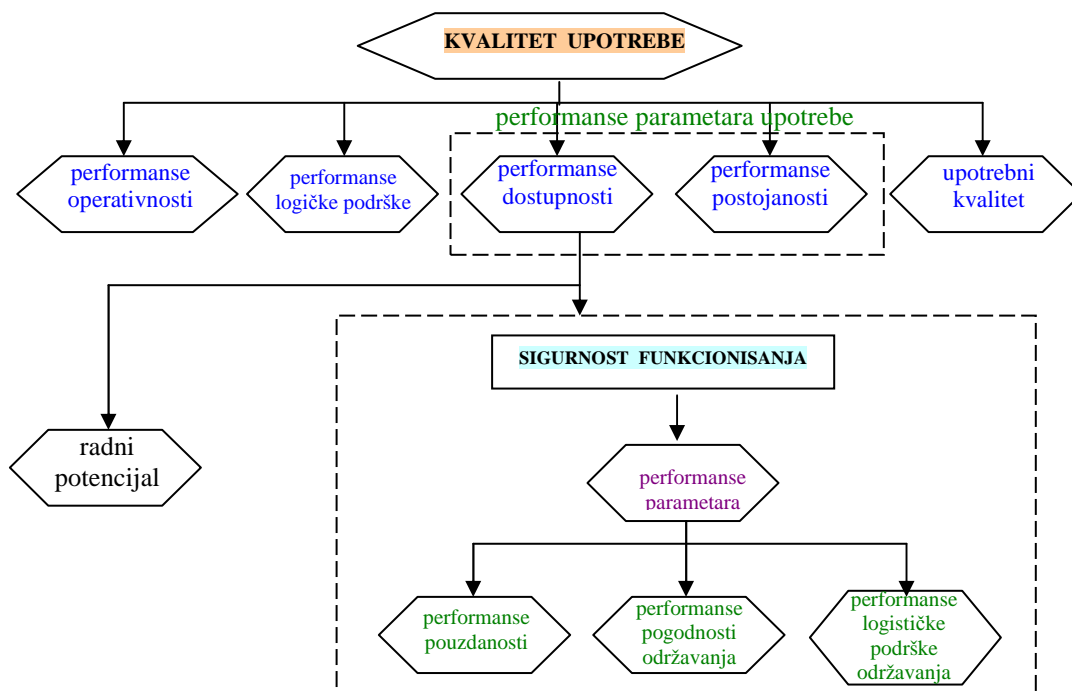
Određivanje parametara pouzdanosti rada sastavnih komponenti uzeta je kao deo zbirnih pojava sigurnosti funkcionisanja i to njegove performanse kvaliteta upotrebnog rada komponenata sklopova hidroelektrane (prikaz na slici 4.4.) [93] i obuhvata:

- performanse parametara upotrebe (dostupnost i postojanost),
- performanse parametara raspoloživosti (pouzdanost, pogodnost održavanja, logičke podrške preventivnog održavanja).

Da bi najbrojnije performanse parametara obezbedile sigurnost funkcionisanja rada sklopova hidroelektrane potrebno je izvršiti povezivanje pouzdanosti njihovog rada i optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri sprovođenju univerzalnog modela.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Za određivanje pouzdanosti sastavnih komponenti analiziranih sklopova koriste se podaci o otkazima koji su nastali zbog uticaja povećanja nivoa vibracija, temperature i pohabanosti ležajeva, zabeležene iz eksploatacije njihovog rada (tabela 4.1., 4.2. i 4.3.) [93].



Slika 4.4. Kvalitet upotrebe sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica prema IEC standardu [93]

Za analizu podataka pri određivanju pouzdanosti komponentata sklopova korišćene su sledeće predmetode [93]:

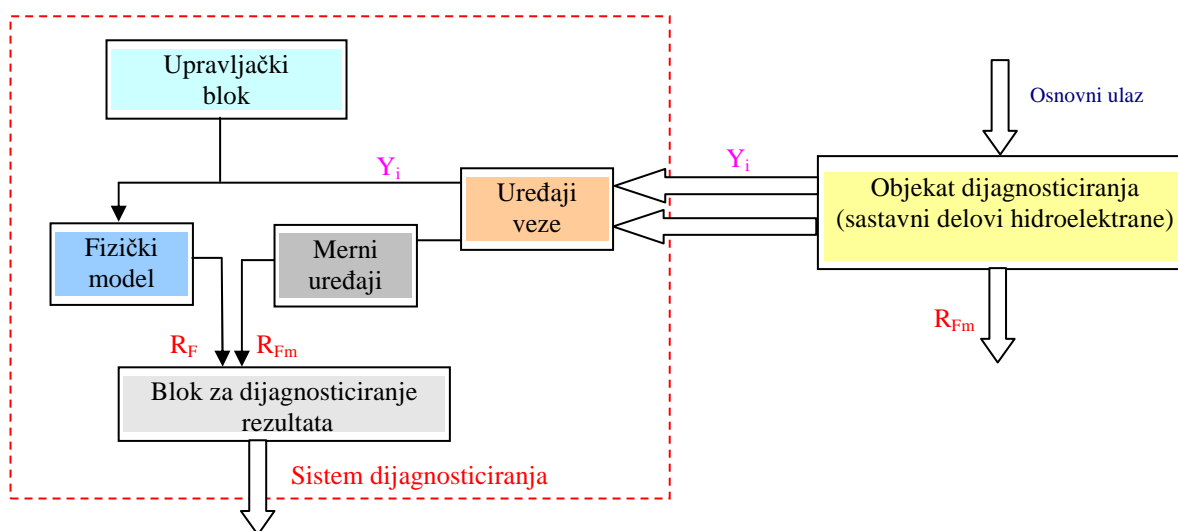
- **Predmetoda 1:** sastoji se u tome da se za dobijene eksploatacione podatke u otkazima, zbog uticaja povišenog nivoa vibracija, temperature i pohabanosti ležajeva, definiše empirijska funkcija gustine raspodele $f_a(t)$, empirijska funkcija intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$ i empirijska funkcija pouzdanosti $R_a(t)$, (detaljnije u poglavlju 6).
- **Predmetoda 2:** koristi se za izbor statističke raspodele pouzdanosti komponentata analiziranih sklopova koja najviše odgovara dobijenim podacima o otkazima koji su nastali zbog uticaja povišenog nivoa vibracija, temperature i pohabanosti ležaja u eksploataciji njihovog rada, (detaljnije u poglavlju 7).

Stanje hidroelektrane određeno je strukturnim parametrima X_1, X_2, \dots, X_j , i u procesu dijagnostike mere se odgovarajući dijagnostički parametri S_1, S_2, \dots, S_k , koji sadrže neophodne informacije o stanju drugih sastavnih komponentata sklopova hidroelektrane. Postavljanje dijagnoze može biti rešenje samo u slučaju ako je broj dijagnostičkih parametara veći ili jednak broju strukturnih parametara ($n \geq j$).

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Pored strukturnih, veliki značaj imaju i dijagnostički parametri. Od njih neposredno zavisi mogućnost merenja strukturnih parametara komponenata hidroelektrane. Ovo se, teško postiže bez rasklapanja sastavnih sklopova hidroelektrana. Dijagnostički parametri su posredne - individualne veličine, koje su povezane sa strukturnim parametrima i nosioci su tačnih informacija o stanju sastavnih komponenata sklopova.

Šema test dijagnostike komponenti sklopova hidroelektrane prikazana je na slici 4.5. HE "Vrla - 3" Surdulica [93]. Upravljački blok algoritam dijagnosticiranja preko izvora dejstva generiše dejstva Y_i elementarnih provera $t_i \in T$ i u saglasnosti sa algoritmom dijagnosticiranja po određenom redosledu šalje ih preko uređaja sistema za vezu komponenata hidroelektrane dijagnosticiranja (npr. stanje ležajeva u toku njihovog životnog veka). Moguć je i uticaj na model hidroelektrane preko izvora dejstva. Upravljački blok može direktno uticati na sklop hidroelektrane preko uređaja za vezu. U opštem slučaju sistem veze može vršiti komutaciju kanala veze u odnosu na signale bloka upravljanja.



Slika 4.5. Blok šema testa dijagnostike parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

4.3.2. GREŠKE U PROCESU DIJAGNOZE STANJA

Hidroelektrana podešena za dijagnozu treba da ima dobru osobinu u pogledu primene dijagnostičkih postupaka. U sadašnjem vremenu praćenja komponenata sklopova u većini slučajeva ovi problemi tehničke dijagnostike, prethodno stanje, kontrola i usavršavanje u uslovima proizvodnje i preventivnog održavanja do sada nisu u potrebnoj meri uzeti u obzir.

Procenjivanje važnosti pravovremene detaljne razrade pitanja organizacije efektivnih procesa dijagnoze vrši se u smislu automatizacije istraživanja neispravnosti sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane. Povećanje materijalnih troškova, predstavlja uzrok povećanog utroška vremena rada usled opravke i uključenja većeg broja kvalifikovane radne snage koja se angažuje pri organizaciji preventivnog održavanja.

Procena u procesu dijagnoze stanja komponenata sklopova hidroelektrane obuhvata postupke, metode, tehnike, kojima se obezbeđuje ispravan rad u određenom vremenskom periodu, radi sprečavanja ili odlaganja pojave stanja komponenata hidroelektrane u otkazu.

Analiza otkaza na sastavnim komponentama sklopova obuhvata primenu metoda analize stabla otkaza koji nastaju usled dejstva mehaničkih oscilacija, povećane temperature, lošeg podmazivanja i pohabanosti ležajeva (detaljnije u poglavlju 2.3.). Ova analiza će kasnije biti iskorišćena u analizi pouzdanosti rada komponenata sklopova hidroelektrane (detaljnije u poglavljima 6 i 7).

Treba istaći da će analize obuhvatiti otkaze koji se najčešće pojavljuju u eksploataciji rada analiziranih sklopova hidroelektrane, a dobijeni su stalnim merenjima nivoa mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva. Otkazi su tako analizirani da jasno ukazuju na posledice nemogućnosti rada komponenti sklopova hidroelektrane.

Izbor parametara stanja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane vrše se na osnovu analiza i procene dijagnostičkog signala, načina i uslova rada, faktora koji utiče na radnu sposobnost komponente sklopa hidroelektrane.

Većinu objektivnih razloga ovakvog pristupa možemo nazvati nedostatkom razvoja teorije i metoda tehničke dijagnostike kao i nedovoljno proučavanje principa izrade i funkcionisanja komponenti za dijagnozu. Važna pojava je i tehnološki faktor koji se sastoji u tome što dokumentaciju svih razrada ima proizvođač hidroelektrana, koji neposredno razrađuje (komponente, agregate, podsklopove), daje dovoljan značaj pitanjima organizacije preventivnog održavanja projektovanih komponenta sklopova hidroelektrane.

Znake provere ispravnosti, provere radne sposobnosti i istraživanja neispravnosti u uslovima proizvodnje, preventivnih popravki i stanja komponenata sklopova u mnogim slučajevima nužno je rešavati posle projektovanja i izrade.

Tokom celog perioda korišćenja sklopova hidroelektrane su izloženi uticaju širokog spektra spoljašnjih i unutrašnjih poremećaja stohastičkog karaktera, koji dovodi do odstupanja njihovih karakteristika i parametara stanja od nominalnih vrednosti. Težnja je da se radne karakteristike sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane održe u granicama dozvoljenih odstupanja ili ponovo vrate u zadati položaj (npr. provera oštećenja ležajeva pri habanju).

Sprovedenjem optimizacije postupaka tehničke dijagnostike kao i svih mera nužnih da sastavne komponente sklopova hidroelektrane funkcionišu na propisani način, potrebno je razviti performanse u propisanim granicama, tj. sa kvalitetom, bez otkaza i uz propisano obezbeđenje životne sredine.

4.3.3. KONSTRUKTIVNA REŠENJA PODESNA ZA DIJAGNOZU STANJA HIDROELEKTRANA

Hidroelektrana je podešena za dijagnozu kada se sve dijagnostičke mere mogu obaviti pristupačno sa visokom radnom produktivnošću i potrebnom tačnošću i sa što manjim troškovima. Konstruktivno rešenje predviđeno za dijagnozu proizilazi iz opšteg principa ekonomičnog konstruisanja po kome sastavne komponente sklopova hidroelektrane treba konstruisati. Troškovi proizvodnje, eksploatacije i preventivnog održavanja trebaju biti minimalni u toku projektovanog vremena korišćenja.

Ukazane nedostatke moguće je eliminisati ako se zadaci dijagnoze rešavaju u periodu projektovanja hidroelektrane koristeći pri tome i prethodna iskustva za njegovo usavršavanje. Razrada sastavnih komponenata sklopova i sredstava za dijagnozu jednako su bitna pri projektovanju hidroelektrane kao i detaljna razrada same hidroelektrane pre početka izgradnje.

Životni ciklus komponenata sklopova hidroelektrane mogu se podeliti na tri ciklusa:

- projektovanje komponenata sklopova,
- proizvodnja (izrada komponenata sklopova hidroelektrana),
- eksploatacija, kada hidroelektrana radi po nameni za koju je projektovana (sa održavanjem i modernizacijom).

Proces projektovanja i konstituisanja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane možemo posmatrati kroz više faza:

- razjašnjenje zadataka funkcionisanja,
- utvrđivanje logičkih veza dejstava,
- utvrđivanje fizičkih veza dejstava,
- utvrđivanje konstruktivnih veza dejstava,
- izrada konstruktivne dokumentacije.

Na osnovu ovih zahteva mogu se postaviti određeni principi konstruktivnog rešenja koji su neophodni za dijagnozu, i to:

- primena mera tehničke dijagnostike samo ako iz njih proizilaze ekonomske vrednosti,
- odabiranje takvog dijagnostičkog sistema koji obezbeđuje najmanje troškove, najveće mogućnosti prilagodljivosti većem broju zadataka i koji ima najmanje zahteva u pogledu dodatnog usavršavanja osoblja koje sa njima radi,
- optimalno prilagođavanje konstruktivnog oblika komponenata sklopova hidroelektrane i dijagnostičkih uređaja, s ciljem da se smanji utrošak vremena za dijagnozu i obezbeđenje povoljnih radnih uslova za dijagnostičko osoblje. Treba odlučiti koliko treba ići u konstruktivnom spajanju komponenata sklopova hidroelektrane i uređaja za dijagnozu,
- montaža davača koji prima dijagnostički signal od komponente sklopa hidroelektrane i vodi ga u dijagnostički uređaj po mogućnosti da se obavi što bliže mestu koje se dijagnosticira. Na tačnost dijagnoze u mnogome utiče dužina dijagnostičkog procesa.

Proces razjašnjenja zadataka dijagnostike, uslovi projektovanja i konstruisanja, montaže i demontaže, uslovi puštanja u pogon i preuzimanja, predstavljaju uslove rada komponenata sklopova hidroelektrane. Mogućnosti praćenja procesa rada i uslovi preventivnog održavanja, nezaobilazni su kao potreba za obezbeđenje mogućnosti većeg stepena primene dijagnosticiranja stanja radi ispravnosti sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane.

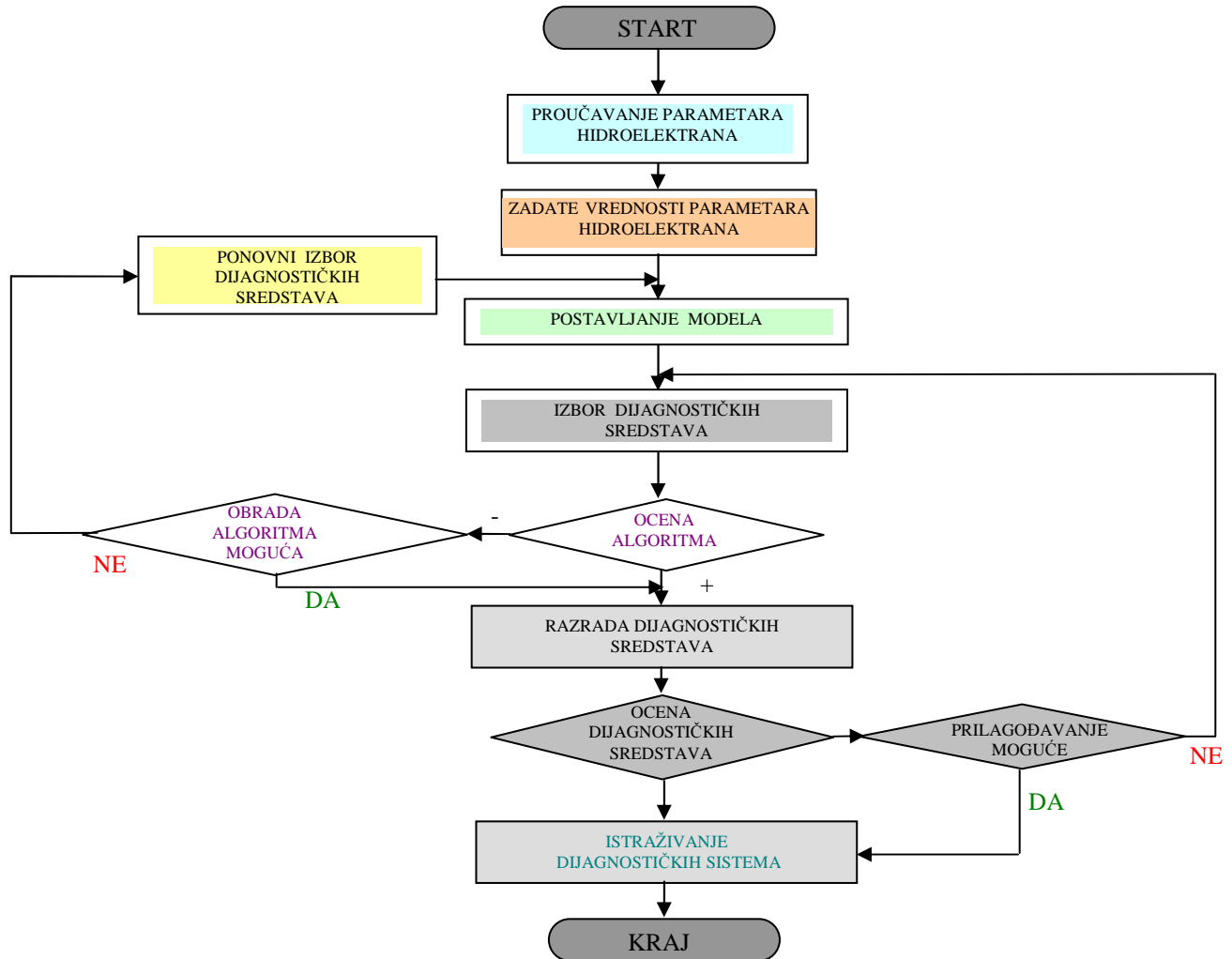
Izbor parametara stanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je u funkciji vremena korišćenja hidroelektrane, tj. posledica različitih uticaja koja vodi do posebnih ili iznenadnih otkaza. Postoje i određuju se različite metodologije preventivnog održavanja prema pouzdanosti. Takođe, realizuju se različite koncepcije i modeli preventivnog održavanja sa stalnim praćenjem stanja komponenata sklopova hidroelektrane.

Sredstva funkcionalne optimizacije tehničke dijagnostike obično se javljaju kao ugrađena, automatska, specijalizovana šema redosleda postupaka, a opšti redosled radnji dat je na šemi blok dijagrama HE "Vrla - 3" Surdulica, na slici 4.6. [93]. Njime se zaključuje da on ne zavisi od prirode razrađene dijagnostike i broja sastavnih komponenti sklopova kojih ima hidroelektrana već zavisi od izbora dijagnosticiranih parametara i procesa trajanja dijagnosticiranja.

U osnovi dijagnostičkog obezbeđenja sklopova hidroelektrane leži organizacija funkcionalne dijagnostike. Pri razradi odgovarajućeg stanja komponente funkcionalne dijagnostike potrebno je:

- proučiti komponente sklopova hidroelektrane kao objekat dijagnosticiranja, tj. principe njihovog rada, strukture, konstrukcije, izvršenje funkcije i drugo,
- izvršiti klasifikaciju mogućih otkaza, uslove i znake njihove pojave, prenošenje signala u kontrolnim tačkama i njihovo otkrivanje u tim tačkama, tj. može se po potrebi fizički modelirati otkaz,
- po mogućnosti formirati rešenje zadatka, izabrati poznati ili postaviti novi matematički model i odgovarajuće modele mogućih otkaza,
- izabrati metod i sastaviti blok dijagram dijagnostike, analizirati model hidroelektrane formalizovanim putem, a pri odsustvu modela intuitivno na osnovu iskustva (slika 4.6.),
- ocena kvaliteta dobijenog algoritma dijagnostike. Za algoritme provere ispravnosti, radne sposobnosti ili pravilnost funkcionisanja komponenata hidroelektrane, kao osnovna karakteristika javlja se mogućnost otkrića potencijalno novih otkaza. Za algoritam istraživanja otkaza ako se poznate karakteristike ne pokažu dovoljnim, potrebno je doraditi algoritam, koristeći druge metode dijagnostike ili poboljšanje prethodne pogodnosti za kontrolu komponenata sklopova hidroelektrane,
- izabrati nova ili razraditi podesna sredstva dijagnostike, koja realizuju blok dijagram dijagnosticiranja, prikazano na slici 4.6.,
- oceniti karakteristike izabranih ili razrađenih komponenti dijagnostike, njihov obim, masu, bezotkaznost i drugo,
- istraživati eksploatacino sistem dijagnosticiranja u celini.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.



Slika 4.6. Blok dijagram organizacije redosleda postupaka dijagnosticiranja sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica

Radi potpunije analize o optimizaciji postupaka dijagnosticiranja koriste se dve metode u određivanju parametara pouzdanosti komponenata analiziranih sklopova i to [93]:

1. Metoda kojom se iz dobijenih podataka o parametrima otkaza iz eksploatacije merenjem nivoa vibracija, temperature i pohabanosti ležaja definišu empirijske funkcije: gustine raspodele, intenzitet otkaza i pouzdanosti.
2. Metoda odobrene statističke raspodele parametara pouzdanosti kod koje funkcija intenziteta otkaza i funkcija pouzdanosti istovremeno predstavljaju odgovarajuće funkcije za prikupljanje podataka o parametrima otkaza.

Korekcione vrednosti pouzdanosti iz eksploatacionih podataka prikazane su na slikama 4.7. i 4.8., a njihove tabelarne vrednosti u sklopu prikazanih slika.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Kako su određene eksploatacione vrednosti pouzdanosti koje izražavaju okvirne vrednosti pouzdanosti rada sastavnih komponenata analiziranih sklopova sa maksimalnom sigurnošću za preciznije njihovo određivanje iskorišćeno je određivanje njihovih korekcionih vrednosti. Ovo je imalo za cilj da se za određivanje ukupne prenosne funkcije pouzdanosti rada komponenata analiziranih sklopova dobiju što preciznije vrednosti pouzdanosti [93].

Korekzione vrednosti pouzdanosti dobijaju se kao količnik empiriske funkcije gustine raspodele iz empiriskih vrednosti $f_a(t)$ i funkcije intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$ za vremenski interval eksploatacionog rada komponenti sklopova (u vreme rada sastavnih komponenti sklopova u trajanju od $50000 \leq t_1 \leq 52000h$, tabela 4.3.) i određuje se izrazom [142]:

$$P_a(t) = \frac{f_a(t)}{\lambda_a(t)}$$

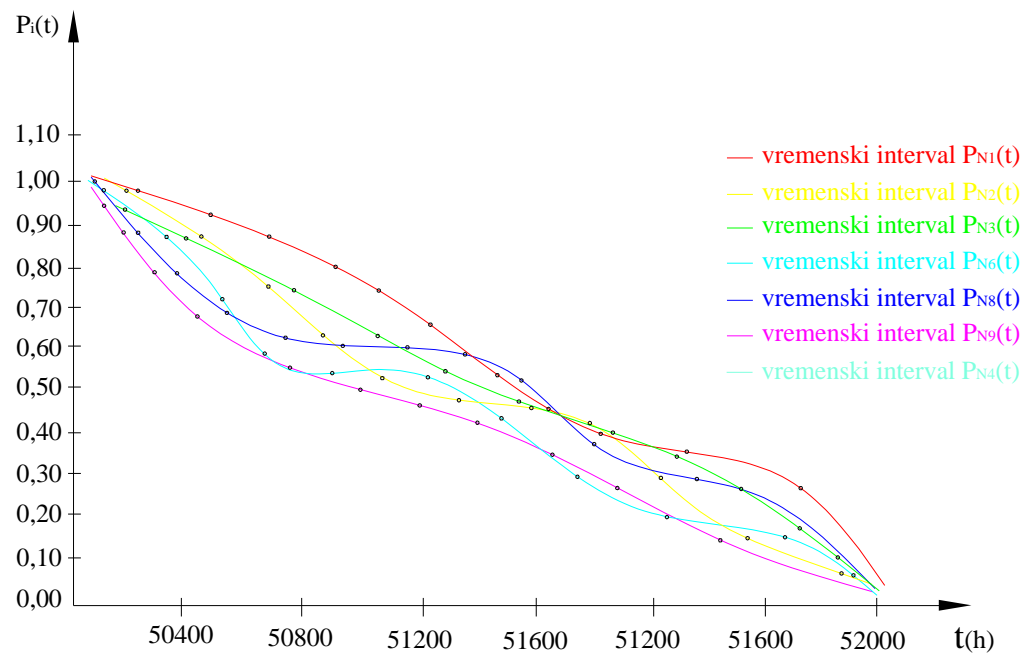
Oznaka sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_{1-0} \leq \Delta t_{i-0} \leq \Delta t_{2-0}$	Interval pouzdanosti za analizirani vremenski interval $\Delta N_{a-1} \leq \Delta N_{i-0} \leq \Delta N_{i-2}$
N ₁	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,80
N ₂	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,81
R ₁	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,82
N ₃	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,73
N ₄	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,76
N ₅	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,80
N ₆	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,76
N ₇	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,77
N ₈	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,79
N ₉	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,81
R ₂	50000 – 52000	1,0 ÷ 0,83

Tabela 4.3 Vrednosti intervala korekcije pouzdanosti u zavisnosti od vremenskog intervala rada sastavnih komponenata analiziranih sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenti

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

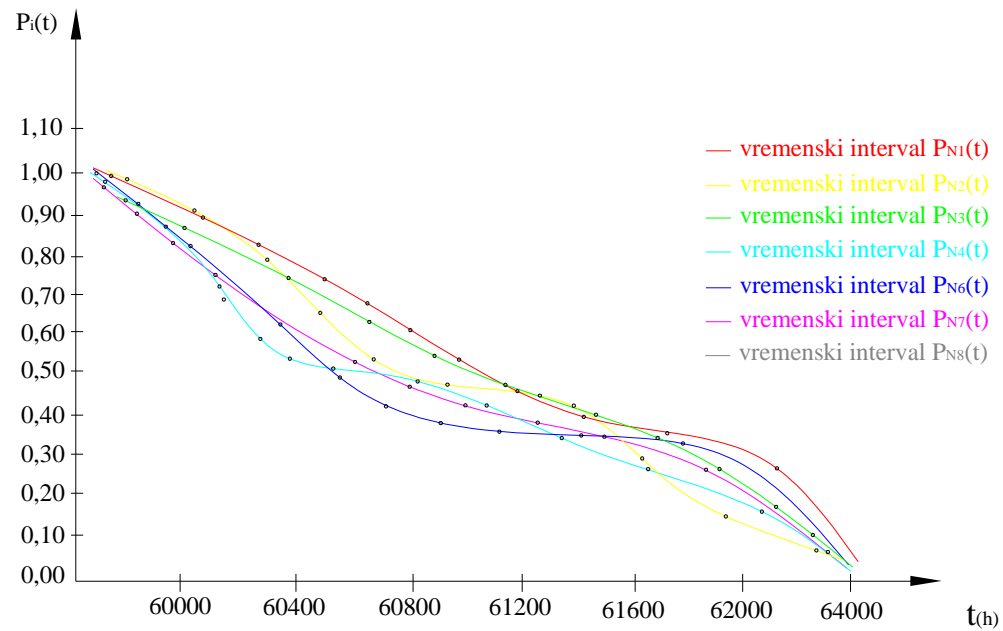
[142]. Vujanović, N., Pouzdanost tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.

vremenski interval	$50.000 \leq t_i \leq 50.400$	$50.400 \leq t_i \leq 50.800$	$50.800 \leq t_i \leq 51.200$	$51.200 \leq t_i \leq 51.600$	$51.600 \leq t_i \leq 52.000$
$PN_1(t)$	1	0,984	0,631	0,594	0,512
$PN_2(t)$	1	0,5	0,724	0,671	0,597
$PR_1(t)$	1	1	1	0,724	0,638
$PN_3(t)$	1	1	1	0,803	0,707
$PN_4(t)$	1	1	0,694	0,623	0,534
$PN_5(t)$	1	1	0,814	0,538	0,581
$PN_6(t)$	1	0,889	1	0,639	0,621
$PN_7(t)$	1	1	1	1	0,423
$PN_8(t)$	1	1	1	1	1
$PN_9(t)$	1	1	1	1	1
$PR_2(t)$	1	1	1	1	1



Slika 4.7. Dijagram korekcionih vrednosti pouzdanosti analiziranih sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na osnovu eksploatacionih podataka na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenti

vremenski interval	$60.000 \leq t_i \leq 60.400$	$60.400 \leq t_i \leq 60.800$	$60.800 \leq t_i \leq 61.200$	$61.200 \leq t_i \leq 61.600$	$61.600 \leq t_i \leq 62.000$
$PN_1(t)$	1	1	0,521	0,432	0,413
$PN_2(t)$	1	1	0,634	0,393	0,314
$PR_1(t)$	1	1	1	0,345	0,310
$PN_3(t)$	1	1	1	1	0,300
$PN_4(t)$	1	1	0,5131	1	1
$PN_5(t)$	1	1	0,313	1	1
$PN_6(t)$	1	1	1	1	1
$PN_7(t)$	1	1	1	1	1
$PN_8(t)$	1	1	1	1	1
$PN_9(t)$	1	1	1	1	1
$PR_2(t)$	1	1	1	1	1



Slika 4.8. Dijagram korekcionih vrednosti pouzdanosti analiziranih sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na osnovu eksploatacionih podataka na kojima su primenjeni parametri stanja komponenti – optimalni model

Analiza pouzdanosti rada sastavnih komponenata analiziranih sklopova sa primenama postupaka tehnologije preventivnog održavanja ima:

- najveće pouzdanosti u radu sastavne komponente N_1, N_2, N_5 čija pouzdanost je maksimalna i iznosi $N_{1-0}(t) = N_{2-0}(t) = N_{5-0}(t) \approx 1,0$ i traje u vremenskom intervalu preko $\Delta t_1 \geq 60000h$.
- na osnovu oblika kriva $f(N_{a-0}(t), t)$, tj. prema njihovom nagibu, redosled vrednosti pouzdanosti, prikazano je u tabelama 4.3. i 4.4. Analiza je obuhvatila intervale pouzdanosti posle prve manje vrednosti od maksimalne.

Oznaka sastavne komponente	Vremenski intervali $\Delta t_{1-0} \leq \Delta t_{i-0} \leq \Delta t_{2-0}$	Interval pouzdanosti za analizirani vremenski interval $\Delta N_{a-A} \leq \Delta N_{i-0} \leq N_{1-2}$
N_1	60000 – 62000	$1,0 \div 0,91$
N_2	60000 – 62000	$1,0 \div 0,92$
R_1	60000 – 62000	$1,0 \div 0,88$
N_3	60000 – 62000	$1,0 \div 0,86$
N_4	60000 – 62000	$1,0 \div 0,89$
N_5	60000 – 62000	$1,0 \div 0,90$
N_6	60000 – 62000	$1,0 \div 0,87$
N_7	60000 – 62000	$1,0 \div 0,86$
N_8	60000 – 62000	$1,0 \div 0,88$
N_9	60000 – 62000	$1,0 \div 0,89$
R_2	60000 – 62000	$1,0 \div 0,88$

Tabela 4.4. Vrednosti intervala korekcije pouzdanosti u zavisnosti od vremenskog intervala rada analiziranih sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima su primenjeni parametri stanja komponenti-optimalni model

Iz oblika kriva korekcionih vrednosti pouzdanosti sastavnih komponenti analiziranih sklopova $P_i(t)$, tj. prema nagibu kriva, mogu se analitički predvideti intervale pouzdanosti koji će se kasnije koristiti kao osnova u određivanju merodavne pouzdanosti (pouzdanost dobijena iz statističke raspodele - detaljnije u poglavlju 7).

4.4. METODE REŠAVANJA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

Tokom poslednjih godina došlo se do velikog napredka na polju razvoja i adaptacije optimizacionih metoda tehničke dijagnostike u istraživanju kompleksnih hidroenergetskih sistema. Najčešće se koristi simulacija i razni metodi direkne optimizacije tehničke dijagnostike komponenti sklopova hidroelektrane.

Kod izbora optimizacione metode, kao i u postupku modeliranja stanja komponenti, treba imati na umu da optimizacioni modeli po pravilu se reprezentuju realno, a matematički optimalna rešenja su obavezno "najbolja" rešenja. Zato često dolazimo u situaciji da je bolje biti samo "blizu" optimumu. Ovaj paradoks, nazvan paradoksom "blizu" optimalnosti rešava se uočavanjem razlike između "najboljeg" u realnom i "optimalnog" u matematičkom smislu.

Posmatrano iz jednog ugla, uključivanje više promenljivih i više faktora, dovodi se do približavanja "optimalnog", a sa druge strane povećava izgled za pojavu grešaka u teoriji estimacije parametara modela. Rešavanje ovako složenih modela često nas dovodi do situacije da zaboravimo suštinski cilj, tj. umesto rešavanja problema upravljanja, pažnju usredsređujemo na metod rešavanja. Kompleksni modeli zato ređe ispadnu manje pogodni od onih znatno jednostavnijih.

Kod pojedinih optimizacionih tehnika postoje značajne razlike koje se odnose na brzinu konvergencije, računarske zahteve, potrebu za inicijalnim mogućim upravljanjem i sl., a svi metodi imaju zajedničke probleme koji se odnose na broj, vrstu i oblik ograničenja, nelinearnost, konveksnost, neprekidnost i diferencijabilnost kriterijumske funkcije pouzdanosti komponenti i visoku dimenzijonalnost, tipičnu za probleme optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana. Izbor optimizacione metode zavisi od karakteristika komponenata posmatrane hidroelektrane, strukture funkcija cilja i ograničenja formulisanog modela, željene tačnosti rešenja i raspoloživog vremena praćenja rada stanja komponenti sklopova.

Izbor nove optimalne metode omogućava rešavanje različitih problema usvajanja nove tehnologije, kreiranje novih – tehnoloških postupaka, opreme, uređaja, inovacije, različitih proizvodnih komponenti i dr. Takođe, rešava raznolike tehničke i druge probleme, daje veoma važnu dimenziju i karakteristiku značajnu za uspešan rad sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Analiza svake od navedenih metoda i primena parametara stanja komponenata bi se koristila za funkciju koja se zasniva na određenom znanju i iskustvu o uzrocima i učestanosti pojava otkaza. Zato primenjujemo i rešavamo pomenute metode (metoda inkorporacije dijagnostičkih parametara, statistička metoda izbora kontrolnih parametara) detaljno uz poznavanje posledica i uzroka manifestacije pojave oštećenja i otkaza.

4.4.1. POSTAVLJANJE I KONCEPT PROBLEMA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana može se obavljati na različite načine. Jedna od najčešće korišćenih mogućnosti je da se za ovo koriste metode ili uprošćene šeme, koje se mogu opisati različitim oblicima matematičkih modela. Ovo je pojednostavljeni prikaz po kome je optimizacija modela pojednostavljenje šeme realnog procesa, a ne fizička suština određivanja.

Izbor optimuma za definisane kriterijume i ograničenja predstavlja neposredni zadatak optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane. Optimum u ovom smislu ne mora da bude matematički ekstrem odgovarajuće kriterijumske funkcije, već može da bude i neko kompromisno rešenje, koje je najbolje za postavljene kriterijume i ograničenja (npr. gotovost, raspoloživost komponenti hidroelektrane i dr.).

Optimizacioni kriterijum S može biti formulisan u vidu kriterijumske funkcije $S = f(x)$ ili da se bazira na više kriterijumskih funkcija i na strukturi preferencije [21]:

$$S = (F(x), P)$$

Struktura preferencije P treba da sadrži informacije ili definisane relacije za upoređivanje i uređenje skupa neinferiornih rešenja u prostoru odlučivanja ili u prostoru kriterijumskih funkcija. To znači da, u slučaju višekriterijumske optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, globalni optimizacioni kriterijum S je dvojak čiji su elementi kriterijumska funkcija $F(x) = (f_1(x), \dots, f_n(x))$ i struktura preferencije P koja definiše relacije pouzdanosti.

Definisanje strukture preferencije predstavlja poseban problem u višekriterijumskoj optimizaciji, koji je ovde obuhvaćen fazom donošenja konačnog rešenja. Višekriterijumsku optimizaciju tehničke dijagnostike otežavaju i kvalitativne komponente sklopova (mere kvaliteta i efikasnosti) koji se teško uključuju u normativne metode.

Način uključivanja strukture preferencije u optimizacionom postupku izdvaja tri prilaza u višekriterijumskoj optimizaciji dijagnostike stanja sastavnih komponenata [21]:

Prvi prilaz je korišćenje višeatributne funkcije, koja sadrži pojedine kriterijume i strukturu preferencije u vidu jedne matematičke funkcije $K(x)$ i koji predstavlja kriterijumsku funkciju optimizacije. U ovom prilazu praktično ne postoji problem donošenja konačne odluke, već se samo može javiti kao pitanje usvajanja optimalnog rešenja, da se usvoji ili da se odbaci.

Drugi prilaz je dvostepeni optimizacioni postupak. U prvoj etapi rešava se optimizacioni zadatak uključivanjem samo kriterijumske funkcije pouzdanosti sastavnih komponenata sklopova. Koristi se matematička metoda za određivanje skupa neinferiornih rešenja i usvaja se konačno ili optimalno rešenje.

[21]. Barzilovič, E. J., Modeli v tehnike obsluživanje složeni sistemi, Mašinstroenie, Moskva, 1988.

Treći prilaz je iterativni optimizacioni postupak, gde se struktura preferencije uključuje postepeno i iterativno. Problem donošenja konačne odluke se javlja u svakoj iteraciji, pa se može smatrati da je lakše nego u drugom prilazu.

Analiza otkaza se može definisati kao logično, sistematsko ispitivanje neke jedinice komponente ili njene konstrukcije, da bi se utvrdila i analizirala verovatnoća, uzroci i posledice realnih i potencijalnih nedostataka u funkcionisanju. Ona uključuje sve mere koje se izvode na hidroelektranama ili njihovim sastavnim komponentama u cilju iznalaženja i vrednovanja otkaza.

Tehnike koje se pri tome primenjuju vezane su za dve osnovne aktivnosti:

- analizu komponenata i vrsta otkaza sa ciljem njihove klasifikacije i
- procenu načina i posledica otkaza sa ciljem ocene kritičnosti.

Za analizu komponenata koja dovede do otkaza i ocenu vrste otkaza koriste se metode, koje predstavljaju ocenu kritičnosti analiziranih sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane i/ili razvijena je FMEA metoda.

Svaka od navedenih metoda ima svoju funkciju ali za sve je zajedničko da se zasnivaju na određenim znanjima i iskustvima o uzrocima, manifestacijama i učestanosti otkaza. Drugim rečima, primena pomenutih metoda zahteva detaljno poznavanje zavisnosti posledica i uzrok manifestacije oštećenja i otkaza.

Glavni događaj odnosno međudogađaj jesu stanja same hidroelektrane ili sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane, a osnovni događaj je događaj koji ne može dalje da se raščlani.

Analiza načina i posledica otkaza (**Failure Mode and Effect Analysis - FMEA**), je analitička i sistematska kvalitativna analiza mogućih otkaza koja omogućuje ocenu kritičnosti svake posmatrane pojedinačne komponente sklopova ili podsistema i njihov uticaj na hidroelektiranu [21]. Odvija se paralelno sa procesom konstruisanja, od preispitivanja idejnog rešenja do preispitivanja definitivnih rešenja. Parametri analize se matematički vrednuju, pa je i konačna ocena rešenja data matematički, što omogućuje međusobno upoređivanje projektnih rešenja (detaljnije u poglavlju 6).

Analiza je zasnovana na iskustvu stečenom u praksi konstruisanjem i praćenjem rada komponenti, kombinovanim sa teorijom verovatnoće. Primena ove analize povećava pouzdanost i kvalitet proizvoda kao i tehnologije njegove izrade, smanjuje troškove testiranja i usavršavanja tehnologije proizvodnje, odnosno obezbeđuje optimalne troškove tokom proizvodnje.

U cilju ove realizacije neophodno je formirati dokument koji može biti prikazan tabelarno pomoću koga se sprovodi analiza. Prvi korak u analizi je anotacija projektovane komponente sklopova (blok šeme, definisanje podsistema i označavanje svake bitne komponente čiji se kvalitet prati). Nakon toga sledi definisanje svih potencijalnih načina, posledica i uzroka otkaza, kao i njihovo procenjivanje. Na osnovu izvršenih procena, izračunava se vrednost prioriteta rizika definisan izrazom [21]:

[21]. Barzilović, E. J., Modeli v tehnike obsluživanje složeni sistemi, Mašinstroenie, Moskva, 1988.

$$V \cdot M \cdot R = N \cdot T \cdot U$$

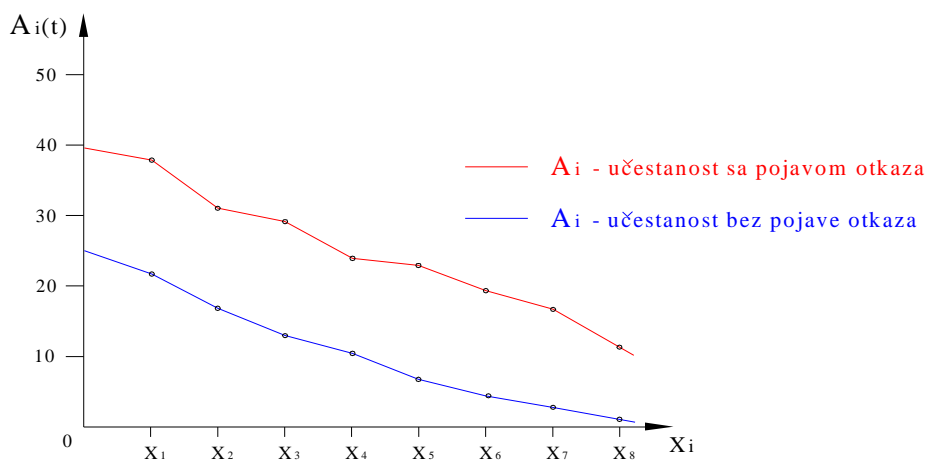
gde je:

- V – verovatnoća da će se otkaz pojaviti,
- T – težina otkaza,
- U – mogućnost uočavanja otkaza,
- M – promena parametara stanja,
- R – rizik pri radu,
- N – broj otkaza pri radu.

Za sastavne komponente osnovni potencijalni otkazi, njihove potencijalne posledice kao i potencijalni uzroci definisani su standardom ISO 12132/99 [21].

Ova analiza spada u statističke metode praćenja, rešavanja problema uzroka i posledice otkaza kod sastavnih komponenata sklopova hidroelektane. Sastoji se u praćenju pojave otkaza u toku vremenskog perioda na osnovu čega se dolazi do najuticajnijih otkaza prema učestanosti pojavljivanja.

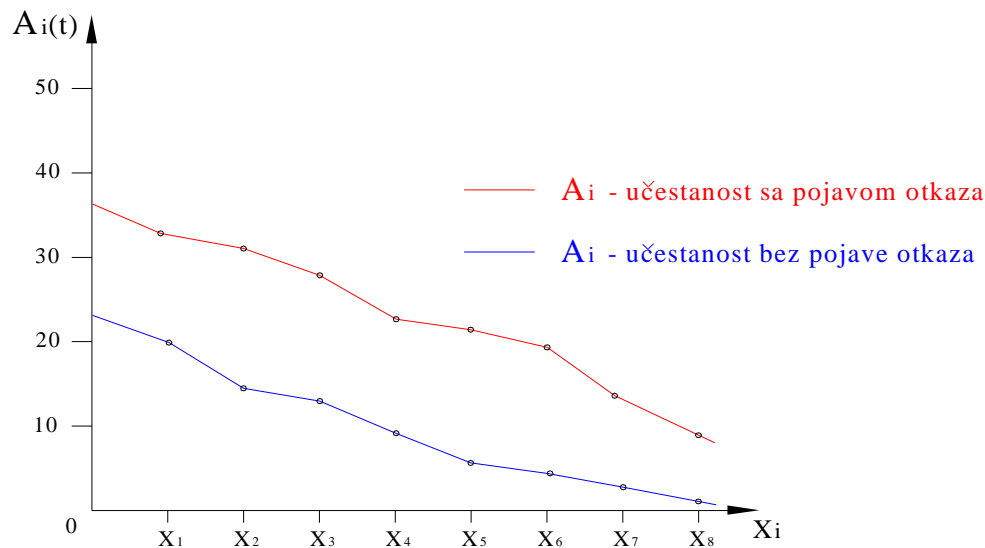
Podaci se prikazuju putem dijagrama tako što se na apscisi beleže opadajućim redosledom vrednosti učestanosti otkaza (npr. turbinski ležaj (N_7)), a na ordinati njegova učestanost u određenom vremenskom intervalu bez primene i sa primenom parametara stanja komponenti HE "Vrla - 3" Surdulica, prikazano na slikama 4.9. i 4.10.



Slika 4.9. Učestanost pojavljivanja otkaza prema uticajnosti sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, merno mesto 1

Dobijeni otkazi (npr. nosećeg ležaja N_3 , gornjeg vodećeg ležaja N_4 , turbinskog ležaja N_7 , tabela P.5. - P.8.) na apscisi (X_1 do X_n) se grupišu prema uticajnosti, tako što se, počevši od najuticajnijeg X_1 retrospektivno, sabiraju njihove učestanosti dok zbir ne bude 80 % i oni čine grupu čestih otkaza. Iza te grupe, na sličan način, grupišu se podaci o otkazima u grupu manje čestih otkaza (npr. zvona N_2 , regulatora R_2 , budilice N_1 , sprovodnog aparata R_1 , tabela P.5. - P.8.) sa kumulativnom vrednošću 20 % učestanosti.

[21]. Barzilovič, E. J., Modeli v tehnike obsluživanje složeni sistemi, Mašinstroenie, Moskva, 1988.



Slika 4.10. Učestanost pojavljivanja otkaza prema uticajnosti sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, merno mesto 2

Ovako grupisani otkazi se upoređuju sa listom otkaza kod FMEA metode i proverava se da li smo FMEA metodom predvideli otkaze iz grupe čestih otkaza (vrste X_1 i X_2 – abrazivno i atezivno habanje kod ležajeva) i da li smo za njih dobili najveći faktor rizika (detaljnije u poglavljima 5.2. i 6.4.).

Sve prethodno pomenute metode imaju za cilj da otklone i smanje verovatnoću nastajanja uzroka otkaza odnosno samog otkaza, a primenjuju se, pre svega u fazi konstruisanja za čije potrebe su i nastale. Ove metode su kasnije počele da se primenjuju i u fazama proizvodnje kao i kod preventivnog održavanja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane.

Ovakve analize se, po praviliu, vrše kod hidroelektrane kod kojih je veliki uticaj preventivnog održavanja na proizvodnost, sigurnost u radu ili uticaj na okolinu, ili kod sistema koji imaju visoke troškove održavanja, česte otkaze ili zahtev za često korektivno održavanje.

Problemi optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane javljaju se na različitim nivoima, od planiranja jednog jednonamenskog objekta, do planiranja razvoja kompleksnog višenamenskog vodoprivrednog sistema. U jednom širem zadatku optimizacije tehničke dijagnostike mogu se postaviti i različiti ciljevi planiranja na različitim nivoima, a u okviru hijerarhijskog sistema odlučivanja.

U datim istraživanjima, osnovno je locirati problem, zatim ustanoviti glavne uticajne parametre pre nego što se donese odluka koje veličine i karakteristike treba da se menjaju, na najjeftiniji i najcelishodniji način. Nije dovoljno, što je čest slučaj u praksi, da se označe sastavne komponente sklopova koje su oštećene ili da se utvrdi samo učestanost otkaza, već je primarno da se utvrdi osnovni uzrok njegovog nastajanja.

Poznavanje relevantnih parametara koji dovode do otkaza komponenti smanje se uticaj nepoznatih i slučajnih faktora i omogućuje racionalna primena savremenih tehnika za analizu i ocenu kritičnosti hidroelektrane i njenih sastavnih komponenti sklopova.

U slučaju sličnih ili istih oštećenja masovne produkcije može da se ukaže, relativno jednostavnim analizama, da li su greške u konstrukciji, materijalu, podmazivanju ili neadekvatnim uslovima rada.

Dijagnostika otkaza sastavnih komponenti sklopova uključuje proučavanje svih relevantnih parametara komponenti sklopova, kao i analizu oštećenih komponenti sklopova.

Pod relevantnim parametrima sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane se podrazumevaju:

- radne karakteristike komponenti sklopova hidroelektrane (vrsta kretanja, opterećenje, brzina, temperatura, vreme rada i druge),
- struktura komponenti sklopova hidroelektrane (ležaj, rukavac, mazivo, atmosferski uticaji) i svojstva komponenata u sklopu,
- interakcije komponenti sklopova hidroelektrane (proces kontakta, postupak i vrste podmazivanja, hemijski aspekti interakcije mazivo – materijal – okolina),
- proces trenja i habanja (moguće vrste i uticajne veličine).

Analiza oštećenih sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane podrazumeva:

- uopšteno stanje komponenti sklopova,
- utvrđivanje vida oštećenja i vrste habanja,
- određivanje uzroka otkaza,
- matematičku interpretaciju koristeći zakonitosti matematičke statistike.

Utvrđivanje uzroka oštećenja i otkaza se obično radi procenom, na osnovu već uspostavljenih klasifikacija uzroka. Pri tome je poznato da pojava otkaza nastaje uz određene pravilnosti, bez obzira što se u praksi kao uzrok može javiti više mehanizama koji deluju simulatno. Takođe, treba imati u vidu da složena kombinacija konstrukcije, primenjenog materijala, uslova rada i preventivnog održavanja često čine teškoće u utvrđivanju primarnog uzroka otkaza. U tim slučajevima, znanja o uslovima rada i istorija preventivnog održavanja sastavnih komponenata sklopova imaju veoma važnu ulogu.

Po pravilu sva pomenuta dokumenta i tehničke informacije orijentisane su na dva objekta:

- identifikaciju načina otkaza sastavnih komponenata i
- utvrđivanje uzroka otkaza sastavnih komponenata.

Način otkaza se definiše kao fizički i/ili hemijski proces koji dovodi do gubitka zadate funkcije i pojava ili simptoma koji su prouzrokovani procesom otkaza. Uzroci otkaza su inženjerski uslovi i nedostaci koji dovode do registrovanog otkaza.

Za rešavanje navedenih problema neophodna je baza podataka o već utvrđenim uzročnicima, mestu pojave i manifestaciji za svaku komponentu sklopa ili mehanizam hidroelektrana. Vrste otkaza sastavnih komponenata sklopova u funkciji najčešćih uzročnika vezanih za greške konstruisanja, materijala, proizvodnje, montaže, eksploatacije i grešaka podmazivanja treba da posluže kao smernice pri analizi otkaza koja se sprovodi u praksi i omogućuju da se definiše odnos uzrok – manifestacija. Očigledno je da se često više uzročnika vezuje za jednu manifestaciju otkaza.

U okviru ove disertacije razrađuje se univerzalni model, kao model koji je primenljiv u planiranju optimizacije postupaka tehničke dijagnostike koja definiše strategiju i promenu stanja komponenata sklopova hidroelektrane. Ovaj model prvo određuje rešenja koja su optimalna po pojedinim kriterijumima, a zatim određuje kompromisna rešenja koja se predlažu, iz kojih treba usvojiti jedno konačno rešenje.

4.4.2. METODA INKORPORACIJE DIJAGNOSTIČKIH PARAMETARA STANJA

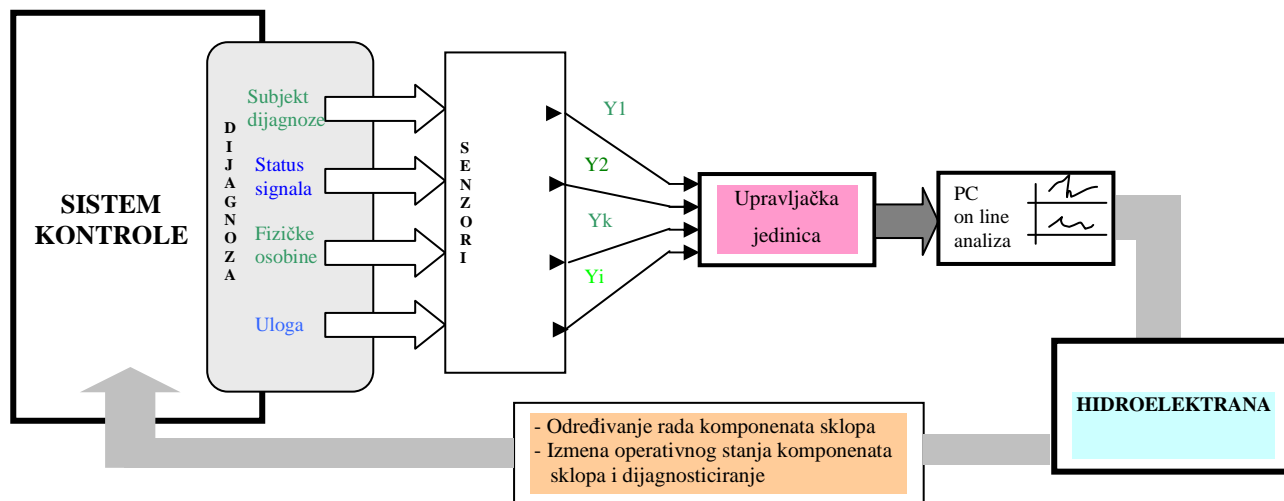
Povezivanje dijagnostičkih parametara preko parametara izvođenja i procesa dekompozicije stvara se ukupna dijagnostička slika sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane.

Diskretni signali su ulazne informacije za formiranje datoteke podataka komponenata hidroelektrane, kao metoda inkorporacije, čija primena je, potrebna i veoma svrsishodna kada su teorijske varijante komplikovane.

Jedno od rešenja problema, različitosti pojave otkaza po mestu, vrsti i načinu nastanka, učestalosti i vremena trajanja, je sublimacija verovatnoće otkaza i veličina parametara stanja hidroelektrane i njenih komponenata sklopova, koje se menjaju različitim intenzitetom, na različitim lokacijama, i u različitom vremenu, koji se ne mogu ili ih je komplikovano matematički formalizovati.

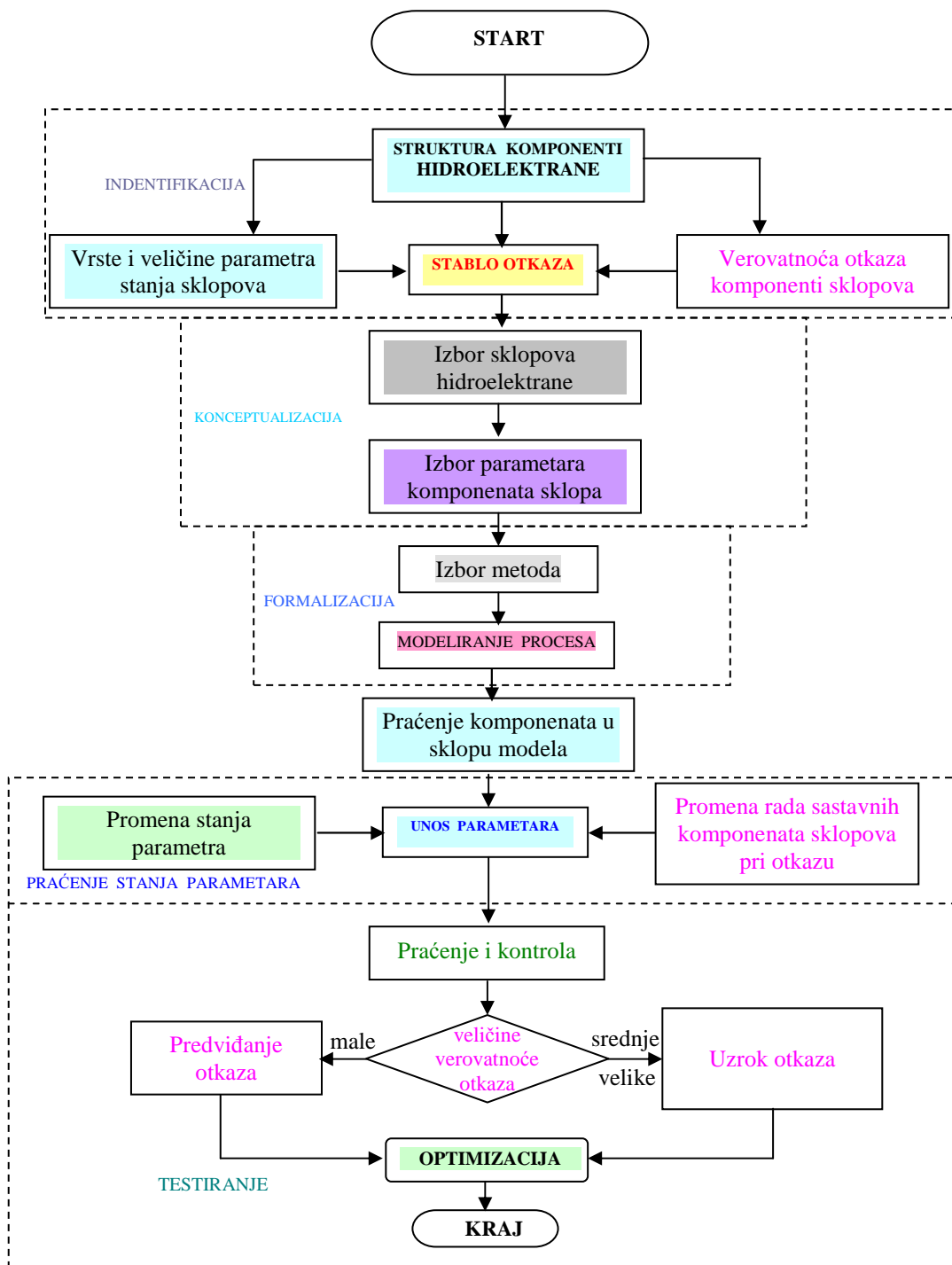
Takav problem se efikasno rešava primenom metode inkorporacije prema šemi toka dijagnoze parametara stanja komponenti (slika 4.11.) [82] i algoritma za konstruisanje modela određivanja parametara dijagnostike (prikazan je na slici 4.12. [93]), a bazira se na:

1. Identifikaciji komponenata sklopova hidroelektrane i to:
 - identifikacija istraživanja strukture sastavnih komponenti na principu strukture stabla otkaza,
 - identifikacija parametara stanja komponenata sklopova hidroelektrane.
2. Verovatnoći otkaza na bazi vrednosti parametara stanja.
3. Modelu optimizacije parametara stanja komponenti metodom inkorporacije.



Slika 4.11. Šema toka dijagnoze parametara stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane [82]

[82]. Mihalevič, B.C., Merodi posledovatelnie optimizacii, Nauka, Moskva, 1991.



Slika 4.12. Algoritam za praćenje i određivanja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike komponenti HE "Vrla - 3" Surdulica [93]

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Model se može uraditi kao prototipni za primenu i dokazivanje metodoloških karakteristika metode inkorporacije parametara stanja komponenti, verovatnoće otkaza u povećanju efikasnosti komponenata i istraživanje komponenata sklopova hidroelektrane. Prikazuje se kao:

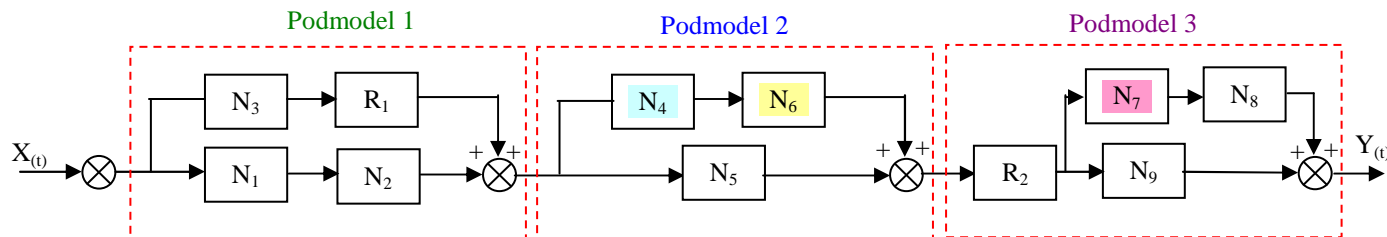
- rezultati dobijeni primenom statističkih i verovatnosnih proračuna koji se ne mogu koristiti za utvrđivanje trenutnog stanja komponenti sklopova hidroelektrane u zavisnosti od toga ne mogu se koristiti za donošenje operativnih – izvršnih odluka,
- metoda inkorporacije parametara stanja komponenata sklopova i verovatnoće otkaza na kojoj se temelji i donosi odluka o aktivnostima preventivnog održavanja, zasniva se na verovatnoći događaja u funkciji dijagnostike parametara stanja komponenti,
- metoda inkorporacije parametara stanja i verovatnoće otkaza predstavlja podlogu za koncept planskog održavanja po stanju komponenti,
- metoda koja spada u koncept preventivnog održavanja sa kompleksnom analizom i
- metoda koja istovremeno predstavlja predviđanje i sprečavanje otkaza hidroelektrane i sastavnih komponenti, pri čemu je razvijen jedinstveni prototip modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Sastavne komponente sklopova:

- N_1 – budilica (pouzdanost sastavne komponente budilice)
- N_2 – zvono (pouzdanost sastavne komponente zvona)
- N_3 – noseći ležaj (pouzdanost sastavne komponente nosećeg ležaja)
- N_4 – gornji vodeći ležaj (pouzdanost sastavne komponente gornjeg vodećeg ležaja)
- N_5 – rotor (pouzdanost sastavne komponente rotora)
- N_6 – donji vodeći ležaj (pouzdanost sastavne komponente donjeg vodećeg ležaja)
- N_7 – turbinski ležaj (pouzdanost sastavne komponente turbinskog ležaja)
- N_8 – ugljeni zaptivač (pouzdanost sastavne komponente ugljenog zaptivača)
- N_9 – radno kolo (pouzdanost sastavne komponente radnog kola)
- R_1 – sprovodni aparat (pouzdanost sastavne komponente sprovodnog aparata)
- R_2 – regulator (pouzdanost sastavne komponente regulatora)

Model za pouzdanost

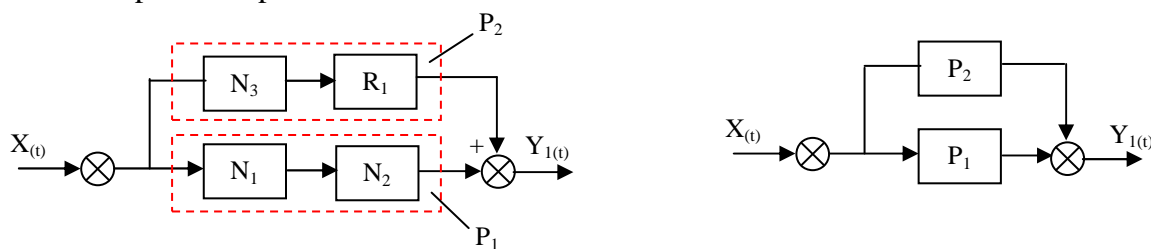
Na slici 4.13. prikazan je blok model pouzdanosti sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, pri čemu je razvijen jedinstveni prototip modela optimizacije po podmodelima 1, 2 i 3, (detaljnije u poglavlju 6).



Slika 4.13. Blok model pouzdanosti sastavnih komponenti HE "Vrla - 3" Surdulica

Redukcija podmodela 1

Na slici 4.14. prikazana je redukcija komponenti sklopova za praćenje vibracija u analizi komponenata podmodela 1.



Slika 4.14. Redukcija prikaza komponenti sklopova za praćenje vibracija

Prenosna funkcija podmodela 1:

$$P_{PM_1}(t) = \frac{\gamma_1(t)}{x(t)} = \frac{P_1 \cdot P_2}{1 - P_1 \cdot P_2}$$

$$P_{PM_1}(t) = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot N_3 \cdot R_1}{1 - N_1 N_2 N_3 R_1}$$

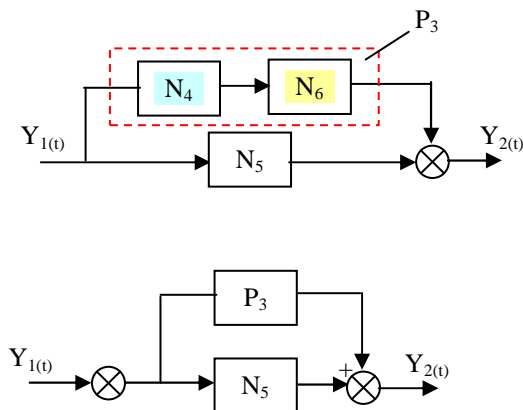
Prvi deo sastavne komponente N_1 , N_2 i N_3 predstavljaju:

$$P_1 = N_1 \cdot N_2$$

$$P_2 = N_3 \cdot R_1$$

Redukcija podmodela 2

Na slici 4.15. prikazana je redukcija komponenti sklopova za praćenja temperature u analizi komponenata podmodela 2.



Slika 4.15. Redukcija prikaza komponenti sklopova za praćenje temperature

Prenosna funkcija podmodela 2:

$$P_{PM_2}(t) = \frac{\gamma_2(t)}{\gamma_1(t)} = \frac{P_3 \cdot N_5}{1 - P_3 \cdot N_5} = \frac{N_4 \cdot N_5 \cdot N_6}{1 - N_4 N_5 N_6}$$

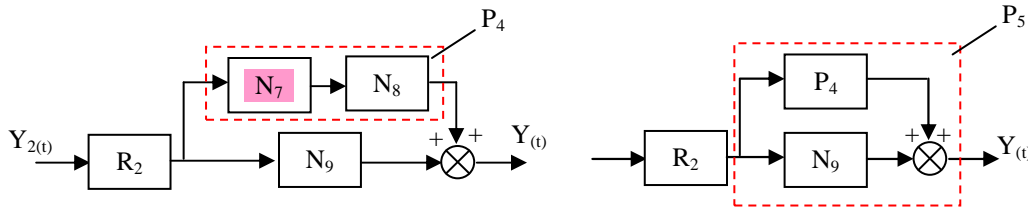
$$P_{PM_2}(t) = \frac{N_4 \cdot N_5 \cdot N_6}{1 - N_4 N_5 N_6}$$

Drugi deo sastavne komponente N_4 , N_5 i N_6 predstavljaju:

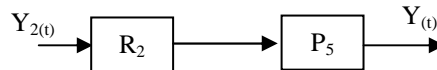
$$P_3 = N_4 \cdot N_6$$

Redukcija podmodela 3

Na slikama 4.16. i 4.17. prikazana je redukcija komponenti sklopova za praćenje pohabanosti ležajeva u analizi komponenti sklopova hidroelektrane, podmodela 3.



Slika 4.16. Prikaz komponenti sklopova za praćenje pohabanosti ležajeva



Slika 4.17. Redukcija prikaza komponenti sklopova za praćenje pohabanosti ležajeva

Treći deo sastavne komponente N_7 , N_8 , N_9 predstavljaju:

$$P_4 = N_7 \cdot N_8$$

$$P_5 = \frac{N_9 \cdot P_4}{1 - N_9 \cdot P_4} = \frac{N_7 \cdot N_8 \cdot N_9}{1 - N_7 \cdot N_8 \cdot N_9}$$

Prenosna funkcija podmodela 3:

$$P_{PM_3} = \frac{Y(t)}{Y(t)} = R_2 \cdot P_5 = \frac{R_2 \cdot N_7 \cdot N_8 \cdot N_9}{1 - N_7 \cdot N_8 \cdot N_9}$$

$$P_{PM_3} = \frac{R_2 \cdot N_7 N_8 \cdot N_9}{1 - N_7 \cdot N_8 \cdot N_9}$$

Ukupna prenosna funkcija pouzdanosti optimalnih komponenti sklopova hidroelektrane jednaka je:

$$P_f(t_i) = P_{PM_1}(t) \cdot P_{PM_2}(t) \cdot P_{PM_3}(t)$$

$$P_f(t_i) = \frac{N_1 N_2 N_3 \cdot R_1}{1 - N_1 N_2 N_3 R_1} \cdot \frac{N_4 N_5 N_6}{1 - N_1 N_5 N_6} \cdot \frac{R_2 N_7 N_8 N_9}{1 - N_7 N_8 N_9}$$

Optimalna prenosna funkcija pouzdanosti:

$$P_f(t_i) = \frac{N_1 N_2 N_3 N_4 N_5 N_6 N_7 N_8 N_9 \cdot R_1 \cdot R_2}{(1 - N_1 N_2 N_3 R_1) \cdot (1 - N_1 N_5 N_6) \cdot (1 - N_7 N_8 N_9)}$$

N_1, \dots, N_9

- merodavne pouzdanosti iz eksploatacije

R_1, R_2

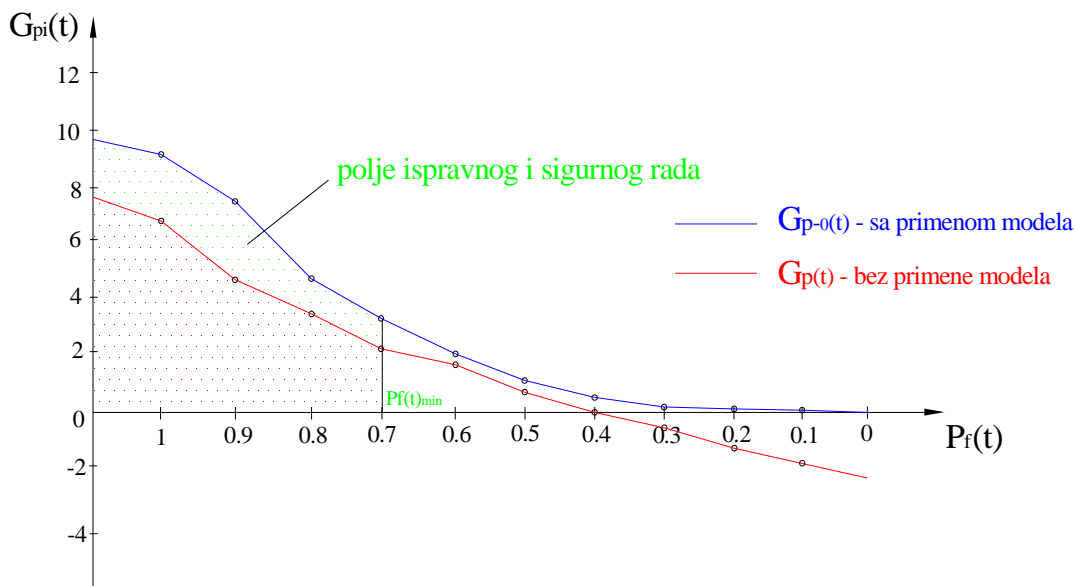
Prikaz vrednosti prenosne funkcije pouzdanosti analiziranih sklopova hidroelektrane izvršen je tabelarno, prikaz u tabelama 4.6. i 4.7. Prikazani su konačni izrazi funkcija pouzdanosti u zavisnosti od vremenskog intervala rada analiziranih komponenata sklopova. Na osnovu dobijenih vrednosti, izvršen je grafički prikaz zavisnosti $f(G_{p_i}(t), P_{f_i}(t))$, (prikaz na slici 4.18.).

Vrednosti pouzdanosti $P_i(t)$	Prenosna funkcija pouzdanosti sastavnih komponenata sklopova $G_p(t_i)$ od 50000 – 75000 h			
1,0	$P_{f_1}(t)$	Zadovoljavajuća pouzdanost u analizi komponenata sklopova hidroelektrane	G_{p_1}	9,851
0,9	$P_{f_2}(t)$		G_{p_2}	6,477
0,8	$P_{f_3}(t)$		G_{p_3}	5,212
0,7	$P_{f_4}(t)$		G_{p_4}	2,046
0,6	$P_{f_5}(t)$		G_{p_5}	1,243
0,5	$P_{f_6}(t)$		G_{p_6}	0,234
0,4	$P_{f_7}(t)$		G_{p_7}	0,062
0,2	$P_{f_8}(t)$		G_{p_8}	0,005
0	$P_{f_9}(t)$		G_{p_9}	0

Tabela 4.6. Vrednosti prenosnih funkcija pouzdanosti komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u zavisnosti od parametara stanja komponenti bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike

Vrednosti pouzdanosti $P_i(t)$	Prenosna funkcija pouzdanosti sastavnih komponenta sklopova $G_{p-o}(t_i)$ od 50000 – 75000 h			
1,0	$P_{f_1}(t)$	Zadovoljavajuća pouzdanost u analizi komponenta sklopova hidroelektrane	G_{p_1}	9,763
0,9	$P_{f_2}(t)$		G_{p_2}	6,344
0,8	$P_{f_3}(t)$		G_{p_3}	5,189
0,7	$P_{f_4}(t)$		G_{p_4}	2,002
0,6	$P_{f_5}(t)$		G_{p_5}	1,211
0,5	$P_{f_6}(t)$		G_{p_6}	0,203
0,4	$P_{f_7}(t)$		G_{p_7}	0,057
0,2	$P_{f_8}(t)$		G_{p_8}	0,004
0	$P_{f_9}(t)$		G_{p_9}	0

Tabela 4.7. Vrednosti prenosnih funkcija pouzdanosti komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u zavisnosti od parametara stanja komponenti sa primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike



Slika 4.18. Grafik prenosne funkcije pouzdanosti komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u zavisnosti od parametara stanja komponenti

4.4.3. STATISTIČKA METODA IZBORA KONTROLNIH PARAMETARA

Stanje hidroelektrana karakteriše veliki broj parametara radnog procesa. Pri tome, svi parametri radnog procesa ne utiču podjednako na stanje komponenata sklopova hidroelektrane. Ako više parametara kontrolišemo, to je veća verovatnoća da se može pravilno prognozirati stanje hidroelektrane. Najbolji način izbora dijagnostičkih parametara radnog procesa hidroelektrane jeste u analizi svih informacija dobijenih o radu sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Radi potpunije analize o pouzdanosti rada komponenti analiziranih sklopova primenjivaće se navedena metoda i izvršiće se njihova međusobna korelacija zbog određivanja sigurnosti funkcionisanja njihovog rada.

Ako imamo (n) povezane komponente hidroelektrane (budilica, nosećih i vodećih ležajeva, rotora, radnog kola) za koje vršimo analizu pouzdanosti počevši od perioda za $t = 0$, onda će u bilo kom trenutku vremena t_i biti $n_i(t_i)$, sklopa koji nisu otkazali. Funkcija gustine otkaza $f_0(t)$, može se odrediti iz obrasca [69], [142]:

$$f_0(t) = \frac{\frac{n_i(t_i) - n_i(t_i + \Delta t_i)}{n}}{\Delta t_i} = \frac{n_i(t_i) - n_i(t_i + \Delta t_i)}{n \cdot \Delta t_i}$$

pri čemu je: $t_i < t \leq \Delta t_i$

Empirijska funkcija intenziteta otkaza $\lambda_0(t)$, jednaka je količniku odnosa broja otkaza u vremenskom intervalu Δt_i i broju sklopova koji nisu otkazali na početku tog intervala, sa dužinom vremenskog intervala Δt_i [69], [142]:

$$\lambda_0(t) = \frac{\frac{n_i(t_i) - n_i(t_i + \Delta t_i)}{n_i(t_i)}}{\Delta t_i} = \frac{n_i(t_i) - n_i(t_i + \Delta t_i)}{n_i(t_i) \cdot \Delta t_i}$$

pri čemu je: $t_i \leq t \leq \Delta t_i$.

Empirijska funkcija pouzdanosti $R_0(t)$ predstavlja verovatnoću bezotkaznog rada povezanih komponenti sklopa u toku vremena t , [69], [142]:

$$R_0(t) = \frac{n_1}{n}$$

pri čemu je:

$n_1(t)$ – broj ispravnih sklopova ili komponenti sklopova na kraju vremenskog intervala Δt_i ,

$n(t)$ – ukupan broj komponenti analiziranog sklopa.

Konkretno sračunavanje ovih funkcija biće prikazano na određivanju pouzdanosti optimalnog rada analiziranih sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane na kojima nisu primenjeni postupci tehnologije preventivnog održavanja i na kojima su ovi postupci sprovedeni.

[69]. Karmanov, V.C., Matematičkie programirovanie, Nauka, Moskva, 1986.

[142]. Vujanović, N., Pouzdanost tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.

Sklopovi na kojima nisu i na kojima su primenjeni postupci tehnologije preventivnog održavanja, vrednosti dobijenih funkcija gustine otkaza $f_a(t)$, funkcija intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$, i funkcija pouzdanosti $P_a(t)$ iz empirijskih podataka za svaku analiziranu komponentu sklopova su prikazani u tabelama (prilog P.9. do P.12.).

Analiza je obuhvatila ista mesta merenja kao u slučaju analize iz eksploatacionih uslova, za svaku sastavnu komponentu analiziranih sklopova.

Korekcijom i upoređivanjem grafika pouzdanosti mogu se odrediti vrednosti pouzdanosti, na osnovu kojih se određuje pouzdanost sigurnosti rada sastavnih komponenata analiziranih sklopova, tj. optimalno vreme rada do otkaza (vreme dozvoljenog rizika).

Analiza pouzdanosti iz eksploataciono dobijenih podataka, korišćiće se u određivanju veka trajanja analiziranih sastavnih komponenti sklopova i to:

Predmetoda 1: sastoji se u tome da iz dobijenih podataka o otkazima iz eksploatacije merenjem nivoa mehaničkih vibracija, temperature i pohabanost ležajeva definišu empirijske funkcije: gustine raspodele, intenzitet otkaza i pouzdanost komponenti. Grafičkim prikazom dobijenih podataka može se okvirno zaključiti o kojoj statističkoj raspodeli pouzdanosti se radi, što će se dalje iskoristiti u izboru najpogodnije statističke raspodele pouzdanosti.

Predmetoda 2: koristi se za izbor statističke raspodele pouzdanosti kod koje funkcija intenziteta otkaza i funkcija pouzdanosti istovremeno predstavljaju odgovarajuće funkcije za prikupljene podatke o otkazima.

Prikaz vrednosti dobijenih funkcija gustine otkaza $f_a(t)$, funkcija intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$ i funkcija pouzdanosti $P_a(t)$ iz eksploatacionih podataka na kojima nisu sprovedeni parametri stanja komponenata i na kojima su ovi postupci sprovedeni, prikazani su tabelarno (prilog P.11. i P.12.), a dijagramima zavisnosti pouzdanosti od eksploatacionog vremena $f(P_a, t)$ HE "Vrla - 3" Surdulica su prikazani na slikama 4.19. i 4.20.

Za simetričan raspored eksploatacionih podataka, primenjuje se normalan (Gausov) zakon raspodele kod koga funkcija raspodele ima oblik [105]:

$$F(T) = 0.5 + \Phi\left(\frac{T - \bar{T}}{\sigma}\right)$$

gde je:

T - period vremena rada komponente,

\bar{T} - vremenski interval rada komponente do otkaza,

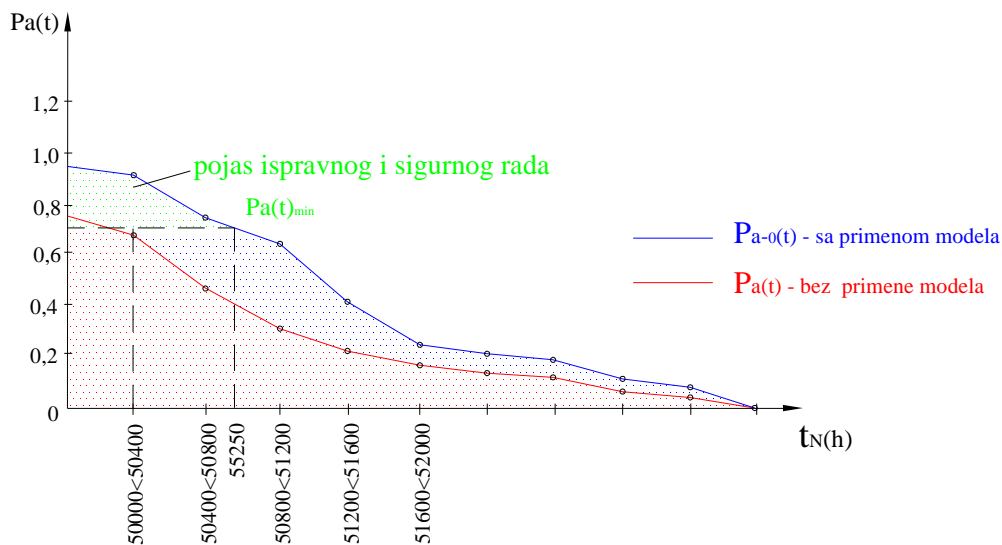
Φ - funkcija vremena,

σ - devijacija

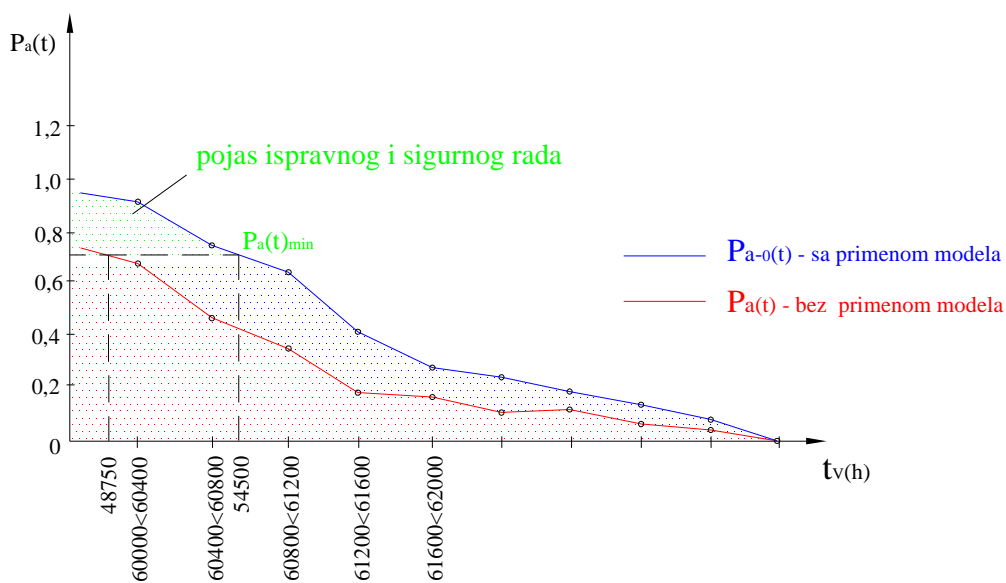
a funkcija gustine raspodele iz jednačina iznosiće [105]:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T - \bar{T})^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

[105]. Petrović, R., Specijalne metode u optimizaciji sistema, Tehnička knjiga, Beograd, 1990.



Slika 4.19. Dijagram pouzdanosti u eksploatacionim uslovima bez primene parametara stanja rada nosećeg ležaja HE "Vrla - 3" Surdulica



Slika 4.20. Dijagram pouzdanosti u eksploatacionim uslovima sa primenom parametara stanja rada vodećih ležajeva HE "Vrla - 3" Surdulica

Za izračunate numeričke statističke karakteristike uzorka može se usvojiti da su parametri Gaus-ove raspodele [105]: $\mu = \bar{T} = 69,4167$ i $\sigma = 0,6562$, na osnovu kojih se mogu izračunati osnovni pokazatelji Gaus-ove raspodele (detaljnije u poglavlju 7.2.).

Metoda koja je za ovo razmatranje posebno interesantna, pored već istaknutih obeležja treba da obuhvati i parametre koji opisuju kontinualne ili druge oblike promene stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

[105]. Petrović, R., Specijalne metode u optimizaciji sistema, Tehnička knjiga, Beograd, 1990.

4.4.4. PARAMETRI STANJA OPTIMIZACIJE KOJI SE PRATE KOD HIDROELEKTRANA

Jedan od najsloženijih zadataka u procesu eksploatacije hidroelektrane jeste održavanje njenog tehničkog stanja. Pri ovome treba reći da ukupnost tehničkog stanja (svaka sastavna komponenta sklopa hidroelektrane i za svaki parametar stanja posebno) određuje radnu sposobnost, tj. pravilno funkcionisanje pri formiranju odgovarajućeg oblika stanja komponenti sklopova na vratilu hidroelektrane.

Tehničko stanje komponenti sklopova hidroelektrane može se opisati određenim radnim parametrima koji su karakteristični i treba da zadovolje projektovanu funkciju cilja pri određenim uslovima i određenom vremenskom intervalu. Promene parametara najčešće vode smanjenju funkcionalnosti, sa konstantnim rastućim i iznenadno dejstvujućim uticajima na stanje komponenata sklopova hidroelektrane.

Kako se stvarno stanje komponenata hidroelektrane stalno menja, a optimizacija tehničke dijagnostike se ne može redukovati samo na jedno određeno stanje, zato se vrši praćenje i registrovanje merljivih promena fizičkih koordinata stanja komponenata u vremenskom intervalu Δt_x . Obrada mernih veličina, odnosno procenjivanje stanja komponenti sklopova hidroelektrane predstavlja osnovni zadatak održavanja prema stanju sa kontrolom radnih parametara.

Parametri stanja komponenti sklopova hidroelektrane sadrže u osnovi vrednosti ulaznih, procesnih i izlaznih radnih parametara u granicama dozvoljenih odstupanja projektovne funkcije cilja, tj. praćenjem parametara i veličina u granice dozvoljenih odstupanja po njihovom izlazu, izvan granica u minimalno određenom vremenskom intervalu t_i i datim uslovima rada.

Pri razradi parametara važno je poznavanje zavisnosti parametara stanja i sposobnosti funkcionisanja komponenata hidroelektrane. Na osnovu te veze parametre stanja razvrstavamo na:

- parametre stanja komponenti sa stalnim uticajem (oni se uzimaju u periodu rada hidroelektrana, a svaka promena dovodi do promene funkcionisanja komponenti hidroelektrane),
- parametre stanja komponenti sa postepenim uticajem (za vreme rada komponenti hidroelektrane vrši se konstatacija o stanju, koje se dobija tek pri dostizanju jedne određene veličine parametara),
- parametre stanja komponenti sa trenutnim uticajem (promena jedne određene veličine trenutno dovodi do nemogućnosti daljeg korišćenja).

Označimo sa A_n – merne vrednosti komponente n ulaznih promenljivih A_1, A_2, \dots, A_n , koje karakterišu uslove eksploatacije komponenti sklopova hidroelektrane, M je merna unutrašnja promenljiva M_1, M_2, \dots, M_n , koja predstavlja pokazatelje režima rada, T je merna izlazna funkcija T_1, T_2, \dots, T_m , koja predstavlja uticaj promene parametara stanja komponenata, R je merni rizik R_1, R_2, \dots, R_r , koji pored svih eksploatacionih karakteristika obuhvataju i pokazatelje pouzdanosti komponenti hidroelektrane. Tako se može napisati jednačina pouzdanosti koja predstavlja sveukupnost uticaja pojedinih parametara stanja na režim rada komponenti [93]:

$$P(t) = \varphi_i(A, M, R, T)$$

S obzirom na to da se hidroelektrana sastoji od velikog broja sastavnih komponenti, čiji ulazni parametri predstavljaju pokazatelje režima rada M_1, M_2, \dots, M_i , a izlazni parametri pokazuju njihovo stanje S_1, S_2, \dots, S_n , imaćemo [93]:

$$R(t) = A(A_1, A_2, \dots, A_n) = f_i(S_1, S_2, \dots, S_n, M_1, M_2, \dots, M_n)$$

Analizirajući prethodno stanje može se zaključiti da uslovi procesa eksploatacije i režima rada optimizacije tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane utiču na promenu njihovog stanja, kao i na pokazatelje pouzdanosti. Zbog toga se uspostavlja funkcionalna zavisnost između promene parametara stanja hidroelektrane (detaljnije u poglavljima 6 i 7) [93]:

$$G_p(t) = T(T_1, T_2, \dots, T_m) = f_i(S_1, S_2, \dots, S_n)$$

Analiza rada komponenata sklopova obuhvata korekciju vrednosti pouzdanosti u slučaju izabrane statističke raspodele pouzdanosti. Korekciona vrednost se dobija iz obrasca [93]:

$$\sigma = \frac{\varphi(z)}{t \cdot f_z(t)} \approx \frac{0,867}{50000 \cdot 1,428 \cdot 10^{-6}} \approx 4,021(h)$$

gde je:

$\varphi(z)$ - korekciona vrednost pouzdanosti dobijena iz empirijskih obrazaca: $P_{F_i}(t) \approx 0,867$,

$f_z(t) = 1,428 \cdot 10^{-6}$ - funkcija gustine otkaza komponenata,

$t = 50000h$ - vremenski interval rada komponenata pre pojave otkaza.

Usvaja se: $\sigma = 4,021(h) \Rightarrow \varphi(z) = 0,867 \Rightarrow P_{F_i}(t) = \varphi(z)0,867$, [93].

Iz tabela vrednosti za površine ispod standardne normalne statističke raspodele pouzdanosti usvajam: $z = 0,92 \Rightarrow \mu = \ln t - z \cdot \sigma = \ln 50000 - 0,92 \cdot 4,021 = 4,91(h)$ [93].

Iz dobijenih vrednosti može se formirati tabela koja obuhvata sve vrednosti parametara (tabela 5.3., P.1, P.2, P.3, P.4.). Uzete su vrednosti funkcija raspodela otkaza odmah nakon najvećih vrednosti pouzdanosti jer iste predstavljaju početak otkaznih stanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Na prikazanom grafiku prenosnih funkcija $G_p(t)$ (slika 5.7.) određena je statistička raspodela pouzdanosti na osnovu koje će se sprovesti dalje korekcije pouzdanosti rada sastavnih komponenti analiziranih sklopova i dobiće se vrednosti merodavne pouzdanosti.

Da bi smo dobili što preciznije rezultate za određivanje pouzdanosti sigurnog rada komponenata analiziranih sklopova hidroelektrane uzeće se korekционе vrednosti pouzdanosti na osnovu lognormalne statističke raspodele pouzdanosti kao odabrane raspodele.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Korekzione vrednosti pouzdanosti biće prikazane tabelarno (tabela 4.8.), a dobija se pomoću izabrane lognormalne statističke raspodele pouzdanosti u obliku [11], [129], [142]:

$$P_i(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2} dt$$

uvođenjem smene: $z = \frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{\ln t - \mu}{\sigma}$; diferenciramo $p_0(t)$,

$$z' = \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)' = \frac{(\ln t - \mu)\sigma - (\ln t - \mu)\sigma}{\sigma^2} \Rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{\frac{1}{t} \cdot \sigma}{\sigma^2} = \frac{1}{t \cdot \sigma} \Rightarrow z = \frac{dt}{t \cdot \sigma}$$

Kako je: $P(t) = 1 - \int_{-\infty}^z \varphi(z) dz$ i $\varphi(z) = t \cdot \sigma \cdot f(t)$, onda je konačni izraz za izračunavanje pouzdanosti rada komponenti analiziranih sklopova [11], [129], [142]:

$$P_i(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)} = \frac{\varphi(z)}{\lambda(t) \cdot t \cdot \sigma}$$

gde je:

$\lambda(t)$ - intenzitet otkaza,
 σ - standardna devijacija.

Na osnovu dobijenih rezultata pouzdanosti konstruisaće se grafik zavisnosti njihove pouzdanosti od vremena rada komponenti sklopova $f(R_i(t), t)$ i to u dva slučaja: bez primene i sa primenom parametara stanja komponenti, na osnovu kojih će se izvršiti grafički prikaz oblasti sigurnosti rada komponenti sklopova.

Primenom dobijenih oblasti sigurnosti funkcionisanja mogu se predvideti oblasti vremena sigurnog rada, vremena rada sa dozvoljenim rizikom i oblasti rada koji ukazuje na neophodnost izvođenja remonta komponenti i celog sklopa. Ova analiza će poslužiti u određivanju korelacije povezanosti uticaja zavisnosti pouzdanosti, promene temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih sklopova (slike 4.21., 4.22. i 4.23.).

Dijagrami prikazanih pouzdanosti predstavljaju tačno određivanje zavisnosti ispravnog rada sastavnih komponenti sklopova kao i prevojne tačke prelaza pouzdanosti u stanje remonta po mernim mestima (prikaz na slikama 4.21., 4.22. i 4.23.).

Odabrani parametri stanja treba u potpunosti da definišu stanje sastavnih komponenti hidroelektrane, što omogućuje predviđanje momenta kada će doći do odstupanja osnovnih karakteristika sastavnih komponenti ili samog postrojenja od dozvoljenih vrednosti. Pri izboru parametara najčešće se uzima da njihov broj bude najmanje moguće.

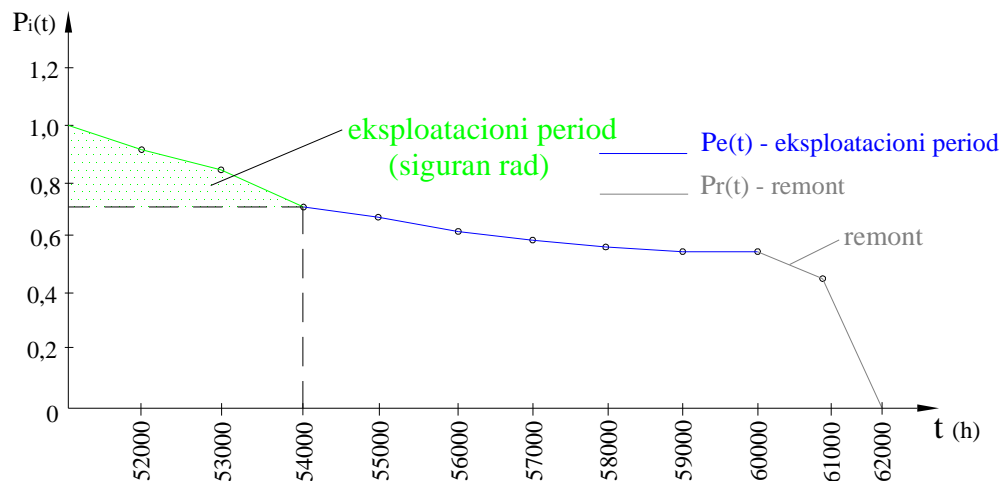
[11]. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2001.

[129]. Stefanović S., Uticaj pojava mehaničkih oscilacija na sigurnost funkcionisanja sklopova u sistemu prenosa snage tekstilnih mašina, T.F. "Mihajlo Pupin" Zranjanin, Doktorska disertacija, Zrenjanin, 2006.

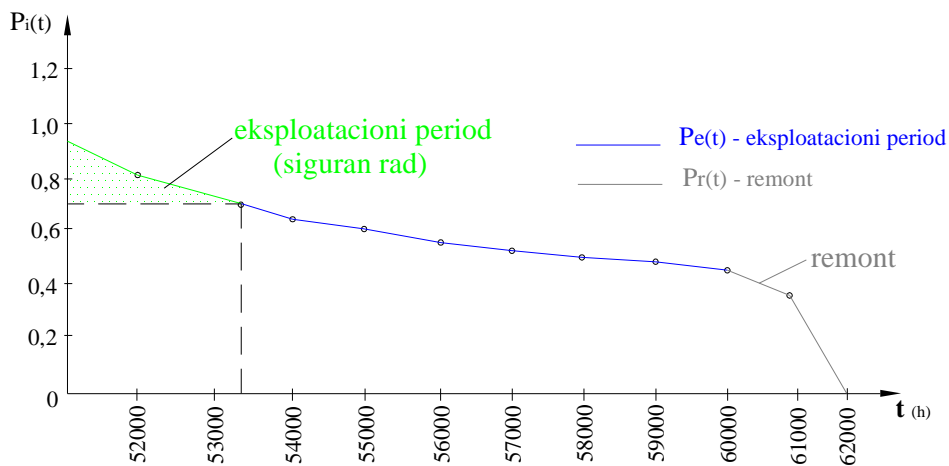
[142]. Vujanović, N., Pouzdanost tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.

R.B.	Naziv sastavnih komponenti sklopa	Vremenski interval komponenti do otkaza $\Delta t(h)$	$f_{N_i}(t)$	z	μ	σ	$P_i(t) = \varphi(z)$
1	Budilica (N_1)	50000 ÷ 60000	$1,438 \cdot 10^{-5}$	1,84	0,56	5,188	1,00
2	Zvono (N_2)	50000 ÷ 60000	$7,95 \cdot 10^{-6}$	2,27	-4,62	8,61	0,982
3	Noseći ležaj (N_3)	50000 ÷ 62000	$4,26 \cdot 10^{-5}$	1,48	8,72	1,03	0,881
4	Gornji vodeći ležaj (N_4)	50000 ÷ 62000	$5,84 \cdot 10^{-6}$	1,12	7,62	1,21	0,842
5	Rotor (N_5)	50000 ÷ 62000	$2,31 \cdot 10^{-5}$	1,32	6,24	2,2	0,838
6	Donji vodeći ležaj (N_6)	50000 ÷ 62000	$4,16 \cdot 10^{-5}$	1,12	0,86	1,12	0,814
7	Turbinski ležaj (N_7)	50000 ÷ 62000	$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,31	0,98	1,39	0,784
8	Ugljeni zaptivač (N_8)	50000 ÷ 60000	$7,12 \cdot 10^{-6}$	1,34	1,32	1,64	0,752
9	Radno kolo (N_9)	50000 ÷ 62000	$5,13 \cdot 10^{-5}$	1,07	1,36	1,21	0,724
10	Sprovodni aparat (R_1)	50000 ÷ 62000	$3,34 \cdot 10^{-5}$	1,37	4,34	1,79	0,703
11	Regulator (R_2)	50000 ÷ 62000	$5,16 \cdot 10^{-5}$	0,78	6,92	1,08	0,682

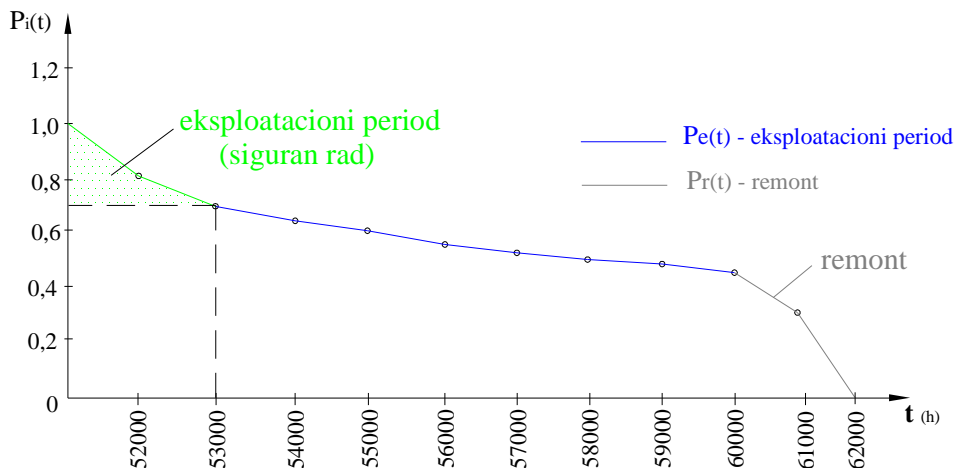
Tabela 4.8. Vrednosti parametara koje određuju pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u slučaju lognormalne raspodele pouzdanosti



Slika 4.21. Dijagram pouzdanosti sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, na mernom mestu 1



Slika 4.22. Dijagram pouzdanosti sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, na mernom mestu 2



Slika 4.23. Dijagram pouzdanosti sastavne komponente sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica, na mernom mestu 3

Treba reći da pored ovih postoji i veoma veliki broj ulaznih parametara, koji karakterišu optimalno stanje i uslove eksploatacije komponenti hidroelektrane (antikoroziivna sredina, kinematski faktori, termoelastičnost sastavnih komponenti itd.).

4.5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih – najznačajnijih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalnih sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza (tabele 4.1. i 4.2.) u dva slučaja i to:

- bez primene parametara optimizacije tehničke dijagnostike,
- sa primenom parametara optimizacije tehničke dijagnostike.

Metodologija optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je prikazana algoritmom (slika 4.1.) koji je dao potpunu analizu stanja rada u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane (slika 4.3.). Određivanje metode rešavanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane obuhvata dve osnovne početne faze i to:

- evidentiran broj otkaza n sastavnih komponenti hidroelektrane na osnovu početnog nivoa stanja,
- analiza eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti hidroelektrane.

Obe faze daju kvalitet upotrebe (slika 4.4.) koji se manifestuje kroz performansi pouzdanosti. Performanse pouzdanosti obuhvataju dve podmetode:

- **podmetoda 1:** sadrži se u tome da za dobijene podatke u otkazima zbog uticaja povišenog nivoa vibracija, temperatura i pohabanosti ležajeva definiše empirijsku funkciju gustine raspodele $f_a(t)$, empirijsku funkciju intenziteta otkaza $\lambda_a(t)$ i empirijsku funkciju pouzdanosti $P_a(t)$, iz empirijskih podataka (tabele 4.4. i 4.5., slike 4.7. i 4.8.).
- **podmetoda 2:** dala je izbor statističke raspodele pouzdanosti komponenti analiziranih sklopova koja je najviše odgovarala podacima otkaza koji su nastali zbog uticaja povišenih nivoa vibracija, temperatura i pohabanosti ležajeva u eksperimentalnim uslovima.

Podmetoda 1 je obuhvatila i redosled organizacije raspodele dijagnosticiranja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane (prikaz na slici 4.6.). Ona je postavila osnov u određivanju eksploatacione pouzdanosti rada sastavnih komponenti hidroelektrane. Na osnovu nje određene su korekcionne vrednosti pouzdanosti sastavnih komponenti sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Analiza načina i posledica otkaza koji su nastali u eksploatacionim uslovima na sastavnim komponentama hidroelektrane su analizirani FMER metodom. Ovom metodom su grupisane učestanosti pojavljivanja otkaza prema uticajnosti (prikaz na slikama 4.9. i 4.10.). Takođe, ona je obuhvatila redosled toka dijagnoze parametara stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane (slika 4.11.). Algoritam za praćenje i određivanje parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, prikazan je na slici 4.12.

Podmetoda 2 je obuhvatila model pouzdanosti koji je prikazan kao blok model (slika 4.13.) i izvršena je redukcijom podmodela 1, 2 i 3 (prikaz na slikama 4.14. – 4.17.) čime je dobijena matematička zavisnost optimalne prenosne funkcije pouzdanosti.

Na osnovu ove zavisnosti određene su vrednosti prenosnih funkcija pouzdanosti bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Takođe, izvršen je grafički prikaz zavisnosti na osnovu dobijenih vrednosti $(f(G_{p_i}(t)), P_{f_i}(t))$, (slika 4.18.). Sa dobijenog dijagrama granice pouzdanosti na osnovu prenosnih funkcija nalaze se u intervalu $P_{f_i}(t) = 0,7 \div 1,0$. Za vrednosti $P_{f_i}(t) < 0,7$ prenosna funkcija $G_{p_i}(t)$ se znatno smanjuje što ukazuje da minimalna pouzdanost rada komponenti sklopova hidroelektrane ne bi trebala da se analizira ispod ove granice.

Na osnovu prenosnih funkcija određena je merodavna statistička raspodela pouzdanosti sastavnih komponenti hidroelektrane (normalna Gausova raspodela). Takođe, njome su konstruisani dijagrami zavisnosti pouzdanosti (prikaz na slikama 4.19. i 4.20.) u eksploatacionim uslovima i određeno je okvirno vreme ispravnog i sigurnog rada nosećeg i vodećih ležajeva za minimalnu vrednost pouzdanosti $P_a(t)_{\min} = 0,7$.

Kod nosećeg ležaja pojas ispravnog i sigurnog rada $t_N = 52000 \div 55250h$, dok kod vodećih ležajeva vreme je manje i iznosi $t_V = 48750 \div 54500h$. Donja granica eksploatacionog vremena ispravnog i sigurnog rada odnosi se na stanje bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, dok se gornja granica odnosi na stanje sa primenom parametara optimizacije.

Ove oblasti u daljoj analizi poslužiće nam kao okvirne u određivanju merodavnih pouzdanosti. Dalja analiza je obuhvatila određivanje sigurnog rada – rada bez rizika u zavisnosti od merodavne pouzdanosti (tabela 4.8.) primenom odabrane statističke raspodele prema mernim mestima.

Granice ispravnog rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane su:

- na mernom mestu 1, iznose $t \leq 56000h$, (slika 4.21.),
- na mernom mestu 2, iznose $t \leq 55000h$, (slika 4.22.),
- na mernom mestu 3, iznose $t \leq 53000h$, (slika 4.23.).

U ovim oblastima eksploatacionog vremena t vršiće se stalna provera uticaja mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanost ležajeva, jer one predstavljaju siguran i ispravan rad komponenti sklopova hidroelektrane (eksploatacioni rad bez rizika).

5.0. ANALIZA MODELA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

5.1. MODEL I OPISIVANJE PROBLEMA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE

Model opisuje različite parametre zavisnosti, a zahteva složene matematičke izraze u analizi problema. Takođe, matematičkim modelom predstavljamo: savršeno poznavanje i primenu složenih matematičkih postupaka izračunavanja, različitih teorija, teorema, metoda, a dolazi se do problema u definisanju postupaka i načina rešavanja različitih zadataka.

Matematički model u najširem smislu reči čini sistem jednačina, tabela, grafikona, običnih, parcijalnih i diferencijalnih jednačina, rekurentnih relacija i sl., koje predstavljaju analitičku, numeričku interpretaciju pojava koja se u predmetu dešavaju, efekata koji su od interesa i koji opisuju funkcionisanje analize rada komponenta sklopova hidroelektrane. Takođe, određuje karakteristike stanja u zavisnosti od vremena, početnih uslova, ulaza i parametara stanja, što omogućava izvođenje zaključka o nekim osobinama sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Formiranje modela obuhvata optimizaciju rasporeda sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, tj. prema oznakama u redosledu komponentata u stablu otkaza (predstavljeno u poglavlju 2.3.), biće iskorišćen u analizi pouzdanosti rada komponenti analiziranih sklopova (detaljnije u poglavljima 6 i 7).

Analiza optimalnog modela obuhvata metodologiju pomoću blok dijagrama u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti analiziranih sklopova hidroelektrane. Metodologija obuhvata optimizaciju konstrukcije monitornog sistema (slika 4.1.), [93]. Komponente su redosledno raspoređene po sklopovima, od radnog kola turbine do budilice, uzimajući njihovu funkcionalnost i namenu, tako da je izvršena redukcija složenih struktura blok dijagrama.

Na osnovu dobijenih konačnih izraza prenosnih funkcija analiziranih sklopova $G_p(t)$ – za sklop komponenti na vratilu turbine i u njima zamenom vrednosti pouzdanosti komponenti $P_0(t)$ za vremenske intervale $50000 \text{ h} \leq \Delta t_i \leq 62000 \text{ h}$, dobija se tabelarna vrednost značajne pouzdanosti iz kojih se kontrolišu krive pouzdanosti funkcija analiziranih komponenti sklopova.

Da bi se formirao univerzalni optimalni model sigurnosti funkcionisanja neophodno je bilo odrediti sve nabrojane parametre teorijske i eksploatacione analize (koji su određeni analitičkim ili eksploatacionim putem, detaljnije u poglavljima 3 i 4) a zatim iste povezati u matematičkom obliku. Ovo je učinjeno analitičkim putem u obliku prenosnih funkcija optimalnog rada modela $P_a(t)$ koji će definisati sigurnost rada analiziranih sklopova (detaljna matematička izvođenja će biti objašnjena u poglavljima 5 i 6).

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Analiza optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pomoću matematičkog modela ima sledeće osobine [93]:

- pruža mogućnost da se hidroelektrana posmatra kao celina ili skup komponenata sklopova i omogući definisanje stepena i koncepcija uticaja svih promenljivih parametara,
- omogućava upoređenje više mogućih varijanti, što predstavlja izbor najbolje ili optimalne vrednosti,
- pomaže da se otkrije veza između pojedinih uticajnih parametara koji se mogu ustanoviti empirijskim metodama,
- ukazuje na podatke koje treba obezbediti da bi se sprovele potrebne analize,
- olakšava predviđanja budućih stanja uz procenu rizika ili granicu poverenja.

Prilikom analitičkog modelovanja različitih problema iz prakse mora se prvo identifikovati sam problem koji želimo rešiti, uz sve komponente sklopova koje utiču na taj problem. Zatim se mora izvršiti analiza problema i identifikacija parametara u cilju njihovog uticaja, dejstva, opisa idr. Izvršena kvalitetna analiza problema treba da bude preduslov koji se mora ispuniti kako bi bio izrađen kvalitetan matematički model. Nakon toga se pristupa proračunskoj proverbi postavljenog modela što na kraju omogućuje dobijanje kvantitativnog rešenja.

Da bi se uspešno mogao rešiti problem optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, pored poznavanja željenog cilja, odnosno skupa dopustivih radnih stanja komponenti i izbora parametara, neophodno je definisati matematički model koji će precizno opisati sve značajnije osobine sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Pre izbora pogodnog matematičkog modela potrebno je postaviti pitanje šta se od modela očekuje, jer ovde uloženi trud po pravilu predstavlja značajnu uštedu u vremenu, uloženom radu i sredstvima. Sledeća faza je analiza raspoloživih informacija o stanju sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane, a tek na kraju se pristupa definisanju univerzalnog matematičkog modela, koji čini most između matematičkih metoda i modela.

Do matematičkog modela se u principu dolazi na razne načine - najčešće matematičkim izražavanjem poznatih fizičkih i drugih zakonitosti u skladu sa kojim se komponente sklopova hidroelektrane ponašaju, uopštavanjem eksploatacionih podataka i originalnom sintezom međusobno zavisnih ulaza, upravljanja i sistema izlaza.

Matematički problem opisuje metodu stvarnih problema, bez obzira da li su ti problemi doživeli svoju materijalizaciju (da postoji određeno tehničko - tehnološko rešenje) ili su hipotetičkog karaktera - matematički opis često iz različitih razloga, nema potpuno poklapanje sa realnim problemom, odnosno ne predstavlja njegovu idealnu sliku.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

Prilikom rešavanja složenih problema, zbog nedostataka parametara za određenim postupcima, nedovoljno tačnim početnim pretpostavkama i ograničenjima može se napraviti veća greška u izračunavanju, nego što bi se pogrešilo primenom jednostavnijih, praktičnih i dovoljno pouzdanih modela. Ponekad i kod izuzetno dobrog poznavanja i dobre primene adekvatnih matematičkih postupaka, tj. može se napraviti greška koja se pojavljuje na približnom i jednostavnijem modelu. Do toga se dolazi činjenicom da što je problematika složenija time je i matematički problem složeniji sa većim brojem jednačina i obimnijim izračunavanjima, čime se može napraviti veća greška u izračunavanju.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana može da se obavlja na različite načine. Jedan od najčešće korišćenih mogućnosti je korišćenje metoda i uprošćene šeme procesa, koje se opisuju različitim oblicima matematičkih modela. Sam tok analize istraživanja biće prikazan tabelarno i dijagramima sa izborom dijagnostičkih parametara koji se upravo baziraju na ocenu stanja komponenti sklopova hidroelektrane (detaljnije u poglavljima 6 i 7).

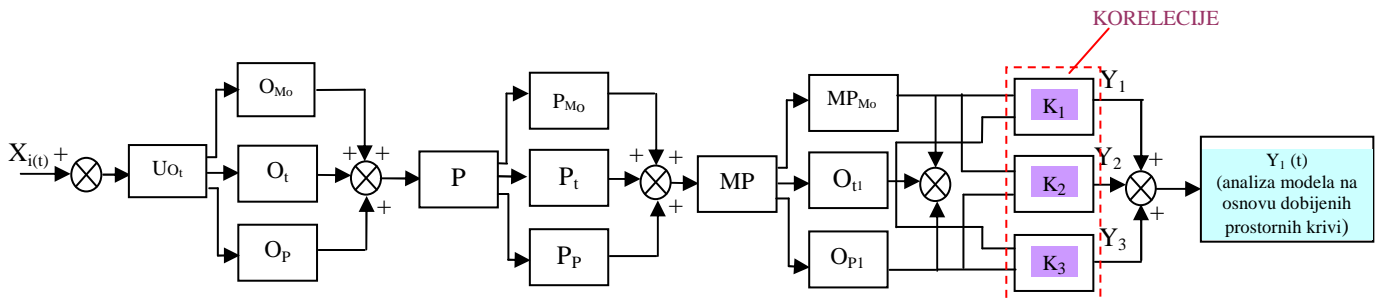
5.2. MATEMATIČKI MODEL OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

Da bi jedan matematički model mogao da se uspešno primenjuje za analizu optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane, mora da ispuni određene uslove:

- treba da na jednostavan i dovoljno precizan način opisuje pouzdanost analiziranih sklopova hidroelektrane, tako da se relativno prostim postupcima može doći do uspešnih rezultata (npr. praćenje temperature ležajeva u toku rada),
- mora da obuhvati sve parametre važne za problem koji se analizira,
- mora biti karakteran, tako da pri svim ponavljanjima dobija uvek isti karakter rezultata,
- treba da bude dovoljno jednostavan, tako da se potrebne analize mogu ubaciti u raspoloživom vremenu i raspoloživom tehnikom,
- treba da omogući naknadna usavršavanja ili uključivanje novih parametara, ako se za to ukaže prilika.

Analiza pouzdanosti matematičkog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane ima sledeće karakteristike da (slika 5.1.):

- prati vibracije vratila u zavisnosti od snage,
- prati promene temperature ležaja u toku vremena,
- prati otkaze ležaja u toku njegovog životnog veka,
- pruži mogućnost da se hidroelektrana posmatra kao celina, tj. kao entitet, te da se simulacijom ili drugim tehnikama omogući definisanje stepena i karaktera uticaja svih promenljivih karaktera,
- omogući upoređenje više mogućih varijanti, što je od neposredne koristi u izboru najbolje ili optimalne varijante,
- pomaže da se otkriju veze između pojedinih uticajnih parametara koje nisu ranije zapažene ili koje se ne mogu ustanoviti empirijskim metodama,
- ukaže na podatke koje treba obezbediti da bi se sprovele potrebne analize,
- olakša predviđanja budućih stanja ili događaja, uz procene i rizika ili granice poverenja itd.



Slika 5.1. Univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti sklopova HE "Vrta -3" Surdulica

gde su:

- U_{ot} - ukupni otkazi sastavnih komponenti usled analiziranih parametara optimizacije,
- O_{mo} - otkazi usled povećanih nivoa mehaničkih oscilacija,
- O_t - otkazi usled povećanja radnih temperatura,
- O_p - otkazi usled pohabanosti,
- P - pouzdanost,
- P_{mo} - pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu uticaja mehaničkih oscilacija,
- P_t - pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu uticaja radnih temperatura,
- P_p - pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu uticaja pohabanosti,
- MP - model pouzdanosti,
- MP_o - model pouzdanosti na osnovu blok dijagrama prema mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija,
- O_{t_1} - optimizacija pouzdanosti na osnovu radnih temperatura,
- O_{p_1} - optimizacija pouzdanosti na osnovu pohabanosti,
- K_1 - korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i radnih temperatura,
- K_2 - korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležaja,
- K_3 - korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležaja.

Formiranje modela je obuhvatilo raspored komponenti sklopova prema oznakama u redosledu komponenata u stablu otkaza (detaljnije u poglavlju 2.3.).

Komponente su redosledno raspoređene po sklopovima, od radnog kola, rotora, zvona, budilice i dr. (slika 4.3.). Iz ovih razloga prikazan je model blok dijagram koji obuhvata raspored komponenti sklopova uzimajući i njihovu funkcionalnost i namenu, tako da je izvršena redukcija složenih struktura blok dijagrama.

Redukcijom ovog modela, izvršiće se njegovo konačno rešavanje pri dobijanju prenosne funkcije pouzdanosti komponenti sklopova hidroelektrane $G_p(t)$. Kao što se sa slike 5.1. vidi, radi se o otvorenom sistemu automatskog upravljanja pouzdanosti. Model blok dijagram pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema izabranim mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva, (prikaz na slici 6.2., detaljnije u poglavljima 5 i 6).

5.3. GRANIČNE VREDNOSTI PRIMENE MODELA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

Određivanje granične vrednosti je složen posao i zato se sprovodi u timskom radu pri eksploatacionim istraživanjima sastavnih komponenti sklopova uz korišćenje svih raspoloživih podataka.

Ovako postavljen model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike prema stanju komponenti predstavlja izbor parametara koji treba da reši pitanje periodičnosti dijagnostičkih kontrola kao i pitanja vremenskog trenutka kada treba izvesti odgovarajuće analize načina i posledice otkaza, da bi se obezbedio normalan proces eksploatacije hidroelektrane.

Važno mesto u određivanju granične vrednosti zauzima dijagnostička kontrola kritičnih parametara vrednosti. Pri tome se u toku rada može koristiti: merenje i kontrola nivoa mehaničkih oscilacija, pohabanost ležajeva, kontrola funkcionalnih parametara (pritisak, temperatura, idr), kontrola usled zamora u materijalu sastavnih komponenti hidroelektrane, idr. Na osnovu toga se za svaku sastavnu komponentu hidroelektrane treba napraviti posebna tabela koja sadrži: kontrolisane tehničke parametre, određivanje varijante održavanja stanja komponenti i instrumente za merenje dijagnostike stanja komponenti.

Izvršene operacije određivanja graničnih vrednosti se mogu podeliti u četiri etape:

- transformacija fizičkih pojava koje prate rad ispravnosti komponenti sklopova hidroelektrane,
- merenje određenih parametara u određenim granicama vrednosti,
- upoređenje vrednosti izmerenih parametara sa dozvoljenim vrednostima utvrđenim tehničkim normama,
- procena određivanja stanja komponenti na bazi rizika.

U rešavanju zadataka i primene modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike prema stanju komponenti sklopova sa kontrolom parametara, tj. eksploatacionog istraživanja granične vrednosti koje daju mogućnost optimalnog praćenja stanja komponenti sklopova hidroelektrane i to pri određivanju:

- mesta izvršenja dijagnostičkih kontrola komponenti,
- izbora režima dijagnostike,
- instrumenata za merenje parametara tehničke dijagnostike.

Tako nivo mehaničkih oscilacija može biti optimalan u granicama određenih izmerenih vrednosti $A_{N_i}(t)_{N_i \max p} = 105 \div 165 [\mu m/s]$ i na bazi statistike. Neka sopstvena iskustva pokazuju da nivo vibracija treba da bude u granicama koje se smatraju normalnim i one koje ne zadovoljavaju. Pojas ispravnog i sigurnog rada $t_N = 52000 \div 55250 h$, opseg radnih temperatura $59^\circ C \div 65^\circ C$ i opseg pohabanosti ležajeva $\bar{z} = 0,3 \div 0,4 [mm]$, (detaljnije u poglavlju 7).

5.4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Formiranje univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike sastavnih komponenti hidroelektrane je obuhvatila najznačajnije parametre teorijske i eksperimentalne analize (parametre uticaja mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanost ležajeva koji su povezani u matematički oblik).

Pri njegovom formiranju krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Oni su obuhvatili otkaze usled povećanih nivoa mehaničkih oscilacija, povećanja radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Takođe, izvršiti analizu problema i identifikaciju parametara u cilju njihovog vrednovanja, primene, opisa idr.

Izvršena kvalitetna analiza problema i izbor metoda treba da bude preduslov koji se mora ispuniti kako bi bio izrađen kvalitetan matematički model. Nakon toga se pristupa izboru parametara i proračunskoj proveri postavljenog modela što na kraju omogućuje dobijanje kvantitativnog rešenja (merodavna analiza je objašnjena u poglavljima 4 i 5).

Analiza pouzdanosti razvrstana je takođe paralelnom spregom i obuhvata merodavnu pouzdanost usled povećanja nivoa mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti određen je model pouzdanosti na osnovu model blok dijagrama na mernim mestima mehaničkih oscilacija, optimizacija pouzdanosti na osnovu radnih temperatura i optimizacija pouzdanosti na osnovu pohabanosti ležajeva.

Njihovim međusobnim uticajima i povezanošću formiraju se korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane:

1. K_1 – korelacija parametara optimizacije mehaničke oscilacije i temperatura,
2. K_2 – korelacija parametara optimizacije mehaničke oscilacije i pohabanosti ležajeva,
3. K_3 – korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Na osnovu korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama sprovedena je analiza modela u empirijskim istraživanjima. Ovakav model je univerzalnog tipa jer može se primeniti kako na jednostavne tako i na složene sisteme bez obzira na gabarite komponenti sklopova.

6.0. EMPIRIJSKA ISTRAŽIVANJA

6.1. POSTUPCI I MESTA MERENJA

Merenje vrednosti vibracija, temperature i pohabanosti ležajeva ima za cilj da se odredi opšte stanje komponenata hidroelektrane, utvrdi njeno ponašanje u prošlosti i prognozira ponašanje u budućnosti. Kada se to zna, može se planirati rad pojedinih sastavnih sklopova hidroelektrane uz produžetak veka trajanja pojedinih komponenti. Korišćenjem ovih podataka mora se razraditi plan preventivnih mera da bi se hidroelektrana pripremila za kritične periode kada su najveća opterećenja ili najveća potrošnja energije. Pogonska spremnost tada mora biti najveća tako da se iznenadni otkazi svode na minimum.

Kada se pojave vrednosti vibracija, temperature i pohabanost ležajeva veće od dozvoljenih, vek trajanja se naglo smanjuje i opasnost od otkaza i havarija se povećava. Za određivanje uzroka pojave vibracija, temperature, pohabanosti ležajeva i iznalaženje pobudnih sila potrebne su merne instalacije i oprema zadovoljavajuće tačnosti i osetljivosti. Za analizu ponašanja komponenti sklopova hidroelektrane pri pojavi većih vibracija potrebno je merenje deformacija i pomeranja pojedinih komponenti sklopova, kao i snimanje pulsacija pritiska u protočnim kanalima čitavog dovodno-odvodnog sistema.

Uređaj za merenje parametara vibracija – mehaničkih oscilacija na osnovnim komponentama sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica ima sledeće osnovne karakteristike [93]:

- da obezbedi merenje sopstvenih frekvenci u opsegu od 0,5 do 500 Hz, (obično do 50 Hz),
- da meri amplitude oscilacija u opsegu od 0,0 do 2000 μm (preporučuje se da ima bar tri opsega uveličavanja 100, 300 i 600 puta),
- osetljivost treba da omogući merenje pomeranja i amplituda od 5 μm ,
- greška merenja amplituda treba da je manja od $\pm 5\%$,
- opseg merenja faznog pomeranja treba da je od 0,0 do 360°,
- greška merenja faznog pomeranja treba da je manja od 10%,
- radni opseg temperature okoline treba da je od -20 do $+60^{\circ}C$,
- zapisane krive oscilacija vrše se na papirnoj i/ili magnetnoj traci,
- ne sme da postoji uticaj jednih vibracija na druge,
- treba da postoji mogućnost merenja vibracija u tri pravca (obično dva horizontalna i vertikalni),
- stabilnost karakteristike i podešenosti pri varijaciji temperature okoline $\pm 15^{\circ}C$ (poželjno je da postoji mogućnost daljinskog podešavanja pokazivača – korekcija nule),
- neosetljivost na promenljivosti magnetnog i električnog polja jačine do 24A/cm učestanosti 50 Hz,
- reprodukovanje pojedinih impulsa vibracija bez velikih deformacija,
- da je prilagodljiv za ugradnju na mestu merenja,
- dugački vek trajanja i pogodnost za ručni transport.

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

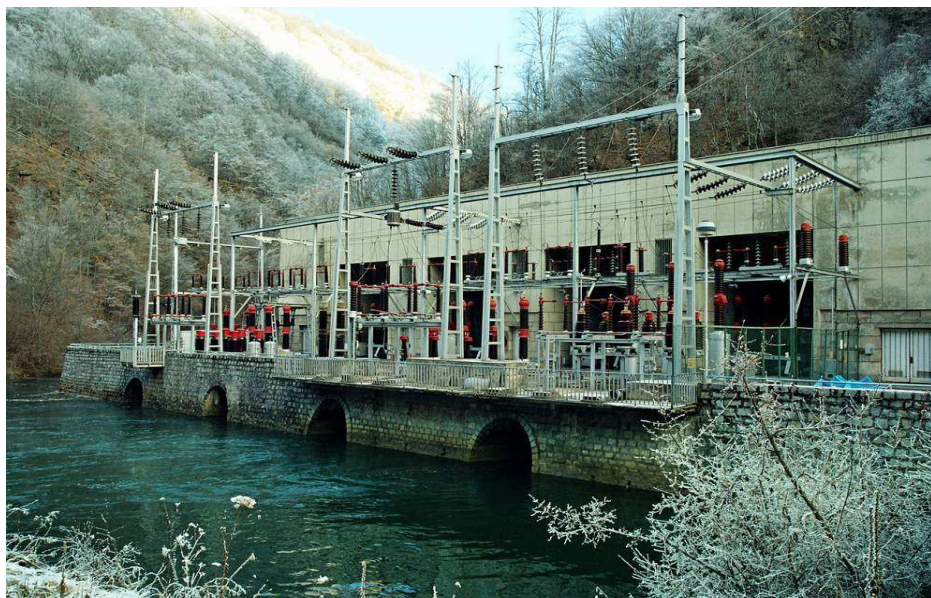
Merač vibracija mora da se pričvrsti za konstrukciju čije se oscilacije mere. Ako se to ne učini neće slediti pomeranja, kada su ubrzanja veća od ubrzanja zemljine teže. Prilikom ispitivanja prelaznih procesa, vibracije su pojačane pa je u tom slučaju posebno važno da instrumenti budu dobro pričvršćeni.

Na slici 6.1. prikazan je izgled agregata A i B hidroelektrane HE "Vrla – 3" Surdulica sa sastavnim komponentama sklopova i raspored mernih mesta merenja vibracija, temperature i pohabanost ležajeva.



a)

Slika 6.1. Izgled HE "Vrla –3" Surdulica a) izgled turbinskog agregata A; b) izgled turbinskog agregata B; c,d,e) izgled budilice i zvona; f) izgled kućišta nosećeg ležaja; g) izgled vratila i ugljenih zaptivača; h) izgled rotora



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

Ispitivanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane mogu se podeliti na sledeći način:

1. primopredajno ispitivanje,
 2. eksploataciona ispitivanja,
 3. ispitivanje pri ponašanju sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane usled - povećanja vibracije, temperature, pohabanosti ležajeva, idr.,
 4. havarijsko ispitivanje posle popravke komponenti sklopova hidroelektrane.
1. Primopredajno ispitivanje se vrši pre puštanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane u normalnu eksploataciju. Cilj je da se odredi njihovo ponašanje i zabeleže uporedni oscilogrami koji će kasnije služiti za poređenje sa novo snimljenim rezultatima, kako bi se procenile promene nastale u toku rada.
 2. Eksploataciona ispitivanja, a naročito ispitivanja pre remonta hidroelektrane, otkrivaju normalnosti koje se javljaju pri radu sastavnih komponenti i postrojenja. Ona ukazuju na stanja komponenti hidroelektrane i otkaze, kao što su debalans obrtnih masa, lom, poremećaji u odnosu na osnovna stanja komponenti. Ovi podaci omogućuju planiranje remonta i obim remontnih radova i utvrđuju stanja komponenti hidroelektrane pre ponovnog ulaska u eksploataciju.
 3. Ispitivanje pri normalnom ponašanju komponenti hidroelektrane praćene pojačanim vibracijama koje imaju za cilj da se otkriju uzroci povišenog nivoa vibracija i da se iznađu načini za njihovo smanjenje. Analizom oscilograma utvrđuje se opšta stanja komponenti hidroelektrane i donose odluke važne za sigurnost njihovog rada, sprečavanja njihovog otkaza i vek njihovog trajanja.
 4. Havarijsko ispitivanje komponenti hidroelektrane posle popravke ima za cilj da se utvrdi opšte stanje sastavnih komponenti i da li su posledice havarije u potpunosti otklonjene. Ispitivanje se može obaviti prema programu. Programom se vrše ispitivanja pri: stacionarnim režimima rada ili prema nestacionarnim ponašanjima komponenti sklopova i postrojenja. Ovaj program se daje kao primer i ne predstavlja obavezan oblik. On se može menjati prema potrebi.

Ako se vrše merenja (npr. merenje vibracija) korišćenjem električnih uređaja mora se proveriti uticaj magnetnog polja generatora na merne rezultate.

Smanjenje uticaja jačine magnetnih polja na merni sistem može se ostvariti primenom postavljenih kablova, uzemljenih zastora i uzemljenjem oscilograma. Takođe, analizom zabeleženih ukupnih otkaza utvrđujemo opšte stanje sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Merenje temperature pojedinih ležaja na hidroelektrani vrši se pomoću sonda za merenje temperature toplog vazduha i to ugrađena je unutar kućišta ispred hladionika jedna termosonda, a u prostor izvan kućišta takođe jedna termosonda za merenje temperature hladnog vazduha.

Sonde otpornih termometara izrađene su od nikl žice, precizno baždarene na određeni otpor kod određene temperature. Princip njihove indikacije zasniva se na porastu unutrašnjeg otpora sonde pri povećanju temperature kod kojeg se menja i pad napona na stezaljkama sonde. Tad se registruje na instrumentu direktno baždarenom u stepenima celzijusa [93].

Sonde u donjem vodećem ležaju ugrađene su tako da svojim vrhom dolaze do bele kovine. Kod nosećih i turbinskih vodećih ležajeva postavlja se živin termometar sa dva radna kontakta, od kojih prvi daje signal kod porasta temperature iznad +55 °C, a drugi obustavlja rad turbine kod porasta temperature iznad +75 °C i otporni termometar, čiji pokazni instrument je smešten na komandnoj ploči, (detaljnije u poglavljima 6.3. i 7.2.).

Habanje je najčešća pojava manifestacije otkaza kod ležajeva. Analiza je rađena na ležajima hidroelektrane tokom generalnih opravki na uzorku pri čemu je konstatovano da su različite vrste habanja prisutne u 91% slučajeva, dok je plastična deformacija registrovana sa 8,5%, a lom ležaja u neznatnom broju 0,5%. Kako je habanje dominantno, dalja analiza je vršena u cilju utvrđivanja najprisutnijih vrsta habanja (detaljnije u poglavlju 6.4., prikaz na slici 6.8. [23]).

[23]. Bednjak, M. H., Modeli v procese radni ležanie, remontu tehnike sistemi, Mašinstroenie, Kiev, 1993

[93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.

6.2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PRI MERENJU MEHANIČKIH OSCILACIJA HIDROELEKTRANE

Periodična kontrola vibracija komponenti sklopova hidroelektrane se vrši istim instrumentima, raspoređenih na isti način i pri istim režimima rada. U zavisnosti od komponenata hidroelektrane mehaničke oscilacije se mere na sledećim mestima:

- na agregatima sa vertikalnim vratilom, na gornjem krstu generatora, na donjem krstu generatora i na oklopu turbinskog ležišta,
- na agregatima sa horizontalnim vratilom, na svim ležištima,
- na generatoru, na svim polovima statora,
- kod svih tipova hidroagregata, na podu mašinske sale, na oklopu sifona, na spirali, na nosačima kranskih staza.

Vibracije nosećih krstova generatora i ležajeva treba meriti u jednoj vertikalnoj ravni. Na generatorskim krstovima merače postavljati što bliže osi obrtanja. Oscilacije turbinskog ležišta se mere na oklopu ili nekom delu dovoljno čvrsto spojenom za telo ležišta.

Pri ispitivanju agregata sa vertikalnim vratilom jedna osa se uzima u vretikalnom pravcu toka vode, a druga u pravcu obala. Nekada je pogodnije postaviti horizontalne ose u radijalnom i tangencijalnom pravcu. Pri ispitivanju agregata sa horizontalnim vratilom jedna osa se uzima u osi agregata, druga horizontalno normalna na osu vratila i treća u vertikalnom pravcu.

Prilikom merenja vibracija agregata treba meriti i ekscentričnost vratila. To se radi instrumentima postavljenim na nepokretnom delu mašine. Ekscentričnost se meri na tri mesta po visini (dužini) vratila kod svakog ležišta i to u dva pravca pod uglom od 90° .

Najvažniji podatak je oblik ose vratila u prostoru pri radu sa normalnom brzinom obrtanja. To se može odrediti ako se vrši registrovanje pokazivanja uređaja postavljenih na tri do četiri mesta duž vratila u vertikalnoj ravni. Ovi merni aparati zapisuju maksimalne amplitude i njihovo fazno pomeranje. Analizom rezultata merenja otkrivaju se nepravilnosti ose vratila kao posledica centriranja i balansiranja rotora hidroelektrane.

Oscilacije agregata i njegovih pojedinih komponenti i uređaja treba meriti sa instrumentima koji imaju filtere za izdvajanje uskih zona pojedinih učestanosti a to su - frekventni analizatori. Rezultati se zapisuju na oscilogramima ili magnetnim trakama.

Veoma često se pri delimičnim otvorima sprovodnih lopatica turbine javljaju vibracije agregata sa znatno većom amplitudom. U nekom opsegu otvora vibracije se pojačavaju do maksimuma, a zatim se smanjuju. To je uzrokovano formiranjem nestabilnog vrtložnog traga u sifonu. Kada se dogodi da dođe do rezonance čitavih dovodno-odvodnih komponenata sklopova pulzacije pritiska se pojačavaju uz velike oscilacije snage hidroelektrane.

Frekvence pojačanih oscilacija agregata odgovaraju frekvenci pulzacije pritiska u sifonu. Ako je protočni sistem u rezonanci onda se uočavaju pulzacije pritiska iste učestanosti u čitavom dovodu i odvodu vode. Pri malim opterećenjima hidroelektrana frekvence su manje u zavisnosti od brzine obrtanja, a pri velikim snagama i preopterećenjima su veće od učestalosti obrtanja. U toku ispitivanja zapisuju se u protokole merenja amplitude oscilacija svih veličina.

Uticaj električne pobude na vibracijama komponenti hidroelektrane određuju se pri praznom hodu. Mere se oscilacije pri pobudama 25, 50, 75, i 100% μm . Ako se vibracije pojačavaju sa povećanjem pobude, znači da postoji magnetna nesimetrija u generatoru. U tom slučaju treba pristupiti detaljnijem ispitivanju uz zapisivanje na traci struje generatora.

Ispitivanjem nepobuđenog agregata na praznom hodu proverava se izbalansiranost rotora. Brzina obrtanja se menja obično na sledeći način: 60, 80, 100, 115, i 130% μm od nominalne. U slučaju da je rotor loše balansirana amplituda vibracija se menja sa kvadratom frekvence $A = f(f^2(t))$ obrtanja. Ispitivanje sa brzinama manjim od 50% se ne preporučuje zbog lošijih uslova podmazivanja ležajeva i opasnosti od oštećenja ležišnih površina.

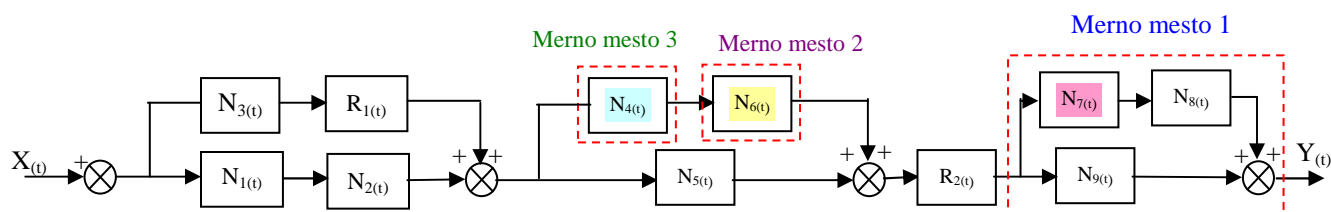
Raspored mernih mesta za merenje mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica (detaljnije u poglavlju 7.1):

Merno mesto 1 - (zona turbinskog vodećeg ležaja) (N_7)
zona gornjeg generatorskog ležaja

Merno mesto 2 - (zona donjeg generatorskog vodećeg ležaja) (N_6)
zona gornjeg generatorskog ležaja

Merno mesto 3 - (zona gornjeg generatorskog ležaja) (N_4)
zona gornjeg generatorskog ležaja

Model blok dijagram pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema izabranim mernim mestima nivoa oscilacija, slika 6.2., radi se o otvorenom sistemu automatskog upravljanja pouzdanosti.



Slika 6.2. Model blok dijagram pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija - vibracija HE "Vrla –3" Surdulica

Merno mesto 1: obuhvata komponente: turbinski vodeći ležaj (N_7), ugljeni zaptivač (N_8) i radno kolo (N_9).

Merodavna kružna brzina je najveća brzina obrtanja radnog kola (ω_{N_9}):

$$M_{N_7} = \frac{N_7(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}}$$

$$M_{N_8} = \frac{N_8(t) \cdot A_8(t)_{N_8}}{\omega_{N_8} = \omega_{N_7}} = \frac{N_8(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}}$$

$$A_7(t)_{N_7} = A_8(t)_{N_8} = A_9(t)_{N_9}$$

$N_7(t)$ - pouzdanost sastavne komponente gornjeg turbinskog ležaja,

$N_8(t)$ - pouzdanost sastavne komponente ugljenog zaptivača.

$$M_{N_9} = \frac{N_9(t) \cdot A_9(t)_{N_9}}{\omega_{N_9}} = \frac{N_9(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}}$$

$N_9(t)$ - pouzdanost sastavne komponente radnog kola

Rezultujući deo **podmodela mernog mesta 1** je:

$$S_1(t) = \frac{M_{N_7} \cdot M_{N_8} \cdot M_{N_9}}{1 - M_{N_7} \cdot M_{N_8} \cdot M_{N_9}} = \frac{\frac{N_7(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}} \cdot \frac{N_8(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}} \cdot \frac{N_9(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}}}{1 - \frac{N_7(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}} \cdot \frac{N_8(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}} \cdot \frac{N_9(t) \cdot A_7(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}}} =$$

$$S_1(t) = \frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}{1 - \frac{\omega_{N_7}^3}{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}} = \frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}^3 - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}$$

$$S_1(t) = \frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}^3 - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}$$

Merno mesto 2: obuhvata sastavnu komponentu donjeg generatorskog vodećeg ležaja ($N_6(t)$).

Rezultujući deo **podmodela mernog mesta 2** je:

$$S_2(t) = \frac{N_6(t) \cdot A_6(t)_{N_6}}{\omega_{N_6}}$$

Merno mesto 3: obuhvata sastavnu komponentu gornjeg generatorskog ležaja ($N_4(t)$).

Rezultujući deo **podmodela mernog mesta 3** je:

$$S_3(t) = \frac{N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}{\omega_{N_4}}$$

Opšti oblik sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane u zavisnosti od nivoa amplituda oscilacija na izabranim mernim mestima je izražen preko opšte univerzalne jednačine optimalnog modela koja glasi:

$$S_\eta(t) = \frac{1}{1 - S_2(t) \cdot S_3(t)} \cdot S_1(t)$$

Oblik u jednačini $\frac{1}{1 - S_2(t) \cdot S_3(t)}$ je prikazan preko jedinične povratne sprege ne uzimajući u razmatranje komponentu $N_5(t)$ - rotor, jer na njoj nisu mereni uticaji mehaničkih oscilacija kao i na komponenti $R_2(t)$ - regulatoru:

$$S_\eta(t) = \frac{S_1(t)}{1 - S_2(t) \cdot S_3(t)}$$

Matematičkim sređivanjem dobija se:

$$S_\eta(t) = \frac{\frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}^3 - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}}{1 - \frac{N_6(t) \cdot A_6(t)_{N_6}}{\omega_{N_6}} \cdot \frac{N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}{\omega_{N_4}}} =$$

$$S_\eta(t) = \frac{\frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}{\omega_{N_7}^3 - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}}}{\omega_{N_6} \cdot \omega_{N_4} - N_6(t) \cdot A_6(t)_{N_6} \cdot N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}$$

Opšti oblik jednačine funkcionisanja sastavnih komponenti je:

$$S_\eta(t) = \frac{N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7} \cdot \omega_{N_6} \cdot \omega_{N_4}}{\left(\omega_{N_7}^3 - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7}\right) \cdot \left(\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} - N_6(t) \cdot A_6(t)_{N_6} \cdot N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4}\right)}$$

Daljim sređivanjem opšte jednačine dobijamo:

$$S_{\eta}(t) = N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7} \cdot \omega_{N_6} \cdot \omega_{N_4} \leq 1,0$$

$$S_{\eta}(t) = \omega_{N_7^3} \cdot \omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} - \omega_{N_7^3} N_6(t) A_6(t)_{N_6} \cdot N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4} - \omega_{N_4} \omega_{N_6} \cdot N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_7} - N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) \cdot A_7^3(t)_{N_6} \cdot A_6(t)_{N_6} \cdot N_4(t) \cdot A_4(t)_{N_4}$$

smena:

$$N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t) = \eta_1$$

$$N_6(t) \cdot N_4(t) = \eta_2$$

Uvođenjem smene dobijamo izraz:

$$S_{\eta}(t) = \frac{\eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_7} \cdot \omega_{N_6} \cdot \omega_{N_4}}{\omega_{N_7^3} \cdot \omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} - \omega_{N_7^3} \cdot \eta_2 A_6(t)_{N_6} \cdot A_4(t)_{N_4} - \omega_{N_4} \omega_{N_6} \cdot \eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_7} - \eta_1 A_7^3(t)_{N_7} \cdot \eta_2 \cdot A_6(t)_{N_6} \cdot A_4(t)_{N_4}}$$

$$S_{\eta}(t) \cong \eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_7} \cdot \omega_{N_6} \cdot \omega_{N_4} = \omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(\omega_{N_9^3} \cdot \eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_7} \right) - \eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4} \cdot \left(\omega_{N_7^3} + \eta_1 A_7^3(t)_{N_7} \right)$$

$$q_1 \omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} A_7^3(t)_{N_7} \left(\eta - 1 - \omega_{N_7^3} \right) = -\eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4} \left(\omega_{N_7^3} + \eta_1 A_7^3(t)_{N_4} \right)$$

$$S_{\eta}(t) \cong \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(1 - \omega_{N_9^3} \right)}{\omega_{N_7^3} + \eta_1 A_7^3(t)_{N_9}} = \frac{-\eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}{\eta_1 A_7^3(t)_{N_9}}$$

$$S_{\eta}(t) \approx \frac{\eta_1 A_7^3(t)_{N_7}}{\omega_{N_7^3} + \eta_1 A_7^3(t)_{N_7}} = \frac{-\eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(1 - \omega_{N_7^3} \right)}$$

Jednačina dobija oblik:

$$S_{\eta}(t) \approx \frac{1}{1 + \frac{\omega_{N_7^3}}{\eta_1 A_7^3(t)_{N_9}}} = \frac{-\eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(1 - \omega_{N_7^3} \right)}$$

$$\text{Jednačina je: } \eta_2 A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4} \cdot \left(1 + \frac{\omega_{N_7^3}}{\eta_1 A_7^3(t)_{N_9}} \right) + \omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(1 - \omega_{N_7^3} \right) = S_{\eta}(t)$$

Opšta jednačina optimizacije u zavisnosti od pouzdanosti i nivoa amplituda mehaničkih oscilacija na mernim mestima je:

$$\eta_1, \eta_2 = P[f(\omega_i, A_i)]$$

$$\eta_2 \left(1 + \frac{\omega_{N_7^3}}{\eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_9}} \right) + \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} \left(1 - \omega_{N_7^3} \right)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}} = S_{\eta}(t)$$

znajući da je pouzdanost:

$$\eta_1 = N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t)$$

$$\eta_2 = N_4(t) \cdot N_6(t)$$

$$\eta_2 + \frac{\eta_2 \cdot \omega_{N_7}^3}{\eta_1 \cdot A_7^3(t)_{N_7}} + \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}} = S_{\eta_1}(t)$$

uzimajući: $\xi = \frac{\eta_2}{\eta_1} \Rightarrow \eta_2 = \xi \cdot \eta_1$

$$\xi \cdot \eta_1 + \xi \frac{\omega_{N_7}^2}{A_7^2(t)_{N_7}} + \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}} = S_{\eta_1}(t)$$

sređivanjem izraza dobija se:

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \eta_1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{\omega_{N_7}^2}{A_7^2(t)_{N_7}} + \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}} = S_{\eta_1}(t)$$

$$S_{\eta_1}(t) \equiv \eta_2 \left(1 + \frac{\omega_{N_7}^2}{\eta_1 \cdot A_7^2(t)_{N_7}} \right) = \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}$$

$$S_{\eta_1}(t) \approx \eta_2 \left(\frac{\omega_{N_7}^2}{\eta_1 \cdot A_7^2(t)_{N_7}} - 1 \right) = \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{A_{N_6}(t) \cdot A_4(t)_{N_4}}$$

$$S_{\eta_1}(t) = \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{\eta_2 \left(\frac{\omega_{N_7}^2}{\eta_1 \cdot A_7^2(t)_{N_7}} - 1 \right) \cdot (A_{N_4}(t)_{N_4}) \cdot (A_{N_6}(t)_{N_6})}$$

Jednačina univerzalnog modela optimizacije nivoa mehaničkih oscilacija na izabranim mernim mestima sklopova hidroelektrane je oblika:

$$S_{\eta_1}(t) = \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7}^2)}{\eta_2 \cdot A_{N_4}(t)_{N_4} \cdot A_{N_6}(t)_{N_6}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_{N_7}^2}{\eta_1 \cdot A_7^2(t)_{N_7}} - 1 \right)}$$

gde je:

η_1, η_2 - korelacije zavisnosti,

$\omega_{N_4}, \omega_{N_6}, \omega_{N_7}$ - kružne frekvence oscilovanja na sastavnim komponentama (ležajevima) hidroelektrane. Njihove vrednosti su dobijene iz merenja,

$\omega_{N_4} = \frac{2\pi}{T}$ - kružna frekvencija.

Opšta jednačina univerzalnog modela optimizacije nivoa mehaničkih oscilacija na izabranim mernim mestima je oblika:

$$S_{\eta}(t) = \frac{\omega_{N_4} \cdot \omega_{N_6} (1 - \omega_{N_7})}{\eta_2 \cdot A_i^2(t)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_{N_7}^2}{\eta_1 \cdot A_i(t)} - 1 \right)}$$

Vrednosti amplituda eksperimentalnim merenjem pokazala su se jednaka i na donjem generatorskom vodećem ležaju (N_6) i na gornjem generatorskom vodećem ležaju (N_4):

$$A_{N_7}(t)_{N_7} = A_{N_6}(t)_{N_6} = A_{N_4}(t)_{N_4} = A_i(t)$$

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije nivoa mehaničkih oscilacija bez primene parametara na izabranim mernim mestima je oblika:

$$S_{\eta}(t) = \frac{\omega_i^2(t)(1 - \omega_i(t))}{\eta_2 \cdot A_i^2(t)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_i^2(t)}{\eta_1 \cdot A_i(t)} - 1 \right)}$$

Onda su im i kružne brzine oscilovanja iste:

$$\omega_{N_7} = \omega_{N_6} = \omega_{N_4} = \omega_i(t)$$

Na osnovu univerzalne jednačine dobiće se oblast zavisnosti primene postupaka tehničke dijagnostike i to uticajem mehaničkih oscilacija na sastavnim komponentama sklopova hidroelektrane.

Značajne vrednosti parametara za određivanje $S_{\eta}(t)$ bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, prikazane su u tabeli 6.1.

$\eta_1 = N_7(t) \cdot N_8(t) \cdot N_9(t)$		$\eta_2 = N_4(t) \cdot N_6(t)$		$A_i(t)[\mu m/s]$		$\omega_i(t)[rad/s]$		$S_\eta(t) \left[\frac{1}{s\mu m} \right]$	
				$A_{N_7}(t)_{N_7} = A_{N_6}(t)_{N_6} = A_{N_4}(t)_{N_4} = A_2$		$\omega_{N_7}(t) = \omega_{N_6}(t) = \omega_{N_4}(t) = \omega_2(t)$			
$\eta_{1\max}$	0,436	$\eta_{2\max}$	0,697	$A_i(t)_{\max}$	163,185	$\omega_i(t)_{\max}$	314	$S_\eta(t)_{\max}$	-1,2
$\eta_{1\min}$	0,422	$\eta_{2\min}$	0,6812	$A_i(t)_{\min}$	106	$\omega_i(t)_{\min}$	35	$S_\eta(t)_{\min}$	$-2,94 \cdot 10^{-3}$
η_{1opt}	0,4325	η_{2opt}	0,688	$A_i(t)_{opt}$	122,39	$\omega_i(t)_{opt}$	64,72	$S_\eta(t)_{opt}$	-0,331
η_{1sr}	0,4268	η_{2sr}	0,6828	$A_i(t)_{sr}$	121,092	$\omega_i(t)_{sr}$	63,62	$S_\eta(t)_{sr}$	-0,327
$N_7(t)_{\max}$	0,788	$N_4(t)_{\max}$	0,851						
$N_7(t)_{\min}$	0,782	$N_4(t)_{\min}$	0,841						
$N_7(t)_{opt}$	0,787	$N_4(t)_{opt}$	0,846						
$N_7(t)_{sr}$	0,784	$N_4(t)_{sr}$	0,842						
$N_8(t)_{\max}$	0,759	$N_6(t)_{\max}$	0,819						
$N_8(t)_{\min}$	0,750	$N_6(t)_{\min}$	0,810						
$N_8(t)_{opt}$	0,758	$N_6(t)_{opt}$	0,814						
$N_8(t)_{sr}$	0,752	$N_6(t)_{sr}$	0,811						
$N_9(t)_{\max}$	0,729								
$N_9(t)_{\min}$	0,721								
$N_9(t)_{opt}$	0,725								
$N_9(t)_{sr}$	0,724								

Tabela 6.1. Značajne vrednosti parametara za određivanje $S_\eta(t)$ bez primene parametara optimizacije i nivoa mehaničkih oscilacija HE "Vrla – 3" Surdulica

Napomena: Vrednosti parametara koji određuju analizirane pouzdanosti $P_{it}(t) = \varphi(z) = N_i(\max, \min, opt, sr)$ su uzete iz poglavlja 5.2., i priloga P.20 do P.24.

Napomena: Kružne frekvence oscilovanja se određuje prema izrazu:

$$\omega = 2\pi \cdot f \left[\frac{rad}{sec} \right]$$

$$\omega_i(t)_{\max} = 2\pi \cdot f_{\max} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cong 314 [rad/sec]$$

$$\omega_i(t)_{\min} = 2\pi \cdot f_{\min} = 2 \cdot \pi \cdot 0,4772 \cong 3 [rad/sec]$$

$$\omega_i(t)_{opt} = 2\pi \cdot f_{opt} = 2 \cdot \pi \cdot 10,3 \cong 64,72 [rad/sec]$$

$$\omega_i(t)_{sr} = 2\pi \cdot f_{sr} = 2 \cdot \pi \cdot 10,125 \cong 63,62 [rad/sec]$$

Ekstremne vrednosti parametara $\eta_i f(\eta_1, \eta_2)$:

$$\eta_{\max} = \eta_{2\max} = 0,697$$

$$\eta_{\min} = \eta_{2\min} = 0,422$$

$$\eta_{opt} = \frac{\eta_{1opt} + \eta_{2opt}}{2} = \frac{0,4325 + 0,688}{2} = 0,56$$

$$\eta_{sr} = \frac{\eta_{1sr} + \eta_{2sr}}{2} = \frac{0,4268 + 0,6828}{2} = 0,555$$

Vrednosti jednačina univerzalnog modela optimizacije parametara i nivoa mehaničkih oscilacija na izabranim mernim mestima komponenti sklopova hidroelektrane iznose:

$$S_{\eta}(t) = \frac{\omega_i^2(t) \cdot (1 - \omega_i(t))}{\eta_2 \cdot A_i^2(t)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_i^2(t)}{\eta_1 A_i(t)} \right)}$$

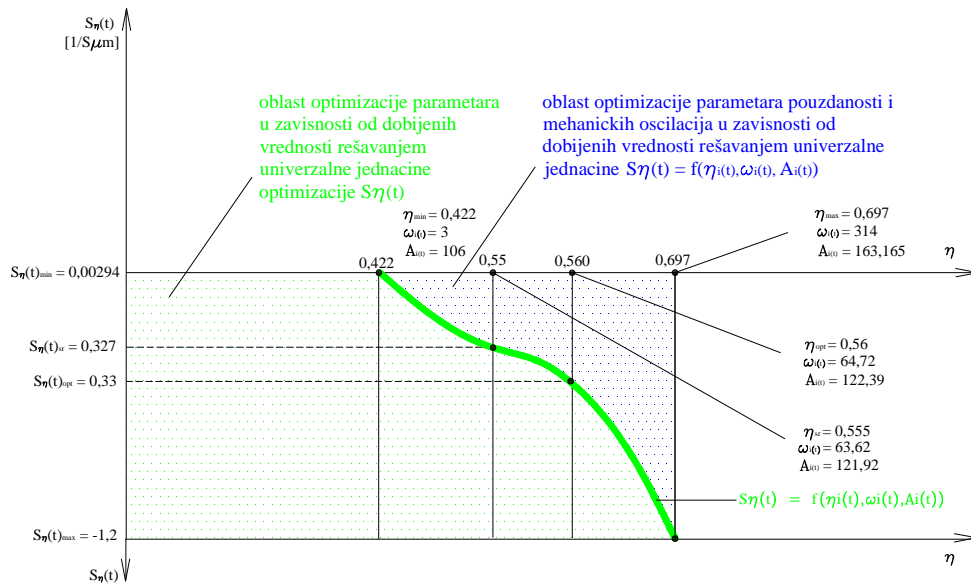
$$S_{\eta}(t)_{\max} = \frac{(314)^2 \cdot (1 - 314)}{0,697 \cdot (163,185)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(314)^2}{0,436 \cdot 163,185} - 1 \right)} = -1,20$$

$$S_{\eta}(t)_{\min} = \frac{(3)^2 \cdot (1 - 3)}{0,6812 \cdot (106)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(3)^2}{0,422 \cdot 106} - 1 \right)} = 2,94 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{\eta}(t)_{opt} = \frac{(64,72)^2 \cdot (1 - 64,72)}{0,688 \cdot (122,39)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(64,72)^2}{0,4321 \cdot 122,39} - 1 \right)} = -0,331$$

$$S_{\eta}(t)_{sr} = \frac{(63,62)^2 \cdot (1 - 63,62)}{0,6828 \cdot (121,092)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(63,62)^2}{0,4268 \cdot 121,092} - 1 \right)} = -0,327$$

Na osnovu prikazanih i sračunatih vrednosti u (tabeli 6.1.) možemo grafički dobiti zavisnost $S_{\eta}(t) = f(P_{ii}(t) = \varphi(z) = N_i(t)\omega_i(t)A_i(t))_{\max, \min, opt, sr}$ koja ujedno povezuje parametre optimizacije pouzdanosti ($P_{ii}(t) = \varphi(z) = N_i(t, \eta_i)$) i mehaničkih oscilacija ($\omega_i(t), A_i(t)$), prikazano na (slici 6.3.).



Slika 6.3. Dijagram optimizacije parametara u zavisnosti od dobijenih vrednosti rešavanjem univerzalne jednačine optimizacije

$$S_{\eta}(t) = f(P_{ii}(t) = \varphi(z) = N_i(t)\omega_i(t)A_i(t))_{\max, \min, opt, sr}$$

Vrednosti univerzalne jednačine sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i to uticajem mehaničkih oscilacija na sastavnim komponentama hidroelektrane.

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije nivoa mehaničkih oscilacija sa primenom parametara je oblika:

$$S_{\eta}(t)_p = \frac{\omega_i^2(t)_p (1 - \omega_i(t)_p)}{\eta_{2p} \cdot A_i^2(t)_p} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega_i^2(t)_p}{\eta_{1p} \cdot A_i(t)_p} - 1 \right)}$$

Iz eksploatacionih merenja nivoi amplituda mehaničkih oscilacija su isti i iznose za ležaj (N_7):

$$A_{N_7}(t)_{N_7 \max p} = 121,8 [\mu m/s] = A_{N_6}(t)_{N_6 \max p} = A_{N_4}(t)_{N_4 \max p}$$

$$A_{N_7}(t)_{N_7 \min p} = 98,4 [\mu m/s] = A_{N_6}(t)_{N_6 \min p} = A_{N_4}(t)_{N_4 \min p}$$

$$A_{N_7}(t)_{N_7 srp} = \frac{121,8 + 98,4}{2} = 110,1 [\mu m/s] = A_{N_6}(t)_{N_6 srp} = A_{N_4}(t)_{N_4 srp}$$

$$A_{N_7}(t)_{N_7 optp} \cong 0,95\% = A_{N_7}(t)_{N_7 \max p} = 0,7 \cdot 121,8 = 115,26 [\mu m/s] = A_{N_6}(t)_{N_6 optp} = A_{N_4}(t)_{N_4 optp}$$

Vrednosti frekvenci su takođe jednake za sva tri analizirana ležaja i iznose:

$$f_{i \max p} = 50 [Hz]$$

$$f_{i optp} = 8,25 [Hz]$$

$$f_{i srp} = 7,9 [Hz]$$

$$f_{i \min p} = 0,2 [Hz]$$

onda su im kružne frekvence iste i iznose:

$$\omega_{i \max p} = 2\pi \cdot f_{i \max p} = 314,2 [rad/s]$$

$$\omega_{i optp} = 51,83 [rad/s]$$

$$\omega_{i srp} = 49,64 [rad/s]$$

$$\omega_{i \min p} = 1,26 [rad/s]$$

Na osnovu određenih vrednosti pouzdanosti $N_7(t)_p, N_8(t)_p, N_9(t)_p, N_4(t)_p, N_6(t)_p$ mogu se odrediti vrednosti smene: $\eta_{1_p} = N_7(t)_p \cdot N_8(t)_p \cdot N_9(t)_p \cdot \eta_{2_p}$. Na osnovu svih određenih parametara dobijaju se ekstremne vrednosti univerzalne jednačine optimizacije sa primenom parametara mehaničkih oscilacija na izabranim mernim mestima sklopova hidroelektrane (tabela 6.2.).

Ekstremne vrednosti parametra η_p :

$$\eta_{i_p} = f(\eta_1, \eta_2)$$

$$\eta_{\max p} = \eta_{2_p \max} = 0,842$$

$$\eta_{\min p} = \eta_{1_p \min} = 0,559$$

$$\eta_{srp} = \frac{\eta_{1_psr} + \eta_{2_psr}}{2} = \frac{0,567 + 0,826}{2} = 0,6965$$

$$\eta_{optp} = \frac{\eta_{1_popt} + \eta_{2_popt}}{2} = \frac{0,5757 + 0,832}{2} = 0,7035$$

$\eta_{1p} = N_7(t)_p \cdot N_8(t)_p \cdot N_9(t)$		$\eta_{2p} = N_4(t)_p \cdot N_6(t)_p$		$A_i(t)_p [\mu m/s]$		$\omega_i(t) [rad/s]$		$S_\eta(t)_p \left[\frac{1}{s\mu m} \right]$	
				$A_{N_7}(t)_{N_7p} = A_{N_6}(t)_{N_6p} = A_{N_4}(t)_{N_4p}$		$\omega_{N_7}(t)_p = \omega_{N_6}(t)_p = \omega_{N_4}(t)_p = \omega_i(t)$			
$\eta_{1p \max}$	0,578	$\eta_{2p \max}$	0,842	$A_i(t)_{p \max}$	121,8	$\omega_i(t)_{p \max}$	314,2	$S_\eta(t)_{\max p}$	-1,768
$\eta_{1p \min}$	0,559	$\eta_{2p \min}$	0,823	$A_i(t)_{p \min}$	98,4	$\omega_i(t)_{p \min}$	1,267	$S_\eta(t)_{\min p}$	$-4,13 \cdot 10^{-5}$
$\eta_{1p \text{opt}}$	0,575	$\eta_{2p \text{opt}}$	0,832	$A_i(t)_{p \text{opt}}$	115,26	$\omega_i(t)_{p \text{opt}}$	51,83	$S_\eta(t)_{\text{opt} p}$	-0,312
$\eta_{1p \text{sr}}$	0,567	$\eta_{2p \text{sr}}$	0,826	$A_i(t)_{p \text{sr}}$	110,1	$\omega_i(t)_{p \text{sr}}$	49,64	$S_\eta(t)_{\text{sr} p}$	-0,311
$N_7(t)_{\max p}$	0,866	$N_4(t)_{\max p}$	0,936						
$N_7(t)_{\min p}$	0,858	$N_4(t)_{\min p}$	0,925						
$N_7(t)_{\text{opt} p}$	0,865	$N_4(t)_{\text{opt} p}$	0,937						
$N_7(t)_{\text{sr} p}$	0,862	$N_4(t)_{\text{sr} p}$	0,926						
$N_8(t)_{\max p}$	0,835	$N_6(t)_{\max p}$	0,906						
$N_8(t)_{\min p}$	0,825	$N_6(t)_{\min p}$	0,891						
$N_8(t)_{\text{opt} p}$	0,833	$N_6(t)_{\text{opt} p}$	0,895						
$N_8(t)_{\text{sr} p}$	0,827	$N_6(t)_{\text{sr} p}$	0,892						
$N_9(t)_{\max p}$	0,729								
$N_9(t)_{\min p}$	0,721								
$N_9(t)_{\text{opt} p}$	0,725								
$N_9(t)_{\text{sr} p}$	0,724								

Tabela 6.2. Značajne vrednosti parametara za određivanje $S_\eta(t)$ sa primenom parametara optimizacije i nivoa mehaničkih oscilacija HE "Vrla – 3" Surdulica

Vrednosti jednačina univerzalnog modela optimizacije sa primenom parametara mehaničkih oscilacija na izabranim mernim mestima komponenti sklopova hidroelektrane iznose:

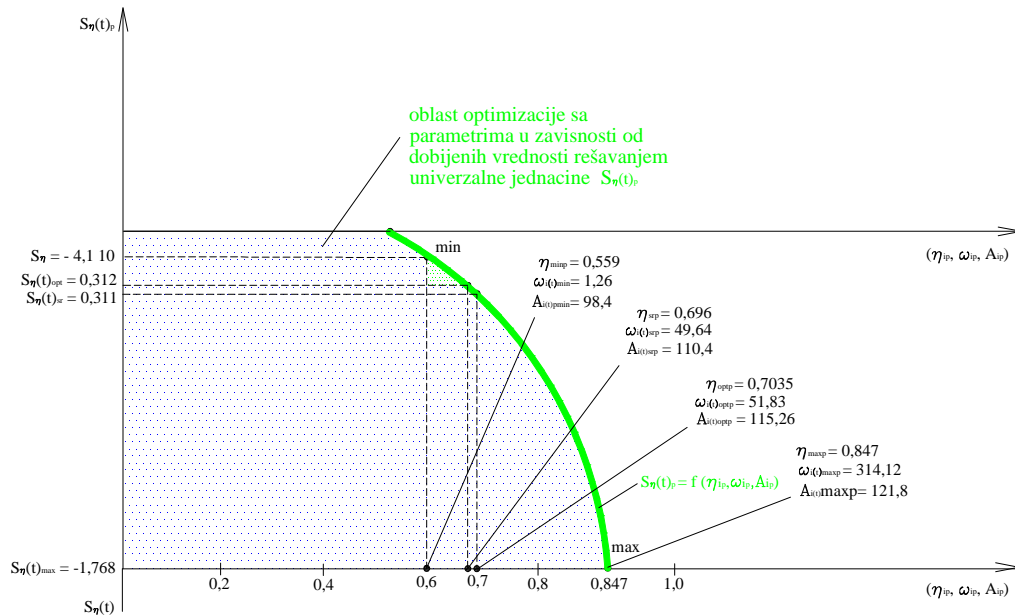
$$S_{\eta}(t)_{\max p} = \frac{(314)^2 \cdot (1 - 314,2)}{0,842 \cdot (121,8)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(314,2)^2}{0,5785 \cdot 121,8} - 1\right)} = -1,768$$

$$S_{\eta}(t)_{\min p} = \frac{(1,26)^2 \cdot (1 - 1,26)}{0,823 \cdot (98,4)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(1,26)^2}{0,559 \cdot 1,26} - 1\right)} = -4,13 \cdot 10^{-5}$$

$$S_{\eta}(t)_{\text{opt}p} = \frac{(51,8)^2 \cdot (1 - 51,8)}{0,832 \cdot (115,26)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(51,8)^2}{0,575 \cdot 115,26} - 1\right)} = -0,312$$

$$S_{\eta}(t)_{\text{srp}} = \frac{(49,64)^2 \cdot (1 - 49,64)}{0,826 \cdot (110,1)^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{(49,64)^2}{0,567 \cdot 110,1} - 1\right)} = -0,311$$

Na slici 6.4. je prikazan dijagram oblasti optimizacije sa primenom parametara pouzdanosti i mehaničkih oscilacija u zavisnosti $S_{\eta_i}(t) = (\eta_{ip}, \omega_{ip}, A_{ip})$.



Slika 6.4. Dijagram optimizacije sa primenom parametara pouzdanosti i mehaničkih oscilacija u zavisnosti $S_{\eta_i}(t) = (\eta_{ip}, \omega_{ip}, A_{ip})$

6.3. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA PRI MERENJU RADNIH TEMPERATURA LEŽAJEVA HIDROELEKTRANE

U okviru kompleksnog sistema praćena je temperatura na ležajevima u toku jednog dana. Ona je jedna od karakteristika kvaliteta, sa ciljem da se utvrdi stabilnost njene promene u toku vremena, a upotrebom modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike (poglavlje 5.3. i 6.3.). Merenje temperature na ležajevima je u [°C] realizovana je na svakih 40 min, tako da je veličina uzorka bila $n = 3$, tabela 6.3., HE "Vrla -3" Surdulica.

Na osnovu jednačine modela predstavljeni su parametri praćenja stanja promene temperature na odgovarajućem mernom mestu i to na turbinskom i generatorskom ležaju HE "Vrla -3" Surdulica u određenom vremenskom periodu.

R.B.	Izmerene vrednosti odstupanja temperature na ležajevima T_{mi} u (°C) i vremenu (t)											
	6 ⁴⁰	7 ²⁰	8 ⁰⁰	8 ⁴⁰	9 ²⁰	10 ⁰⁰	10 ⁴⁰	11 ²⁰	12 ⁰⁰	12 ⁴⁰	13 ²⁰	14 ⁰⁰
N ₄	68,8	69,4	69,8	70,0	68,2	69,3	70,5	69,2	68,8	68,6	69,7	69,7
N ₆	68,2	69,1	70,2	69,3	68,7	69,8	69,9	68,9	68,6	69,3	69,6	69,9
N ₇	69,7	69,0	70,7	69,2	69,4	70,2	69,6	69,6	68,4	70,1	70,4	70,8

Tabela 6.3. Tabelarni prikaz izmerenih vrednosti odstupanja temperature primenom parametara stanja komponenti na ležajevima T_{mi} u [°C] HE "Vrla -3" Surdulica u određenom vremenskom intervalu

Na osnovu eksploatacionih podataka i za utvrđene ekstremne vrednosti odstupanja temperature na ležaju, formiran je interval statističkog skupa $68[°C] < T_i \leq 71[°C]$ koji se, na osnovu ukupnog broja podataka ($n = 36$), deli na $k = 6$ grupnih intervala jednakih širina $\Delta T_i = 0,5$, što predstavlja optimalnu vrednost.

Za formiran interval statističkog skupa ($68[°C] < T_i \leq 71[°C]$) i usvojene vrednosti ($k = 6$ i $\Delta T_i = 0,5$) mogu se izračunati osnovni pokazatelji eksploatacione raspodele [1-6], čije su vrednosti prikazane u tabeli 6.4., HE "Vrla -3" Surdulica.

R.b	Grupni intervali	T_i	$f_e(t)$	Δn_e	$F_e(t)$
1.	68,0 – 68,5	68,25	0,0833	3	0,0833
2.	68,5 – 69,0	68,75	0,1944	10	0,2778
3.	69,0 – 69,5	69,25	0,2778	20	0,5556
4.	69,5 – 70,0	69,75	0,2500	29	0,8056
5.	70,0 – 70,5	70,25	0,1389	34	0,9444
6.	70,5 – 71,0	70,75	0,0556	36	1,0000

Tabela 6.4. Tabelarni prikaz osnovnih parametara pokazatelja raspodele na određenim temperaturama ležajeva HE "Vrla -3" Surdulica

Numeričke statističke karakteristike eksploatacionih podataka (detaljnije u poglavlju 6.3.) su:

- Aritmetička sredina uzorka merenja temperature u toku rada [96]:

$$T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n T_{mi}$$

- Standardna devijacija uzorka pri merenju temperature [141], [96]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^k \Delta n_i \cdot (T_{mi} - T)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k f(t) \cdot (T_{mi} - \bar{T})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k f(t) \cdot T_{mi}^2 - T^2}$$

Funkcija raspodele odstupanja u zavisnosti od pouzdanosti rada sastavnih komponenti i radne temperature [11]:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(T-T_{mi})^2}{2\sigma^2}}$$

Za simetričan raspored eksploatacionih podataka pouzdanosti sastavnih komponenti hidroelektrane na osnovu odstupanja radnih temperatura koristićemo normalan (Gaus-ov) zakon raspodele čija funkcija raspodele ima oblik [11]:

$$F(t) = 0,5 + \phi \left(\frac{T - T_{mi}}{\sigma} \right)$$

gde je:

- σ - standardna devijacija,
- ϕ - koeficijent promene pouzdanosti u zavisnosti od temperature.

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije praćenja promene temperature pri merenju ležajeva u toku rada je oblika [96]:

$$T_{mi} = T_i + \frac{T - T_i}{F(t)(T_{j+1})} \cdot \left(\frac{1}{2} - \sum_{i=1}^j F(t)(T_i) \right)$$

Na osnovu izračunavanja parametara $V_a, \beta_a, \beta_a, \eta_a$ vrši se upoređivanje i praćenje odstupanja temperature na ležaju, sa ciljem da se utvrdi stabilnost i kvalitet u toku rada, (tabela 6.5. i 6.6., prikazano u prilogu rada P 9. – P 12.) [141], [96] koji obuhvata:

- aritmetička sredina uzorka merenja temperature i devijacija u toku rada je [96]:

$$T = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=3}^1 69,150 = 69,416, \quad \sigma = 0,6562$$

- parametar varijacije [96]:

[11]. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2001.

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

[141]. Tumohov, A.B., Математические модели экономические воспроизводство, МGV, Москва, 1992.

$$V_a = \frac{\sigma}{T} \cdot 100 = 0,9453$$

- parametar asimetrije stanja komponenti [96]:

$$\beta_{a_1} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{mi})^3}{\sigma^3} = 0,1065$$

- parametar uporednosti stanja komponenti [96]:

$$\beta_{a_2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^4}{\sigma^4} = 2,3663$$

- parametar razlike praćenja pri merenju [96]:

$$\eta_a = \beta_{a_2} - 3 = -0,6337$$

Pošto je $T = 69,4167^\circ\text{C}$ to je eksploataciona raspodela približno simetrična, ako je $\beta_a = 0,1065$ to je eksploataciona raspodela pozitivna, odnosno asimetrična, ako je $\beta_a = 2,3663$ ($\eta_{a_2} = -0,6337$) predstavlja normalnu raspodelu.

Provera saglasnosti eksploatacionih podataka sa teorijskim (u ovom slučaju Gaus-ovim) modelom raspodele vrši se realizacija pomoću određene teorijske prave. U normalnom (Gaus-ovom) listu verovatnoće nanose se tačke funkcije raspodele $F(t)$ i temperature T , tabela 6.5.

R.b	T_i	$x_i=T_i$	$F_i(t)$	$y_i = \frac{T_i - T_{mi}}{\sigma}$
1.	68,25	68,25	0,0833	-1,3800
2.	68,75	68,75	0,2778	-0,5900
3.	69,25	69,25	0,5556	0,1400
4.	69,75	69,75	0,8056	0,8600
5.	70,25	70,25	0,9444	1,5900
6.	70,75	-	1,0000	-

Tabela 6.5. Tabelarni prikaz linearizacije funkcije Gaus-ove raspodele $F(t)$ odstupanja temperature na ležaju

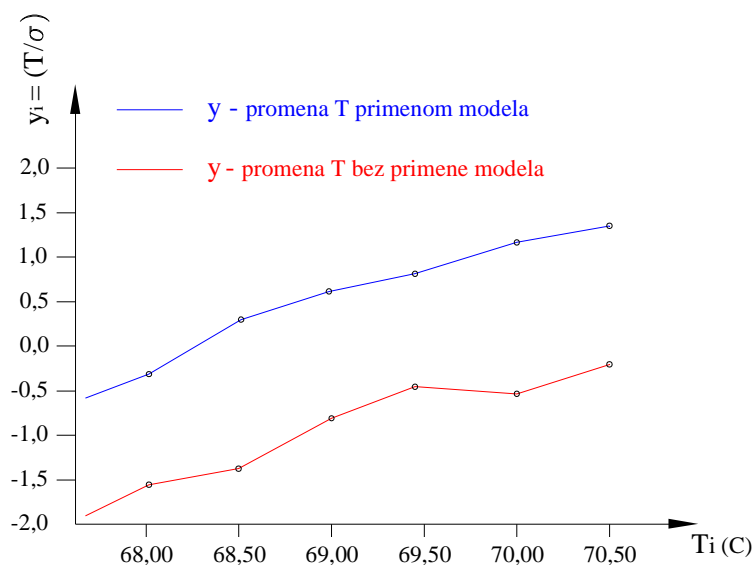
Na osnovu metode najmanjih kvadrata za funkciju raspodele $F_i(t)$ i na osnovu vrednosti iz tabele 6.5. određena je teorijska prava u listi verovatnoće Gaus-ove raspodele [141], [96]:

$$y = a + b \cdot x = -105,7911 + 1,5240 \cdot x$$

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

[141]. Тумохов, А.В., Математические модели экономические воспроизводство, МГВ, Москва, 1992.

Upotrebljivi koeficijent korelacije $r = 0,9316$ je isti i nanosi se uporedo sa nanetim eksploatacionim tačkama u verovatnosnom papiru Gaus-ove raspodele prikazane na slici 6.5. Pošto su eksploatacione tačke u neposrednoj okolini prave, može se zaključiti, da normalna raspodela dobro reprezentuje eksploatacione podatke pri kontroli odstupanja temperature na ležaju i predstavlja optimalnu vrednost tehničke dijagnostike zadatog ležaja.



Slika 6.5. Položaj teorijske prave i eksperimentalnih tačaka uzorka pri kontroli odstupanja temperature na ležajevima HE "Vrla -3" Surdulica

Kada su poznate vrednosti parametara Gaus-ove raspodele ($\mu = T = 69,4167$, $\sigma = 0,6562$ i $\Phi = 0,4173$), lako se mogu formirati funkcije Gaus-ove raspodele, i to u obliku [96]:

- funkcija raspodele (kumulativna verovatnoća) [96]:

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{T_i - 69,4167}{0,6562}\right) = 1,3462$$

- zakon raspodele (relativna verovatnoća) ili funkcija gustine raspodele [96]:

$$f(t) = 1,64485 \cdot e^{-\frac{(T_i - 69,4167)^2}{0,8612}} = 1,2129$$

Pri tome su, vrednosti teorijskih pokazatelja pouzdanosti ležaja prikazane u tabeli 6.4. dok je grafički prikaz teorijskih pokazatelja pouzdanosti, uporedo sa eksploatacionim, (prikaz na slici 6.6.-a). Iz Gaus-ove raspodele (slika 6.6.-b) moguće je odrediti, za određenu verovatnoću, temperaturu u ležaju. Tako je, npr., za verovatnoću 50 % temperatura ležaja $T_{50\%} = 69,4167$ [°C], za verovatnoću 80 %, $T_{80\%} = 68,8642$ [°C] ili za verovatnoću 90 %, $T_{90\%} = 68,5757$ [°C].

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

R.B.	Grupni intervali	T_i	n	f(t)	n_r	F(t)
1.	68,0 – 68,5	68,25	2,2527	0,0626	0,3500	0,0375
2.	68,5 – 69,0	68,75	6,5315	0,1814	0,5404	0,1539
3.	69,0 – 69,5	69,25	10,5964	0,2943	0,4468	0,4013
4.	69,5 – 70,0	69,75	9,6190	0,2672	0,0200	0,6950
5.	70,0 – 70,5	70,25	4,8858	0,1357	0,3280	0,8980
6.	70,5 – 71,0	70,75	1,3886	0,0386	0,2548	0,9793

Tabela 6.6. Tabelarni prikaz osnovnih parametara teorijskih Gaus-ovih pokazatelja raspodele odstupanja temperature na ležajevima HE "Vrla –3" Surdulica

Hipoteza o Gaus-ovoj raspodeli odstupanja temperature na ležaju prihvata se, za nivo značajnosti $\alpha = 5\%$, na osnovu sledećih neparametarskih testova tabela 6.5., kao i vrednosti optimizacije koja će predstaviti realno stanje [96] (detaljnije u poglavlju 6.3.).

Ocena sposobnosti procesa provere parametara tehničke dijagnostike pri merenju temperature vrši se na osnovu [23, 29]:

- Relativne širine procesa rada komponenti [23]:

$$f_a = \frac{6 \cdot \sigma}{T} \cdot 100 = \frac{6 \cdot 0,6562}{63} \cdot 100 = 6,1924$$

- Indeksa preciznosti pri radu komponenti [23]:

$$\lambda_a = \frac{T}{T_i \cdot \sigma} = \frac{63}{68,25 \cdot 0,6562} = 1,4620$$

- Indeksa tačnosti rada komponenti [29]:

$$R_a(t) = \frac{T_i - T}{T_i \cdot \sigma} = \frac{68,25 - 63}{68,25 \cdot 0,6562} = 0,1196$$

Relativna širina rasipanja procesa je $f_a(t) = 103,245 > 75$ što iznosi više nego 75 % od tolerancije. Pošto je indeks preciznosti: $\lambda_a(t) = 0,762 < 1$ to je sistem ili proces precizan ili pošto je indeks tačnosti $R_a(t) = 0,115 < 1$ to je sistem ili proces tačan. Na osnovu vrednosti $f_a(t)$, λ_a i $R_a(t)$ može se zaključiti da kompleksni sistem ili proces je sposoban da ostvari propisanu, traženu (propisani nivo klaviteta) karakteristiku kvaliteta, prilog P.9. - P12. Takođe, utiče na određivanje optimalnog rešenja postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

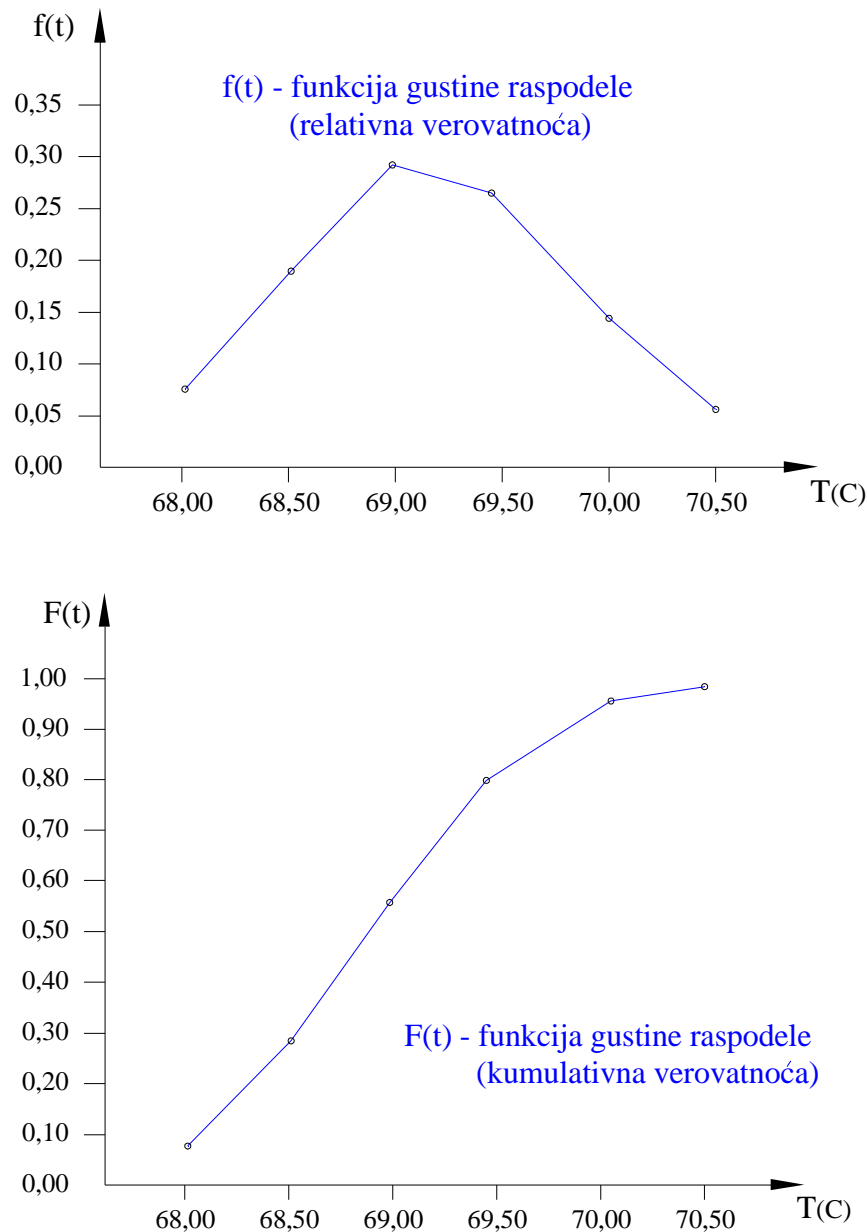
[23]. Bednjak, M.H., Modeli v procesi radni ležanje v tehniki sistemi, MG V, Kiev, 1993.

[29]. Brankovski, M., Issledovanie i ustanenie vibracii turbogeneratorov, Energie, Moskva, 1997.

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

Na osnovu eksploatacionih podataka i parametara μ i σ , Gaus-ove raspodele moguće je konstruisati histogram i poligon eksploatacione raspodele (slika 6.6.-a) i kumulativna raspodela (slika 6.6-b) sa prilagođenim teorijskim krivama Gaus-ove raspodele.

Primena novog modela predstavlja poređenje eksploatacionih i teorijskih vrednosti, pri čemu se zapaža razlika između novopostavljenog modela i postojećih modela koji služe istoj nameni.



Slika 6.6. a-b. Dijagram promene parametara stanja komponenti pri
a) eksploatacionoj funkciji raspodele i b) kumulativnoj funkciji
raspodele odstupanja temperature ležajeva HE "Vrla -3" Surdulica

Pouzdanost rada sastavnih komponenti u zavisnosti od promena temperatura se izračunava [96]:

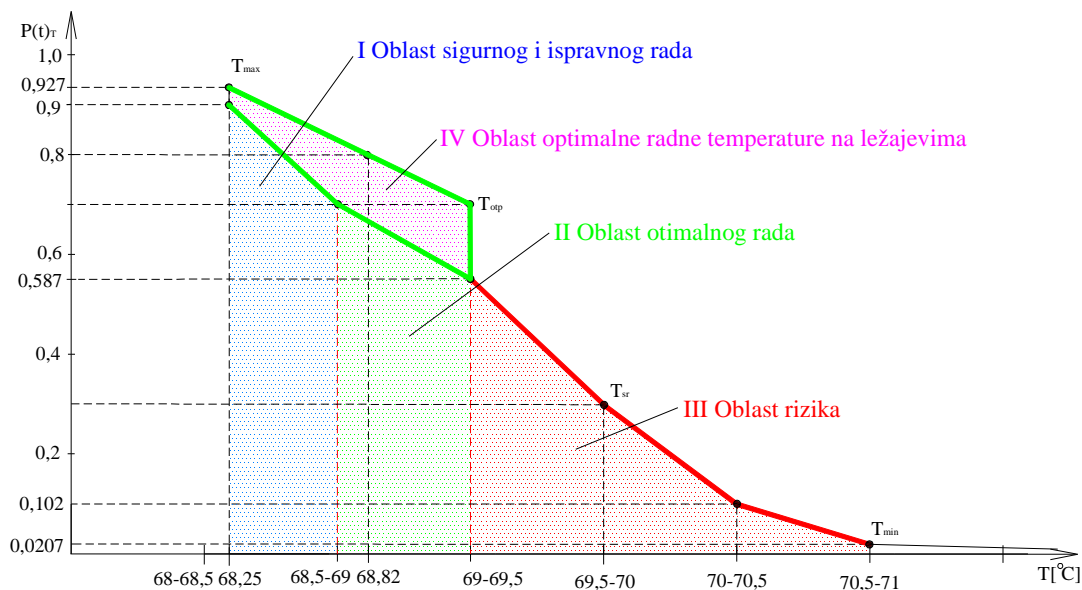
$$P(t)_T = 1 - F_t(x)$$

za grupne intervale je prikazana u tabeli 6.7.

R.B.	GRUPNI INTERVALI [°C]	POUZDANOST $P(t)_T$	KVALITET
1.	68,0 – 68,5	0,962	Siguran i ispravan rad
2.	68,5 – 69,0	0,846	
3.	69,0 – 69,5	0,598	Oblast optimalnog rada
4.	69,5 – 70,0	0,305	Oblast rizika
5.	70,0 – 70,5	0,102	
6.	70,5 – 71,0	0,020	

Tabela 6.7. Pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla –3" Surdulica u zavisnosti od temperature

Na osnovu prikazane tabele grafički se može odrediti oblast radnih temperatura bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, prikazano na slici 6.7.



Slika 6.7. Dijagram zavisnosti temperaturnih intervala u funkciji pouzdanosti (oblast optimalne radne temperature na ležajevima) bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike HE "Vrla –3" Surdulica

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

6.3.1. OPTIMIZACIJA POUZDANOSTI RADA SASTAVNIH KOMPONENTI HIDROELEKTRANE U ZAVISNOSTI OD PROMENE RADNIH TEMPERATURA – ODREĐIVANJE OPTIMALNE RADNE TEMPERATURE NA LEŽAJEVIMA (N_4, N_6, N_7)

Za izračunate numeričke statističke vrednosti karakteristika pouzdanosti rada sastavnih komponenti hidroelektrane u zavisnosti od promena vrednosti radnih temperatura usvajaju se parametri normalne (Gaus-ove) raspodele: $\mu = T = T_{optima\ln o} = 69,4167$, $\sigma = 0,6562$ i $\phi = 0,4173$ na osnovu kojih se dobija opšti izraz raspodele odstupanja:

$$P(t)_T = \frac{1}{0,6562\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(69,4167-T_{mi})^2}{1,3124}}$$

$$P(=t)_T = 0,60795 \cdot e^{-\frac{(69,4167-T_{mi})^2}{1,3124}} = 0,708$$

Poslednji izraz predstavlja zavisnost pouzdanosti rada sastavnih komponenti hidroelektrane sa promenom radnih temperatura. U izrazu T_{mi} su vrednosti pouzdanosti u opsegu od $T_{opt} = 69^\circ C$ do $T_{krit} > 73^\circ C$ onda je $T_{mi} = 68^\circ C \div 71^\circ C$ sa devijacijom od $0,2^\circ C$.

Matematičkim skraćivanjem može se dobiti izraz zavisnosti radne temperature sastavnih komponenti hidroelektrane od njihove vrednosti pouzdanosti u intervalu $P_{max} = 1,0 \div P_{min} = 0,5$.

Radna temperatura analiziranih ležajeva se dobija [96]:

$$-\ln \frac{P(t)_T}{0,60795} = \frac{(69,4167 - T_{mi})^2}{1,3124}$$

$$\sqrt{-1,3124 \ln \frac{P(t)_T}{0,60795}} = 69,4167 - T_{mi}$$

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke diajnostike kod provere temperature pri merenju ležajeva je oblika:

$$T_{mi} = 69,4167 - \sqrt{1,3124 \ln \frac{P(t)_T}{0,60795}}$$

$P(t)_{T_{max}} = 1,0$ (maksimalna pouzdanost rada sastavnih komponenti u zavisnosti od najbolje radne temperature).

[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

Na osnovu grupnih intervala mogu se zaključiti ekstremne vrednosti radne temperature ležajeva što ukazuje da iz ove analize treba analizirati pouzdanost [96]:

$$T_{mi\min} = 68,6^{\circ}C$$

$$P(t)_T = 0,9 \Rightarrow T_{mi} = 68,7^{\circ}C$$

$$P(t)_T = 0,8 \Rightarrow T_{mi} = 68,82^{\circ}C$$

$$P(t)_T = 0,7 \Rightarrow T_{mi} = 69^{\circ}C$$

$P(t)_T = 0,6 \Rightarrow$ dobija se negativna vrednost podkorene veličine što ukazuje da iz ove analize treba analizirati pouzdanost do minimalne vrednosti od $P(t)_{T\min} = 0,7$.

Sprovedenom analizom se zaključuje da je optimalna temperatura rada analiziranih ležajeva $T_{mi,opt} = 69^{\circ}C$.

Na osnovu T 6.7. i to na osnovu grupnih intervala mogu se zaključiti ekstremne vrednosti radne temperature ležajeva bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i to[96]:

$$T_{mi\min} = 68,25^{\circ}C$$

$$T_{mi,opt} = 69^{\circ}C$$

$$T_{misr} = 68,25^{\circ}C = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^n T_{mi} = \frac{(68,25 + 68,75 + 69,25 + 69,75 + 70,25 + 70,75)}{6}$$

$$T_{misr} = 69,5^{\circ}C$$

$$T_{mi\max} = 71^{\circ}C$$

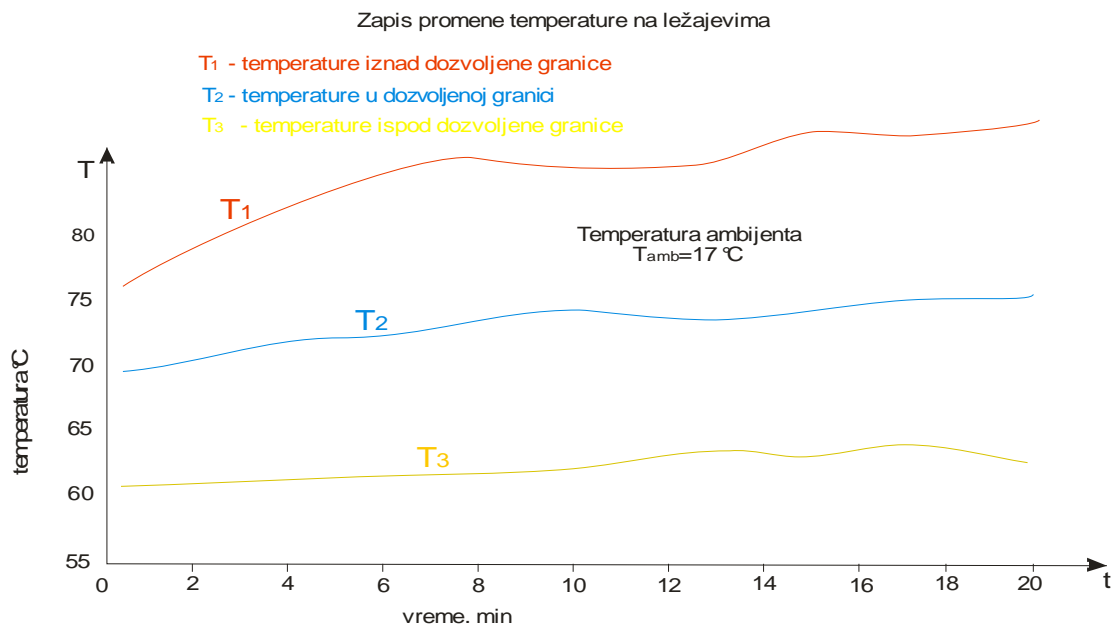
[96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.

6.3.2. ODREĐIVANJE EKSTREMNE VREDNOSTI PARAMETARA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE PRI MERENJU RADNIH TEMPERATURA

Na slici 6.8. prikazan je dijagram promene izabranih dijagnostičkih parametara za vreme rada ležajeva hidroelektrane u trajanju od 60 minuta (tabela 6.8.). Takođe, dijagram prikazuje promene temperature na ležajevima. Temperatura okoline je $T_{amb} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Može se zaključiti da je najveći porast temperature ($\Delta T_1 \approx 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$) na ležaju koji se nalazi na generatoru (označena sa $T_1 - N_4$). Ovo se objašnjava činjenicom da se vratilo obrće najvećom ugaonom brzinom (600 min^{-1}), kao i relativno niskim protokom ulja koje podmazuje ovaj ležaj ($V \approx 0,9 \text{ l/min}$). Porast temperature na drugom ležaju (označeno sa $T_2 - N_6$), za vreme trajanja rada hidroelektrane iznosi $\Delta T_2 \approx 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je priraštaj temperature na trećem ležaju (označeno sa $T_3 - N_7$), praktično zanemariv.

R.B.	Izmerene vrednosti odstupanja temperature ležaja									
	6 ⁰⁰	7 ⁰⁰	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	10 ⁰⁰	11 ⁰⁰	12 ⁰⁰	13 ⁰⁰	14 ⁰⁰	15 ⁰⁰
N ₄	71,2	72,9	74,4	75,9	76,1	77,7	78,8	78,9	79,2	79,7
N ₆	67,9	67,8	67,8	67,9	67,8	67,8	67,8	67,9	67,9	68,2
N ₇	61,1	61,5	61,7	62,6	63,3	63,9	64,2	64,8	64,9	64,5

Tabela 6.8. Tabela prikaz izmerenih vrednosti odstupanja temperature ležajeva u T [$^{\circ}\text{C}$] HE "Vrla -3" Surdulica sa primenom parametara optimizacije tehničke dijagnostike u toku dana

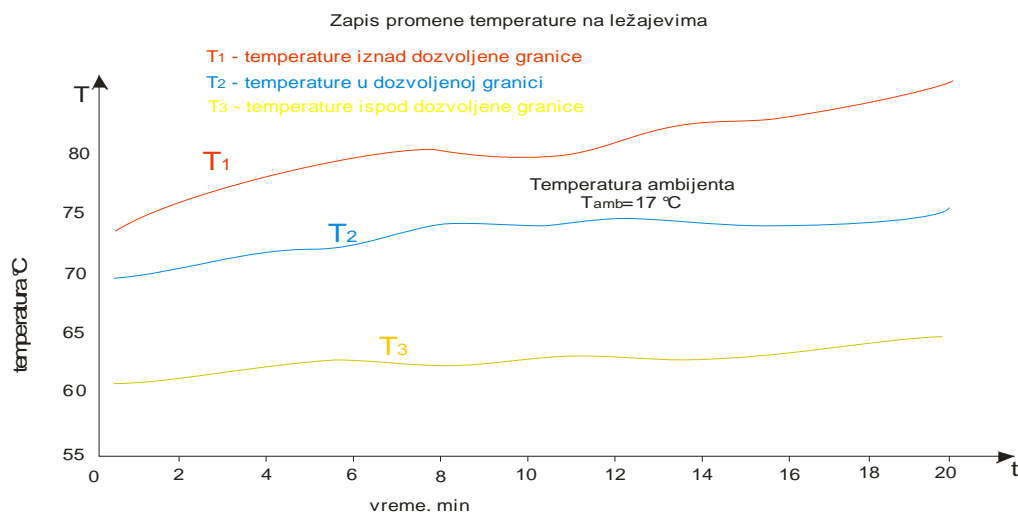


Slika 6.8. Dijagram promena temperature ležaja u trajanju od 60 min sa parametrima stanja komponenti sklopova HE "Vrla -3" Surdulica na mernom mestu 1

Dijagram na slici 6.9., pokazuje da je promena merenog dijagnostičkog parametra temperature ležajeva za vreme trajanja rada hidroelektrane mala (tabela 6.9.), a time je predstavljena optimalna vrednost u zavisnosti od propisanih.

R.B.	Izmerene vrednosti odstupanja temperature ležaja									
	6 ⁰⁰	7 ⁰⁰	8 ⁰⁰	9 ⁰⁰	10 ⁰⁰	11 ⁰⁰	12 ⁰⁰	13 ⁰⁰	14 ⁰⁰	15 ⁰⁰
N ₄	72,7	73,1	73,3	75,8	74,2	75,7	76,8	77,1	78,1	79,7
N ₆	67,9	67,8	68,2	68,4	68,7	68,9	68,9	68,1	68,5	68,9
N ₇	61,6	62,8	63,4	64,7	63,3	64,9	65,1	65,6	65,8	66,1

Tabela 6.9. Tabela prikaz izmerenih vrednosti odstupanja temperature ležajeva u T [°C] HE "Vrla –3" Surdulica sa primenom parametara tehničke dijagnostike u toku dana



Slika 6.9. Dijagram promena temperature ležaja u trajanju od 60 min sa parametrima stanja komponenata sklopova HE "Vrla –3" Surdulica na mernom mestu 2

Iz analize otkaza primećeno je da se promenom temperature ležajeva veliki broj otkaza mogao sprečiti, kad bi se komponente sklopova hidroelektrane održavale onako kako to proizvođač propisuje. Na taj način bi većina otkaza, koja je nastala za vreme neizvedenih propisanih aktivnosti, bila sprečena. Neispravnost određenih komponenti hidroelektrane utiče na funkcionisanje ostalih komponenti, a samim tim i na kvalitet, a može da izazove velike zastoje pa čak i određene lomove.

Na osnovu izvršenih merenja i primene raspodele verovatnoće promenom radnih temperatura utvrđena je optimalna primena dijagnostičkih parametara radnih temperatura na postizanju maksimalne efektivnosti komponenti sklopova hidroelektrane.

Zabeležene vrednosti promena radnih temperatura optimizacije sa primenom optimizacije postupaka tehničke dijagnostike (prikaz u tabelama 6.10., 6.11. i 6.12.) određuju ekstremne vrednosti po mernim mestima I, II i III, (prikaz na slici 6.10), (detaljnije u poglavlju 3.2.).

Raspored mernih mesta:

- I – prvo zabeleženo merenje (tabela 6.10.),
 II – drugo zabeleženo merenje (tabela 6.11.),
 III – treće zabeleženo merenje (tabela 6.12.).

R.B.	$T_{mi\ min}^* [^{\circ}C]$			$T_{mi\ opt}^* [^{\circ}C]$			$T_{mi\ sr}^* [^{\circ}C]$			$T_{mi\ max}^* [^{\circ}C]$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
N ₄	68,2	61,2	62,7	69,33	66,48	65,45	69,35	65,45	65,7	70,5	69,7	68,7
N ₆	68,2	57,8	57,8	69,3	57,88	58,43	69,2	58	58,35	70,2	58,2	58,9
N ₇	68,4	61,7	60,7	69,55	64,83	63,63	69,76	64,45	64,3	70,7	67,2	67,9

Tabela 6.10. Prikaz temperature po mernim mestima na ležajevima N₄, N₆ i N₇
 HE "Vrla -3" Surdulica

Izračunata optimalna temperatura za ležaju N₄:

$$T_{mi\ opt\ N_4}^* = \frac{70,3 + 69,6 + 69,3 + 70,2 + 68,8 + 69,7 + 70,8 + 69,5 + 69,3 + 70,1 + 69,9 + 70,2}{12}$$

$$T_{mi\ opt\ N_4}^* = 69,8[^{\circ}C]$$

$$T_{mi\ sr\ N_4}^* = \frac{T_{mi\ min}^* + T_{mi\ max}^*}{2} = \frac{68,8 + 70,8}{2} = 69,8[^{\circ}C]$$

Za određivanje I i III zabeleženog merenja procedura je ista kao i kod I za sve analizirane ležajeve (N₄, N₆, N₇).

Na osnovu prikazane tabele 6.11. grupni intervali se kreću:

R.B	Oznaka ležaja	Grupni interval [°C]	Usvojeni grupni intervali [°C]	Merodavni usvojeni grupni intervali celih vrednosti	T_{mi}	Δn_i	$F_i(t) = \varphi_i(t)$
1.	N ₄	61,2 ÷ 70,5	60,7 ÷ 61,2	61 ÷ 62	61,5	7	0,367
2.	N ₆	57,8 ÷ 70,2	61,2 ÷ 68,2	62 ÷ 68	65	10	0,524
3.	N ₇	60,7 ÷ 70,7	68,2 ÷ 70,2	68 ÷ 70	69	9	0,683
			70,2 ÷ (70,5 - 70,7)	70 ÷ 71	70,5	5	0,841
			(70,5 - 70,7) ÷ 79,3	71 ÷ 80	75,5	2	1,000

Tabela 6.11. Prikaz grupnih intervala za postojeće ležajeve N₄, N₆, N₇
 HE "Vrla -3" Surdulica

Δn_i - idealni broj otkaza.

- Aritmetička sredina uzorka merenja temperature u toku rada:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{mi} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (59,5 + 61,5 + 65 + 69 + 70,5 + 75,5) = 66,83 [^{\circ}\text{C}]$$

- Praćenje promena pri merenju temperatura ležajeva u toku rada:

$$T_{mi} = T_i + \frac{T - T_i}{F_i(t)(T_{i+1})} \left[\frac{1}{2} - \sum_{i=1}^{\gamma} F_i(t)(T_i) \right] = 66,24 [^{\circ}\text{C}]$$

- Standardna devijacija uzoraka pri merenju temperature:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta n_i (T_{mi} - T)^2} = 0,06$$

- Na osnovu standardne devijacije $\sigma = 0,06$; $z = 1,3$; $F(z) = 0,1582$ vrednost pouzdanosti je sledeća $P_i(t) = 1 - \varphi_i(t)$, (tabela 6.12).

R.B.	$\varphi_i(t)$	$P_i(t)$	$T_{mi} [^{\circ}\text{C}]$	$\sigma = 0,06; z = 1,2; F(t) = \varphi(z) = 0,1804$
1.	0,0980	0,902	59,5	Siguran i ispravan rad
2.	0,2780	0,722	61,5	
3.	0,4590	0,541	65	Oblast optimalnog rada
4.	0,6392	0,361	69,5	Oblast rizika
5.	0,8196	0,180	70,5	
6.	1,000	0,000	75,5	

Tabela 6.12. Tabelarni prikaz vrednosti pouzdanosti u oblasti radne temperature sa primenom optimizacije postupaka tehničke dijagnostike HE "Vrla -3" Surdulica

Temperature prikazane u intervalima u funkciji pouzdanosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane:

$$T_{mi \min p} = 58^{\circ}\text{C}$$

$$T_{mi \max p} = 80^{\circ}\text{C}$$

$$T_{misredp} = \frac{58 + 80}{2} = \frac{138}{2} = 69^{\circ}\text{C}$$

$$T_{mioptp} = \frac{61,5 + 65}{2} = 63,25^{\circ}\text{C}$$

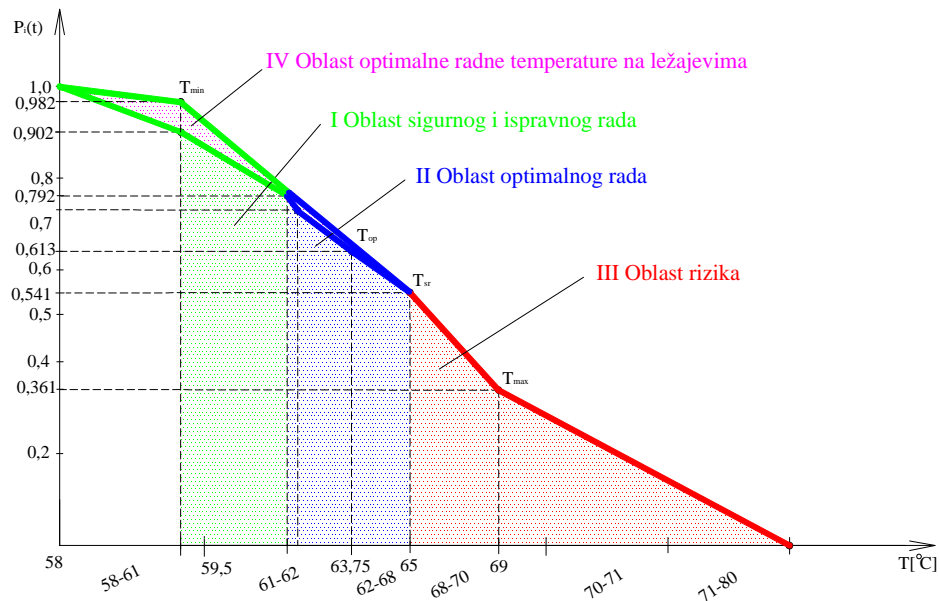
Vrednosti pouzdanosti u zavisnosti od temperature su:

$$T_{\min p} = 58^{\circ}\text{C} \quad P_i(t) = 1,0$$

$$T_{\max p} = 80^{\circ}\text{C} \quad P_i(t) = 0$$

$$T_{stp} = 58^{\circ}\text{C} \quad P_i(t) = 0,361$$

$$T_{optp} = 63,25^{\circ}\text{C} \quad P_i(t) = \frac{0,722 + 0,541}{2} = 0,6315$$



Slika 6.10. Dijagram pouzdanosti temperaturnih intervala [$^{\circ}\text{C}$] u funkciji pouzdanosti (oblast optimalne radne temperature na ležajevima) sa primenom parametara optimizacije tehničke dijagnostike HE "Vrla -3" Surdulica

Na slici 6.10. prikazan je dijagram pouzdanosti temperaturnih intervala u funkciji pouzdanosti (oblast optimalne radne temperature ležajeva) sa izmenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike HE "Vrla - 3" Surdulica.

6.4. ODREĐIVANJE OPTIMALNE VREDNOSTI ZAZORA PRI PRAĆENJU POHABANOSTI LEŽAJEVA (N_4, N_6, N_7)

Uslovi pri određivanju pohabanosti ležaja i korišćenje komponenti sklopova hidroelektrane predstavljaju široki spektar uticajnih poremećaja koji utiču na njihovo stanje i pokazatelje pouzdanosti. Uzajamna veza promene parametara stanja pouzdanosti predstavlja osnovu za razvoj novog modela, tako da se omogući obezbeđenje zahtevanog nivoa pouzdanosti ležajeva na osnovu praćenja provere stanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Strukturni parametri ukazuju na međusobnu uslovljenost izlaznih karakteristika stanja komponenti, bilo da se radi o performansama ili pokazateljima pratećih procesa rada sklopova. Iz toga se može izvesti zaključak da karakteristike izlaznih procesa mogu se primeniti kao dijagnostički parametri, odnosno veličine pomoću kojih se daje ocena stanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Pošto je intenzitet promene stanja pohabanosti ležaja uslovljen uticajima brojnih faktora (npr. uslovi korišćenja, kvalitet održavanja, kvalitet materijala itd.), u slučaju da su ove promene kontinuirane u funkciji pouzdanosti od vremena neće doći do pojave otkaza. A sama promena parametara stanja pohabanosti ležaja se može razmatrati kao slučajna funkcija pouzdanosti, čije se realizacije vrše za više istovremenih komponenti sklopova.

Stanje radne sposobnosti ležaja određuje se analizom zadatih parametara, tj. proverom da li se nalaze u dozvoljenim granicama. Narušenost stanja radne sposobnosti ležaja nastaje pri ispunjavanju ili neispunjavanju bar jednog od zadatih parametara.

U okviru kompleksnog sistema praćenja pohabanost ležaja je u toku svog radnog veka jedna od kritičnih komponenti hidroelektrane, sa ciljem da se utvrdi njegova pouzdanost (detaljnije u poglavlju 5). Otkazi ležaja u toku njegovog životnog veka mereni u 10^3 [h], čija je veličina uzorka bila $n = 3$, prikazani su u tabeli 6.13. [23].

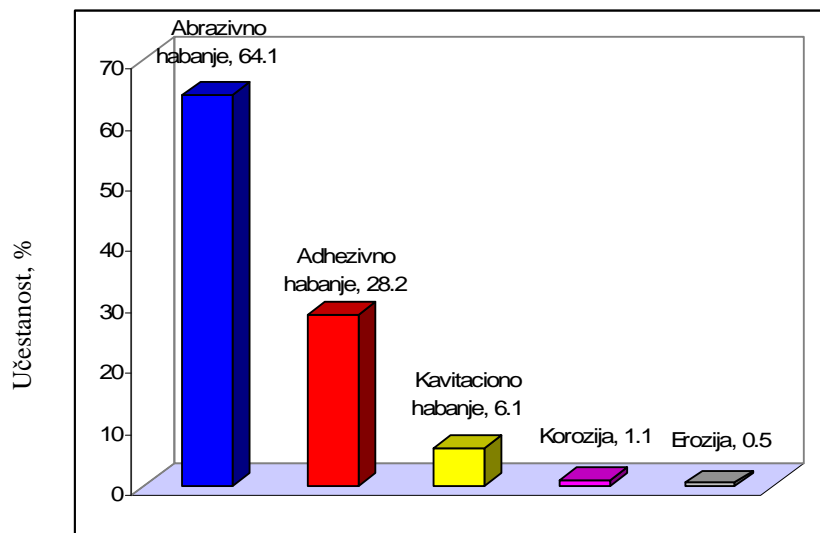
Otkazi i oštećenja ležajeva izazvani navedenim grupama uzročnika manifestuju se najčešće kao habanje, lom i plastična deformacija materijala, predstavljaju optimum vrednosti u zavisnosti od propisanih. To su istovremeno i osnovni vidovi otkaza, koji se mogu podeliti, u odnosu na svojstvo materijala, u dve kategorije. Jedna je povezana i zavisna prevashodno od čvrstoće materijala, a druga je funkcija triboloških procesa na spregnutim površinama ležaj – rukavac. Lom i plastična deformacija su oštećenja u funkciji čvrstoće ležaja dok je habanje sa svim svojim manifestacijama vezano za tribološke procese.

Uzročnici otkaza	Učestanost, %
Greške u proizvodnji	8,4
Neadekvatan proračun	7,2
Greške u materijalu	3,6
Nepравilnosti u proizvodnji i montaži	9,7
Greške u eksploataciji	21,1
Habanje tokom dugotrajnog rada	46,4
Ostalo	3,6

Tablica 6.13. Uzročnici i učestanost otkaza ležajeva [23]

[23]. Bednjak, M. H., Modeli v procesi radni ležanie remonti v tehnike sistemi, MG V, Kiev, 1993.

Habanje je najčešća pojava otkaza ležajeva. Analiza je rađena na ležajevima hidroelektrane tokom generalnih opravki na uzorke pri čemu je konstatovano da su različite vrste habanja prisutne u 97% slučajeva, dok je plastična deformacija registrovana sa 2,5%, a lom ležaja u neznatnom broju (0,5%). Kako je habanje bilo dominantno, dalja analiza je vršena u cilju utvrđivanja najprisutnijih vrsta habanja (slika 6.11.) [23]:



Slika 6.11. Analiza utvrđivanja najprisutnijih vrsta habanja kod ležajeva hidroelektrana

Rezultati sa slike 6.11. pokazuju da je najprisutnije abrazivno i adhezivno habanje ležajeva, dok su ostale vrste habanja znatno manje zastupljene.

Sva merna mesta komponenta hidroelektrane koja su podložna otkazima, su slaba mesta. Slaba mesta mogu se pojaviti usled: slabih konstruktivnih rešenja, nedovoljno dobrih postupaka izrade, neodgovarajućeg rukovanja i održavanja, neodgovarajućeg tehnološkog procesa rada, uticaja okoline (vlažnost, prašina, temperatura i dr.), neodgovarajućeg materijala i drugo.

Slaba mesta hidroelektrane mogu biti trajnog karaktera i stalno ponavljajuća jednokratna slaba mesta, koja se mogu sasvim odstraniti. Jednokratna slaba mesta treba da se konstruktivno menjaju i otklanjaju.

Formiranjem univerzalnog optimalnog modela tehničke dijagnostike neophodno je odrediti sve nabrojane parametre teoriske i eksploatacione analize, a zatim iste povezati u matematički oblik što je i učinjeno. Ovo je urađeno analitičkim putem u obliku prenosne funkcije pouzdanosti optimalnog modela koja će definisati rad analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane.

[23]. Bednjak, M. H., Modeli v procesi radni ležanie v tehnike sistemi, MG V, Kiev, 1993

6.4.1. ODREĐIVANJE POHABANOSTI LEŽAJEVA HIDROELEKTRANE

Analizirani sklopovi nisu u početku eksploatacije imali veći broj otkaza komponenata, već je dolazilo do nepreciznosti u njihovoj montaži koje su dovele do određenih zastoja, i može se reći da ovo nisu rani otkazi pri uhodavanju komponenti sklopova već nedostaci pri puštanju komponenti hidroelektrane u njen eksploatacioni rad.

Pri uhodavanju stanja rada komponenti sklopova hidroelektrane postepeno je dolazilo (npr. do habanja ležajeva), a u sprezi sa tim i do povećanje otkaza pojedinih njihovih komponenti. Prvi otkazi su se pojavili oko 50000 h rada na sastavnim komponentama analiziranih sklopova hidroelektrane. Od 25.08.1998. god. do 30.08.2003. god. dolazi do intenzivnog rasta otkaza njihovih sastavnih komponenti, pa se za ovaj period može reći da je on period njihovog nestabilnog rada (prikaz na slici 6.12.). Ovo se može prikazati dijagramom primene optimalne zavisnosti broja otkaza N_{ot} u funkciji eksploatacionog vremena (t) (prikaz u tabelama 6.14. i 6.15.).

Na osnovu broja evidentiranih otkaza koji su nastali povećanjem nivoa pohabanosti ležajeva, izvršena je procedura određivanja pouzdanosti iz eksploatacionih uslova svakog analiziranog sklopa.

Analiza otkaza sastavnih komponenti analiziranih sklopova biće skoncentrisana na oblasti njihovog nestabilnog rada jer tada dolazi do njihovog intenziviranja. Ako sa T_1 – obeležimo vreme do kada se analizirani sklop uhadava, a sa T_2 – vreme do koga je analizirani sklop imao rad bez otkaza (eksploataciono – siguran rad) onda je svaki interval vremena posle T_2 interval nestabilnog njegovog rada $T'_2 > T_2$, tj. interval rada sa rizikom (detaljnije u poglavlju 4).

U tabeli 6.14. izvršen je prikaz svih otkaza koji su nastali usled povećanja nivoa pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih komponenti hidroelektrane, na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenata kao i otkazi na kojima su primenjeni parametri stanja komponenata.

Veoma često više uzročnika uzroka pojave otkaza doprinosi pohabanost ležaja. Učestanost pojedinih uzročnika (prikaz u tabeli 6.15.) dobijena je praćenjem 320 slučajeva otkaza ležaja, što utiče na optimizaciju postupaka tehničke dijagnostike komponenti sklopova hidroelektrane. Prikupljene informacije služe za analizu otkaza, tehnike novog nastajanja i formiranje arhive otkaza koje se dešavaju na komponentama sklopova hidroelektrane.

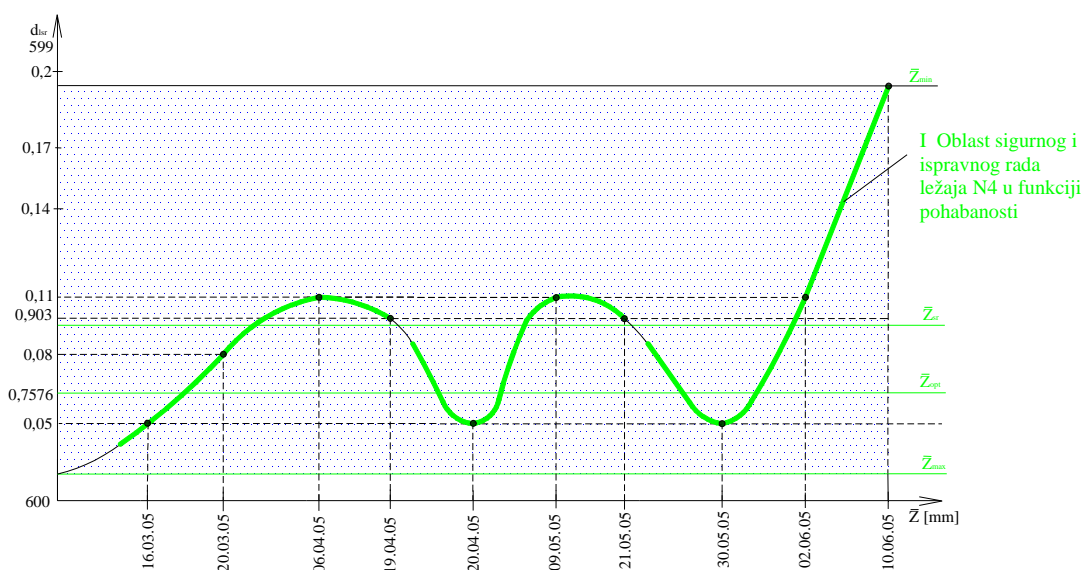
6.4.2. POHABANOST LEŽAJEVA (N_4 , N_6 i N_7) BEZ PRIMENE PARAMETARA OPOTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

Otkazi u periodu praćenja rada ležajeva N_4 i N_6 HE "Vrla -3" Surdulica, tabela 14:

Datum otkaza	Naziv sastavne komponente: N_4 – gornji vodeći ležaj i N_6 – donji vodeći ležaj	
	Ukupan broj otkaza	Zabeležena vrednost unutrašnjeg prečnika ležaja $d_{1sr} [(\Phi)(mm)]$
04.03.1999.	8	599,25
28.08.1999.	9	599,18
02.03.2000.	10	599,32
29.08.2000.	7	599,10
04.03.2001.	8	599,25
29.08.2001.	8	599,12
01.03.2002.	10	599,20
30.08.2002.	6	599,13
02.03.2003.	9	599,24
30.08.2003.	8	599,20

Tabela 14. Ukupan broj otkaza u periodu rada ležajeva N_4 i N_6 HE "Vrla -3" Surdulica

Iz prikazane tabele 14 možemo konstruisati dijagram zavisnosti broja otkaza u funkciji izmerenog unutrašnjeg prečnika segmentnog aksijalnog nosećeg ležaja – N_4 , (slika 6.12.).



Slika 6.12. Određivanje oblasti dozvoljenog zavora usled pohabanosti prečnika unutrašnjeg segmenata aksijalnog vodećeg ležaja N_4 HE "Vrla -3" Surdulica

Da bi se odredila procena očekivane vrednosti zazora do koga segmentni aksijalni vodeći ležaj (N_4 i N_6) ima ispravan rad usled pohabanosti njegovog unutrašnjeg prečnika ($d_{l_{sr}}$) uzećemo aritmetičku sredinu vrednost \bar{z} tih merenja:

$$d_{l_{N_4, N_6}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{l_i}$$

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije praćenja promene pohabanosti pri merenju ležajeva u toku rada je oblika [96]:

$$\bar{z}_{s N_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_{\max})^2}{n-1}}$$

Pri čemu je:

n - broj nezavisnih merenja zazora,

d_{l_i} - zazori svih izmerenih unutrašnjih prečnika ležaja

$$d_{l_{N_4, N_6}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (599,25 + 599,18 + 599,32 + 599,10 + 599,25 + 599,12 + 599,20 + 599,33 + 599,24 + 599,20)$$

$$d_{l_{N_4, N_6}} = 599,191 [mm] \geq dz_{opt}$$

Najveću vrednost zazora koja može biti ostvarena između unutrašnjeg prečnika ležaja (N_4 i N_6) i vratila hidroelektrane je (prikaz na slici 6.13.):

$$\bar{z}_{N_4, N_6} = d_{l_{sr}} - \bar{d}_{z_{N_4, N_6}}$$

$$\bar{z}_{N_4, N_6 \max} = 600 - 599,191 = 0,809 [mm]$$

Da bi se dobila preciznija vrednost granice optimalnog dozvoljenog zazora ($\bar{z}_{s_{opt}}$) uvešćemo eksperimentalnu standardnu devijaciju jednog merenja za niz od n ponovljenih merenja i izrazićemo je:

$$\bar{z}_{i N_4, N_6} = 1,69 [mm]$$

$$\bar{z}_{s N_4, N_6 opt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (1,69 - 0,809)^2}{9}} = 0,2623 [mm]$$

$$\text{Odnosno: } \bar{z}_{s N_4, N_6 opt} = 600 - 599,2623 = 0,7376 [mm]$$

$$\text{Optimalna vrednost zazora je: } \bar{z}_{s N_4, N_6 opt} = 0,7376 [mm]$$

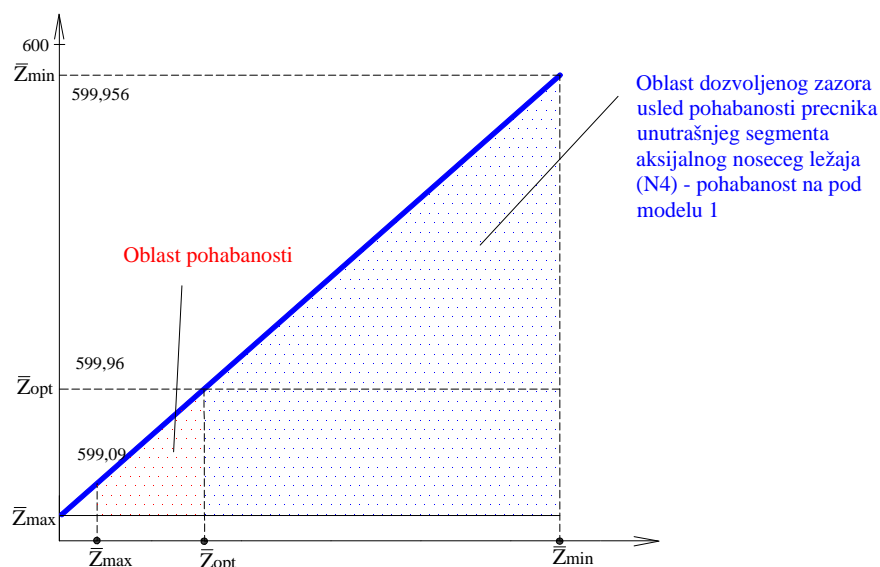
Idealna vrednost zazora je minimalna vrednost zazora koja leži u tolerancijskom polju labavog naleganja i za nazivne prečnike $\phi 600$ iznosi $T = 0,0044[mm]$, jer je to osnovna tolerancija koja se određuje iz izraza [95]:

$$T = 0,45 \cdot \sqrt[3]{d_{l, sr}} + 0,01d_{l, sr} = 0,0044[mm]$$

Onda je idealni zazor $\bar{z}_{N_4, N_6 \min} = z_{ideal} = 0,0044[mm]$

Dobijene vrednosti zazora su:

- 1) $\bar{z}_{\max} = 0,809[mm]$
- 2) $\bar{z}_{Sopt} = 0,7376[mm] = \bar{z}_{sr}$
- 3) $\bar{z}_{\min} = z_{ideal} = 0,0044[mm]$



Slika 6.13. Oblast dozvoljenog zazora usled pohabanosti unutrašnjeg prečnika gornjeg vodećeg ležaja N_4 – pohabanost na podmodelu 1

Koeficijenti pravca prave:

$$z = ax + b$$

$$z = 0, \quad a = -\frac{b}{x}, \quad a = -\frac{b}{599}$$

$$x = 0, \quad z = b$$

$$a = -\frac{z}{599}$$

$$\bar{z}_{\max} a = -\frac{599,097}{599} [mm]$$

[95]. Nikolić, D., Primena sopstvenog modela optimizacije na pouzdanost ležaja hidroeletreane, časopis "Tehnička dijagnostika", br. 1, str. 83-87, Vrnjačka banja, 2006.

$$\bar{z}_{S\ opt\ a} = -\frac{599,2623}{599} [mm]$$

$$\bar{z}_{\min\ a} = -\frac{599,956}{599} [mm]$$

Vrednosti zazora su:

$$\bar{z}_{N_4, N_6\ max} = 600 - 0,809 = 599,193 [mm]$$

$$\bar{z}_{S\ N_4, N_6\ opt} = 600 - 0,7376 = 599,2623 [mm]$$

$$\bar{z}_{N_4, N_6\ min} = z_{ideal} = 599,956 [mm]$$

Vrednosti zazora \bar{z}_{\max} , $\bar{z}_{opt} = \bar{z}_{sr}$, \bar{z}_{\min} su jednake za gornji i donji vodeći ležaj (N_4) i (N_6) dok je za turbinski ležaj (N_7) nešto drugačiji iz razloga što ovaj segmentni ležaj ima veći unutrašnji prečnik i iznosi $d_{l\ sr} = 650 [mm]$, (tabela 6.15.).

Datum provere pojave otkaza	N ₇ – turbinski ležaj	
	Ukupan broj otkaza	Zabeležena vrednost unutrašnjeg prečnika ležaja $d_{l\ sr} (\Phi) [mm]$
04.03.1999.	9	649,25
28.08.1999.	9	649,30
02.03.2000.	8	649,17
29.08.2000.	7	649,11
04.03.2001.	8	649,27
29.08.2001.	8	649,18
01.03.2002.	9	649,29
30.08.2002.	7	649,25
02.03.2003.	9	649,25
30.08.2003.	8	649,18

Tabela 6.15. Otkazi u periodu praćenja rada turbinskog ležaja N₇ u određenom vremenskom periodu rada HE "Vrla -3" Surdulica

Aritmetička sredina vrednosti prečnika segmentnog turbinskog ležaja N₇ je:

$$\bar{z}_{N_7} = \frac{1}{10} \sum_{i=10} (649,25 + 649,30 + 649,17 + 649,11 + 649,27 + 649,18 + 649,29 + 649,25 + 649,25 + 649,18) =$$

$$\bar{z}_{N_7} = 649,234 [mm] \geq \bar{z}_{opt}$$

Najveća vrednost zazora je:

$$\bar{z}_{N_7\ max} = d_{l\ sr} - z = 650 - 649,234 = 0,766 [mm]$$

Optimalna vrednost dozvoljenog zazora pomoću eksperimentalne standardne devijacije iznosi:

$$z_{S N_7 opt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (1,79 - 0,766)^2}{9}} = 0,323[mm]$$

$$\text{Odnosno } \bar{z}_{N_7 opt} = 650 - 649,323 = 0,677[mm]$$

Minimalna vrednost zazora je:

$$T_{\min} = 0,45\sqrt[3]{650} + 0,001 \cdot 650 = 4,548[mm] = 0,004548[mm]$$

Vrednost idealanog zazora jednak je:

$$\bar{z}_{N_7 \min} = \bar{z}_{ideal} = 0,004548[mm]$$

Ekstremne vrednosti su:

- 1) $\bar{z}_{N_7 \max} = 0,766[mm] = z_{\max p}$
- 2) $\bar{z}_{N_7 opt} = \bar{z}_{sr} = 0,677[mm] = \bar{z}_{opt-p} = \bar{z}_{sr-p}$
- 3) $\bar{z}_{N_7 \min} = \bar{z}_{ideal} = 0,004548[mm] = \bar{z}_{\min p}$

Nanete eksperimentalne tačke Weibull-ove raspodele (tabela 6.16.) su u neposrednoj okolini teorijskih pa se može zaključiti da reprezentuju kontroli odstupanja pohabanosti ležajeva. Na osnovu jednačine mogu se odrediti parametri Weibull-ove raspodele sa optimalnim vrednostima [95]:

- parametar oblika Weibull-ove raspodele:

$$\beta = a = 15,3464$$

- parametar razmere Weibull-ove raspodele [95]:

$$\eta = e^{-a/\beta} = 8,5771$$

Kada su poznate vrednosti parametara Weibull-ove raspodele ($\beta = 15,3464$ i $\eta = 8,5771$) lako se mogu formirati funkcije osnovnih teorijskih Weibull-ovih pokazatelja pouzdanosti, i to u obliku [95]:

- funkcija pouzdanosti:

$$P(t) = e^{-(t/8,5771)^{15,3464}} = 0,9270$$

[95]. Nikolić, D., Primena sopstvenog modela optimizacije na pouzdanost ležaja hidroelettrane, časopis "Tehnička dijagnostika", br. 1, str. 83-87, Vrnjačka banja, 2006.

- funkcija nepouzdanosti [95]:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/8,5771)^{15,3464}} = 0,0667$$

- funkcija gustine otkaza [95]:

$$f(t) = 1,78923 \cdot \left(\frac{t}{8,5771}\right)^{14,3464} \cdot e^{-(t/8,5771)^{15,3464}} = 0,0744$$

- funkcija intenziteta otkaza [95]:

$$\lambda(t) = 1,78923 \cdot \left(\frac{t}{8,5771}\right)^{14,3464} = 0,0802$$

Pri tome su vrednosti teorijskih pokazatelja pouzdanosti ležaja prikazane u tabeli 6.17. Grafički prikaz teorijskih pokazatelja pouzdanosti, uporedo sa eksperimentalnim, predstavlja optimizaciju postupaka tehničke dijagnostike. Tako je, npr., za verovatnoću 50 % vreme bezotkaznog rada $t_{50\%} = 8,3747 \cdot 10^3$ [h], za verovatnoću 80 %, $t_{80\%} = 7,7785 \cdot 10^3$ [h] ili za verovatnoću 90 %, $t_{90\%} = 7,5072 \cdot 10^3$ [h].

R.b.	t	$x_i = \ln t$	F(t)	$P_t = \ln \frac{1}{1 - F(t)}$
1.	7,25	1,981	0,0667	1,474
2.	7,75	2,048	0,2000	1,030
3.	8,25	2,110	0,4333	0,766
4.	8,75	2,169	0,8000	0,476
5.	9,25	2,225	0,9333	0,196
6.	9,75	-	1,0000	-

Tabela 6.16. Tabelarni prikaz parametara stanja komponenata linearizacije funkcije Weibull-ove raspodele F(t) otkaza ležaja

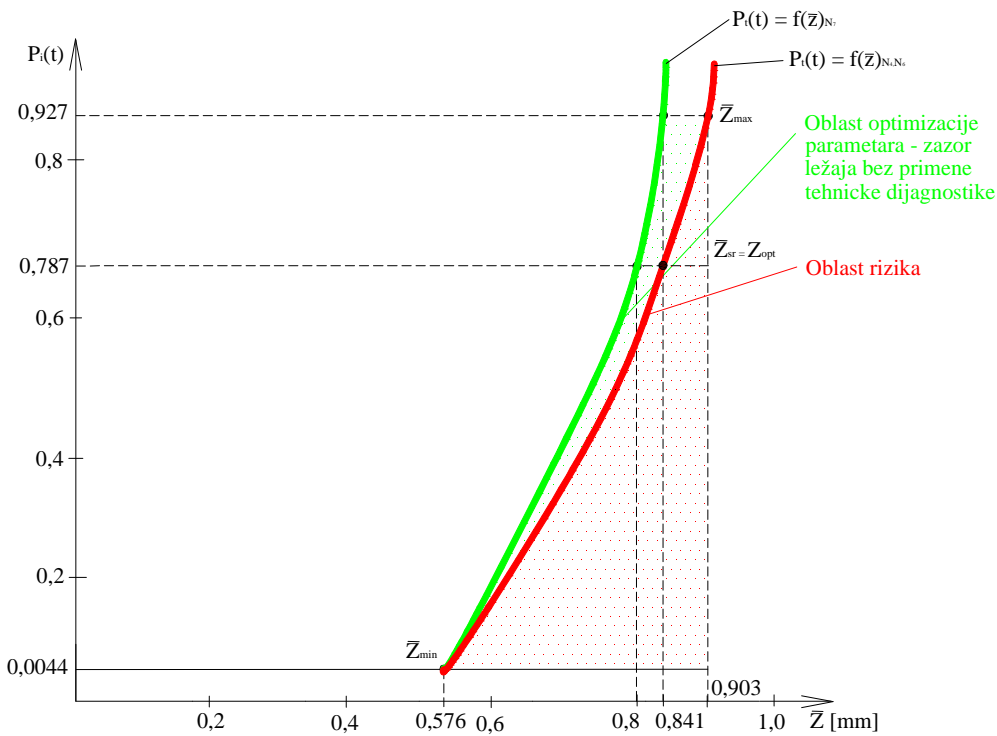
R.b.	Grupni intervali	t	n	F(t)	η	β	m	$P_t(t)$	$\lambda(t)$
1.	7,0 – 7,5	7,25	2,2311	0,0744	0,1900	0,1730	27,8100	0,9270	0,0802
2.	7,5 – 8,0	7,75	5,0739	0,1691	0,7053	0,1902	24,2947	0,8098	0,2088
3.	8,0 – 8,5	8,25	8,8586	0,2953	0,7021	0,4234	17,2979	0,5766	0,5121
4.	8,5 – 9,0	8,75	9,1871	0,3062	0,2875	0,7429	7,7125	0,4571	1,1912
5.	9,0 – 9,5	9,25	3,2753	0,1092	0,7611	0,9587	1,2389	0,3413	2,6437
6.	9,5 – 10,0	9,75	0,1326	0,0044	0,9764	0,9992	0,0236	0,2208	2,6862

Tabela 6.17. Tabelarni prikaz osnovnih parametara stanja komponenata teorijskih Weibull-ovih pokazatelja pouzdanosti ležaja

Na osnovu dobijenih vrednosti zazora u oblast rada ležajeva N_4 , N_6 i N_7 (tabela 6.18.) prikazano je na dijagramu zavisnosti pouzdanosti od zazora sa oblastima sigurnog – ispravnog rada i rizika bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (slika 6.14.).

R.B.	$P_t(t)$	$\bar{z}[mm]_{N_4, N_6}$	Oblast rada ležajeva N_4 i N_6	$\bar{z}[mm]_{N_7}$	Oblast rada ležaja N_7
1.	0,9270	0,809 (\bar{z}_{max})	Oblast rizika	0,766	Oblast rizika
2.	0,8098	0,737 ($\bar{z}_{opt} = z_{sr}$)		0,677	
3.	0,5766	0,0044 (\bar{z}_{min})	Oblast sigurnog i ispravnog rada	0,00459	Oblast sigurnog i ispravnog rada
4.	0,2571				
5.	0,0413				
6.	0,0008				

Tabela 6.18. Prikaz vrednosti zavisnosti pouzdanosti zazora u oblasti rada ležajeva N_4 , N_6 i N_7 HE "Vrla -3" Surdulica



Slika 6.14. Dijagram zavisnosti pouzdanosti od zazora sa oblastima sigurnog i ispravnog rada i rizika bez primene parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

Merodavni zazori ležajeva su:

$$\bar{z}_{max} = 0,766[mm]$$

$$\bar{z}_{opt} = \bar{z}_{sr} = \frac{0,737 + 0,677}{2} = 0,707[mm]$$

$$\bar{z}_{min} = 0,0045[mm]$$

6.4.3. POHABANOST LEŽAJEVA (N_4 , N_6 i N_7) SA PRIMENOM PARAMETARA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

Nakon izvršenog generalnog remonta u periodu od 01 - 31.08.2000. god. evidentirani su otkazi na sastavnim komponentama (ležajeva: N_4 , N_6 i N_7) hidroelektrane HE "Vrla -3" Surdulica primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike (tabela 6.19.).

Datum provere pojave otkaza	Broj otkaza na ležajevima hidroelektrane		
	N_4	N_6	N_7
01. – 31.08.1997.	Generalni remont		
25.08.1998.	17	18	17
28.08.1999.	18	17	18
28.08.2000.	19	15	16
27.08.2001.	18	16	17
29.08.2002.	16	17	16
30.08.2003.	16	15	15
29.08.2004.	13	14	13
27.08.2005.	12	11	12
25.08.2006.	12	13	12
28.08.2007.	12	11	11

Tabela 6.19. Pregled otkaza ležajeva (N_4 , N_6 i N_7) HE "Vrla -3" Surdulica u određenom vremenskom periodu

Na osnovu zabeleženih otkaza izvršeno je demontiranje svakog segmentnog ležaja i zabeleženi su zazori između segmenata i vratila, odnosno veličine promene unutrašnjeg segmentnog aksijalnog vodećeg ležaja $d_{l_{sr}p}$ [mm] (prikaz u tabeli 6.20.).

Datum provere pojave otkaza	Naziv sastavne komponente	
	N_4 – gornji vodeći ležaj i N_6 – donji vodeći ležaj	
	n – ukupan broj otkaza	$d_{l_{sr}p} \Phi$ [mm]
25.08.1998.	18	599,22
28.08.1999.	17	599,30
28.08.2000.	15	599,28
27.08.2001.	16	599,25
29.08.2002.	17	599,22
30.08.2003.	15	599,30
29.08.2004.	14	599,66
27.08.2005.	11	599,67
25.08.2006.	13	599,68
28.08.2007.	11	599,70

Tabela 6.20. Pregled otkaza ležajeva (N_4 i N_6) HE "Vrla -3" Surdulica u određenom vremenskom periodu

Određivanje vrednosti zazora do koga segmentni aksijalni vodeći ležaj (N_4 i N_6) ima ispravan rad usled pohabanosti njegovog unutrašnjeg prečnika ($d_{l_{sr}}$) uzećemo aritmetičku sredinu vrednost \bar{z} tih merenja:

$$d_{l_{N_4, N_6}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{l_i}$$

Konačna jednačina univerzalnog modela optimizacije praćenja promene pohabanosti pri merenju ležajeva u toku rada sa primenom parametara je oblika [95]:

$$\bar{z}_{s N_i p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_{\max})^2}{n-1}}$$

Iz prikazane tabele odredićemo ekstremne vrednosti zazora za ležajeve N_4 i N_6 , oni su jednaki:

- Vrednosti očekivanog prečnika segmenata:

$$d_{l_{(N_4, N_6)p}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d(l_i)_p = \frac{1}{10} (599,22 + 599,30 + 599,28 + 599,25 + 599,22 + 599,30 + 599,66 + 599,67 + 599,68 + 599,70) = 599,272 \text{ mm}$$

- Maksimalna vrednost zazora je:

$$\bar{z}_{(N_4, N_6 \max)_p} = d_{l_{sr}} - d_{l_{(N_3, N_4, N_6)_p}}$$

$$\bar{z}_{(N_4, N_6 \max)_p} = 600 - 599,272 = 0,728$$

- Dozvoljeni optimalni zazor na osnovu eksperimentalne standardne devijacije:

$$z_i = 0,22 + 0,3 + 0,28 + 0,25 + 0,22 + 0,3 + 0,25 + 0,28 + 0,3 + 0,32 = 2,72 [\text{mm}]$$

$$z_{(N_4, N_6)opt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_{\max})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(2,72 - 0,728)^2}{9}} = 0,664 [\text{mm}]$$

- optimalni zazor je:

$$\bar{z}_{s(N_4, N_6)opt}_p = 600 - 599,664 = 0,336 [\text{mm}]$$

- idealna vrednost zazora je njegova minimalna vrednost i iznosi:

$$\bar{z}_{(ideal N_4, N_6)_p} = \bar{z}_{\min(N_4, N_6)_p} = 0,0044 [\text{mm}]$$

Ekstremne dobijene vrednosti zazora za ležajeve N_4 i N_6 su:

1. $\bar{z}_{(N_4, N_6 \max)_p} = 0,728 [\text{mm}]$
2. $\bar{z}_{s(N_4, N_6)opt}_p = 0,336 [\text{mm}]$
3. $z_{\min(N_4, N_6)_p} = 0,0044 [\text{mm}]$

[95]. Nikolić, D., Primena sopstvenog modela optimizacije na pouzdanost ležaja hidroelektrane, časopis "Tehnička dijagnostika", br. 1, str. 43-47, Vrnjačka banja, 2006.

6.4.4. ODREĐIVANJE EKSTREMNIH VREDNOSTI ZAZORA ZA TURBINSKI LEŽAJ N₇

U tabeli 6.21. evidentirani su otkazi na turbinskom ležaju (N₇) i date vrednosti zabeleženog unutrašnjeg prečnika segmentnog aksijalnog ležaja $d_{l_{isrp}}$.

Datum provere pojave otkaza	Naziv sastavne komponente	
	Turbinski ležaj (N ₇)	
	n – ukupan broj otkaza	$d_{(l_{isr})_p} \Phi [mm]$
25.08.1998.	17	649,25
28.08.1999.	18	649,30
28.08.2000.	16	649,30
27.08.2001.	17	649,20
29.08.2002.	16	649,25
30.08.2003.	15	649,35
29.08.2004.	13	649,67
27.08.2005.	12	649,69
25.08.2006.	12	649,70
28.08.2007.	11	649,71

Tabela 6.21. Ukupan broj otkaza turbinskog ležaja N₇ HE "Vrla -3" Surdulica

Iz prikazane tabele 6.21. odredićemo ekstremne vrednosti zazor za turbinski ležaj N₇:

- Vrednost očekivanog prečnika segmenata:

$$d_{l(N_7)_p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{(i)_p} = \frac{1}{10} (649,25 + 649,3 + 649,3 + 649,2 + 649,25 + 649,35 + 649,67 + 649,69 + 649,70 + 649,71) = 649,307 [mm]$$

- Maksimalna vrednost zazor je:

$$\bar{z}_{(N_7 \max)_p} = d_{l_{sr}} - d_{l(N_7)_p} = 650 - 649,307 = 0,693 [mm]$$

- Dozvoljeni optimalni zazor na osnovu eksperimentalne standardne devijacije:

$$z_i = 0,25 + 0,3 + 0,3 + 0,2 + 0,25 + 0,35 + 0,3 + 0,35 + 0,42 + 0,35 = 3,07 [mm]$$

$$z_{(N_7)_{opt}} = \sqrt{\frac{(3,07 - 0,693)^2}{9}} = 0,792 [mm]$$

- optimalni zazor je:

$$\bar{z}_{S(N_7)_{opt}_p} = 650 - 649,792 = 0,208 [mm]$$

- Minimalni zazor je:

$$\bar{z}_{N_7 \min p} = 0,004548 [mm]$$

Ekstremne vrednosti su:

1. $\bar{z}_{(N_7 \max)_p} = 0,693[mm]$
2. $\bar{z}_{s(N_7 opt)_p} = 0,208[mm]$
3. $\bar{z}_{(N_7 \min)_p} = 0,004548[mm]$

Na osnovu dobijenih ekstremnih vrednosti zazora primenom optimizacije postupaka tehničke dijagnostike odrediće se vrednosti merodavnih zazora.

Na osnovu tabele 6.22. konstruisaće se dijagram zavisnosti (prikaz na slici 6.15.) pouzdanosti od veličine zazora sa oblastima sigurnog i ispravnog rada i rizika sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i na osnovu njega odrediće se vrednosti merodavnih zazora.

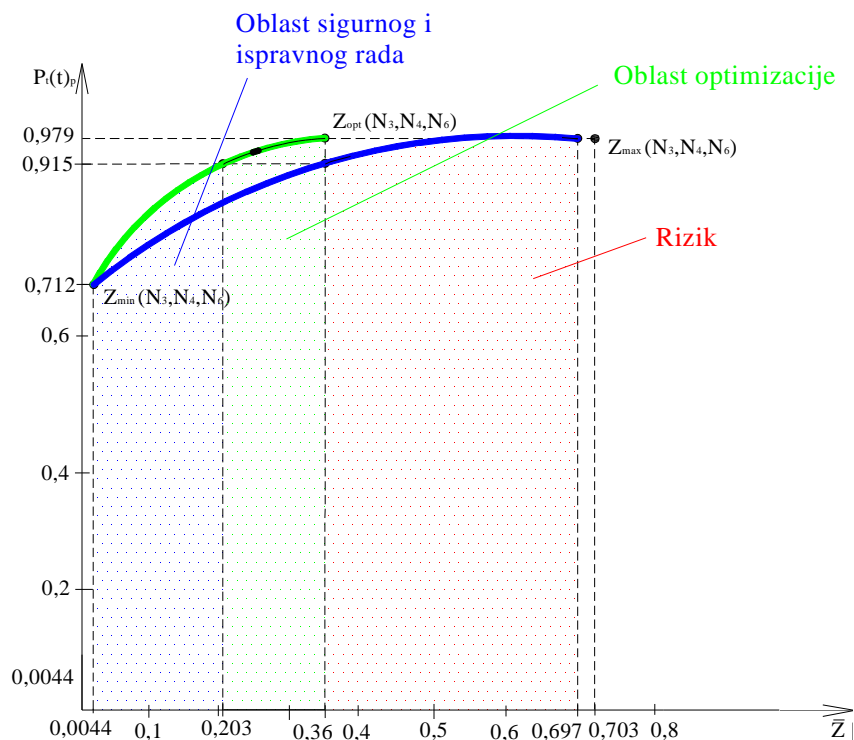
R.B.	$P_t(t)_p$	$\bar{z}_{N_4, N_6} [mm]$	Oblast rada ležajeva N_4 i N_6	$\bar{z}_{N_7(\min)}$	Oblast rada ležaja N_7
1.	0,979	$0,728(\bar{z}_{\max})_p$	Oblast rizika	$0,693(\bar{z}_{\max})_p$	Oblast rizika
2. 3.	0,915 0,716	$0,336(\bar{z}_{s opt})_p$ $0,0044(\bar{z}_{\min})_p$	Oblast sigurnog i ispravnog rada	$0,208(\bar{z}_{s opt})_p$ $0,004548(\bar{z}_{\min})_p$	Oblast sigurnog i ispravnog rada
4.	0,405	-	-	-	-
5.	0,161	-	-	-	-
6.	0,042	-	-	-	-

Tabela 6.22. Oblast rada ležajeva N_4 , N_6 i N_7 HE "Vrla -3" Surdulica

Vrednosti pouzdanosti $P_t(t)_p$ rada ležajeva su određene na isti način kao i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i prikazane su u tabeli 6.22.

Merodavni zazori u oblasti rada ležajeva su:

1. $\bar{z}_{(\max)_p} = 0,728[mm]$
2. $\bar{z}_{s(opt)_p} = \frac{0,336 + 0,208}{2} = 0,272[mm] = \bar{z}_{srp}$
3. $\bar{z}_{(\min)_p} = 0,044[mm]$



Slika 6.15. Dijagram zavisnosti oblasti primene parametara optimizacije i ispravnog rada ležajeva u funkciji pouzdanosti i zazora

Rezultujući univerzalni model je obuhvatio istovremeno oblat zavisnosti: $S_\eta(t) = f(P_i(t) = \varphi(z) = N_i(t), \omega_i(t), A_i(t), \text{ radne temperature } T_{mi} \text{ i vrednosti zazora } \bar{z}$. Ove zavisnosti određiće korelacije koje su definisane u algoritmu metodologije optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Rezultujuća prostorna kriva (optimizaciona kriva) određiće korelacije zavisnosti u ravanskom sistemu: 0_{xy} (korelacija K_1 - oblast optimizacije sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane prema parametrima optimizacije mehaničkih oscilacija i radnih temperatura), 0_{yz} (korelacija K_2 - oblast optimizacije sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane prema parametrima optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti), 0_{xz} (korelacija K_3 - oblast optimizacije sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane prema parametrima optimizacije radnih temperatura i pohabanosti – veličini zazora).

Za konstrukciju prostornog dijagrama 0_{xyz} ekstremne vrednosti optimizacije parametara tehničke dijagnostike su prikazane u (tabeli 6.23.) bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike (tabela 6.24.).

Na osnovu ekstremnih tačaka korelacija određiće se oblasti optimizacije parametara tehničke dijagnostike u kojima sastavne komponente imaju siguran rad - rad bez rizika. Ovim je dokazana glavna hipoteza.

$S_{\eta}(t) \left[\frac{1}{\mu m \cdot s} \right]$		$T_{mi} [^{\circ}C]$		Pohabanost ležajeva			Pohabanost ležajeva	
				vrednosti zazora $\bar{z}_i [mm]$		vrednost merodavnih zazora $\bar{z} [mm]$		
				$\bar{z}_{N_4=N_6}$		\bar{z}_{N_7}		
$S_{\eta}(t)_{\max}$	-1,2	$T_{mi \max}$	71	$\bar{z}_{i \max}$	0,809	0,766	\bar{z}_{\max}	0,766
$S_{\eta}(t)_{\max}$	0,0029	$T_{mi \min}$	68,25	$\bar{z}_{i \min}$	0,004	0,0045	\bar{z}_{\min}	0,004
$S_{\eta}(t)_{\max}$	-0,331	T_{miopt}	69	\bar{z}_{iopt}	0,737	0,677	\bar{z}_{opt}	0,707
$S_{\eta}(t)_{\max}$	-0,327	T_{misr}	69,5	\bar{z}_{isr}	0,737	0,677	\bar{z}_{sr}	0,707

Tabela 6.23. Pohabanost ležajeva bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike HE "Vrla -3" Surdulica

$$\bar{z}_{opt} = \bar{z}_{sr} = \frac{\bar{z}_{N_4, N_6 iopt} + \bar{z}_{N_7}}{2}$$

$S_{\eta}(t)_p \left[\frac{1}{\mu m \cdot s} \right]$		$T_{mip} [^{\circ}C]$		Pohabanost ležajeva		Pohabanost ležajeva	
				Vrednosti zazora $[mm]$		Vrednosti merodavnih zazora $[mm]$	
				$\bar{z}_{N_4=N_6p}$	\bar{z}_{N_7p}		
$S_{\eta}(t)_{\max p}$	-1,768	$T_{mi \max p}$	65	0,728	0,693	$\bar{z}_{i \max p}$	0,728
$S_{\eta}(t)_{\min p}$	$-4,13 \cdot 10^{-5}$	$T_{mi \min p}$	58	0,044	0,00454	$\bar{z}_{i \min p}$	0,044
$S_{\eta}(t)_{optp}$	-0,312	T_{mioptp}	62,25	0,336	0,208	\bar{z}_{ioptp}	0,272
$S_{\eta}(t)_{srp}$	-0,311	T_{misrp}	61	0,336	0,208	\bar{z}_{isrp}	0,272

Tabela 6.24. Pohabanost ležajeva sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike HE "Vrla -3" Surdulica

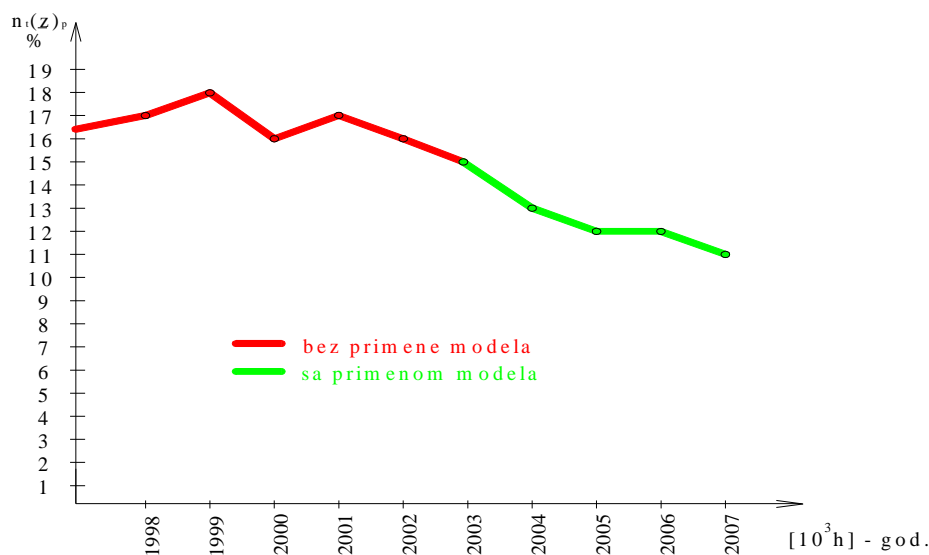
Ove krive će analizirati i procentualni učinak optimizacije između maksimalne, optimalne, srednje i minimalne vrednosti korelacija.

Prostorna optimizaciona kriva biće određena pomoću podprograma koji je programiran u matematičkom programu MATLAB 6.5.

Na osnovu tabele 6.25. konstruisaće se dijagram zavisnosti (prikaz na slici 6.16.) pouzdanosti od vrednosti broja otkaza usled pohabanosti ležajeva (npr. period praćenja rada turbinskog ležaja N_7) u oblastima sigurnog i ispravnog rada, sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u funkciji eksploatacionog vremena (t), a na osnovu njega određiće se vrednosti merodavnih zazora (smanjuje se vrednost pohabanosti ležajeva sa upotrebom univerzalnog modela od 37,8% na 11,2%).

Datum provere pojave otkaza	Broj otkaza na ležajevima hidroelektrane ($t, 10^3 h$)	
	bez primene parametara	sa primene parametara
25.08.1998.	17	-
28.08.1999.	18	-
28.08.2000.	16	-
27.08.2001.	17	-
29.08.2002.	16	-
30.08.2003.	15	-
29.08.2004.	-	13
27.08.2005.	-	12
25.08.2006.	-	12
28.08.2007.	-	11

Tabela 6.25. Otkazi u periodu praćenja rada turbinskog ležaja N_7 u određenom vremenskom periodu rada HE "Vrla -3" Surdulica



Slika 6.16. Dijagram zavisnosti broja otkaza usled pohabanosti ležajeva (npr. period praćenja rada turbinskog ležaja N_7) u vremenskom periodu rada HE "Vrla -3" Surdulica

6.5. UNIVERZALNI MODEL OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANE

Da bi se odredila zavisnost uzajamnih povezivanja korelacija $(S_\eta(t), T_{mi}, \bar{z})$ poći će se od formiranja kvadratne determinante oblika 3×3 sa koeficijentima korelacija, (detaljnije u poglavlju 6.2, 6.3 i 6.4.) [82]:

$$K_1 = f(S_\eta(t), T_{mi}, 0)$$

$$K_2 = f(0, T_{mi}, \bar{z})$$

$$K_3 = f(S_\eta(t), 0, \bar{z})$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_{(t)} = \begin{bmatrix} K_3 \\ K_2 \\ K_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & T_{mi} & \bar{z} \\ S_\eta(t) & 0 & \bar{z} \\ S_\eta(t) & T_{mi} & 0 \end{bmatrix}$$

pri čemu je K – oznaka povezivanja svih korelacija.

Rešavanjem determinante oblika:

$$K_{(t)} = \begin{bmatrix} 0 & T_{mi} & \bar{z} \\ S_\eta(t) & 0 & \bar{z} \\ S_\eta(t) & T_{mi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & T_{mi} \\ S_\eta(t) & 0 \\ S_\eta(t) & T_{mi} \end{bmatrix}$$

dobija se izraz za određivanje zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane u vidu jednačine:

$$K_{(t)} = (S_\eta(t) \cdot T_{mi} \cdot \bar{z})^2$$

Konačna jednačina UNIVERZALNOG MODELA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE ima oblik:

$$K_{(t)} = \frac{\omega_i^4(t)(1-\omega_i(t))^2 \cdot T_{mi}^2 \cdot \bar{z}^2}{\eta_2^2 \cdot A_i^4(t) \cdot \left(\frac{\omega_i^2(t)}{\eta_1 - A_i(t)} - 1 \right)^2}$$

Ravanske zavisnosti korelacija biće određene pomoću podprograma koji je formiran na osnovu matematičkog programa MATLAB 6.5. i kojim se dobijaju aproksimacije krivih korelacija. Na osnovu ovih krivi aproksimacija određuje se procenat povećanja optimizacije njenim uvođenjem.

[82]. Mihalevič, B.C., Metodi posledovatelnie optimizacii, Nauka, Moskva, 1998.

Matematički program za aproksimaciju ravanskih krivih korelacija

1. % podaci za aproksimaciju korelacije K_1 :

$$x = \begin{bmatrix} T_{mi\ min} & T_{misr} & T_{miopt} & T_{mi\ max} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} S_{\eta}(t)_{\min} & S_{\eta}(t)_{sr} & S_{\eta}(t)_{opt} & S_{\eta}(t)_{\max} \end{bmatrix}$$

% stepen polinoma kojim se vrši aproksimacija

$$n = 1 \dots 4$$

% vektor r sadrži koeficijente polinoma stepena n

$$r = \text{polzfit}(x, y, n)$$

% prikazane vrednosti koje se aproksimiraju i

% polinoma kojim je izvršena aproksimacija

$$x_1 = T_{mi\ min} : 0,01 : T_{mi\ max}$$

$$y_1 = \text{polyval}(r, x_1)$$

$$\text{plot}(x_1, y_1, x, y, *);$$

2. % podaci za aproksimaciju korelacije K_2 :

$$y = \begin{bmatrix} S_{\eta}(t)_{\min} & S_{\eta}(t)_{sr} & S_{\eta}(t)_{opt} & S_{\eta}(t)_{\max} \end{bmatrix}$$

$$z = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\min} & \bar{z}_{sr} & \bar{z}_{opt} & \bar{z}_{\max} \end{bmatrix}$$

% stepen polinoma kojim se vrši aproksimacija

$$n = 1 \dots 4$$

% vektor r sadrži koeficijente polinoma stepena n

$$r = \text{polzfit}(y, z, n)$$

% prikazane vrednosti koje se aproksimiraju i

% polinoma kojim je izvršena aproksimacija

$$y_1 = T_{mi\ min} : 0,01 : T_{mi\ max}$$

$$z_1 = \text{polyval}(r, y_1)$$

$$\text{plot}(y_1, z_1, y, z, '*').$$

3. % podaci za aproksimaciju korelacije K_3 :

$$z = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\min} & \bar{z}_{sr} & \bar{z}_{opt} & \bar{z}_{\max} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} T_{mi\min} & T_{misr} & T_{miopt} & T_{mi\max} \end{bmatrix}$$

% stepen polinoma kojim se vrši aproksimacija

$$n = 1 \dots 4$$

% vektor r sadrži koeficijente polinoma stepena n

$$r = \text{polzfit}(y, z, n)$$

% prikazane vrednosti koje se aproksimiraju i

% polinoma kojim je izvršena aproksimacija

$$z_1 = \bar{z}_{\min} : 0,01 : \bar{z}_{\max}$$

$$x_i = \text{polyval}(r, z_1)$$

$$\text{plot}(z_1, x_i, z, x, '*').$$

Za određivanje zavisnosti korelacija dobiće se dve krive bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Iz tih razloga u podprogramima treba prvo odrediti korelacije koje uzimaju zavisnost u funkciji parametara:

1) bez primene parametara:

$$x = \begin{bmatrix} T_{mi\min} & T_{misr} & T_{miopt} & T_{mi\max} \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} S_{\eta}(t)_{\min} & S_{\eta}(t)_{sr} & S_{\eta}(t)_{opt} & S_{\eta}(t)_{\max} \end{bmatrix}$$

$$z = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\min} & \bar{z}_{sr} & \bar{z}_{opt} & \bar{z}_{\max} \end{bmatrix}$$

2) sa primenom parametara:

$$x_p = \begin{bmatrix} T_{mi\min p} & T_{misrp} & T_{mioptp} & T_{mi\max p} \end{bmatrix}$$

$$y_p = \left[S_\eta(t)_{\min p}, S_\eta(t)_{srp}, S_\eta(t)_{optp}, S_\eta(t)_{\max p} \right]$$

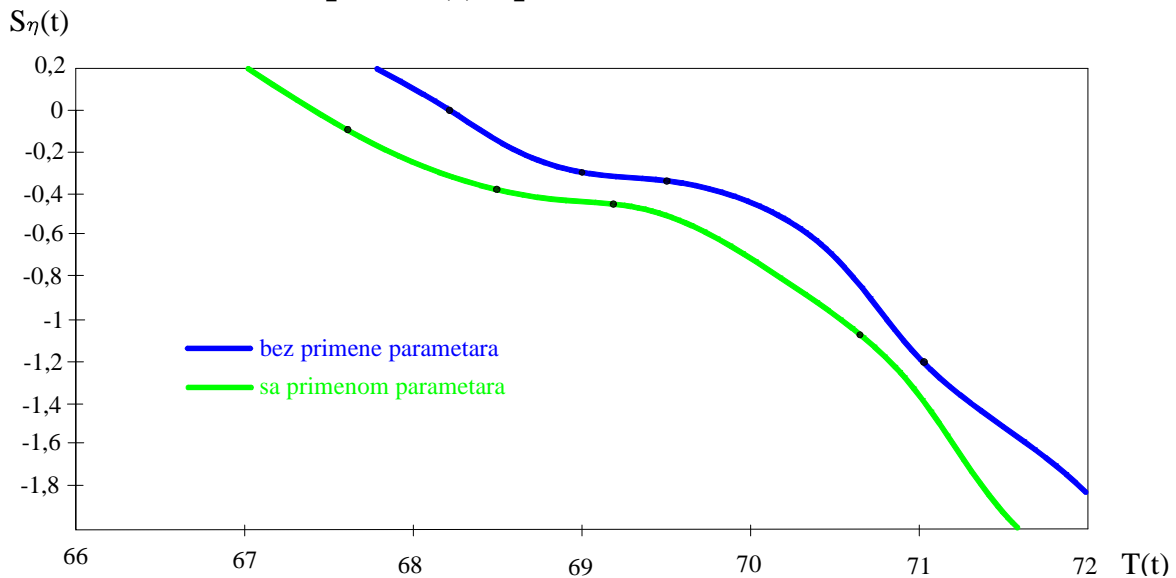
$$z_p = \left[\bar{z}_{\min p}, \bar{z}_{srp}, \bar{z}_{optp}, \bar{z}_{\max p} \right]$$

U zaključku ćemo analizirati dobijene ravanske rezultujuće krive (prikaz na slikama 6.17. - 6.21.):

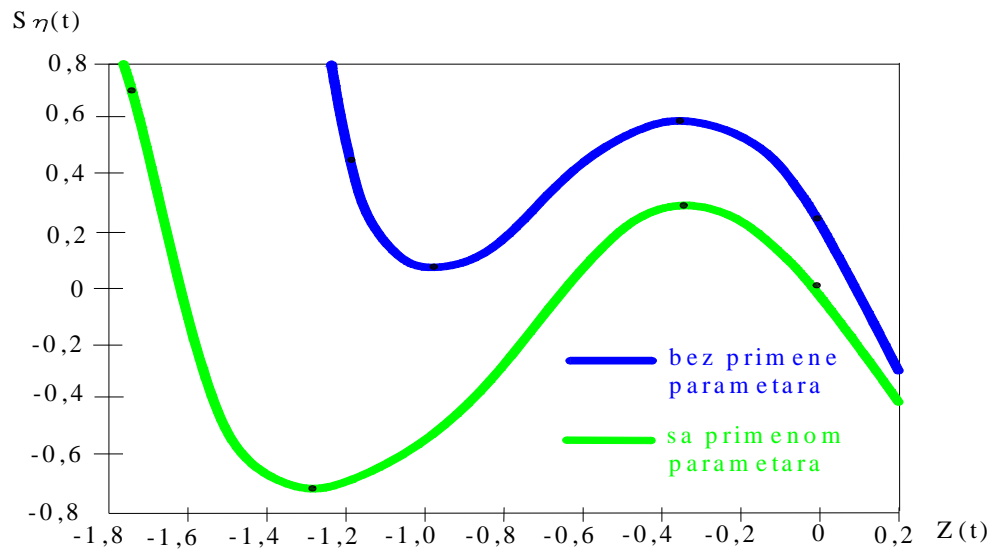
$$1) \text{ Korelacija } K_1 = \left[\begin{array}{l} f(T_{mi})_{\max} = S_\eta(t)_{\max} \\ f(T_{mi})_{opt} = S_\eta(t)_{opt} \\ f(T_{mi})_{sr} = S_\eta(t)_{sr} \\ f(T_{mi})_{\min} = S_\eta(t)_{\min} \end{array} \right]$$

$$2) \text{ Korelacija } K_2 = \left[\begin{array}{l} f(\bar{z})_{\max} = S_\eta(t)_{\max} \\ f(\bar{z})_{opt} = S_\eta(t)_{opt} \\ f(\bar{z})_{sr} = S_\eta(t)_{sr} \\ f(\bar{z})_{\min} = S_\eta(t)_{\min} \end{array} \right]$$

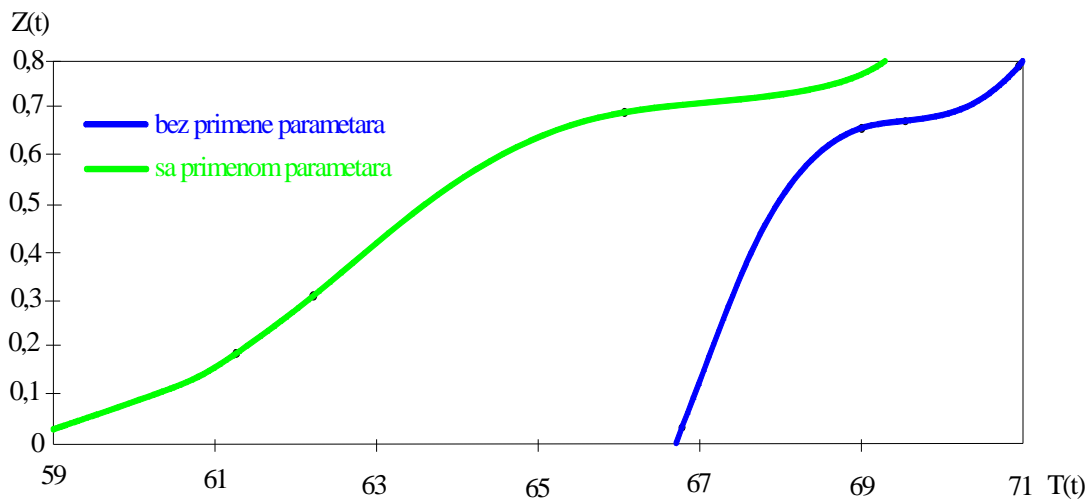
$$3) \text{ Korelacija } K_3 = \left[\begin{array}{l} T_{mi} = f(\bar{z})_{\max} \\ T_{mi} = f(\bar{z})_{opt} \\ T_{mi} = f(\bar{z})_{sr} \\ T_{mi} = f(\bar{z})_{\min} \end{array} \right]$$



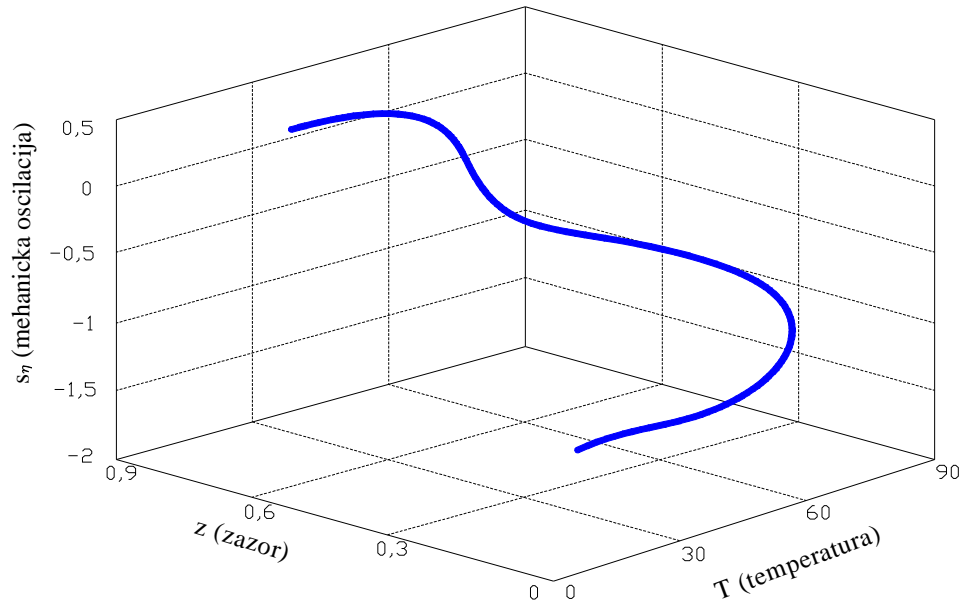
Slika 6.17. Dijagram zavisnosti korelacije mehaničkih oscilacija i temperature sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane



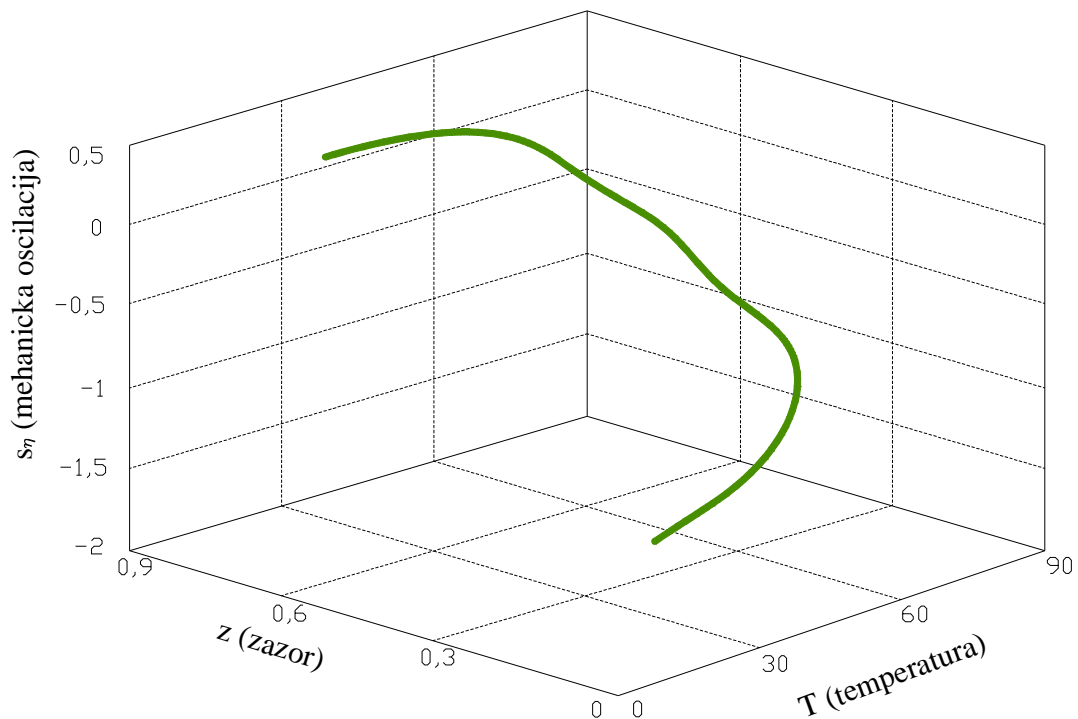
Slika 6.18. Dijagram zavisnosti korelacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležaja sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane



Slika 6.19. Dijagram zavisnosti korelacije pohabanosti ležaja i temperature sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane



Slika 6.20. Dijagram zavisnosti korelacije mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane



Slika 6.21. Dijagram zavisnosti korelacije mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležaja sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane

6.6. PREDNOSTI I MANE UNIVERZALNOG MODELA OPTIMIZACIJE PRIMENOM POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE HIDROELEKTRANA

Primenjeni model predstavlja dinamičko-statistički, integralni i matematički postupak koji omogućava optimalno dinamičko upravljanje procesima promene stanja komponenti i održavanja sklopova hidroelektrane. Temelji se na analizi parametara optimizacije prema stanju i daje određene uslove pri radu komponenti sklopova. Takođe, na bazi relevantnih informacija potrebnih za prenošenje odluka o dinamici i obimu rada komponenti sklopova hidroelektrane.

U ovom slučaju obuhvaćen je rad sastavnih komponenti koje su izložene apsolutnoj i relativnoj vibraciji, temperaturi i pohabanosti ležaja bez primene i sa primenom parametra optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

Izbor modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane je poseban problem preventivnijeg održavanja, koji ima više komponenti sklopova podložnih otkazima, izrazito stohastičkog karaktera. Da bi ovaj problem mogao uspešno i dovoljno jednostavno da se reši, razvijen je univerzalni model na osnovu izbora parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Model je zasnovan na realnoj situaciji stohastičke promene parametara stanja komponenti hidroelektrane, pod dejstvom različitih poremećaja i njihove vrednosti se nalaze izvan dozvoljenih odstupanja. Predstavljene su funkcijom pouzdanosti koja traži optimalno dinamičko rešenje i upravljanje procesima promene stanja komponenti. Takođe, primenom preventivnog odražavanja na bazi pouzdanosti i gotovosti komponenti.

Osnovni cilj modela je da se na osnovu organizovanog praćenja promene parametara stanja odredi stanje sastavnih komponenti hidroelektrane i da se na osnovu tako dobijenih vrednosti odredi periodičnost provere parametara stanja komponenti kao i vremenski trenutak sprovođenja postupka preventivnog održavanja sklopova hidroelektrane.

Analizom parametara koji su obuhvatili promenu zazora, smanjuje se uticaj mehaničkih oscilacija, što je objašnjeno detaljnije u poglavljima 5, 6 i 7. Takođe, parametri optimizacije smanjuju uticaj mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva, a odnose se na promenu kvaliteta površina polumeseca bez primene parametara optimizacije. Površina je bila u kvalitetu obrade IT 7, a sa primenom parametara optimizacije promenjen je kvalitet obrade IT 6 (tuširanjem površine polumeseca).

Primena parametara koji je smanjio uticaj radnih temperatura obuhvatio je svakodnevnu promenu kontrole viskoznosti ulja i obuhvatio je recikliranje (filtriranje, obogaćivanje aditivima) i to na svakih 6000 radnih sati hidroelektrane, a bez primene ovih parametara optimizacije recikliranje se vrši na 8000 radnih sati.

Na slici 2.1. dati su uzroci otkaza pojedinih komponenti HE "Vrla -3" Surdulica, usled uticaja mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Takođe, uzroke pojave otkaza sastavnih komponenti analiziranih sklopova, a na osnovu kojih se mogu predvideti postupci primene parametara stanja komponenti. Otkazi koji su evidentirani nisu obuhvatili sve nabrojane otkaze u stablu otkaza, već su zabeleženi isključivo na sastavnim komponentama N_4 , N_6 , i N_7 , pa se na tim komponentama nalaze merna mesta, a te iste su najopterećenije u radu hidroelektrane.

Rezultati broja otkaza slabih mesta koji se dobijaju u eksploatacionim uslovima, poslužiće u analizi sigurnosti funkcionisanja rada analiziranih komponenti sklopova kao i u određivanju njihovih karakteristika pouzdanosti što je prikazano (detaljnije u poglavlju 4).

Osnova modela je da se na osnovu poznatih zakonitosti promene parametara stanja, izmerenih vrednosti parametara poznatih karakteristika pouzdanosti sastavnih komponenti sklopova i dobijenih izlaznih vrednosti reši:

- kada treba sprovesti odgovarajuće postupke da bi se obezbedio zadnji nivo pouzdanosti komponenta,
- kada treba vršiti pregled stanja komponenta.

Ovo podrazumeva da se u okviru univerzalnog modela optimalizacije postupaka tehničke dijagnostike mora što bolje opisati struktura komponenti hidroelektrane, iskazujući zakonitosti promene parametara stanja komponenta i njihove stvarne prednosti i mane.

Prednosti primenjenog univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane su:

- opisuje i prati dinamiku statističkih procesa promene parametara stanja komponenti u funkciji vremena rada hidroelektrane,
- model je optimalan i integralan jer predstavlja sistem rada komponenti po vremenu, čije izlazne karakteristike omogućavaju optimalno upravljanje procesima promene stanja komponenti u smislu optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, pouzdanosti, gotovosti i drugih performansi stanja komponenti,
- obezbeđuje zahtevani nivo pouzdanosti komponenti hidroelektrane u celokupnom životnom veku,
- vrši praćenje promena identifikovanih parametara stanja sklopova i uvid u stanje sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane,
- preventivna podešavanja radi sprečavanja otkaza i zamene komponenti koje su podložne habanju, starenju i sl.,
- obezbeđuje stanje u radu bilo koje komponente sklopa hidroelektrane i dr.,
- poznati su zakoni verovatnoće kojima se pokrivaju promene parametara stanja komponenti i menjaju se u funkciji vremena rada hidroelektrane,
- definisani su parametri stanja i menjaju se u funkciji vremena rada komponenti hidroelektrane,

- na bazi ispitivanja stanja komponenti utvrđeni su koeficijenti iz jedinične promene stanja i potrebne vrednosti parametra stanja komponenti,
- izabrani dijagnostički parametri u potpunosti odgovaraju parametrima stanja komponenti i zadovoljavaju statističke zahteve (npr. brzinu dijagnostike, informativnost, stabilnost, osetljivost, objektivnost, itd.).

Mane primenjenog univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane su:

- određena pouzdanost u funkciji sigurnosti u eksploataciji sastavnih komponenti,
- utvrđivanje zakona raspodele vremena rada do otkaza sastavnih komponenti hidroelektrane,
- unutrašnje stanje može da se ocenjuje nekim prognostičkim parametrom, koji je slučajan, menja se u funkciji vremena,
- slučajni otkazi se događaju sa verovatnoćom pojave u zavisnosti od vrednosti pojedinih parametara stanja komponenti.

Definisanje univerzalnog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, predstavlja proces promene stanja komponenti koji je osetljiv i složen. Takođe, treba da bude tačan, tj. treba da obuhvati sve bitne uticajne parametre i realne dobijene vrednosti koje daju karakteristiku optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Modelom se rešava složen stohastički proces promene parametara stanja komponenti hidroelektane.

Primena novog univerzalnog optimalnog modela daje određenu vrednost stanja komponenti sklopova hidroelektrane i predstavlja optimum korišćenja bez nastanka otkaza u odnosu na postojeće metode i parametre. Takođe, pokazuje verovatnoću stanja rada komponenti pri određenim vrednostima koje nisu kvantitativno definisane sa vrednošću datih parametara i sa pojavom češćih otkaza.

6.7. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Empirijska istraživanja su obuhvatila u prvom delu formiranja model blok dijagrama pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija – vibracija. Najpre su objašnjene karakteristike uređaja za merenje mehaničkih vibracija, a zatim se pristupilo matematičkoj formi određivanja konačnog izraza univerzalne jednačine optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u određivanju zavisnosti merodavne pouzdanosti nivoa amplituda i kružnih frekvencija.

Model obuhvata analizu podmodela 1, 2 i 3 (prikaz na slici 6.2.) i uvođenje korelacionih zavisnosti smenom η_1 i η_2 , unošenja vrednosti amplituda oscilovanja i frekvenci. Takođe, određene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine $S_\eta(t)_{\max}$, $S_\eta(t)_{\min}$, $S_\eta(t)_{sr}$, $S_\eta(t)_{opt}$, bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i vrednosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike komponenti hidroelektrane $S_\eta(t)_{\max p}$, $S_\eta(t)_{\min p}$, $S_\eta(t)_{srp}$, $S_\eta(t)_{optp}$.

Na izabranim mernim mestima sklopova hidroelektrane, a na osnovu ovih vrednosti konstruisan je dijagram (slika 6.3.) $S_\eta(t) = f(\eta_i(t), \omega_i(t), A_i(t))$ i dijagram (prikaz na slici 6.4.) $S_\eta(t)_p = f(\eta_i(t)_p, \omega_i(t)_p, A_i(t)_p)$ na kojima su jasno definisane oblasti optimizacije sa parametrima pouzdanosti mehaničkih oscilacija u zavisnosti od dobijenih vrednosti rešenja univerzalne jednačine.

Dalja analiza je obuhvatila određivanja ekstremnih vrednosti radnih temperatura ležajeva i njenu optimizaciju. Pošlo se od ekstremnih ispitivanja i merenja radnih temperatura ležajeva na mernim mestima (detaljnije u poglavlju 6, tabela 6.3.).

Na osnovu eksploatacionih podataka utvrđenih ekstremnih vrednosti radnih temperatura ležajeva formiran je interval statističkog skupa ($68^\circ\text{C} \leq T_i \leq 71^\circ\text{C}$) i određeni pokazatelji eksploatacione raspodele (tabela 6.4.). Takođe, određene su numeričke statističke karakteristike eksploatacionih podataka i izvršen tabelarni prikaz linearizacije Gaus-ovom raspedelom $F(t)$, (tabela 6.5.).

Metodom najmanjih kvadrata za funkciju raspodele konstruisan je dijagram položaja teorijske prave i eksperimentalnih tačaka uzoraka pri kontroli odstupanja radnih temperatura u ležajevima (prikaz na slici 6.5. i tabela 6.6.). Takođe, sprovedena je ocena sposobnosti provere parametara tehničke dijagnostike pri merenju temperature. Nakon toga se vrši konstrukcija dijagrama promene parametara stanja komponenti pri eksploatacionoj funkciji raspodele odstupanja temperature ležajeva (prikaz na slici 6.6.).

Na osnovu ovih dijagrama određen je kvalitet okvirne optimizacije koji je definisao granice:

- sigurnog i ispravnog rada ležajeva,
- optimalnog rada ležajeva,
- oblasti rizika.

Ove okvirne oblasti su prikazane u tabeli 6.7. i na slici 6.7. i na osnovu njih su određene ekstremne vrednosti temperature ležajeva bez primene parametara optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Dalja analiza obuhvata određivanje ekstremnih vrednosti parametara tehničke dijagnostike – radnih temperatura sa postupcima optimizacije. Na osnovu izmerenih vrednosti odstupanja temperatura ležajeva, određeni su grupni intervali radnih temperatura, koristeći Weibull-ovu raspodelu. Takođe, ovde su određene oblasti sigurnog, optimalnog rada i rizika. Na osnovu ovih oblasti određene su ekstremne vrednosti radnih temperatura

$(T_{mip}, T_{max p}, T_{srp}, T_{optp})$.

Kao treći parametar optimizacije postupaka tehničke dijagnostike uzeta je analiza pohabanosti ležajeva sa zabeleženim otkazima na mernim sklopovima hidroelektrane (tabele 6.14. i 6.15.) i to bez primene parametara optimizacije zabeležene su vrednosti unutrašnjih prečnika ležajeva.

Na osnovu aritmetičkih sredina i idealne vrednosti zazora određene su njegove ekstremne vrednosti. One su poslužile kao početni parametri Weibull-ove raspodele za određivanje merodavnih zazora kao i za određivanje oblasti sigurnog, ispravnog rada i oblasti rizika (tabela 6.19.).

Slična procedura je korišćena i za određivanje merodavnih zazora pri određivanju pohabanosti ležajeva sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Određene su oblasti rada ležajeva korišćenjem ekstremne standardne devijacije i merodavnih zazora.

Od 25.08. 1998. god. do 30.08. 2003. god. dolazi do intezivnog rasta otkaza usled pohabanosti ležajeva, tj. bez primene parametara optimizacije, za ovaj period može reći da je period njihovog nestabilnog rada, što procentualno iznosi 37,8%. Uvođenjem univerzalnog modela sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u periodu od 30.08. 2003. god. do 28.08. 2007. god. dolazi do smanjenja pojave otkaza, tj. na osnovu njega određiće se vrednosti merodavnih zazora, procentualno 11,2%.

Imajući sve ekstremne vrednosti parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pristupa se u izradi rezultujućeg modela. Određuju se korelacije koje su definisane u algoritmu metodologije optimizacije - univerzalni model optimizacije (prikaz na slici 5.1.).

Matematička zavisnost korelacija je postavljena formiranjem kvadratnih determinanti oblika 3×3 sa koeficijentima korelacije. Rešavanjem opšteg oblika determinanti $K(t)$ dobijen je konačni izraz za određivanje zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije tehničke dijagnostike.

S obzirom da je kriva prostorna, a za analizu su bile neophodne ravanske krive zavisnosti korelacija, iste su određene pomoću podprograma koji je formiran na osnovu matematičkog programa MATLAB 6.5. (prikaz na slici 6.20. i 6.21.). Na istim dijagramima su uvek prikazane po dve ravanske krive korelacije i to jedna bez primene, a druga sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Dijagram na slici 6.17. predstavlja vrednost zavisnosti korelacija mehaničkih oscilacija i temperature, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom temperature intervala $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$ i mehaničkih oscilacija $-1,2 \div 0,311$).

Dijagram prikazan na slici 6.18. predstavlja vrednost zavisnosti korelacija mehaničkih oscilacija i zazora usled pohabanosti ležaja, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom zazora $0,272 \div 0,737$ i mehaničkih oscilacija $-1,2 \div 0,311$).

Dijagram prikazan na slici 6.19. predstavlja vrednost zavisnosti korelacija zazora usled pohabanosti ležaja i temperature, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom temperature intervala $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$ i zazora $0,272 \div 0,737$).

Na slikama 6.20. i 6.21. prikazane su krive zavisnosti korelacija u prostoru koje su ovuhvatile određene vrednosti parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike radnih temperatura, mehaničkih oscilacija i pohabanost ležaja sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka. Takođe, na osnovu ovih parametara određene su ekstremne vrednosti mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva.

7.0. PREZENTOVANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA OPTIMIZACIJE POSTUPAKA TEHNIČKE DIJAGNOSTIKE

7.1. ZABELEŽENE VREDNOSTI AMPLITUDA I FREKFENCI MEHANIČKIH OSCILACIJA PREMA MERNIM MESTIMA HIDROELEKTRANE

Metodološki pristup merenja apsolutnih vibracija sastoji se u simultantnom zapisivanju analognih mernih veličina u frekventnom domenu. Korišćenje oprema za merenje apsolutnih vibracija na izabranim mernim mestima sastoji se iz sledećeg mernog lanca i to:

- bez kontaktnog davača Kaman Measuring Systems, KD-2000/2S, SAD,
- analizator merenja vibracija Brul el Kjaer, Danska, baziran na piezoelektričnim pretvaračima tipa 4382 i pojačivačima tipa 2635.

Merenja apsolutnih vibracija vršena su pri ustaljenom režimu rada komponenti hidroelektrane u vremenskom trajanju od 5 minuta nakon čega se pristupilo zapisivanju mernog signala.

Rezultati ispitivanja prikazani su u frekventnom domenu $0 \div 50$ Hz. Merna mesta su izabrana i utvrđena na osnovu komponenti hidroelektrane i to:

Merno mesto 1 - obuhvatilo je sklop koji se ponaša u paralelnoj sprezi i to turbinskog ležaja N_7 , ugljenog zaptivača N_8 i radnog kola N_9 . Lokacija tačka merenja se nalazi na sredini visine kućišta turbinskog ležaja.

Merno mesto 2 – je izabrano tako da se nalazi na pola visine od kućišta donjeg vodećeg ležaja N_6 .

Merno mesto 3 - je izabrano tako da se nalazi na pola visine od gornjeg vodećeg ležaja N_4 .

Merenja su sprovedena za tri karakteristična slučaja različitih snaga hidroelektrane i to:

- **slučaj 1**, $P_A = 0,6P_{\max}$,
- **slučaj 2**, $P_A = 0,8P_{\max}$,
- **slučaj 3**, $P_A = 1,0P_{\max}$.

Dijagrami zavisnosti – mapa apsolutnih vibracija pomeranja i dijagrami frekventnih spektara brzine vibracija $A = f(f)$ su zabeležene ekstremne veličine vibracija za dva karakteristična slučaja i to:

- ekstremne vrednosti amplituda $A_i(t)$ i $f_i(t)$ za slučaj bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane,
- ekstremne vrednosti amplituda $A_i(t)_p$ i $f_i(t)_p$ za slučaj sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Vrednosti frekvenci su takođe jednake za sva tri analizirana ležaja i iznose:

$$f_i \max = 50 [Hz]$$

$$f_i \text{opt} = 10,3 [Hz]$$

$$f_i \text{sr} = 10,125 [Hz]$$

$$f_i \min = 0,4772 [Hz]$$

Vrednosti amplituda i frekvenci oscilovanja sastavnih komponenti hidroelektrane dobijene merenjem na izabranim mernim mestima su sledeće:

1. Turbinski vodeći ležaj (N₇):

$$A_{N_7}(t)_{N_7 \max} = 163,185 [\mu m/s]$$

$$A_{N_7}(t)_{N_7 \min} = 106 [\mu m/s]$$

$$A_{N_7}(t)_{N_7 \text{sr}} = \frac{163,185 + 106}{2} = 121,092 [\mu m/s]$$

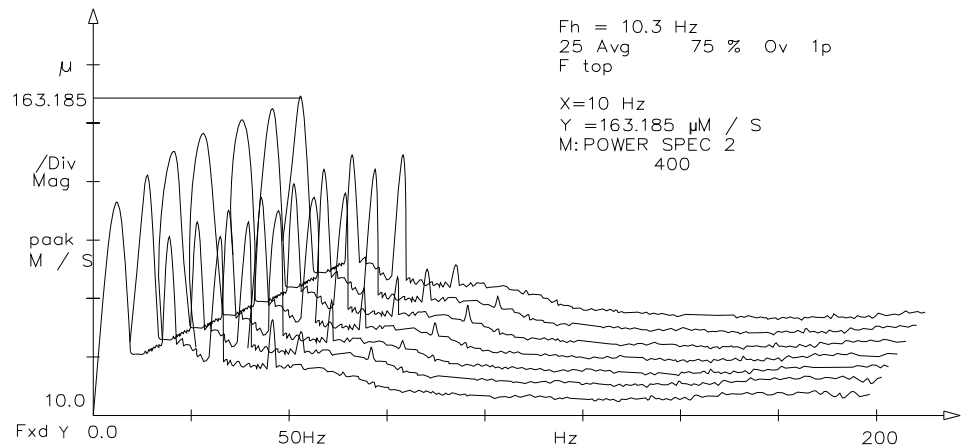
$$A_{N_7}(t)_{N_7 \text{opt}} = 0,75\% A_{N_7}(t)_{N_7 \max} = 122,39 [\mu m/s]$$

Dijagrami su prikazani na slikama 7.1. - 7.12. sa njih su očitane ekstremne vrednosti tabela 7.1., a upoređivanjem dijagrama jasno se zaključuje da su dijagrami gotovo identični i da ekstremne vrednosti važe za sva tri merna mesta.

Bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike		Sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike	
Vrednosti amplituda oscilovanja		Vrednosti amplituda oscilovanja	
$A_i(t)_{\max}$	163,185	$A_i(t)_{\max p}$	121,8
$A_i(t)_{\min}$	106	$A_i(t)_{\min p}$	98,4
$A_i(t)_{\text{opt}}$	121,092	$A_i(t)_{\text{opt}p}$	115,26
$A_i(t)_{\text{sr}}$	122,39	$A_i(t)_{\text{sr}p}$	110,1
Vrednosti frekvenci oscilovanja		Vrednosti frekvenci oscilovanja	
$f_i(t)_{\max}$	50	$f_i(t)_{\max p}$	50
$f_i(t)_{\min}$	10,3	$f_i(t)_{\min p}$	8,25
$f_i(t)_{\text{opt}}$	10,125	$f_i(t)_{\text{opt}p}$	7,9
$f_i(t)_{\text{sr}}$	0,4772	$f_i(t)_{\text{sr}p}$	0,2

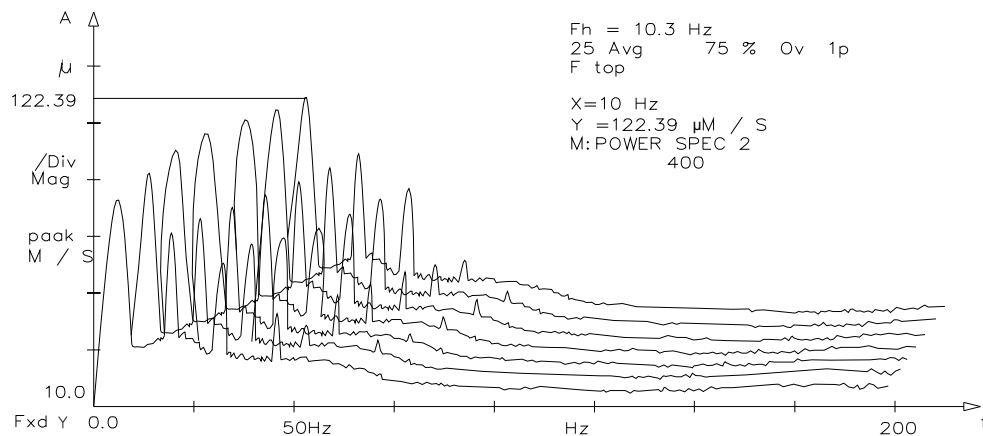
Tabela 7.1. Zabeležene ekstremne vrednosti mehaničkih oscilacija HE "Vrla -3" Surdulica

Ekstremne vrednosti su nastale empirijskom analizom vrednosti zabeleženih merenja u iznosu od 160 merenja. Takođe, pod parametrom optimizacije kojim se smanjio nivo amplituda mehaničkih oscilacija je kvalitet površine polumeseca kao što je i ranije rečeno, (detaljnije u poglavlju 6).



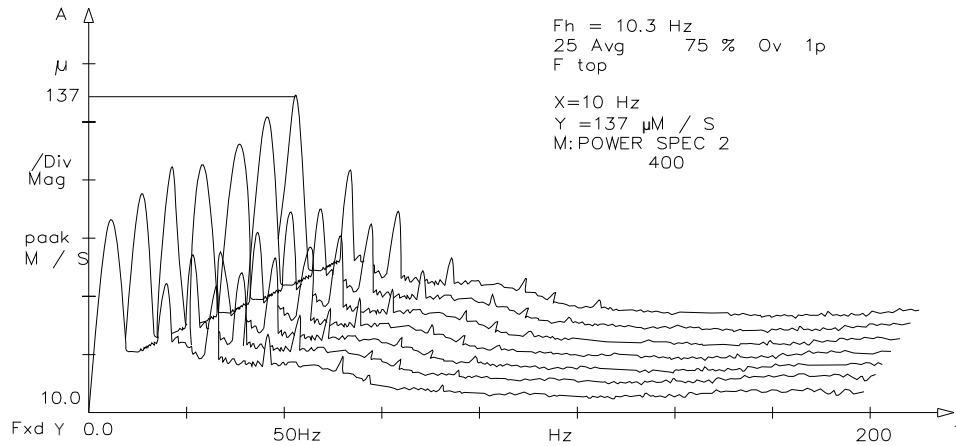
Slika 7.1. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) bez primene parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

- VRLA 3
- Agregat A
- Merno mesto 1
 - Turbinski vodeci ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Agregat na mreži, $P_A = 7.8$ MW, $P_R = 3.5$ MVar



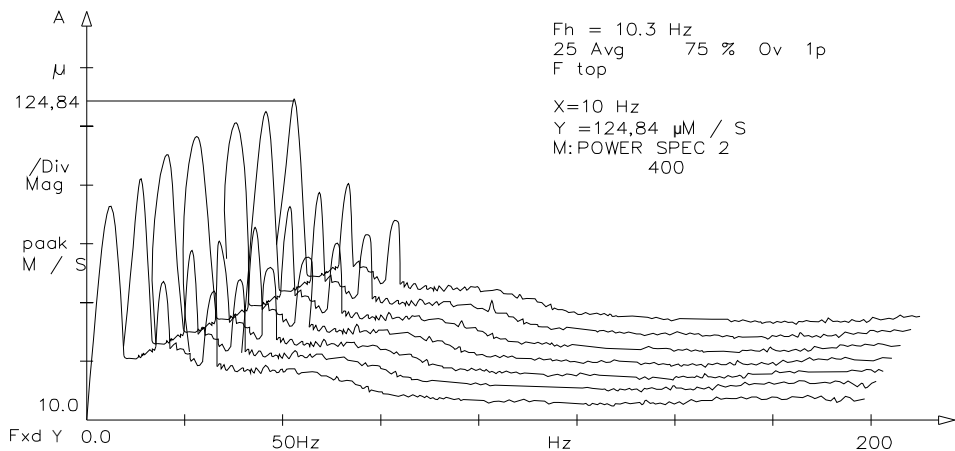
Slika 7.2. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) bez primene parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

- VRLA 3
- Agregat A
- Merno mesto 2
 - Donji generatorski ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Agregat na mreži, $P_A = 10.4$ MW, $P_R = 3.5$ MVar



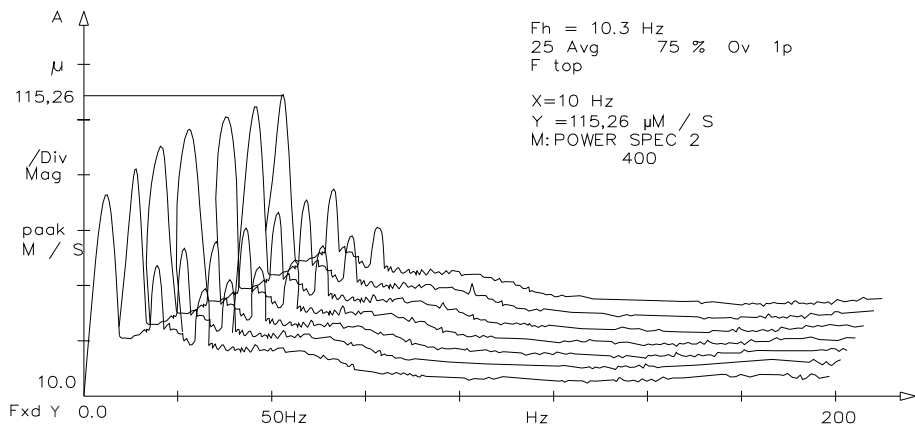
Slika 7.3. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) bez primene parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

- Đerdap II
- Agregat A
- Merno mesto 3
 - Gornji generatorski ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Prazan hod pobuden
 - Agregat na mreži, $P_A = 25$ MW, $P_R = 9.5$ MVar



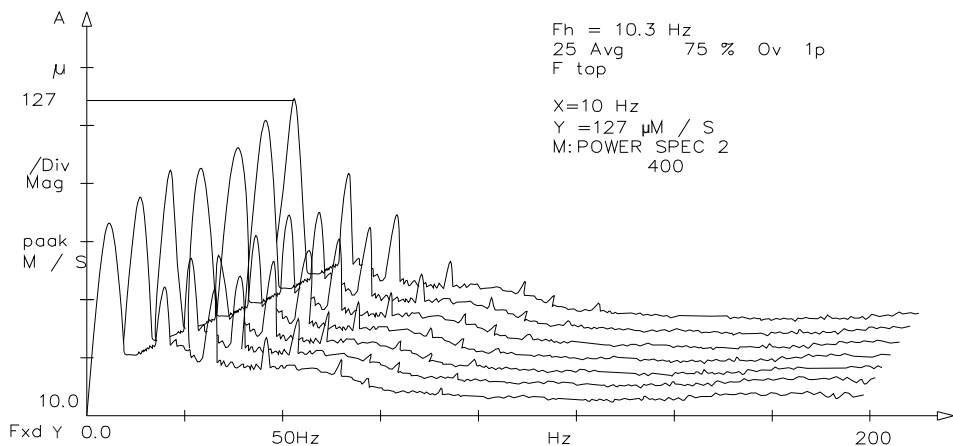
Slika 7.4. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) sa primenom parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

- VRLA 3
- Agregat A
- Merno mesto 1
 - Turbinski ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Prazan hod pobuden
 - Agregat na mreži, $P_A = 7.8$ MW, $P_R = 3.5$ MVar



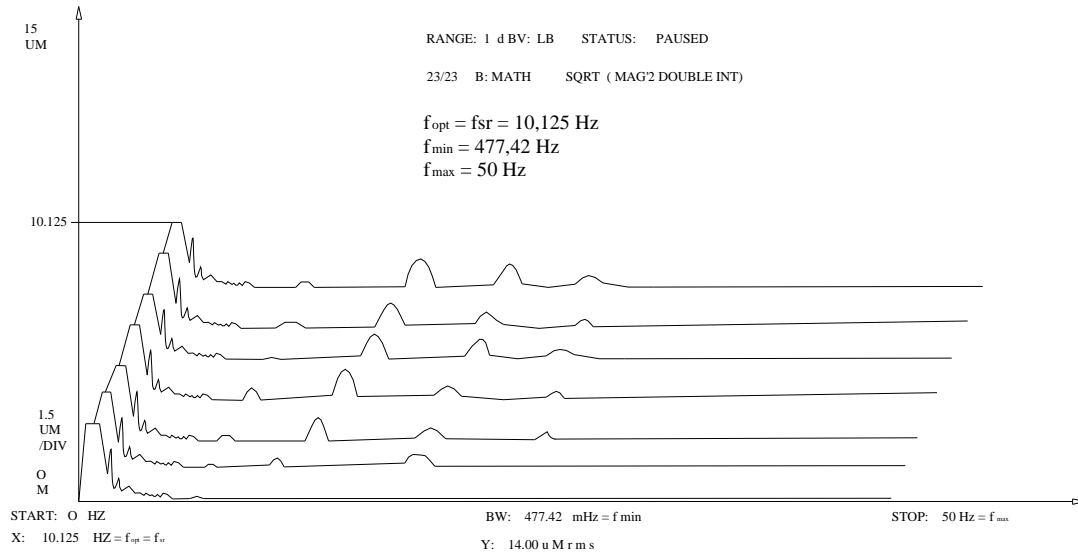
Slika 7.5. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) sa primenom parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

- VRLA 3
- Agregat A
- Merno mesto 2
 - Donji generatorski ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Prazan hod pobuden
 - Agregat na mreži, $P_A = 10,4$ MW, $P_R = 3,5$ MVar

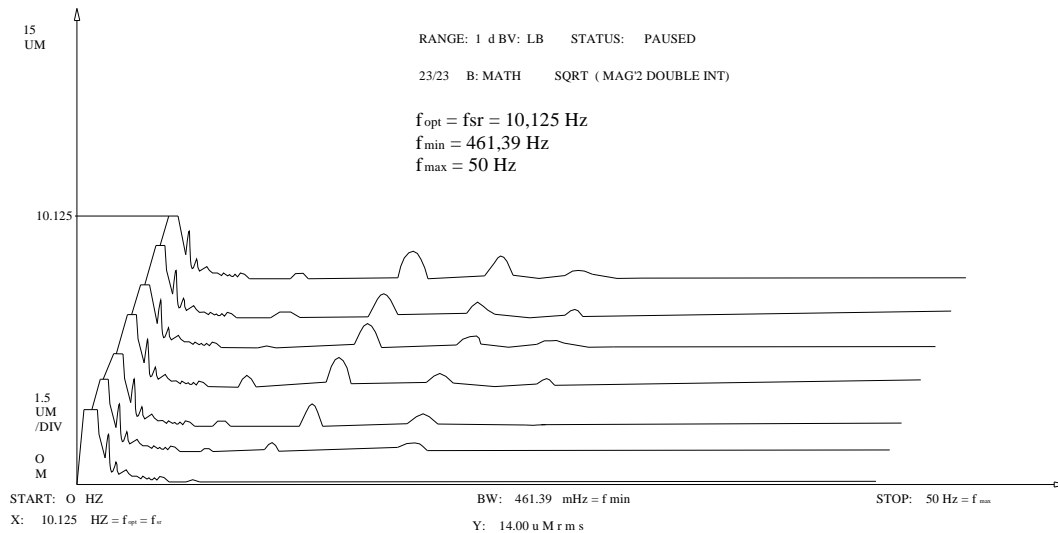


Slika 7.3. Frekventni spektari vibracija pomeraja (a) i brzine vibracija (b) sa primenom parametra optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike

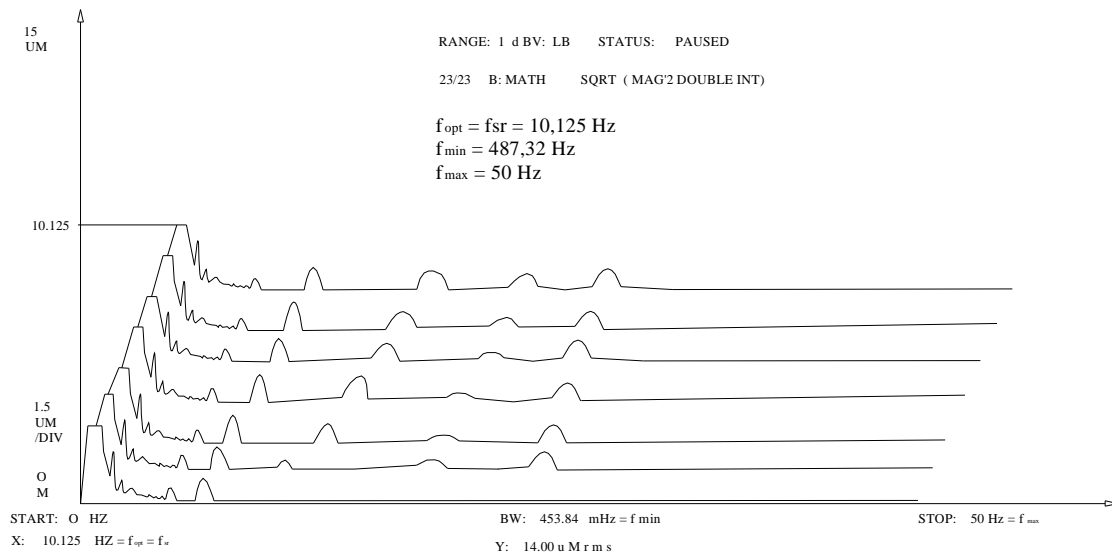
- Đerdap II
- Agregat A
- Merno mesto 2
 - Gornji generatorski ležaj
- Merni pravac A
- Režim rada
 - Prazan hod nepobuden, $n = 600$ ob./min.
 - Prazan hod pobuden
 - Agregat na mreži, $P_A = 25$ MW, $P_R = 9,5$ MVar



Slika 7.7. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja bez primene parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane
 - VRLA 3/Agreat-A
 - Turbinski ležaj, (Merno mesto - 1 - zona)
 - Startovanje agregata

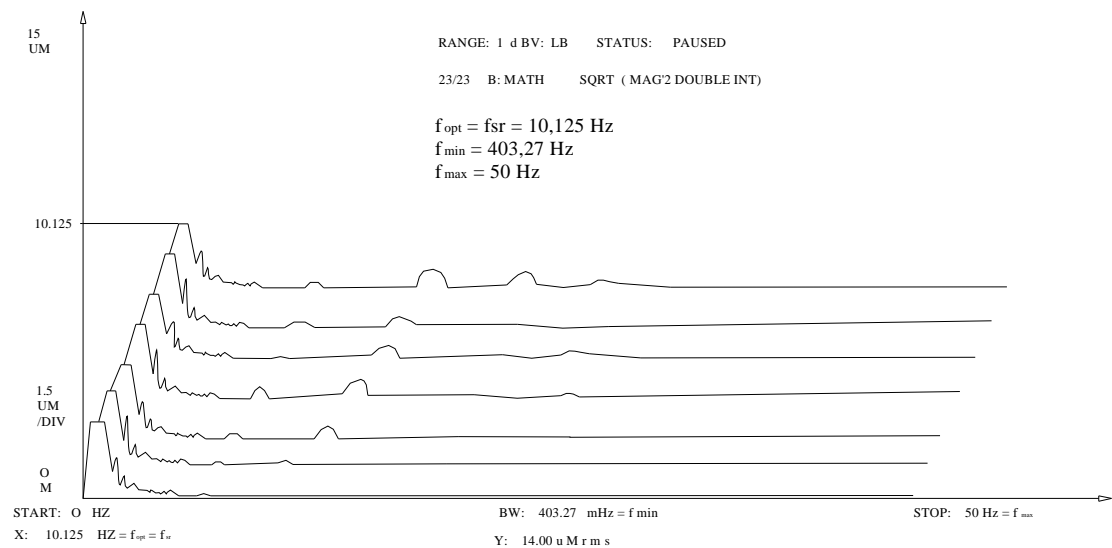


Slika 7.8. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja bez primene parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane
 - VRLA 3/Agreat-A
 - Generatorski ležaj, (Merno mesto - 2 - zona)
 - Startovanje agregata



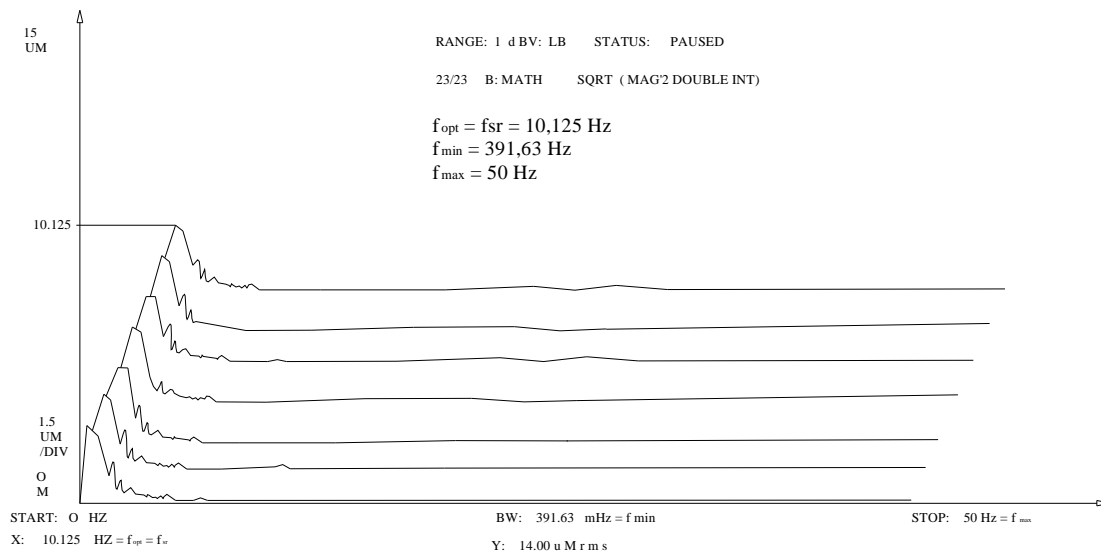
Slika 7.9. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja bez primene parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane

- Đerdap II/Agreat-A
- Gornji generatorski ležaj, (Merno mesto - 3 - zona)
- Startovanje agregata



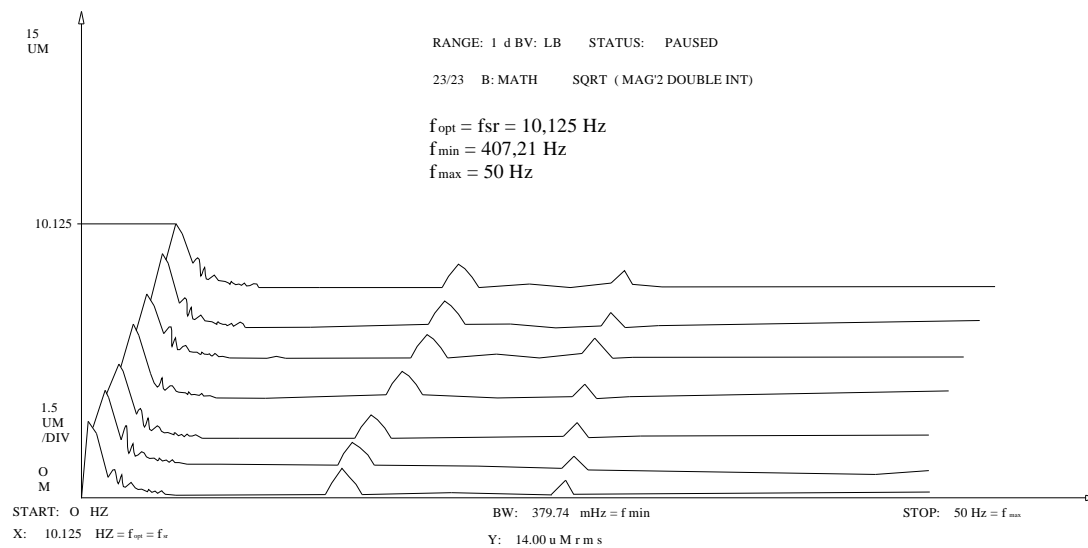
Slika 7.10. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja sa primenom parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane

- VRLA 3/Agreat-A
- Donji generatorski ležaj, (Merno mesto - 1 - zona)
- Startovanje agregata



Slika 7.11. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja sa primenom parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane

- VRLA 3/Agregat-A
- Donji generatorski ležaj, (Merno mesto - 2 - zona)
- Startovanje agregata



Slika 7.12. Trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeraja sa primenom parametara optimizacije postupaka tehnicke dijagnostike hidroelektrane

- Đerdap II/Agregat-A
- Gornji generatorski ležaj, (Merno mesto - 3 - zona)
- Startovanje agregata

Pored vremenskih funkcija, frekventnih spektara relativne vibracije su prikazane u formi obrtnog dijagrama putanje ose vratila, na slikama 7.1. ÷ 7.6. Na slikama 7.7. ÷ 7.12. su prikazana trodimenzionalna mapa apsolutnih vibracija pomeranja, tj. startovanja i zaustavljanja agregata.

Mehaničke oscilacije na donjem vodećem ležaju N_6 i gornjem vodećem ležaju N_4 agregata - A, HE "Vrla -3" Surdulica su relativno visoke, $A_i(t)_{op} = 121,092 \div 163,185 [\mu m / s]$, odgovaraju amplitudama turbinskog ležaja prikazano na slikama 7.1. ÷ 7.6, što ukazuje da amplitude približno rastu sa kvadratom broja obrtaja, tj. apsolutnih mehaničkih oscilacija koje su vezane za geometriju vratila.

Na osnovu prikazanih dijagrama relativne i apsolutne vibracije date su vrednosno na osnovu modela (detaljnije u poglavlju 5.2. i 6.2.) mogućnosti optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, pojedinih mernih mesta na vratilama agregata.

Primenom univerzalnog modela mogu se prikazati vrednosti vremenskih funkcija i frekventni spektar mehaničkih oscilacija vratila. Mehaničke oscilacije vratila su zabeležene na datom agregatu u zavisnosti od njegove snage i merene su u tri različite tačke (prikazi na slikama 7.1. ÷ 7.12.).

Na osnovu napred izloženog, a polazeći od detaljno prikazanih rezultata u prilogu P.21 ÷ P.26 – dobijene su vrednosti amplituda u zavisnosti od vremena rada (t) analiziranih sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica i "Đerdap II" Kladovo. Takođe, na tačno definisanim mernim mestima u eksploatacionom periodu rada sa dozvoljenim rizikom – primenom optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja za (λ_{max}) izvedenog ispitivanja HE "Vrla -3" Surdulica, prikazani na slikama 7.1. ÷ 7.12., mogu se izvući sledeći zaključci:

- ispitivanjem vibracionog stanja obuhvaćene su sve komponente sklopova hidroelektrane koje su sastavni deo hidroenergetskog sistema HE "Vrla -3" Surdulica, koji predstavljaju pokazatelje pojave otkaza u datom vremenskom periodu,
- ispitivanja su izvedena sa osnovnim ciljem da se na bazi snimljene vibracione slike agregata putem univerzalnog modela dobije širi presek njihovog osnovnog dinamičkog stanja,
- zbog relativno velikog broja komponenata sklopova izvršen je program ispitivanja i on je razvrstan po radnim mestima kao i u zavisnosti od broja obrtaja gde treba proveriti određene parametre stanja koji utiču na optimizaciju dijagnostike hidroelektrane,
- ispitivanja su izvedena na više režima ustaljenog i neustaljenog rada komponenti sklopa sa odgovarajućim režimima rada, sa razlogom poboljšanja i otkrivanja pojave otkaza, a u cilju pouzdanijeg rada.

Merenjem su obuhvaćeni sledeći režimi neustaljenog rada komponenti sklopa, sa ciljem optimizacije tehničke dijagnostike i odgovarajućih parametara stanja koja utiču na:

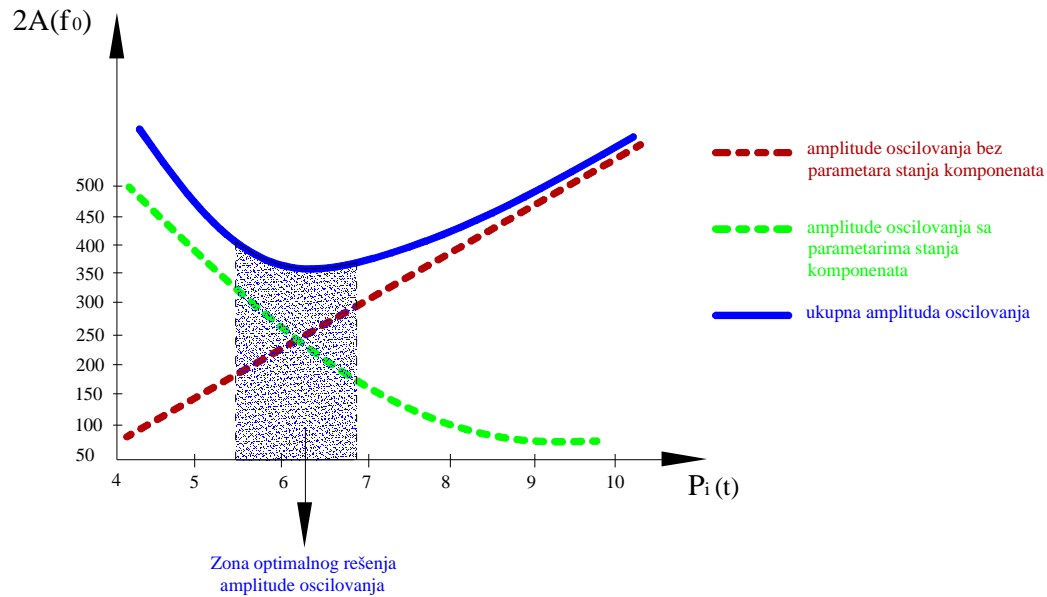
- startovanje komponenti sklopova,
- zaustavljanje / zbacivanje snage,

- rezultate merenja u neustaljenim režimima rada (tabela P.21. ÷ P.26.) koji su dati u vremenskom domenu sa dopunjenim tabelarnim prikazom (u pilogu rada). Tabele su organizovane po pojedinim mernim mestima, mernim pravcima i režimima rada,
- dobijene rezultate koji su upoređeni sa vrednostima propisanim u raspoloživim normativnim dokumentima koji se odnose na ovakvu vrstu hidroelektrana i na bazi toga su izvedene ocene postojećeg stanja, što se može videti iz analiza dobijenih rezultata i propisanih vrednosti iz tabela P.21 ÷ P.26 u prilogu,
- relativne vibracije vratila izmerene na HE "Vrla -3, A" Surdulica kojesu relativno velike (videti ocenu stanja – nezadovoljavajuće, max.). Izmerena vrednost je $(A_i(t))_{\max} = 163,185 [\mu m / s]$ zona generatorskog ležaja, a na drugom $A_i(t)_{op} = 121,092 [\mu m / s]$ (zona turbinskog vodećeg ležaja). Na oba ležaja treba proveriti veličine zazora i izvršiti korekciju na njima,
- stanje turbinskog ležaja koje je uglavnom dobro. Na slikama 7.9. do 7.12. su dat šest alternativne varijante u odnosu na koje su ocenjivane mehaničke oscilacije stanja komponenti sklopova. Ocena je dovedena u vezu sa izmerenim efektivnim vrednostima mehaničke oscilacije pomeraja vratila pri radnom hodu i maksimalnim padom,
- stanje nosećih aksijalnih ležajeva koje je prikazano u priloženim tabelama i uporednim dijagramima. U elektranama dominantan uticaj ima osnovna komponenta po broju obrta, a prisutan je i prvi harmonik osnovne komponente što je u direktnoj vezi sa ranije pomenutom, nesimetričnosi vratila. Komponente izložene mehaničkim oscilacijama $A_i(t)_{\max} [\mu m / s]$ u potpunosti određuju stanje ležajeva sa dve varijante i to sa primenom i bez primene prametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane,
- prezentaciju relativnih mehaničkih oscilacija vratila koja je paralelno data u formi vremenske funkcije, frekventnih spektara i obrtnih trajektorija putanje ose vratila. Apsolutne mehaničke vibracije su date u frekventnom domenu sa paralelnim prikazom rezultata u formi pomeranja i brzine. Brzina mehaničkih oscilacija $A_i(t)_{\max} [\mu m / s]$ je data u cilju pouzdanije komparacije sadašnjih i budućih rezultata.

Poređenje izmerenih i propisanih vrednosti ima poseban značaj u oceni stanja optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Na osnovu dobijenih rezultata izvršena su upoređenja sa propisanim vrednostima. Upotrebom modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike izvršena su značajnija upoređenja matematičkog i eksploatacionog istraživanja što predstavlja optimum određivanja stanja hidroelektrane i njenih komponentata.

Poseban problem je što danas u svetu ne postoje jedinstveni standardi za ocenu i kategorizaciju mehaničkih oscilacija stanja komponenti sklopova hidroelektrane, već su to u najvećem broju slučajeva različite preporuke, koje ocenu vibracionog stanja dovode u vezu sa različitim parametrima kao što su: prečnik radnog kola, broj obrtaja i veličina pada. Zbog relativno malog broja obrtaja, koji najčešće iznosi $600 \text{ }^{\circ}/\text{min}$, na ovu vrstu agregata po pravilu je nemoguće primeniti klasične standarde za ocenu vibracionog stanja rotacionih agregata.

Na slici 7.13. je prikazano optimalno rešenje pri promeni pouzdanosti u funkciji amplitude oscilovanja upotrebom univerzalnog modela i parametara stanja komponenata. Njihovom upotrebom mogu se dobiti izlazni rezultati, a time praktično omogućiti konačno funkcionisanje analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane HE "Vrla -3" Surdulica, (prikaz u prilogu P. 11 i P. 12 - određivanje parametara $f_a(t)$, $\lambda_a(t)$, $P_a(t)$ za sastavne komponente sklopova HE "Vrla - 3" u Surdulici bez primene parametara stanja komponenti).



Slika 7.13. Dijagram zavisnosti promene pouzdanosti u funkciji amplitude oscilovanja pri upotrebi univerzalnog modela za odgovarajuća merna mesta

Merenjem kontrole mehaničkih oscilacija, tj. merenjem parametara slučajnih veličina na izabranim kontrolnim mestima, prikazane su vrednosti funkcija amplitude oscilovanja i vrednosti pouzdanosti. Ove vrednosti su prikazane za svaki signal na mernom mestu i to za odgovarajući redosled merenja (prikaz na slici 4.2.). Ovakav način predstavljanja za redosled merenja je najkorisniji jer on daje pravu sliku spektra nivoa oscilovanja te se na osnovu njihovih vrednosti oscilovanja predstavlja zavisnost amplitude od pouzdanosti.

Iz dobijenog dijagrama određene su veličine ekstremnih vrednosti amplituda. Ovako dobijene vrednosti zavisnosti korišćene su u određivanju kružnih brzina zavisnosti amplituda oscilovanja od frekvenci. Dobijene zavisnosti se unose u univerzalni optimalni model određivanja frekventnih sigurnosti rada analiziranih komponenti sklopova, odnosno kao bitni parametri bez kojih nije bilo moguće odrediti sigurnost funkcionisanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Primenom optimalnog univerzalnog modela u praktičnim uslovima do otkaza komponenti sklopova ne dolazi često ako se model pravilno primenjuje. Tako, na primer kod vratila generatora su unapred uočena oštećenja, tako da se imalo vremena za intervencije preventivnog održavanja pre nego što dođe do pojave otkaza.

7.2. ZABELEŽENE VREDNOSTI RADNIH TEMPERATURA PREMA MERNIM MESTIMA HIDROELEKTRANE

Korišćenje opreme za merenje temperature ležaja, tj. njegove košuljice polumeseca zavisi od sastavnih komponenti hidroelektrane i korišćena je na sledeći način:

- **merno mesto 1** – merenje temperature na turbinskom ležaju je izvršeno živinim termometrom sa dva radna kontakta, od kojih prvi daje signal kod porasta temperature iznad $+65^{\circ}\text{C}$ ($+75^{\circ}\text{C}$),
- **merno mesto 2** – merenje temperature je izvršeno na donjem vodećem ležaju N_6 pomoću živinog termometra sa dva radna kontakta, od kojih prvi daje signal kod porasta temperature $+55^{\circ}\text{C}$ ($+65^{\circ}\text{C}$), a drugi obustavlja rad turbine iznad $+65^{\circ}\text{C}$ ($+70^{\circ}\text{C}$),
- **merno mesto 3** – merenje temperature na gornjem vodećem ležaju N_4 je izvršeno živinim termometrom sa dva radna kontakta, od kojih prvi daje signal kod porasta temperature $+55^{\circ}\text{C}$, a drugi obustavlja rad turbine kod porasta temperature iznad $+60^{\circ}\text{C}$ ($+65^{\circ}\text{C}$).

Na osnovu određenih pouzdanosti $P_i(T)$ rada sastavnih komponenti hidroelektrane, a korišćenjem zabeleženih vrednosti radnih temperatura (tabela 6.3. i 6.8.) određen je kvalitet optimizacije (obuhvatio je tri oblasti sigurnosti funkcionisanja rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane) i na osnovu njega određeni su grupni intervali opsega radnih temperatura.

Na dijagramu (slika 6.7.) jasno se uočavaju ovi intervali rada i nisu primenjeni ovi postupci parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

Grupni interval ispravnog rada se kreće u opsegu temperatura $68 \div 69,5^{\circ}\text{C}$ bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, a sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike $59,5 \div 65^{\circ}\text{C}$.

7.3. ZABELEŽENE VREDNOSTI POHABANOSTI LEŽAJEVA NA MERNIM MESTIMA HIDROELEKTRANE

Na osnovu vrednosti zabeleženih amplituda i stalnog praćenja radnih temperatura ležajeva, može se predvideti sigurnost funkcionisanja analiziranih ležajeva hidroelektrane.

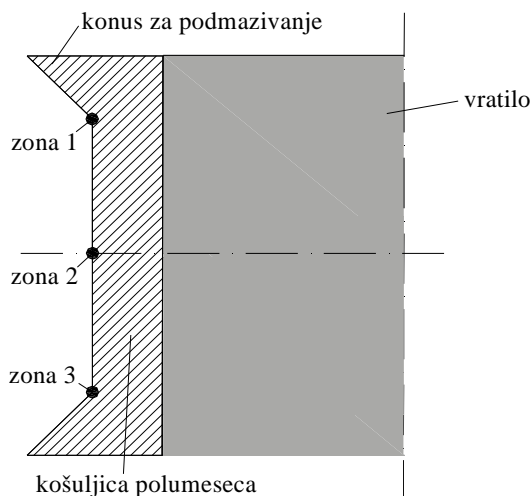
U periodu od 25.08.1998. god. do 30.08.2003. god. dolazilo je do intenzivnog otkaza ležaja usled pohabanosti zbog pojave velike transverzalne sile na obodu vratila što je izazvalo debalans vratila i nesiguran rad komponenti hidroelektrane, što procentualno iznosi 37,8%. Otkazi su bili periodični, a njihov broj kao i veličina zazora je zabeležena u tabeli 6.25.

Zabeleženi otkazi su evidentirani na osnovu iskustva i povećanja radnih temperatura koje su zabeležene ugrađenim živinim kontaktnim termometrima lociranim i to po dva na svaki ležaj.

Iz tog razloga pristupilo se generalnom remontu, a veličina unutrašnjeg prečnika ležaja izmerena je nakon demontaže. Vrednosti unutrašnjeg prečnika dobijene su u tri zone i to:

- **Zona merenja 1** – obuhvatila je zonu merenja prečnika ležaja neposredno posle završetka radijusa zaobljenja konusa za podmazivanje,
- **Zona merenja 2** – obuhvatila je okvirno mesto na sredini visine ležaja,
- **Zona merenja 3** – obuhvatila je merenje unutrašnjeg prečnika ležaja kao i zona merenja prečnika 1 samo sa donje strane.

Prikaz zone merenja turbinskog unutrašnjeg ležaja su date na slici 7.14.



Slika 7.14. Presek sklopa vratila i košuljice polumeseca sa obeleženim zonama merenja vrednosti unutrašnjeg prečnika turbinskog ležaja HE "Vrla -3" Surdulica

Iste zone merenja korišćene su za izmerene vrednosti unutrašnjeg prečnika bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Vrednosti zazora bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane su kod gornjeg generatorskog ležaja N_4 i donjeg generatorskog ležaja N_6 određene prema idealnom zazoru jer je promena zazora približno linearna, dok kod turbinskog ležaja N_7 Weibull-ovom raspodelom su određeni merodavni zazori (tabela 6.19.).

Ove dobijene vrednosti zazora su nam pokazale da se radi o labavom naleganju $H11/d9$, $H11_{+0}^{+400}$, $d9_{+400}^{-245}$, što ukazuje da je granični zazor, $Z_g = 800\mu m$ što se i vidi iz zabeleženih merenja.

Da bi se smanjio procenat habanja unutrašnjeg prečnika za vreme generalnog remonta uveden je parametar pohabanosti koji se ogleda u promeni tolerancijskog polja naleganja, tako da je uvedeno novo naleganje $H9/d9$.

Iz prikazane tabele 6.20. evidentirane su vrednosti unutrašnjeg prečnika ležajeva i to u periodu od 25.08. 1998. god. do 28.08. 2007. god. Nakon ovog vremena je generalni remont. Na osnovu tabele 6.20. aritmetičkom sredinom određene su ekstremne vrednosti zazora ležajeva N_4 i N_6 .

Na osnovu zabeleženih vrednosti unutrašnjeg prečnika, a prikazane u tabeli 6.21. aritmetičkom sredinom određene su ekstremne vrednosti zazora.

Tabelama 6.19. i 6.22. određene su oblasti rizika u zavisnosti od maksimalne veličine zazora.

Veličine zazora bez primene parametara optimizacije za ležajeve N_4 i N_6 iznose: $\bar{z}(mm)_{N_4, N_6 \max} = 0,809$ a za ležaj $\bar{z}(mm)_{N_7 \max} = 0,766$, a sa primenom parametara optimizacije iznose (promena naleganja): $\bar{z}_{N_4, N_6}(mm)_{\max p} = 0,728$, a za N_7 je: $\bar{z}_{N_7}(mm)_{\max p} = 0,693$.

Dobijene ekstremne vrednosti zazora ukazuju da sa primenom parametara optimizacije pohabanost se smanjuje:

$$\text{- za donji i gornji generatorski ležaj: } \frac{\bar{z}(mm)_{N_4, N_6 \max}}{\bar{z}_{N_4, N_6}(mm)_{\max p}} = \frac{0,809}{0,728} = 1,113$$

$$\text{- za turbinski ležaj: } \frac{\bar{z}(mm)_{N_7 \max}}{\bar{z}_{N_7}(mm)_{\max p}} = \frac{0,766}{0,693} = 1,111$$

Ukupno smanjenje pohabanosti je:

$$\bar{z} = \frac{\bar{z}_{N_4, N_6} + \bar{z}_{N_7}}{2} = \frac{1,113 + 1,111}{2} = 1,112 = 11,2\%$$

Uvođenjem univerzalnog modela sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u periodu od 29.08. 2004. god. do 28.08. 2007. god. dolazi do smanjenja pojave otkaza usled pohabanosti ležajeva od 37,8% na 11,2%.

7.4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, tj. promenama kvaliteta površine i zazora smanjuje se nivo amplituda – njenih ekstremnih vrednosti (tabela 7.1.) na:

$$\Delta A(t)_{\max} = \frac{A_i(t)_{\max p}}{A_i(t)_{\max}} = \frac{121,8}{163,185} = 0,746 \quad (25,4\%)$$

$$\Delta A(t)_{\min} = \frac{A_i(t)_{\min p}}{A_i(t)_{\min}} = \frac{98,4}{106} = 0,9283 \quad (7,2\%)$$

$$\Delta A(t)_{opt} = \frac{A_i(t)_{opt p}}{A_i(t)_{opt}} = \frac{115,26}{121,092} = 0,952 \quad (4,8\%)$$

$$\Delta A(t)_{sr} = \frac{A_i(t)_{sr p}}{A_i(t)_{sr}} = \frac{110,1}{122,39} = 0,899 \quad (10,1\%)$$

$$\begin{aligned} \Delta A_i(t) &= \frac{\Delta A(t)_{\max} + \Delta A(t)_{\min} + \Delta A(t)_{opt} + \Delta A(t)_{sr}}{4} = \\ &= \frac{0,746 + 0,928 + 0,952 + 0,899}{4} = \frac{3,525}{4} = 0,881 \quad (11,8\%) \end{aligned}$$

Uvođenjem parametara optimizacije (poboljšanje kvaliteta površine i promene količine zazora) smanjuje se procenat srednje veličine amplituda za 11,8% što opravdava uvođenje ovog parametra.

Uvođenjem parametara (smanjenje intervala recikliranja ulja i stalnim filtriranjem) zadržava se opseg radnih temperatura $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$, a bez primene parametara $68^{\circ}\text{C} \div 69,5^{\circ}\text{C}$.

Uvođenjem parametara, opseg temperatura se smanjio:

$$\Delta T_i = (68 + 69,5) \div (59,5 + 65) = 13^{\circ}\text{C}$$

procentualno: $\Delta T_i = \frac{59,5 + 65}{68 + 69,5} = 0,905 \rightarrow (9,5\%)$ što takođe, opravdava uvođenje ovog parametra.

Dobijene vrednosti zazora su nam pokazale da se radi o labavom naleganju, a ekstremne vrednosti zazora pokazuju da sa primenom parametara optimizacije ukupna pohabanost se smanjuje na 11,2% (detaljnije u poglavlju 7.3.).

7.5. VREDNOVANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA ZA NAUKU I PRAKTIČNU PRIMENU

Na osnovu vrednosti svih parametara kao učesnika u formiranju optimalnog modela rada sastavnih komponenti analiziranih sklopova hidroelektrane prema izabranim mernim mestima izvršena je analiza univerzalnog optimalnog modela sigurnosnog funkcionisanja rada analiziranih sklopova.

Sprovedenjem i određivanjem podmodela prema izabranim mernim mestima merenja nivoa mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva izvršeno je povezivanje podmodela u strukturni blok dijagram. Na osnovu analitičkog pristupa određeni su matematički izrazi koji obuhvataju lokaciju mernih mesta kao i njihovo međusobno povezivanje na osnovu strukturnih šema. Takođe, određen je analitički opšti oblik prenosne funkcije optimalnog rada modela $S_{\eta}(t)$ koji definiše sigurnost rada analiziranog sklopa.

Analiza modela pokazuje do kojih graničnih vrednosti komponente sklopova u procesima eksploatacije imaju ispravan i siguran rad. Konstruisane granične krive određuju zavisnost frekventne sigurnosti u funkciji eksploatacionog rada komponenti sa dozvoljenim rizikom – optimalni rad analiziranih sklopova. Vrednosti prema izabranim mernim mestima na kojima su vršena merenja nivoa mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva, a ostvarena frekventna sigurnost $S_{\eta}(t) = f(t)$ iznad graničnih krivih, predstgavljaju stanje rada analiziranih komponenti sklopova sa nedozvoljenim rizikom.

Testiranjem optimalnog modela $S_{\eta}(t) = f(t)$ je sprovedena u konstruisanju dijagrama na kojima su ucrtane krive zavisnosti optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada analiziranih sklopova hidroelektrane. Analizom se ukazuje pažnja u primeni parametara dijagnosticanja jer ukupan procentualni iznos je veoma veliki u delu rizika i analize praćenja mehaničkih vibracija. Postojeće stanje u odnosu na stanje uvođenjem novih parametara tehničke dijagnostike povećalo je optimalnu vrednost amplitude oscilovanja rada komponenti sklopova hidroelektrane.

Vrednosti relativne mehaničke oscilacije vratila izmerene na hidroelektrani HE "Vrla -3, A" Surdulica su relativno velike. Izmerene vrednosti **donjeg generatorskog ležaja** bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike $A_i(t)_{\max} = 163,185[\mu m/s]$, $A_i(t)_{\max p} = 121,092[\mu m/s]$, a vrednosti **gornjeg generatorskog ležaja** $A_i(t)_{\max} = 122,39[\mu m/s]$, $A_i(t)_{\max p} = 110,10[\mu m/s]$, a vrednosti **vođeg turbinskog ležaja** $A_i(t)_{\max} = 121,92[\mu m/s]$, $A_i(t)_{\max p} = 115,26[\mu m/s]$, (detaljnije u poglavlju 7.1.).

Analiza praćenja promene temperature ležajeva u toku vremena, a sa vođenjem novih parametara tehničke dijagnostike povećala je optimalnu vrednost rada ležajeva u odnosu na postojeće stanje rada ležajeva, (detaljnije u poglavlju 7.2.). Grupni interval ispravnog rada se kreće u opsegu temperatura bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike $68 \div 69,5^{\circ}C$, a sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike $59,5 \div 65^{\circ}C$.

Veličine zazora bez primene parametara optimizacije za ležajeve N_4 i N_6 iznose: $\bar{z}(mm)_{N_4, N_6 \max} = 0,809$, a za ležaj $\bar{z}(mm)_{N_7 \max} = 0,766$, a sa primenom parametara optimizacije iznose (promena naleganja): $\bar{z}_{N_4, N_6}(mm)_{\max p} = 0,728$, a za N_7 je: $\bar{z}_{N_7}(mm)_{\max p} = 0,693$. Ukupan procenat smanjenja rizika i povećanja sigurnosti funkcionisanja rada ležajeva u okviru datih merenja i analiza praćenja promene pohabanosti povećala je vrednost rada ležajeva u odnosu na postojeće stanje rada ležajeva.

Opravdanost istraživanja se ogleda u analizi koja obuhvata povećanje optimalne vrednosti rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane za približno 12% u odnosu na prvobitno postojeće stanje rada komponenti sklopova (detaljnije u poglavlju 7.4.).

Naučni doprinos istraživanja se ogleda u izvršenoj analizi parametara koji se koristi u modelu za određivanje optimalnih postupaka tehničke dijagnostike stanja sastavnih komponenti sklopova kao i brojnih faktora uslovljenih pri korišćenju modela. Društvena opravdanost predstavlja razvoj modela iz najboljeg parametara, a njegova primena u teoriji i organizaciji izvodi se praktično sa primenom tehnike preventivnog održavanja, tako da su znatne uštede na komponente sklopova na kojima je vršeno ispitivanje i dobijena optimalna vrednost stanja komponenti sklopova hidroelektrane.

Dobijeni rezultati predstavljaju naučnu opravdanost i suštinu primene modela optimizacije tehničke dijagnostike rada komponenti sa proverom parametra koji daje kontinualno praćenje promene odabranog parametra, jednoznačno i sigurno opisuje stanje posmatranih sklopova hidroelektrane. Na osnovu ovako identifikovanih promena utvrđenih izbora parametra stanja i pouzdanosti, određuju se potrebni postupci preventivnog održavanja sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Sprovedeni rezultati istraživanja daju praktičnu primenu i opravdanost programiranja ovog algoritma neophodnog za poznavanje matematičkog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Oni će dati analizu stanja i predstavljati dinamiku rada sklopova hidroelektrane, čije će se stanje u svakom vremenskom trenutku definisati sa vrednošću ulaznih i izlaznih parametara. Modelom se definiše veza periodičnosti provere parametara i signalizacione tolerancije parametara stanja komponenti pri obezbeđenju željenog nivoa pouzdanosti.

Dobijene vrednosti rezultata istraživanja predstavljaju naučnu i praktičnu primenu opravdanosti za EPS Srbije od posebnog značaja za unapređenje postupaka tehničke dijagnostike i postupaka preventivnog održavanja. Takođe, na osnovu datih rezultata EPS dobija povećanje proizvodnje električne energije za približno 12%, tj. povećava se produktivnost rada komponenti sklopova hidroelektrane.

7.6. DOKAZIVANJE GLAVNE HIPOTEZE

U okviru ove disertacije urađen je univerzalni model koji je primenljiv u planiranju optimizacije postupaka tehničke dijagnostike koji definiše strategiju i promenu stanja rada komponenti sklopova hidroelektrane. Ovaj model prvo određuje rešenja koja su optimalna po pojedinim kriterijumima, a zatim određuje kompromisna rešenja koja se predlažu, a iz kojih treba usvojiti jedno konačno rešenje.

Za rešavanje navedenih problema neophodna je baza podataka o već utvrđenim uzročnicima, mestu pojave i manifestaciji za svaku komponentu sklopa hidroelektrane. Vrste otkaza sastavnih komponenti sklopova su u funkciji najčešćih uzročnika vezanih za greške konstruisanja, materijala, proizvodnje, montaže, eksploatacije i grešaka podmazivanja koje treba da posluže kao smernice pri analizi otkaza koje se sprovode u praksi i omogućuju definisanje uzroka.

Model je urađen kao prototipni, a može se primeniti u dokazivanju metodoloških karakteristika, verovatnoće otkaza u povećanju efikasnosti rada komponenti kao i u istraživanju komponenti sklopova hidroelektrane.

Pri njegovom formiranju krenulo se od zabeleženih ukupnih otkaza sastavnih komponenti usled analiziranja parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Oni su obuhvatili otkaze usled povećanih nivoa mehaničkih oscilacija, povećanja radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Ovi parcijalni otkazi čine paralelnu spregu i njihov uzajamni uticaj određuje pouzdanost rada sastavnih komponenti hidroelektrane (merodavna analiza je objašnjena u poglavlju 4).

Model je obuhvatio analizu podmodela 1, 2 i 3 (prikazi na slici 6.2.) i uvođenjem korelacionih zavisnosti smena η_1 i η_2 , unošenjem vrednosti amplituda oscilovanja i frekvenci, određene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine $S_\eta(t)_{\max}$, $S_\eta(t)_{\min}$, $S_\eta(t)_{sr}$, $S_\eta(t)_{opt}$, bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Takođe su određene vrednosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane $S_\eta(t)_{\max p}$, $S_\eta(t)_{\min p}$, $S_\eta(t)_{srp}$, $S_\eta(t)_{optp}$.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih – najznačajnijih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalne sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza u dva slučaja (tabele 4.1. i 4.2.).

Metodologija optimizacije postupaka tehničke dijagnostike je prikazana algoritmom (slika 4.1.) koji je dao potpunu metodologiju u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane (slika 4.3.). Za određivanje metode rešavanja optimizacije postupaka optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane obuhvatila je dve osnovne početne faze i to:

- evidentiran broj otkaza n sastavnih komponenti hidroelektrane na osnovu početnog nivoa stanja,
- analiza eksploatacionih uslova rada sastavnih komponenti hidroelektrane.

Analiza pouzdanosti je prikazana takođe paralelnom spregom i obuhvatila je merodavne pouzdanosti usled povećanja nivoa mehaničkih oscilacija, radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti određen je model pouzdanosti na osnovu model blok dijagrama na mernim mestima mehaničkih oscilacija, optimizacija pouzdanosti na osnovu radnih temperatura i optimizacija pouzdanosti na osnovu pohabanosti ležajeva.

Njihovim međusobnim uticajima i povezanošću formiraju se korelacije parametara postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane:

1. K_1 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i temperatura,
2. K_2 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva,
3. K_3 – korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Na osnovu korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama sprovedena je analiza modela u empirijskom istraživanju. Ovakav model je univerzalnog tipa jer može se primeniti kako na jednostavne tako i na složene sisteme bez obzira na gabarite komponenti sklopova.

Analizom matematičke zavisnosti korelacija formirana je kvadratna determinanta oblika 3×3 sa koeficijentima korelacije. Rešavanjem opšteg oblika determinanti $K(t)$ dobijen je konačni izraz za određivanje zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Datim modelom formirana je prostorna kriva, a za analizu su bile neophodne ravanske krive zavisnosti korelacija, iste su određene pomoću podprograma koji je formiran na osnovu matematičkog programa MATLAB 6.5. (slike 6.20. i 6.21.). Na istim dijagramima su uvek prikazane po dve ravanske krive korelacije i to jedna bez primene, a druga sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike, sa promenom kvaliteta površine i zazora smanjuje se nivo amplituda, tj. njenih ekstremnih vrednosti za 11,8% (tabela 7.1.). Uvođenjem parametara (smanjenje intervala recikliranja ulja i stalnim filtriranjem) zadržava se opseg sa primenom parametra radnih temperatura $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$, a bez primene parametra $68^{\circ}\text{C} \div 69,5^{\circ}\text{C}$ za 9,5% što takođe opravdava uvođenje ovog parametra.

Na osnovu iznetih analiza obuhvaćena je glavna hipoteza koja ima za cilj da se formira univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike radi postizanja maksimalne pouzdanosti i raspoloživosti hidroelektrane u radu, a time postigne viši nivo pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Glavni zaključak koji se nameće iz ove disertacije, a ujedno i potvrda glavne hipoteze je uspešno izvršena analiza parametara stanja komponenti koji utiču na univerzalni model za utrdivanje optimalne vrednosti, maksimalne pouzdanosti i raspoloživosti komponenata sklopova hidroelektrane. Takođe, na osnovu dobijenih rezultata EPS Srbije je povećao proizvodnju električne energije za 12%.

8.0. ZAKLJUČAK

Na osnovu datih istraživanja obuhvaćena je glavna hipoteza koja ima za cilj da se formira univerzalni model optimizacije postupaka tehničke dijagnostike radi postizanja maksimalne pouzdanosti i raspoloživosti hidroelektrane u radu, a time se postigne viši nivo pouzdanosti rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane.

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalne sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza u dva slučaja i to: bez primene parametara optimizacije tehničke dijagnostike i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

U periodu od 25.08. 1998. god. do 30.08. 2003. god. dolazi do intezivnog rasta otkaza usled pohabanosti ležajeva, tj. bez primene parametara optimizacije (u tom vremena nije primenjivan model sigurnosti funkcionisanja analiziranih sklopova), može se reći da je to period njihovog nestabilnog rada, što procentualno iznosi 37,8%. Uvođenjem univerzalnog modela sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u periodu od 30.08. 2003. god. do 28.08. 2007. god. dolazi do smanjenja pojave otkaza, procentualno na 11,2% (u tom vremenu je u primeni univerzalni model optimizacije sigurnosti funkcionisanja analiziranih komponenti), tj. na osnovu njega određiće se vrednosti merodavnih zazora.

Na osnovu univerzalnog modela izvršena je analiza jednačine za određivanje zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Za dobijanje ekstremnih vrednosti jednačine prostorne krive koristiće se ekstremne vrednosti korelacija (K_1 , K_2 , K_3) parametara i to:

- 1) Korelacija bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike:

$$K(t) = \frac{\omega_i^4(t)(1-\omega_i(t))^2 \cdot T_{mi}^2 \cdot \bar{z}^{-2}}{\eta_2^2 \cdot A_i^4(t) \cdot \left(\frac{\omega_i^2(t)}{\eta_i - A_i(t)} - 1 \right)^2} \quad \text{za vrednosti}$$

$$S_\eta(t)_{opt} = f(\eta_{1opt}, \eta_{2opt}, \omega_{iopt}, A_i(t)_{opt})$$

dobija se vrednost optimizacije:

$$K(t) = (S_\eta(t)_{opt} \cdot T_{miopt} \cdot \bar{z}_{opt})^2$$

$$K(t) \left[\frac{^\circ\text{C}}{\mu\text{m} \cdot \text{s}} \right] = (S_\eta(t)_{opt} \cdot T_{miopt} \cdot \bar{z}_{opt} \cdot 10^3)^2$$

$$K(t) = (-0,331 \cdot 69 \cdot 0,707 \cdot 10^3)^2 = 2,6073 \cdot 10^8 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$$

$$K(t) = (-0,331 \cdot 69 \cdot 0,707 \cdot 10^3)^2 = 2,6073 \cdot 10^8 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{s}} \right]$$

2) Korelacija sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike:

$$K(t)_p = \frac{\omega_i^4(t)(1-\omega_i(t))^2 \cdot T_{mip}^2 \cdot \bar{z}_p^2}{\eta_2^2 \cdot A_i^4(t) \cdot \left(\frac{\omega_i^2(t)}{\eta_i - A_i(t)} - 1 \right)^2}$$

$$K(t)_p = \left(S_\eta(t)_{opt.p} \cdot T_{mioptp} \cdot \bar{z}_{optp} \cdot 10^3 \right)^2$$

$$K(t)_p = (-0,312 \cdot 62,25 \cdot 272)^2 = 27907807 \left[\frac{^\circ C}{s} \right]$$

Procentualno povećanje uvođenjem parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike iznosi (povećanje optimalne vrednosti):

$$\Delta K(t)_1 = \frac{K(t)}{K(t)_p} = \frac{2,6073 \cdot 10^8}{27907807} = 9,3425\%$$

Analiza vrednosti optimizacije korelacija na osnovu ravanskih krivih

1) Korelacija $K_1(t) = f(S_\eta(t), T_{mi})$:

- bez primene parametara optimizacije:

$$K_1(t) = \begin{bmatrix} S_\eta(t) & 0 \\ S_\eta(t) & T_{mi} \end{bmatrix} = S_\eta(t) \cdot T_{mi}$$

$$K_1(t) = S_\eta(t) \cdot T_{mi}$$

$$\text{Optimalna vrednost: } K_1(t)_{opt} = S_\eta(t)_{opt} \cdot T_{miopt} = -0,331 \cdot 69 = -22,84 \left[\frac{^\circ C}{s \cdot \mu m} \right]$$

- sa primenom parametara optimizacije:

$$K_1(t)_p = \begin{bmatrix} S_\eta(t)_p & 0 \\ S_\eta(t)_p & T_{mip} \end{bmatrix} = S_\eta(t)_p \cdot T_{mip}$$

$$K_1(t)_p = S_\eta(t)_p \cdot T_{mip}$$

$$K_1(t)_{optp} \cdot T_{mioptp} = -0,312 \cdot 62,25 = -19,422 \left[\frac{^\circ C}{s \cdot \mu m} \right]$$

Procentualno povećanje optimizacije na osnovu korelacije K_1 je:

$$\Delta K_1(t) = \frac{K_1(t)_{opt}}{K_1(t)_{optp}} = \frac{-22,84}{-19,422} = 1,176$$

2) Korelacija $K_2(t) = f(S_\eta(t), \bar{z})$:

- bez primene parametara optimizacije:

$$K_2(t) = \begin{bmatrix} S_\eta(t) & 0 \\ S_\eta(t) & \bar{Z} \end{bmatrix} = S_\eta(t) - \bar{z}$$

$$K_2(t) = S_\eta(t) \cdot \bar{z}$$

$$\text{optimalna vrednost je: } K_2(t)_{opt} = S_\eta(t)_{opt} \cdot \bar{z}_{opt} = -0,331 \cdot 0,707 = -0,234 \left[\frac{1}{s} \right]$$

- sa primenom parametara optimizacije:

$$K_2(t)_{opt-p} = S_\eta(t)_{opt-p} \cdot \bar{z}_{opt-p} = -0,312 \cdot 0,272 = -0,0848 [mm \cdot ^\circ C]$$

Procentualno povećanje optimizacije je:

$$\Delta K_2(t) = \frac{K_2(t)_{opt}}{K_2(t)_{opt-p}} = \frac{-0,234}{-0,0848} = 2,757$$

3) Korelacija $K_3(t) = f(T_{mi}, \bar{z})$:

- bez primene parametara optimizacije:

$$K_3(t) = \begin{bmatrix} T_{mi} & \bar{z} \\ 0 & \bar{z} \end{bmatrix} = T_{mi} \cdot \bar{z}$$

$$\text{Optimalna vrednost je: } K_3(t)_{opt} = T_{mi_{opt}} \cdot \bar{z}_{opt} = 69 \cdot 0,707 = 48,783 [mm \cdot ^\circ C]$$

- sa primenom parametara optimizacije:

$$K_3(t)_{opt-p} = T_{mi_{opt-p}} \cdot \bar{z}_{opt-p} = 62,25 \cdot 0,272 = 16,93 [mm \cdot ^\circ C]$$

Procentualno povećanje optimizacije je:

$$\Delta K_3(t) = \frac{K_3(t)_p}{K_3(t)_{opt-p}} = \frac{48,783}{16,93} = 2,8811$$

Ukupno povećanje procentualne optimizacije preko određenih korelacija je:

$$\begin{aligned} \Delta K(t)_2 &= \begin{bmatrix} \Delta K_1 & \Delta K_2 & \Delta K_3 \\ \Delta K_2 & \Delta K_3 & \Delta K_1 \\ \Delta K_3 & \Delta K_1 & \Delta K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta K_1 & \Delta K_2 \\ \Delta K_2 & \Delta K_3 \\ \Delta K_3 & \Delta K_1 \end{bmatrix} = \\ &= (\Delta K_1 \cdot \Delta K_3 \cdot \Delta K_2 + \Delta K_2 \cdot \Delta K_1 \cdot \Delta K_3 + \Delta K_3 \cdot \Delta K_2 \cdot \Delta K_1) - (\Delta^2 K_3 + \Delta^2 K_1 + \Delta^2 K_2) = \\ &= \Delta K(t)_2 = (3 \cdot \Delta K_1 \cdot \Delta K_2 \cdot \Delta K_3) - (\Delta K_3^2 + \Delta K_1^2 + \Delta K_2^2) = \\ &= \Delta K(t)_2 = (3 \cdot 1,176 \cdot 2,757 \cdot 2,881) - ((2,881)^2 + (1,176)^2 + (2,757)^2) = \\ &= \Delta K(t)_2 = 28,022 - (8,3 + 1,383 + 7,6) = 28,022 - 17,283 = 10,74\% \end{aligned}$$

Povećanje merodavne optimizacije (optimalnih vrednosti) uvođenjem parametara postupaka tehničke dijagnostike analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane iznosi:

$$\Delta K(t)_{opt} = \frac{\Delta K(t)_1 + \Delta K(t)_2}{2} = \frac{9,3425 + 10,74}{2} = 10,04\%$$

Optimizacija oblasti sigurnosti funkcionisanja – pojava sigurnog rada

Oblasti sigurnog rada analiziranih sastavnih komponenti sklopova hidroelektrana nalaze se između maksimalne i minimalne vrednosti korelacija $(S_\eta(t)_{\max}, S_\eta(t)_{\min}, T_{mi\max}, T_{mi\min}, \bar{z}_{\max}, \bar{z}_{\min})$.

Na osnovu opšteg izraza određivanja zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane: za ekstremne vrednosti maksimuma i minimuma, dobijaju se sledeće vrednosti ukupne korelacije:

- bez primene parametara optimizacije:

$$K(t)_{\max} = (S_\eta(t)_{\max} \cdot T_{\max} \cdot \bar{z}_{\max})^2$$

$$K(t)_{\max} = (-1,2 \cdot 71 \cdot 0,766)^2 = 4892,9 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

- sa primenom parametara optimizacije:

$$K(t)_{\max p} = (S_\eta(t)_{\max p} \cdot T_{\max p} \cdot \bar{z}_{\max p})^2$$

$$K(t)_{\max p} = (-1,768 \cdot 80 \cdot 0,693)^2 = 9607,51 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

- bez primene parametara optimizacije:

$$K(t)_{\min} = (S_\eta(t)_{\min} \cdot T_{\min} \cdot \bar{z}_{\min})^2$$

$$K(t)_{\min} = (-0,327 \cdot 69,5 \cdot 0,707)^2 = 258,17 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

- sa primenom parametara optimizacije:

$$K(t)_{\min p} = (S_\eta(t)_{\min p} \cdot T_{\min p} \cdot \bar{z}_{\min p})^2$$

$$K(t)_{\min p} = (-0,0413 \cdot 58 \cdot 0,044)^2 = 233,4 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

1. Oblast sigurnog rada bez primene parametara:

$$\Delta K(t) = K(t)_{\max} - K(t)_{\min} = 4892,9 - 258,17 = 4634,73 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

2. Oblast sigurnog rada sa primenom parametara:

$$\Delta K(t)_p = K(t)_{\max p} - K(t)_{\min p} = 9607,51 - 233,4 = 9374,11 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sec}} \right]$$

Povećanje sigurnosti funkcionisanja rada komponenti:

$$O_b = \frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t)_p} = \frac{4634,73}{9374,11} \cong 42,5\%$$

O_b - oblast optimizacije sigurnosti rada komponenti.

Uvođenjem parametara optimizacije smanjuje se procenat srednje veličine amplituda za 11,8% što opravdava uvođenje ovog parametra. Uvođenjem parametara zadržava se opseg radnih temperatura $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$, a bez primene parametara $68^{\circ}\text{C} \div 69,5^{\circ}\text{C}$, opseg temperatura se smanjio procentualno za 9,5% što opravdava uvođenje ovog parametra.

Analizom jednačine za određivanje zavisnosti prostorne krive optimizacije parametara tehničke dijagnostike hidroelektrane dobijene su na osnovu ekstremne vrednosti korelacija (K_1 , K_2 , K_3) parametara.

Oblasti sigurnog rada analiziranih sastavnih komponenti sklopova hidroelektrana se nalaze između maksimalne i minimalne vrednosti određenih korelacija ($S_{\eta}(t)_{\max}$, $S_{\eta}(t)_{\min}$, $T_{mi \max}$, $T_{mi \min}$, \bar{z}_{\max} , \bar{z}_{\min}). Na osnovu opšteg izraza određivanja zavisnosti prostorne krive optimizacije parametara tehničke dijagnostike hidroelektrane za ekstremne vrednosti max. i min., dobija se vrednost ukupne korelacije: bez primene parametara optimizacije: $K(t)_{\max} = (-1,2 \cdot 71 \cdot 0,766)^2 = 4892,9 \left[^{\circ}\text{C}/\text{sec} \right]$ i sa primenom parametara optimizacije: $K(t)_{\max p} = (-1,768 \cdot 80 \cdot 0,693)^2 = 9607,51 \left[^{\circ}\text{C}/\text{sec} \right]$.

Oblast sigurnog rada komponenti sklopova hidroelektrane bez primene parametara optimizacije: $\Delta K(t) = K(t)_{\max} - K(t)_{sr} = 4892,9 - 258,17 = 4634,73 \left[^{\circ}\text{C}/\text{sec} \right]$, a oblast sigurnog rada sa primenom parametra optimizacije: $\Delta K(t)_p = K(t)_{\max p} - K(t)_{srp} = 9607,51 - 243,4 = 9364,11 \left[^{\circ}\text{C}/\text{sec} \right]$.

Procentualno povećanje oblasti sigurnosti funkcionisanja usled primene parametara optimizacije postupka tehničke dijagnostike povećala se za $O_b = 42,5\%$. Takođe, povećala se procentualna sigurnost funkcionisanja komponenti sklopova hidroelektrane, a time Elektroprivreda Srbije je postigla uštede u proizvodnji električne energije.

8.1. REZIMEI POGLAVLJA

Disertacija se kompleksno bavi problematikom formiranja univerzalnog modela kao i izborom naznačajnijih parametara, a na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti formiraju se korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Takođe, doprinos u naučnom smislu je da da sistematizovan pregled metoda za izbor parametara u formiranju univerzalnog modela u užem smislu, a u širem smislu te metode su primenljive za sve komponente sklopova hidroelektrane. U tehnološkom smislu doprinos ove disertacije se ogleda u primeni metoda simulacije za izbor najboljih parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri funkcionisanju komponenti sklopova, sa aspekta pouzdanosti njihovih sklopova, što je dokazano na konkretnom eksperimentu komponenta sklopova. Simulacijom se može prognozirati vremenski trenutak zamene komponenti sklopova pre nego što dođe do njihovog otkaza.

Cilj ovog istraživanja je da se utvrdi primena univerzalnog modela na druge složene sisteme bez obzira na gabarite komponenti sklopova. Strukturna analiza je pokazala ukupne parcijalne otkaze koji čine paralelnu spregu i njihov uzajamni uticaj. Određuje pouzdanost rada komponenti sklopova hidroelektrane. Takođe, utvrđuje izvodljivost postupaka na nekoj stvarnoj komponenti hidroelektrane. Analizom parametara se razmatra funkcionalna struktura hidroelektrane na tri podsistema, pri čemu je prelaz s jednog na drugi podsistem uslovljen pojavom nekog otkaza, što je praćeno i preraspodelom opterećenja na svakom funkcionalnom podsistemu. Upotrebom modela optimizacije pomoću vrednosne analize omogućeno je da se primenom algoritamskih postupaka izračunavaju vrednosti koje će omogućiti upoređenje teoriskih i eksploatacionih rezultata.

Na bazi datih istraživanja dobijeni su rezultati koji predstavljaju naučni i stručni doprinos predmetnoj problematici. Eksploataciona istraživanja su omogućila proveru i dokazivanje glavne hipoteze i postavljenih pomoćnih hipoteza ove disertacije. Na osnovu dijagrama eksploatacije, konstatuje se da se mogu očekivati otkazi već posle 60000 časova rada, a da nijedna komponenta neće imati radni vek duži od 65000 časova. U realnim uslovima praćenja serije rada komponenti potvrdila se pretpostavka pouzdanosti, jer je došlo do otkaza komponenti nakon 52000 časova rada.

Optimalna razmatranja, zahtevaju dobro poznavanje metoda uz različite pojave izbora parametara bitnih za optimizacionu analizu. Pri tome se vrednosti parametara mogu prilagođavati u zavisnosti od dobijanja optimalne vrednosti u toku rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane (npr. praćenje promena temperature ležaja). Dobijeni rezultati predstavljaju naučnu opravdanost i suštinu modela, sa proverom parametara određuju kontinualno praćenje promena odabranog parametra koji sigurno opisuje radno stanje posmatrane komponente sklopa hidroelektrane.

Vrednost u **prvom poglavlju** ogleda se u problematici kojom se karakterišu zabeleženi ukupni otkazi, a na osnovu ispravne dijagnostike pouzdanosti može se intervenisati u korekciji funkcionisanja, odnosno može se zameniti neispravna komponenta prilikom održavanja sklopova hidroelektrane. Analizom parametara omogućava se dijagnosticiranje komponenti u određivanju parcijalnih otkaza pojedinih komponenti sklopova, kao i nalaženje kritičnog puta na kome je najverovatnije došlo do otkaza. Analizom pouzdanosti, izvršen je sistematizovan pregled metoda za proučavanje tipa funkcije pouzdanosti komponenti u užem smislu, a u

širem smislu te metode su primenljive za sve tehničke sisteme sa aspekta pouzdanosti njihovih sklopova, što je dokazano na konkretnom eksperimentu komponente sklopova hidroelektrane.

Vrednost u **drugom poglavlju** ogleda se u pregledu značajnih objavljenih radova iz oblasti pouzdanosti u funkciji problematike funkcionisanja komponenti i sklopova hidroelektrane. One su obuhvaćene sledećim sadržajima: pojmom i značajem pouzdanosti i definisanjem pouzdanosti (osnovnim pokazateljima pouzdanosti analiziranjem sastavnih komponenti, primenom osnovnih metoda). U tom slučaju opisan je kratak prikaz literature o poznatim postupcima za donošenje odluka na bazi prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti sastavnih komponenti hidroelektrane. Opisane su osnovne karakteristike tih modela i navedena njihova ograničenja.

Vrednost u **trećem poglavlju** ogleda se u predstavljanju metodološkog koncepta rada koji opisuje istraživanje problema, predmeta, cilja, hipoteza, metodologije, organizacije i naučno društvenu opravdanost optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane. Data metodologija određuje vezu i proveru parametra stanja sastavnih komponenti hidroelektrane u radu i otkazu. Ima za cilj da teorijski i eksperimentalno, kontrolisano, sistematski i kritički ispita hipotezu o relacijama za prepoznavanje tipa funkcije pouzdanosti komponenti sklopova hidroelektrane na statističkim i simulacionim modelima. U teoriskom delu su sistematično izložene: matematičke metode kao osnova za donošenje odluka, a u eksploatacionom istraživanju dokazivanje hipoteze pri proveri izbora parametara u analizi komponentata i upoređivanje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenim računarskom simulacijom. Eksploataciona istraživanja su omogućila proveru i dokazivanje glavne hipoteze i postavljenih pomoćnih hipoteza. Složeno eksperimentalno istraživanje sa metodama simulacije je pokazalo potpunu opravdanost proučavanja osnovne problematike disertacije analizom pouzdanosti komponenti sklopova hidroelektrane.

Vrednost **četvrtog poglavlja** ogleda se u metodologiji optimizacije postupaka tehničke dijagnostike prikazane algoritmom (slika 4.1.) koja određuje sigurnost funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane (slika 4.3.). Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalnih sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza (tabele 4.1. i 4.2.) u dva slučaja i to: bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Posledice otkaza koji su nastali u eksploatacionim uslovima na sastavnim komponentama hidroelektrane su analizirani su FMER metodom. Ovom metodom su grupisane učestanosti pojavljivanja otkaza prema uticajnosti (slika 4.9. i 4.10.). Dobijane vrednosti u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti komponenti sklopova hidroelektrane, vrše se na osnovu izbornih najboljih parametara i navedenih metoda. Takođe, u ovom delu date su analize izlaznih parametara procesa eksploatacije koji karakterišu suštinske osobine u određenom trenutku vremena, tj. verovatnoću pravilnog prognoziranja postojećih stanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Primenom metoda simulacije, što je dokazano na konkretnoj eksploataciji komponenti, može se prognozirati vremenski trenutak zamene komponente pre nego što dođe do njenog otkaza. U ovom poglavlju je predstavljen izbor najboljih parametara stanja komponenti koji se uključuju u sprovođenju metoda pri dobijanju optimalnih vrednosti, kao i razvoj performansi u propisanim granicama bez pojave otkaza.

Vrednost **petog poglavlja** ogleda se u predstavljanju analize optimalnog modela za određivanje perioda dijagnostike stanja komponenti sklopova hidroelektrane. Naglašeni su svi značajni parametri prema istom sistemu obeležavanja i usvojenim nazivima, tako da se veoma lako mogu primeniti i uporediti rezultati dobijeni njihovom primenom na druge tehničke sisteme. Takođe, prikazane vrednosti univerzalnog modela mogu se primenjivati na određenim komponentama sa veoma velikim brojem ulaznih parametara pri čemu se karakterišu optimalna stanja i uslovi eksploatacije komponentata hidroelektrane. Upotrebom modela određuje se veza periodičnosti provere postojećih parametara stanja komponenti i željenog stanja pouzdanosti novih komponentata. Zatim se obezbeđuje potreba primene parametara u granicama dozvoljenih odstupanja funkcije cilja, tj. predstavlja se optimum u granici nivoa pouzdanosti postojećih sastavnih komponenti sa novim sklopovima hidroelektrane. Na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti određen je model pouzdanosti koji obuhvata korelacije parametara postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane i to: K_1 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i temperatura, K_2 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva i K_3 – korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva. Na osnovu korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama sprovedena je analiza modela u empirijskim istraživanjima. Primenom optimalne prenosne funkcije pouzdanosti određuje se vrednost stanja ispitivanih komponenti sklopova (mehaničkih oscilacija vratila, promena temperature ležajeva i pohabanost ležajeva) u vremenu $t(x)$ iz uslova zadatog nivoa verovatnoće pouzdanosti ili verovatnoće nastanka otkaza komponente u budućem radu. U slučaju kada je intenzitet otkaza monotono rastuća funkcija onda ona predstavlja optimalni interval promene parametara stanja komponenti po vremenu, pri čemu dostiže svoju maksimalnu vrednost.

Vrednost **šestog poglavlja** ogleda se u empiriskom istraživanju i obuhvata formiranje modela blok dijagrama pouzdanosti kod analiziranih komponenti sklopova hidroelektrane prema mernim mestima nivoa mehaničkih oscilacija. Najpre su objašnjene karakteristike uređaja za merenje mehaničkih vibracija, a zatim se pristupilo matematičkoj formi određivanja konačnog izraza univerzalne jednačine optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u određivanju zavisnosti merodavne pouzdanosti nivoa amplituda i kružnih frekvencija. Model je obuhvatio analizu podmodela 1, 2 i 3 (slika 6.2.) i uvođenje korelacionih zavisnosti smena η_1 i η_2 , unošenje vrednosti amplituda oscilovanja i frekvenci, određene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine $S_\eta(t)_{\max}$, $S_\eta(t)_{\min}$, $S_\eta(t)_{sr}$, $S_\eta(t)_{opt}$, bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Takođe su određene vrednosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane $S_\eta(t)_{\max p}$, $S_\eta(t)_{\min p}$, $S_\eta(t)_{srp}$, $S_\eta(t)_{optp}$. Određuju se korelacije koje su definisane u algoritmu metodologije univerzalnog modela optimizacije (slika 5.1.). Imajući sve ekstremne vrednosti parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike iste smo uvrstili u rezultujući model. Rešavanjem opšteg oblika determinanti $K(t)$ dobijen je konačni izraz za određivanje zavisnosti prostorne krive parametara optimizacije tehničke dijagnostike. S obzirom da je kriva prostorna, a za analizu su bile neophodne ravanske krive zavisnosti korelacija bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, iste su određene pomoću podprograma koji je formiran na osnovu matematičkog programa MATLAB 6.5. (slike 6.18. i 6.19.).

Vrednost **sedmog poglavlja** ogleda se u analizi simulacione metode i empirijska istraživanja u procesu donošenja odluka primenom pouzdanosti na komponente i sklopove hidroelektrane. U ovom delu vršena su teorijska i empirijska istraživanja problematike modelovanja pri određivanju tipa pouzdanosti komponenata hidroelektrane. Na bazi tih istraživanja dobijeni su rezultati koji predstavljaju naučni i društveni doprinos predmetnoj problematici. Empirijska istraživanja su omogućila proveru i dokazivanje glavne hipoteze i postavljenih pomoćnih hipoteza. Uz pomoć univerzalnog modela moguće je na jednostavan način izvršiti određivanje optimalne vrednosti dijagnostike stanja komponenti sklopova hidroelektrane, za koje je potrebno poznavati zakon raspodele vremena rada do otkaza. Analiza rezultata dobijenih računarskim simulacijama pokazuju, da sve korelacije u eksploatacionim uslova zavise od izbora parametara kao i ponašanje razmatranih komponenata je potpuno fizički opravdano, što potvrđuje ispravnost razvijenog univerzalnog modela kao i ispravnost razvijenih algoritma modela. Primenjujući sve ovo u eksploatacionim uslovima i izvođenjem tehničke dijagnostike stanja posmatranih komponenti hidroelektrane u tačno proračunatim intervalima nije došlo do otkaza dijagnostičkih komponenti, jer se smanjivanjem broja otkaza smanjuju i troškovi održavanja. Na osnovu sprovedenih analiza istraživanja zaključeno je da za dobijanje pouzdanih vrednosti neophodno u fazi razvoja primenjivati odgovarajuće parametre stanja rada komponenti. U okviru toga za optimizaciju postupaka tehničke dijagnostike su uzeti u obzir svi bitni i potrebni uticajni parametri tehničke dijagnostike koji pri tome zadovoljavaju sve važne kriterijume. Uvođenjem parametara optimizacije (poboljšanje kvaliteta površine i promene količine zazora) smanjuje se procenat srednje veličine amplituda za 11,8% što opravdava uvođenje ovog parametra. Uvođenjem parametara (smanjenje intervala recikliranja ulja i stalnim filtriranjem) zadržava se opseg radnih temperatura $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$, a bez primene parametara $68^{\circ}\text{C} \div 69,5^{\circ}\text{C}$, opseg temperatura se smanjio procentualno 9,5% što takođe, opravdava uvođenje ovog parametra.

Vrednost **osmog poglavlja** ogleda se u analizi jednačine za određivanje zavisnosti prostorne krive optimizacije parametara tehničke dijagnostike hidroelektrane. Za dobijanje ekstremnih vrednosti jednačine prostorne krive koriste se ekstremne vrednosti korelacija (K_1, K_2, K_3) parametara i to korelacija bez primene i sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike. Dalja istraživanja problematike pouzdanosti sklopova hidroelektrane treba usmeriti u pravcu novih naučnih i tehničkih dostignuća primenom osnovnih ideja modelovanja sa pogledom najznačajnijih parametara stanja komponenti kod utvrđivanja mehaničkih vibracija, promene temperature i pohabanosti ležajeva. Pre svake optimizacije potrebno je imati adekvatnu zamenu za posmatrane komponente sklopova ili doći do novog matematičkog modela sklopova hidroelektrane. Oblasti sigurnog rada analiziranih sastavnih komponenti sklopova hidroelektrana nalaze se između maksimalne i minimalne vrednosti korelacija $(S_{\eta}(t)_{\max}, S_{\eta}(t)_{\min}, T_{mi\max}, T_{mi\min}, \bar{z}_{\max}, \bar{z}_{\min})$. Na osnovu opšteg izraza određivanja zavisnosti prostorne krive optimizacije parametara tehničke dijagnostike hidroelektrana za ekstremne vrednosti maksimuma i minimuma, dobijaju se određene vrednosti ukupne korelacije. Procentualno povećanje pri izboru parametara optimizacije postupka tehničke dijagnostike je za 42,5% povećala sigurnost funkcionisanja rada komponenti sklopova hidroelektrane. Problematiku kojom se bavi disertacija karakteriše savremenost, a njeno rešavanje originalnost, a predloženi rezultati teoriski i praktičani značaj.

8.2. KLJUČNI ZAKLJUČCI

Optimizacija postupaka tehničke dijagnostike predstavlja izbor najboljih parametara u određivanju sigurnosti funkcionisanja sastavnih komponenti hidroelektrane. Od idejnih alternativa za određivanje optimalnih sigurnosti uzeta je pouzdanost rada sastavnih komponenti na osnovu zabeleženih otkaza (tabele 4.1. i 4.2.) u dva slučaja i to: bez primene parametara optimizacije tehničke dijagnostike i sa primenom parametara optimizacije tehničke dijagnostike.

Analizom prenosnih funkcija određena je merodavna statistička raspodela pouzdanosti sastavnih komponenti hidroelektrane (normalna Gausova raspodela). Takođe, njome su konstruisani dijagrami zavisnosti pouzdanosti (slike 4.19. i 4.20.) u eksploatacionim uslovima i određeno je okvirno vreme ispravnog i sigurnog rada nosećeg i vodećeg ležaja za minimalnu vrednost pouzdanosti $P_a(t)_{\min} = 0,7$.

Rezultati rada nosećeg ležaja, pojas ispravnog i sigurnog rada $t_N = 52000 \div 55250h$, a kod vodećih ležajeva vreme je manje i iznosi $t_V = 48750 \div 54500h$. Donja granica eksploatacionog vremena ispravnog i sigurnog rada odnosi se na slučaj bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, dok se gornja granica odnosi na slučaj sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike.

U oblastima eksploatacionog vremena t vršice se stalna provera uticaja mehaničkih oscilacija, temperatura i pohabanost ležajeva, jer one predstavljaju siguran i ispravan rad komponenti sklopova hidroelektrane (eksploatacioni rad bez rizika).

Granice ispravnog rada sastavnih komponenti sklopova hidroelektrane su:

- na mernom mestu 1, iznose $t \leq 56000h$, (slika 4.21.),
- na mernom mestu 2, iznose $t \leq 55000h$, (slika 4.22.),
- na mernom mestu 3, iznose $t \leq 53000h$, (slika 4.23.).

Na osnovu određenih vrednosti analizirane pouzdanosti model blok dijagrama dobijen je univerzalni model optimizacije na mernim mestima mehaničkih oscilacija, optimizacija pouzdanosti na osnovu radnih temperatura i optimizacija pouzdanosti na osnovu pohabanosti ležajeva. Njihovim međusobnim uticajima i povezanošću formiraju se korelacije parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane:

1. K_1 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i temperatura,
2. K_2 – korelacija parametara optimizacije mehaničkih oscilacija i pohabanosti ležajeva,
3. K_3 – korelacija parametara optimizacije radnih temperatura i pohabanosti ležajeva.

Primenom korelacija koje su uzajamno povezane paralelnim spregama sprovedena je analiza modela u empirijskim istraživanjima. Ovakav model je univerzalnog tipa jer može se primeniti kako na jednostavne tako i na složene sisteme bez obzira na dimenzije komponenti sklopova hidroelektrane.

Analiza modela je obuhvatila podmodele 1, 2 i 3 (slika 6.2.) i uvođenje korelacionih zavisnosti smenom η_1 i η_2 . Unošenjem vrednosti amplituda oscilovanja i frekvenci određene su ekstremne vrednosti univerzalne jednačine $S_\eta(t)_{\max}$, $S_\eta(t)_{\min}$, $S_\eta(t)_{sr}$, $S_\eta(t)_{opt}$, bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike i vrednosti sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane $S_\eta(t)_{\max p}$, $S_\eta(t)_{\min p}$, $S_\eta(t)_{srp}$, $S_\eta(t)_{optp}$.

Konstruisane krive na dijagramu (slika 6.17.) predstavljaju vrednost zavisnosti korelacija mehaničkih oscilacija i temperature, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom temperatura u intervalu $59,5^\circ\text{C} \div 65^\circ\text{C}$ i mehaničkih oscilacija $-1,2 \div 0,311$).

Prikazani dijagram na slici 6.18. predstavlja vrednost zavisnosti korelacija mehaničkih oscilacija i zazora usled pohabanosti ležaja, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom zazora $0,272 \div 0,737$ i mehaničkih oscilacija $-1,2 \div 0,311$).

Na slici 6.19. prikazan je dijagram koji predstavlja vrednost zavisnosti korelacija zazora usled pohabanosti ležaja i temperature, gde je optimalna vrednost datih parametara sa primenom i bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane (optimalna vrednost predstavljena je odnosom temperature intervala $59,5^\circ\text{C} \div 65^\circ\text{C}$ i zazora $0,272 \div 0,737$).

Na slikama 6.20. i 6.21. prikazane su krive zavisnosti korelacija u prostoru koje su obuhvatile određene vrednosti parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike radnih temperatura, mehaničkih oscilacija i pohabanost ležajeva sa primenom i bez primene parametara optimizacije. Takođe, na osnovu ovih parametara određene su ekstremne vrednosti mehaničkih oscilacija, temperature i pohabanosti ležajeva.

Iz dobijenih vrednosti dijagram zavisnosti – mapa apsolutnih vibracija pomeranja i dijagrami frekventnih spektara brzine vibracija $A = f(f)$ zabeležene su ekstreme veličine mehaničkih vibracija za dva karakteristična slučaja i to:

- ekstremne vrednosti amplituda $A_i(t)$ i $f_i(t)$ za slučaj bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane,
- ekstremne vrednosti amplituda $A_i(t)_p$ i $f_i(t)_p$ za slučaj sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane.

Sa dijagrama prikazanih na slikama 7.1. - 7.12. očitane su ekstremne vrednosti mehaničkih oscilacija, tabela 7.1., a njihovim upoređivanjem jasno se zaključuje da su dijagrami gotovo identični i da ekstremne vrednosti rada komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica i "Đerdap II" kod Kladova, važe za sva tri merna mesta.

Dobijene vrednosti veličine zazora bez primene parametara optimizacije za ležajeve N_4 i N_6 iznose: $\bar{z}(mm)_{N_4, N_6 \max} = 0,809$, a za ležaj $\bar{z}(mm)_{N_7 \max} = 0,766$, a sa primenom parametara optimizacije iznose (promena naleganja): $\bar{z}_{N_4, N_6}(mm)_{\max p} = 0,728$, a vrednosti veličine zazora bez primene parametara optimizacije za N_7 iznosi: $\bar{z}(mm)_{N_7 \max} = 0,766$, a sa primenom parametara optimizacije iznosi: $\bar{z}_{N_7}(mm)_{\max p} = 0,693$.

Vrednosti zazora optimizacije pohabanosti ležajeva se smanjuje i to:

$$\begin{aligned} - \text{ za donji i gornji generatorski ležaj: } \bar{z}_{N_4, N_6} &= \frac{\bar{z}(mm)_{N_4, N_6 \max}}{\bar{z}_{N_4, N_6}(mm)_{\max p}} = \frac{0,809}{0,728} = 1,113 \\ - \text{ za turbinski ležaj: } \bar{z}_{N_7} &= \frac{\bar{z}(mm)_{N_7 \max}}{\bar{z}_{N_7}(mm)_{\max p}} = \frac{0,766}{0,693} = 1,111 \end{aligned}$$

Ukupno smanjenje pohabanosti ležajeva je:

$$\bar{z} = \frac{\bar{z}_{N_4, N_6} + \bar{z}_{N_7}}{2} = \frac{1,113 + 1,111}{2} = 1,112 = 11,2\%$$

Primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrane, tj. promenama kvaliteta površine i zazora smanjuje se nivo amplituda, tj. njenih ekstremnih vrednosti za 11,2% (tabela 7.1.). Uvođenjem parametara (smanjenje intervala recikliranja ulja i stalnim filtriranjem) zadržava se opseg radnih temperatura $59,5^{\circ}\text{C} \div 65^{\circ}\text{C}$, a bez primene parametara $68^{\circ}\text{C} \div 69,5^{\circ}\text{C}$ za 9,5% što takođe opravdava uvođenje ovog parametra. Uvođenjem univerzalnog modela sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike u periodu od 30.08. 2003. god. do 28.08. 2007. god. dolazi do smanjenja pojave otkaza usled pohabanosti ležajeva za 11,2%, tj. na osnovu njega određiće se vrednosti merodavnih zazora.

PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

Predlog daljeg istraživanja se sastoji u konstruktivnoj promeni turbinskog ležaja iz razloga što je najopterećeniji u radu. Samim tim na njemu su najveće vibracije koje se prenose na ostale ležajeve hidroelektrane. Analizom je primećeno da se javlja velika ovalnost (ekscentričnost) zazora između vratila turbine i polumeseca.

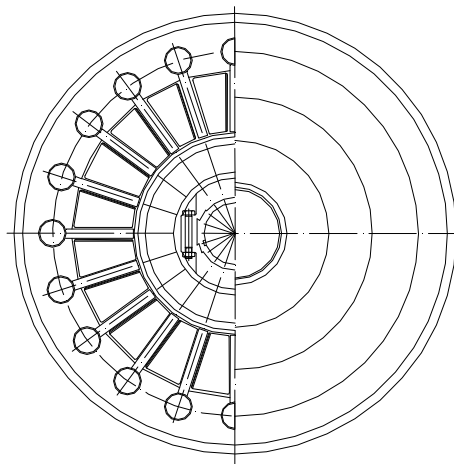
Iz navedenih razloga konstruktivna promena se sastoji u zameni polumeseca sa segmentima. Izgled predloženog konstruktivnog segmentnog ležaja dat je na slici 8.1. S obzirom da se javljaju velike radijalne sile po obimu vratila, a znajući ugrađeni prostor ležaja i broj segmenata koji može da obezbedi centričnost vratila i ležaja kreće se u granicama od 18 do 20 segmenata.

Kao početna ideja uzeto je 20 segmenata (slika 8.1.) iste veličine koji su jednako raspoređeni po obimu košuljice i na taj način veliki intenzitet radijalnih sila je ravnomerno raspoređen na većem broju segmenata. U ovom slučaju dovedena veličina maksimalnog zazora iznosi $\bar{z}_{\max} = 0,3\text{mm}$.

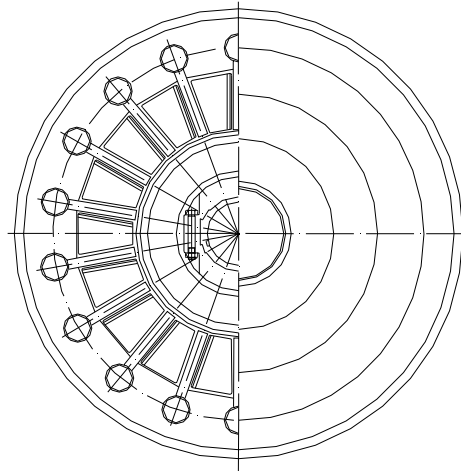
Opteretivši agregat u režimu pune snage $P_{\max} = 13\text{MW}$ izmerene su veličine amplituda i iznose $\bar{A}_i(t)_{\max p} = 110,6\mu\text{m}$, $\bar{A}_i(t)_{\min p} = 89,2\mu\text{m}$. Posle vremena $\bar{t} = 6500$ radnih sati, nivo amplituda se povećao na $\bar{A}_i(t)_{\max p} = 175,1\mu\text{m}$, $\bar{A}_i(t)_{\min p} = 119,8\mu\text{m}$, čime se došlo do zaključka da se zazor znatno povećao i to nam je ukazalo da su se segmenti pohabali pre polumeseca za 1500 radnih sati.

Zaključeno je da razlog leži u tome da nije dovoljno obezbeđena krutost segmenata, tj. nije njihova krutost veze sa košuljicom.

Primenjena je druga proba gde smo smanjili broj segmenata i povećane su njegove geometrijske karakteristike (prikaz na slici 8.2.).



Slika 8.1. Izgled segmenata sa košuljicom turbinskog ležaja (broj segmenata 20)

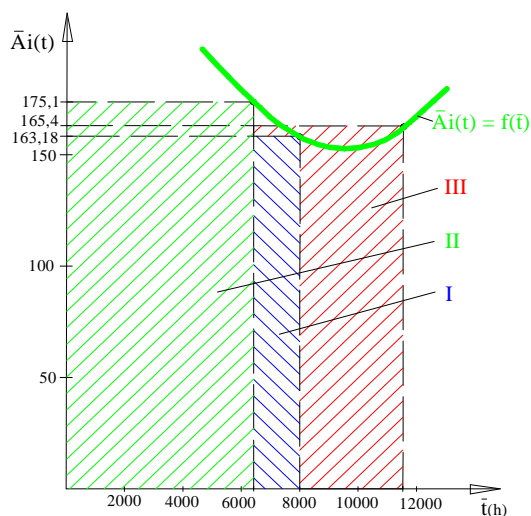


Slika 8.2. Izgled segmenata sa košuljicom turbinskog ležaja (broj segmenata 18)

Uslovi režima rada agregata su bili isti kao i kod prve probe i neprekidno su mereni nivoi amplituda vibracija, sve do $\bar{t} = 11400$ radnih sati, ekstremne vrednosti amplituda su iznosile $\bar{A}_i(t)_{\max p} = 107,2 \mu m$, $\bar{A}_i(t)_{\min p} = 86,1 \mu m$ i može se reći da je turbinski ležaj u ovom periodu imao ispravan i siguran rad.

Posle vremena njegovog rada $\bar{t} = 11400$ radnih sati dolazi do povećanog nivoa vibracija tako da pri vremenu rada $\bar{t} = 12000$ radnih sati, nivo amplituda bi iznosio $\bar{A}_i(t)_{\max p} = 165,4 \mu m$, $\bar{A}_i(t)_{\min p} = 122,8 \mu m$, što je ukazalo da je trebalo izvršiti remont ležaja, tj. zameniti segmente.

Iz navedenog proističe da se konstruktivnom izmenom polumeseca u segmente (sa brojem segmenata 18) može povećati eksploataciono vreme rada turbinskog ležaja (slika 8.3.).



Slika 8.3. Dijagram zavisnosti promene amplituda $\bar{A}_i(t)$ u funkciji t (h)

gde je:

- I – zona sigurnog funkcionisanja turbinskog ležaja sa polumesecima,
- II – zona probe konstruktivne promene turbinskog ležaja polumeseca sa segmentima,
- III – zona druge probe konstruktivne promene turbinskog ležaja polumeseca sa segmentima.

Iz prikazanog dijagrama obeleženi deo krive zavisnosti povećanja vremena rada turbinskog ležaja koji iznosi $\Delta \bar{t} = 3400$ radnih sati što je u procentualnom iznosu:

$$\Delta \bar{t}(\%) = \frac{11400}{8000} \cdot 100 = 42,5(\%)$$

Ovim je jasno prikazano da predlog daljeg istraživanja treba sprovesti zamenom polumeseca segmentima (broj segmenata 18) jer se na taj način povećava učinak rada ležaja za 42,5 %.

Ugradnja segmenata je izvršena na prečnicima vratila agregata $D = 600\text{mm}$ i sprovedena je analiza iz razloga što najveći broj agregata u hidroelektranama ima ovaj prečnik vratila (hidroelektrane "Vlasina - 1,2,3 i 4", "Đerdap - II", "Drina" itd.).

Primenom ekspertnog sistema želi se doznati na osnovu čega je data takva dijagnoza kojom se utvrđuje proces rada posmatranih komponenti. Takođe, zahteva dalje usavršavanje tehnologije i nove istraživačke napore. Ekspertni sistemi su predviđeni za rad sastavnih komponenti hidroelektrane u realnim uslovima i mogu obavljati svoju funkciju u realnom vremenu. Neophodno je da preko odgovarajućeg senzorskog sistema stalno dobija informacije o promeni relevantnih veličina i vremena rada komponenti. Ovi sistemi mogu uspešno da se koriste, jer su u stanju da veoma brzo, na osnovu softverskog paketa, ispituju, uporede, provere veliki broj podataka i postave dijagnozu stanja svake komponente.

L I T E R A T U R A

- [1]. Adamović, Ž., Preventivno održavanje u mašinstvu, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [2]. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
- [3]. Adamović, Ž., Maintenance considerations in generating capacity reliability assessment-methodology and application, Maintenance Management Internacional, 4 (1996), 3-10, kingston (Canada), 1996.
- [4]. Adamović, Ž., Nikolić, D., Inženjerstvo dijagnostike, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2004.
- [5]. Adamović, Ž., Tehnologija održavanja, Univerzitet u Novom Sadu, 1998.
- [6]. Adamović, Ž., Hidraulika i pneumatika, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2002.
- [7]. Adamović, Ž., Nikolić, D., Teorija sistema, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2002.
- [8]. Adamović, Ž., Pouzdanost i dijagnostika mašina, OMO, Beograd, 2002.
- [9]. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika u mašinstvu, Nučna knjiga, Beograd, 1991.
- [10]. Adamović, Ž., Lambić, M., Stojićević, D., Hidropneumatske mašine, OMO, Beograd, 2003.
- [11]. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2001.
- [12]. Adamović, Ž., Logistički sistem održavanja, Privredni pregled, Beograd, 1987.
- [13]. Arsenić, Ž., Efektivnost tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [14]. Avriel, M., Nonlinear programming, Analysis and Methods Engwood cliffs, Prentice – Hall, 1989.
- [15]. Babić, M., Stojković, S., Osnovi turbomašina, Naučna knjiga, Beograd 1990.
- [16]. Baldin, A., Modeli tehnologije održavanja sistema, Vojnotehnički glasnik, br.2, Beograd, 1995.
- [17]. Banerjee, K. S., Optimization of sistem Reliability using a parametric Approach, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-22, No 1, 1983.
- [18]. Baldin, A., Održavanje po stanju, OMO, Beograd, 1996.
- [19]. Barlow, R. ", Mathematical Theory of Reliability, North-Holland, New Jork, 1995.
- [20]. Banazowr, Linear Programming with multiple objective functions step method (stem)", mathematical Programming, Vol. 1, No. 3, dec. 1981.
- [21]. Barzilovič, E. J., Modeli v tehnike obsluživanje složeni sistemi, Mašinstroenie, Moskva, 1988.
- [22]. Bass, S.M. and H. Kwakernaak, "Rating and Ranking of Multiple-Aspect Alternatives Using Fuzzy Sets", Automatica, Vol 13 No 1, 1996.
- [23]. Bednjak, M. H., Modeli v procesi radni ležanje remonti v tehnike sistemi, MGV, Kiev, 1993.
- [24]. Benjamin, T.S., Fundamentals of Topology, Macmillan Publishing Co. Inc., Györ Hyngary, 1989.
- [25]. Bernev, E.R., "Vibracii hidroagregati hidroelektričiskie v stanici", Mašinstroenie, Moskva, 1994.

- [26]. Boudarel, R., J. Delmas and P. Guichet, *Dynamic Programming and Its Application to Optimal Control*, Academic Press, New York and London, 1987.
- [27]. Briger, A., Nloičlner Lrač Lrainnčer,Erniinnđiličl, Einear, 1986.
- [28]. Brkić, Lj., Benišek, M., Stojković M., *Energetska postrojenja*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1991.
- [29]. Brankovski, M., *Issledovanje i ustanenie vibracii turbogeneratorov*, Energie, Moskva, 1997.
- [30]. Castles, F.G.,D.J.Murray, C.J.Polit and D.C.Potter (Ed.), *Decisions, Organizations and Society (Selected readings)*, Megraw-Hill, New York, 1986.
- [31]. Cohon, J. and D. Marks, "A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques", *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 2, April 1995.
- [32]. Dašić, P.: Reliability analysis of the components of tribo-mechanical systems. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering – IJAME*. Zielona Góra (Poland): University Press, Vol. 7 (2002.) Special issue (Papers from the Second International Tribology Conference SITC 2002, 25 - 28. August 2002), pp. 311-318. ISSN 1425-1655, Prague, Czech Republic, 29. July - 03. August 2002.
- [33]. Dašić, P.: The analysis of possibilities of the approximation of machining process characteristics by power polynomial. In *Summaries of 16th International Conference on Production Research - ICPR-16, Vol. 5*, Edited by D. Hanus, J. Talácko.): Czech Association of Scientific and Technical Societies, 2001, pp. 43. ISBN 80-02-01438-3, Prague, Czech Republic, 29. July - 03. August 2001.
- [34]. Dašić, P.; Skubov, D. Yu.; Vodolazskaya, N. V.: Dependence analysis of the mean arithmetic deviation of the profile and cutting time for turning by the 2nd power polynomial. V knige: *Progresivnii tehnologii i sistemi mašinostroenie: Međunarodnii sbornik naučnii trudov, Viinuck 24*,: Doneckii nacionalnii tehničeskii univerzitet (Donntu), c. 147-152. ISBN 966-7907-07-4, *Doneck* (Ukraina), 2003.
- [35]. Da Cunha, N.O. and F.Polak, "Constrained Minimization Under Vector-Valued Criteria in Finite Dimensional Spaces", *J. of Math. Anal. and Appl.* 19, 1979.
- [36]. Den Hartog, J.P., *Vibracije u mašinstvu*, Građevinska knjiga, Beograd, 1994.
- [37]. Devis, B., *Optimisingm the ATE Test Mix*, reprihted from elektronik production, 1980
- [38]. Dixon, L.C.W.,*Nonlienar Optimization*, The English Universities Preaa Ltd, London, 1982.
- [39]. Dimenberg, F. N., Kolesnikov, K. S., *Vibracie v tehnike*, spravočnik tom 3, *Mašinostroenie*, Moskva, 1989.
- [40]. Đorđević, B. and S. Opricović, "Optimizing the Explotation of a Multi-purpose Dam", *Colloquia Mathematica Societatis Janos Bolai: Inventori Control and Water Storage*, Gyor, Hungary, 1989.
- [41]. Dreyfus, S.E. and A.M. Law, *The Art and Theory of Dynamic Programming*, Academic Press, North-Holland, New York, 1989.
- [42]. Duckstein, L. and R. Krzusztofowicz, "A Utility Criterion for Real-Time Reservoir Operation", *Proc. of the Arizona Academy of Science*, Las Vegas, Nevada, 1987.
- [43]. Duckstein, L., and S. Opricovic, "Multiobjective Optimuzation in River Basin Development", Working paper, The University of Arizona, Tucson, 1991.
- [44]. Duckstein, L., S. Opricović and I. Bogardi, "Multiobjective Control of Karstic Aquifer Dewatering for Mining", *Proc. of the International Symposium on Karst Hydrology*, Budapest, Sept. 1989.

- [45]. Dyer, J.S. "A Time – Sharing Computer Program for the Solution of the Multiple Criteria Problem", *Management Science*, Vol. 19, No. 12, August, 1989.
- [46]. Dyer, P. and S. McReynolds, *The Computation and Theory of Optimal Control*, Academic Press, Tucson, 1988.
- [47]. Freimer, M. and P. L. Yu, "Some New Results on Compromise Solutions for Group Decision Problems ", *Management Science*, Vol. no. 6, 1990.
- [48]. *Empfehlungen für die Revisionsintervalle von Generatoren*, VDEW. Frankfurt, 1990.
- [49]. Gasich V., *The system concept and the design engineer*, *Automatike engineering*, vol. 94, No.11. 1991.
- [50]. Gaylo, B., *A practical reliability and availability program for power plants*, *Combustion*, september, 1989.
- [51]. Gertsbakh, I. B., *Model of preventive maintenance*, North- Holland, New York, 1987.
- [52]. Gembicki, F.W. and Y.Y. Haimes, "Approach to Performance and Sensitivity Multiobjective Optimization: The Goal Attainment Method", *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-20, No. 6, Dec. 1986.
- [53]. Guesnerre, "Pareto optimality in non-convex economies" *Econometrica*, Vol. 43, No. 1, jan. 1989.
- [54]. Gill, E., *Practical Optimization*, London, Academic Press, 1989.
- [55]. Goodwin, G. G., P. V. Kabaila and T. S. Ng, "On the Optimization of Vector - Valued Performance Criteria", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. AC - 20 No. 6, Dec. 1994.
- [56]. Haimes, Y.Y., W.A. Hall, "Multiobjectives in Water Resource Systems Analysis: The Surrogate Worth Trade off Method", *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 4, Aug. 1996.
- [57]. Hill, C., *An introduction to Chemical Engineering Kinetics and hydroelectric Design*, Free University, Amsterdam, 1989.
- [58]. Haimes, Y.Y., W.A. Hall and H.T. Freedman, *Multiobjective Optimization in Water Resources Systems*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 1989.
- [59]. Haith D.A., "Multiobjective Water Resources Planning", In *Systems Approach to Water Management*, A.K. Biswas, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [60]. Hofmann, D.: *Rechnergestützte Qualitätssicherung*. Berlin: VEB Verlag Technik, Vol. 288, dec. 1988.
- [61]. Inoué, Optimal Reliability Design of Process Systems, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-23, No 1, 1994.
- [62]. Ivanović, G., Stanivuković, D., *Pouzdanost sistema*, Mašinski fakultet, Beograd, 1987.
- [63]. Jones, N. D., *Computability Theory*, Academic Press, North-Holland, New York and London, 1993.
- [64]. Kim J. Y., *Optimal Reliability Design for Complex System*, *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-30, No.3, 1991.
- [65]. Keeney, R. L. and G. W. Kirkwood, "Group Decision Making using Cardinal Social Welfare Functions", *Management Science*, Vol. 22, No. Dec. 1987.

- [66]. Keeney, R. L. and E. F. Wood, "An Illustrative Example of the Use of Multiattribute Utility Theory for Water Resource Planning", *Water Resources Research*, Vol 13, No. 4, Aug. 1989.
- [67]. Klein, J., Strohmer, F., Enzenhofen D., Investigation on Vibration of a Large Penstock, on the Sources of their Excitation and on Getting them under Control, 8 th AHR Symposium Leningrad 1986.
- [68]. Keen, P.G.W. , The Evolving Concept of Optimality", In *Multiple Criteria Decision Making* , Edited by M.K. Starr Amsterdam - New York, 1987.
- [69]. Karmanov, V.C., *Matematičkie programirovanie*, Nauka, Moskva, 1996.
- [70]. Lipson, C., *Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments*, Mc Graw – Hill, New York, 1987.
- [71]. Lambić, M., Čóckalo D., *Inženjerske metode*, Tehnički fakultet »M. Pupin«, Zrenjanin, 2003.
- [72]. Lambić, M., Marjanović, *Hidropneumatska postrojenja*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1998.
- [73]. Lee, F., Gardner, J., Thomson, G., Maintainability aspects of process plant pipe joints, *proc, Imashe Vol.201, No. A1, London, 1991.*
- [74]. Lin, J.G. "Multiple - Objective Problems, Pareto - Optimal Solutions by Method of Proper Equalita Constraints", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol, AC-21, NO.5, Oct. 1988.
- [75]. Lathrop, J. W. and K. Chen, "Comrehensive Evauiation of Long - Range Research and Development Strategies", *IEEE Trans. on systems, man and cybernetics*, Vol. SMC - 6, No. 1, Jan. 1992.
- [76]. Lin, J. G., "Maximal Vectors and Multi - Objective Optimization", *JOTA Vol. 18, No. 1, Jan. 1984.*
- [77]. Loucks, D.P., " An Application of Interactive Multiobjective Water Rasoureces Planning", *Interfaces*, Vol. 8, N₀. 1, 1987.
- [78]. McKelvey, R. D.and R. E. Wendell, "Voting Equilibria in Multidimensional Choice Spaces", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 1, No 2, May. 1989.
- [79]. Medanić, J. and M. Anđelić, "Minimax Pareto Optimal Solutions With Application to Linear - Quadratic Problems", *Seminar "Multicriteria Decision Making"*, CISM, Udine, Jun. 1974.
- [80]. Mehdorn, H., *Logistik im Werusverbund, Lokistin im Unternehmen*, nov/dec., 1990.
- [81]. Monarchi, D. E., C. C. Kisiel and L. Duckstein, "Interactive Multiobjective Programming in Water Resources: A Case Study", *Water Resources Research*, Vol. No. 4, 1987.
- [82]. Mihalević, B.C., *Merodi posledovatelnie optimizacie*, Nauka, Moskva, 1998.
- [83]. Minić S., *Dinamički model preventivnog održavanja prema stanju*, Naučno-tehnički skup, br.4, Beograd, 1990.
- [84]. Minić, S., *Izbor modela održavanja tehničkih sistema po vremenu na bazi kriterijuma minimalnih troškova*, *Vojnotehnički glasnik*, Beograd, 1995.
- [85]. Minić, S., *Koncept i model preventivnog održavanja tehničkih sistema prema stanju*, *Vojnotehnički glasnik*, br.6, Beograd, 1994.
- [86]. Minić, S., *Model tehničkog održavanja tehničkog sistema prema stanju*, *Naučno-tehnički pregled*, br.8, Beograd, 1994.

- [87]. Minić, S., Modeli održavanja tehničkih sistema, Vojna knjiga, Beograd, 1998.
- [88]. Misra, B.K., Reliability Optimization of a Serial - Paral, Sistem, IEEE Trans, on Reliability, No. 4, 1982.
- [89]. Nijkamp, P., "Stochastic Quantitative and Quantitative Multi - Criteria Analysis for Environmental Design", Research Memorandum No. 56, Department of Economics, Free University, Amsterdam, 1994.
- [90]. Nijkamp, P., and P. Rietveld, "Multi - Objective Programming Models: New Ways in regional Decision - Making ", Research Memorandum No. 43, Department of Economics, Free University, Amsterdam, 1995.
- [91]. Onisawa, T., An Application of Fuzzy Concepts to Modeling Reliability Analysis, Fuzzy Sets and Systems, 37, 1990.
- [92]. Nikolić, D., Dijagnostika, pouzdanost i efektivnost motora u eksploataciji, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd, 1999.
- [93]. Nikolić, D., Projekat: Primena postupaka tehničke dijagnostike u hidroelektranama, TF "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu, Zrenjanin 2005.
- [94]. Nikolić, D., Primena tehničke dijagnostike i rezultati ispitivanja vibracionog stanja u hidroelektranama, Časopis "Tehnička dijagnostika", br.1, str. 18-22, Vrnjačka Banja, 2005.
- [95]. Nikolić, D., Primena sopstvenog modela optimizacije na pouzdanost ležaja hidroelektrane, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 1, str. 43-47, Vrnjačka banja, 2006.
- [96]. Nikolić, D., Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, Časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 2, str. 38-42, Vrnjačka banja, 2006.
- [97]. Nikolić, D., Formiranje univerzalnog optimalnog modela na izabranim mernim mestima hidroelektrane pri merenju vibracija, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 2, str. 61-66, Vrnjačka banja, 2006.
- [98]. Nikolić, D., Konstruktivna rešenja podesna za dijagnostiku stanja hidroelektrane, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema" br.1, str. 21-26, Vrnjačka banja, 2007.
- [99]. Nikolić, D., Analiza modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema " br.1, str. 32-37, Vrnjačka banja, 2007.
- [100]. Nikolić, D., Razvoj sopstvenog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri merenju mehaničkih vibracija hidroelektrane, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema" br.1, str. 58-63, Vrnjačka banja, 2007.
- [101]. Nikolic, D., Matematička zavisnost primene modela optimizacije kod hidroelektrane, Časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 4 i 5, ISSN 1452-9677, str. 34-45, Niš, 2007.
- [102]. Nikolic, D., Adamovic, Ž., The analysis of the univerzal model optimization technical diagnostic procedures for power plants, Časopis "Strojarstvo", (u toku objavljivanje), Zagreb, 2007.
- [103]. Opricović, S. and B. Đorđević, "Optimal Long - Term Control of a Multipurpose Reservoir With Indirect Users", Water Resources Research, Vol. 12, No. 6, Dec. 1988.
- [104]. Pejović, S., Hidrauličke vibracije. Hidropostrojenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1979.
- [105]. Petrović, R., Specijalne metode u optiizaciji sistema, Tehnička knjiga, Beograd, 1990.

- [106]. Pravila tehničke eksploatacije "Električke stanice i setie". Energii, Moskva, 1989.
- [107]. The Research project "Cooperative Research on Decision Making Under Uncertainty in Natural Resources Management", The University of Arizona, Tucson, USA, and the Mining Research Institute, Budapest, Hungary, 1981.
- [108]. Rac, A., Dijagnostika mašinskih sistema, XIII konferencija VUMO, Beograd, 1988.
- [109]. Rogers, L., Thermography expectations and achievements an analysis of present roles and imminent changes, National Conference on Condition Monitoring, London, 1988.
- [110]. Roll, Y., Measuring the efficiency of maintenance units in the Israeli air Forces, Euro. J. Oper. Research, No. 43, 1998.
- [111]. Rejes, E., Terteologija, Informator, Zagreb, 1974.
- [112]. Richard, F., Industrial Engineering, Plenum Press, New York, 1986.
- [113]. Smith, J., Reliability Engineering, Pitman Publishing, Parker Street, Kingston, London, 1987.
- [114]. Sidnev, I., Tehnički dijagnostika, Mašinstroenie, Moskva, 1991.
- [115]. Roth, P., Dijagnosis od Automata Failures, IMB Journal od Research and Development, 10. 1979.
- [116]. Rushworth, H. A., The bredby maintainability index a method of systematically applying ergonomic principles to reduce cost and accidents in maintenance operations, maintenance, vol. 7. No. 2. 1992.
- [117]. Roy, B., "Problems and Methods with Multiple Objective Functions", Mathematical Programming 1, No. 2, 1991.
- [118]. Roy, B. et B. Bertier, "La metode ELECTRE II" Sixieme Conference Internationale de recherche operationnelle, Dublin, 1982.
- [119]. Salukvadze M., "On the Existence of Solutions in Problems of Optimization Under Vector-Valued Criteria", JOTA, Vol. 13, No. 2, 1984.
- [120]. Sargen, L., Principles of Inventory, Plenum Press, New York, 1983.
- [121]. Schmitendorf, W.E. and G. Moriarty, "A Sufficiency Condition for Coalitive Pareto-Optimal Solutions", In Multicriteria Decision Making and Differential Games, Edited by G. Leitmann, Plenum Press, New York, 1989.
- [122]. Sniedovich, M., On the Theory and Modeling of Dynamic Programming With Applications in Reservoir Operation, Ph. D. Dissertation, University of Arizona, Tucson, USA, 1992.
- [123]. Sotirović, V., Adamović, Ž., Metodologija naučno-istraživačkog rada sa statistikom u MS EXCEL-u, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2005.
- [124]. Stadler, W., "Sufficient Conditions for Preference Optimality" In Multiple Criteria Decision Making and Differential Games, Edited by G. Leitmann, Plenum Press, New York, 1991.
- [125]. Stern, R. J. and A. Ben - Israel, "An Interior Penalty Function Method for the Construction of Efficient Points in a Multiple Criteria Control Problem", J. of Math. Anal. and Appl. 46, 1984.
- [126]. Stanivuković, D., Ivanović G., Efektivnost tehničkih sistema, Naučna knjiga, Beograd, 1978.
- [127]. Stanivuković, D., Tehnička dijagnostika, Institut za tehničke sisteme, Novi Sad, 1984.

- [128]. Stute, G., Programierbare Straurerungen fur Fertigungseeihri – chfungen, ind. Ferrierengung 64, Springer – Verlag, Munchen, 1984.
- [129]. Stefanović S., Uticaj pojava mehaničkih oscilacija na sigurnost funkcionisanja sklopova u sistemu prenosa snage tekstilnih mašina, T.F. "Mihajlo Pupin" Zranjanin, Doktorska disertacija, Zrenjanin, 2006.
- [130]. Tiliman, A.F., Determing, Component Redudacy for Optimum Sisiem, Reliability, IEEE Transcations on Reliability, Vol., R-26, No-3, 1987.
- [131]. Taylor, III B. W, Davis R. K. and R. M. North, "Approaches to Multi - Objective Planning in Water Resource Projects", Water Resources Bulletin, (AWRA), Vol. 12., No. 5, oct. 1991.
- [132]. Thompson, G., The reduction of plant maintenance costs through desing, Maintenance, Vol. 7. No. 2. 1992.
- [133]. Troyer, D., Contimation Monitoring for maximum uptime, Diagnetiics, Inc., 1997.
- [134]. Todorović, J., Zelenović, D., Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [135]. Todorović, J., Zelenović, D., Efektivnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1991.
- [136]. Todorović, J., Održavanje tehničkog sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1995.
- [137]. Todorović, J., Osnovi teorije održavanja, Mašinski fakultet, Beograd, 1984.
- [138]. Todorović, J., Osnovi teorije održavanja, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [139]. Todorović, J., Teorija efektivnosti, Mašinski fakultet, Beograd, 1994.
- [140]. Tomović, J., Ispitivanje pouzdanosti, Vojno izdavački zavod, Beograd, 1998.
- [141]. Тумохов, А.В., Математические модели економичские воспроизводство, МGV, Москва, 1992.
- [142]. Vujanović, N., Pouzdanost tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1990.
- [143]. Vujanović, N., Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Naučna knjiga, Beograd, 1992.
- [144]. Vukadinović S., Elementi teorije pouzdanosti i teorije obnavljanja tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Beograd, 1989.
- [145]. Wellenschningungen von Wasseruraftmaschinen sätzen Messungen und Beurteilung, V01.2059, 1991.
- [146]. Wallenius, J. "Comparative Evaluation of Some Interactive Approaches to Multicriterion Optimization", Management Science, Vol. 21, No. 12, Aug. 1988.
- [147]. Wohllebe, H., Teehnische Dijagnostik in Mashinenbau, veb vrelag tehnick, Dresden, 1988.
- [148]. Wourd, E. P. The dynomics of planning, Pergaman Press, Oxford, 1984.
- [149]. What is TPM, Maintenance, vol 7, No.1, March, 1992.
- [150]. Yu, P.L. and G. Leitmann, "Compromise Solutions, Dominations Structures, and Salukvadzes Solution", Journal of Optimization Theory and Aplicationa (JOTA), Vol. 13, No. 3, 1994.
- [151]. Yu, P.L. and G. Leitmann, "Confedence Structures in Decision Making", Journal of Optimiyation Theori and Applications, Vol. 22, No. 2, June. 1993.
- [152]. Yu, P.L. "Decision Dynamics With an Application to Persuasion and Negotiation", In Multiple Criteria Decision Making, Editid by M. K. Starr and M. Zeieni, North - Holland Publishing Compani, Amsterdam, 1994.

- [153]. Zadach, L. A., "Optimality and Noa - Scalar - Valued Performance Criteria", LEE Transactions on Automatic Control, Vol AC - 8, No. 1, jan. 1987.
- [154]. Zeleny, M., "Compromise Programming", in Cochrane J.L. and M. Zeleny, University of South Academic Press, London, 1983.
- [155]. Zeleny, M., "Linear Multiobjective Program", Springer Verlag, Academic Press, London, 1985.
- [156]. Zlikind, Y.M., Kontrolie, vibracie mošćnih gidrogeneratov, Energie, Moskva, 1988.
- [157]. Zelenović, D., Istraživanje uticaja na pojavu otkaza, Priručnik, Beograd, 1984.
- [158]. Zelenović, D., Vujanović, N., Pouzdanost sistema, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1986.
- [159]. Zuhorn D., Erfolgskriterien fuer eine Effizient Logistik, Logistik im Unternehmen, jan-feb. 1990.
- [160]. Zelenović, D., Proizvodni sistem, Nućna knjiga, Beograd, 1988.
- [161]. Zelenović, D., Upravljanje proizvodnim sistemom, Naućna knjiga, Beograd, 1987..
- [162]. Zbornik radova "XXI majski skup održavalaca ", Kotor, 1998.
- [163]. Zbornik radova XXIII Jugoslovenski majski skup "Održavanje tehničkih sistema", Kragujevac, 1998.
- [164]. Zbornik radova sa Savetovanja održavaoca, Smederevo, 1995.
- [165]. Zbornik radova, YUTRIB '89, "Jugoslovenska konferencija o tribologiji", Kragujevac, 1989.
- [166]. Zbornik radova, YUTRIB '89, "Jugoslovenska konferencija o tribologiji", Beograd, 2003.
- [167]. Zbornik radova, "Tehnićka dijagnostika", Naućni-strućni ćasopis, Smederevo, 2004.
- [168]. Zbornik radova, "Održavanje mašina", Naućno-strućni ćasopis, Beograd, 2004.
- [169]. Zbornik radova, " Hidraulika i pneumatika", Naućno-strućni ćasopis, Niš, 2006.
- [170]. Zbornik radova, "Hidraulika i pneumatika", Naućno-strućni ćasopis, Niš, 2007.

PRILOZI

R.B.	Naziv sastavnih komponenti sklopa	Vremenski interval komponenti do otkaza $\Delta t(h)$	$f_{N_i}(t)$	z	μ	σ	$P_i(t) = \varphi(z)$
1	Budilica (N ₁)	50000 ÷ 65000	$1,558 \cdot 10^{-5}$	1,94	0,67	5,23	1,00
2	Zvono (N ₂)	50000 ÷ 66000	$7,98 \cdot 10^{-6}$	2,46	-4,89	8,78	0,989
3	Noseći ležaj (N ₃)	50000 ÷ 62000	$4,34 \cdot 10^{-5}$	1,54	8,88	1,23	0,887
4	Gornji vodeći ležaj (N ₄)	50000 ÷ 62000	$5,91 \cdot 10^{-6}$	1,32	7,78	1,28	0,846
5	Rotor (N ₅)	50000 ÷ 65000	$2,44 \cdot 10^{-5}$	1,45	6,56	2,29	0,848
6	Donji vodeći ležaj (N ₆)	50000 ÷ 62000	$4,16 \cdot 10^{-5}$	1,37	0,98	1,34	0,834
7	Turbinski ležaj (N ₇)	50000 ÷ 62000	$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,43	0,94	1,47	0,787
8	Ugljeni zaptivač (N ₈)	50000 ÷ 64000	$7,36 \cdot 10^{-6}$	1,44	1,37	1,69	0,758
9	Radno kolo (N ₉)	50000 ÷ 65000	$5,56 \cdot 10^{-5}$	1,21	1,39	1,28	0,745
10	Sprovodni aparat (R ₁)	50000 ÷ 65000	$3,88 \cdot 10^{-5}$	1,28	4,39	1,85	0,734
11	Regulator (R ₂)	50000 ÷ 65000	$5,59 \cdot 10^{-5}$	0,89	6,98	1,13	0,695

Tabela P.1. Vrednosti parametara koje određuju pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla -3" Surdulica u slučaju lognormalne raspodele pouzdanosti $R_{ii}(t)_{opt} = \varphi(z)_{opt}$ bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike

R.B.	Naziv sastavnih komponenti sklopa	Vremenski interval komponenti do otkaza $\Delta t(h)$	$f_{N_i}(t)$	z	μ	σ	$P_i(t) = \varphi(z)$
1	Budilica (N_1)	50000 ÷ 65000	$1,38 \cdot 10^{-5}$	1,92	0,65	5,19	1,00
2	Zvono (N_2)	50000 ÷ 66000	$7,95 \cdot 10^{-6}$	2,34	-4,76	8,69	0,988
3	Noseći ležaj (N_3)	50000 ÷ 62000	$4,26 \cdot 10^{-5}$	1,52	8,78	1,23	0,877
4	Gornji vodeći ležaj (N_4)	50000 ÷ 62000	$5,84 \cdot 10^{-6}$	1,24	7,69	1,29	0,851
5	Rotor (N_5)	50000 ÷ 65000	$2,31 \cdot 10^{-5}$	1,39	6,28	2,28	0,847
6	Donji vodeći ležaj (N_6)	50000 ÷ 62000	$4,16 \cdot 10^{-5}$	1,25	0,98	1,19	0,819
7	Turbinski ležaj (N_7)	50000 ÷ 62000	$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,39	0,99	1,43	0,788
8	Ugljeni zaptivač (N_8)	50000 ÷ 64000	$7,12 \cdot 10^{-6}$	1,43	1,39	1,69	0,759
9	Radno kolo (N_9)	50000 ÷ 65000	$5,13 \cdot 10^{-5}$	1,25	1,39	1,27	0,729
10	Sprovodni aparat (R_1)	50000 ÷ 65000	$3,34 \cdot 10^{-5}$	1,45	4,44	1,87	0,723
11	Regulator (R_2)	50000 ÷ 65000	$5,16 \cdot 10^{-5}$	0,87	6,99	1,35	0,697

Tabela P.2. Vrednosti parametara koje određuju pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla -3" Surdulica u slučaju lognormalne raspodele pouzdanosti $R_{ii}(t)_{\max} = \varphi(z)_{\max}$ bez primene parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike

R.B.	Naziv sastavnih komponenti sklopa	Vremenski interval komponenti do otkaza $\Delta t(h)$	$f_{N_i}(t)$	z	μ	σ	$P_i(t) = \varphi(z)$
1	Budilica (N ₁)	50000 ÷ 65000	$1,43 \cdot 10^{-5}$	1,84	0,56	5,18	1,00
2	Zvono (N ₂)	50000 ÷ 66000	$7,97 \cdot 10^{-6}$	2,27	-4,62	8,61	0,982
3	Noseći ležaj (N ₃)	50000 ÷ 62000	$4,28 \cdot 10^{-5}$	1,48	8,72	1,03	0,881
4	Gornji vodeći ležaj (N ₄)	50000 ÷ 62000	$5,84 \cdot 10^{-6}$	1,12	7,62	1,21	0,842
5	Rotor (N ₅)	50000 ÷ 65000	$2,33 \cdot 10^{-5}$	1,32	6,24	2,21	0,838
6	Donji vodeći ležaj (N ₆)	50000 ÷ 62000	$4,16 \cdot 10^{-5}$	1,12	0,86	1,12	0,814
7	Turbinski ležaj (N ₇)	50000 ÷ 62000	$1,44 \cdot 10^{-5}$	1,31	0,98	1,39	0,784
8	Ugljeni zaptivač (N ₈)	50000 ÷ 64000	$7,12 \cdot 10^{-6}$	1,34	1,32	1,64	0,752
9	Radno kolo (N ₉)	50000 ÷ 65000	$5,23 \cdot 10^{-5}$	1,07	1,36	1,21	0,724
10	Sprovodni aparat (R ₁)	50000 ÷ 65000	$3,34 \cdot 10^{-5}$	1,37	4,34	1,79	0,703
11	Regulator (R ₂)	50000 ÷ 65000	$5,18 \cdot 10^{-5}$	0,78	6,92	1,08	0,682

Tabela P.3. Vrednosti parametara koje određuju pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u slučaju lognormalne raspodele pouzdanosti $R_{ii}(t)_{sr} = \varphi(z)_{sr}$ sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike

R.B.	Naziv sastavnih komponenti sklopa	Vremenski interval komponenti do otkaza $\Delta t(h)$	$f_{N_i}(t)$	z	μ	σ	$P_i(t) = \varphi(z)$
1	Budilica (N ₁)	50000 ÷ 65000	$1,33 \cdot 10^{-5}$	1,82	0,57	5,17	1,00
2	Zvono (N ₂)	50000 ÷ 66000	$7,95 \cdot 10^{-6}$	2,23	-4,60	8,61	0,981
3	Noseći ležaj (N ₃)	50000 ÷ 62000	$4,26 \cdot 10^{-5}$	1,44	8,70	1,01	0,880
4	Gornji vodeći ležaj (N ₄)	50000 ÷ 62000	$5,84 \cdot 10^{-6}$	1,10	7,61	1,21	0,841
5	Rotor (N ₅)	50000 ÷ 65000	$2,31 \cdot 10^{-5}$	1,31	6,21	2,23	0,832
6	Donji vodeći ležaj (N ₆)	50000 ÷ 62000	$4,16 \cdot 10^{-5}$	1,11	0,82	1,12	0,811
7	Turbinski ležaj (N ₇)	50000 ÷ 62000	$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,30	0,93	1,34	0,780
8	Ugljeni zaptivač (N ₈)	50000 ÷ 64000	$7,12 \cdot 10^{-6}$	1,31	1,32	1,61	0,752
9	Radno kolo (N ₉)	50000 ÷ 65000	$5,13 \cdot 10^{-5}$	1,03	1,33	1,20	0,721
10	Sprovodni aparat (R ₁)	50000 ÷ 65000	$3,34 \cdot 10^{-5}$	1,33	4,31	1,72	0,702
11	Regulator (R ₂)	50000 ÷ 65000	$5,16 \cdot 10^{-5}$	0,72	6,92	1,03	0,681

Tabela P.4. Vrednosti parametara koje određuju pouzdanost rada sastavnih komponenti sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica u slučaju lognormalne raspodele pouzdanosti $R_i(t)_{\min} = \varphi(z)_{\min}$ sa primenom parametara optimizacije postupaka tehničke dijagnostike

Vreme rada komponenti sklopova (h)	Otkazi na mestima merenja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane „Vrla – 3“										
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	R ₁	R ₂
50000	18	38	15	13	15	19	17	17	12	17	15
52000	13	25	13	12	10	17	16	18	15	13	14
54000	12	23	17	14	15	12	17	15	18	12	17
56000	13	16	18	19	15	12	18	16	19	14	15
58000	15	15	16	18	14	14	19	14	14	13	12
60000	14	14	15	19	14	18	17	17	18	14	14
61000	11	16	16	14	16	15	16	15	15	21	15
62000	13	17	18	19	16	16	16	17	16	13	13
63000	14	16	17	16	11	12	13	11	12	12	15
64000	12	13	11	17	16	19	18	17	17	15	17

Tabela P.5. Otkazi koji su nastali usled povećanog nivoa vibracije, temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih komponenata sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenti - optimalni model

Vreme rada komponenti sklopova (h)	Otkazi na mestima merenja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane „Vrla – 3“										
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	R ₁	R ₂
51000	17	36	14	12	14	18	16	15	10	16	14
53000	12	24	13	12	10	15	14	15	11	13	11
55000	12	22	15	14	15	12	15	14	18	12	17
57000	12	16	16	17	15	12	18	16	16	11	15
59000	14	11	16	18	14	14	19	14	14	13	12
61000	13	14	15	17	14	18	17	17	18	14	14
62000	11	12	16	14	15	15	16	13	15	21	11
63000	13	14	16	18	16	16	16	17	16	13	13
64000	13	13	15	16	11	12	13	11	12	12	15
65000	11	12	11	15	14	16	14	15	16	14	14

Tabela P.6. Otkazi koji su nastali usled povećanog nivoa vibracije, temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih komponenata sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima nisu primenjeni parametri stanja komponenti - optimalni model

Vreme rada komponenti sklopova (h)	Otkazi na mestima merenja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane „Vrla – 3“										
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	R ₁	R ₂
50000	9	14	8	6	10	15	11	11	9	10	11
52000	9	11	9	8	9	10	11	10	13	10	10
54000	8	9	8	10	11	9	10	12	11	9	10
56000	7	10	7	11	12	10	12	11	15	10	11
58000	10	8	7	10	9	12	11	10	11	11	9
60000	6	10	6	10	12	13	10	13	11	10	11
61000	7	9	7	11	14	12	10	11	10	11	11
62000	8	8	9	10	10	11	11	12	11	10	10
63000	5	10	7	12	12	9	8	7	9	9	9
64000	6	9	7	10	11	11	10	11	10	7	8

Tabela P.7. Otkazi koji su nastali usled povećanog nivoa vibracije, temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih komponenata sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima su primenjeni parametri stanja komponenti - optimalni model

Vreme rada komponenti sklopova (h)	Otkazi na mestima merenja sastavnih komponenata sklopova hidroelektrane „Vrla – 3“										
	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	R ₁	R ₂
51000	8	11	7	5	9	11	8	9	9	8	8
53000	7	10	8	8	8	10	9	10	10	10	10
55000	8	9	6	8	11	9	10	9	11	9	9
57000	7	10	7	9	10	8	8	11	9	10	11
59000	9	8	7	10	9	12	11	10	11	11	9
61000	6	9	6	10	12	11	7	9	11	8	11
62000	7	8	7	11	11	10	10	11	10	11	11
63000	7	8	6	9	10	11	11	12	10	10	9
64000	5	10	7	10	12	9	8	7	9	8	9
65000	4	8	5	8	8	8	7	9	8	6	8

Tabela P.8. Otkazi koji su nastali usled povećanog nivoa vibracije, temperature i pohabanosti ležajeva na mernim mestima analiziranih komponenata sklopova HE "Vrla - 3" Surdulica na kojima su primenjeni parametri stanja komponenti - optimalni model

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju temperature ležajeva			
		$\lambda_a(t)$	$R_a(t)$	$f_a(t)$	$S_a(t)$
N ₃	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,945	0,106	2,366	-0,633
N ₄	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,809	0,141	2,262	-0,434
N ₆	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,837	0,154	2,169	-0,452
N ₇	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,898	0,161	2,178	-0,468

Tabela P.9. Određivanje parametara $\lambda_a(t)$, $R_a(t)$, $f_a(t)$ i $S_a(t)$ pri merenju temperature ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica bez primene parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju temperature ležajeva			
		$\lambda_a(t)$	$R_a(t)$	$f_a(t)$	$S_a(t)$
N ₃	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,921	0,101	2,358	-0,624
N ₄	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,789	0,134	2,256	-0,425
N ₆	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,824	0,145	2,158	-0,446
N ₇	$50000 \leq \Delta t_i \leq 52000$	0,876	0,155	2,169	-0,457

Tabela P.10. Određivanje parametara $\lambda_a(t)$, $R_a(t)$, $f_a(t)$ i $S_a(t)$ pri merenju temperature ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica bez primene parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju temperature ležajeva			
		$\lambda_a(t)$	$R_a(t)$	$f_a(t)$	$S_a(t)$
N ₃	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,734	0,116	1,031	-0,259
N ₄	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,798	0,120	1,034	-0,268
N ₆	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,741	0,127	1,039	-0,274
N ₇	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,727	0,131	1,048	-0,286

Tabela P.11. Određivanje parametara $\lambda_a(t)$, $R_a(t)$, $f_a(t)$ i $S_a(t)$ pri merenju temperature ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica sa primenom parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju temperature ležajeva			
		$\lambda_a(t)$	$R_a(t)$	$f_a(t)$	$S_a(t)$
N ₃	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,734	0,116	1,031	-0,259
N ₄	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,798	0,120	1,034	-0,268
N ₆	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,741	0,127	1,039	-0,274
N ₇	$60000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	0,727	0,131	1,048	-0,286

Tabela P.12. Određivanje parametara $\lambda_a(t)$, $R_a(t)$, $f_a(t)$ i $S_a(t)$ pri merenju temperature ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica sa primenom parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju pohabanosti ležajeva				
		$\beta (t)$	$\eta (t)$	$\varphi (t)$	$\omega (t)$	$k(t)$
N_3	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	15,346	8,577	0,931	0,659	2,872
N_4	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,043	8,852	0,940	0,668	2,679
N_6	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,849	8,964	0,847	0,677	2,684
N_7	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,957	9,075	0,855	0,685	2,891

Tabela P.13. Određivanje parametara $\beta (t)$, $\eta (t)$, $\varphi (t)$, $\omega (t)$, $k(t)$ pri merenju pohabanosti ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica bez primene parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju pohabanosti ležajeva				
		$\beta (t)$	$\eta (t)$	$\varphi (t)$	$\omega (t)$	$k(t)$
N_3	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	15,334	8,565	0,918	0,646	2,860
N_4	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,032	8,845	0,923	0,649	2,665
N_6	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,836	8,952	0,833	0,665	2,673
N_7	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	16,945	9,061	0,842	0,673	2,887

Tabela P.14. Određivanje parametara $\beta (t)$, $\eta (t)$, $\varphi (t)$, $\omega (t)$, $k(t)$ pri merenju pohabanosti ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica bez primene parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju pohabanosti ležajeva				
		$\beta (t)$	$\eta (t)$	$\varphi (t)$	$\omega (t)$	$k(t)$
N ₃	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	12,620	6,031	0,819	0,537	1,651
N ₄	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	12,224	5,035	0,823	0,542	1,857
N ₆	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	11,829	5,038	0,727	0,448	1,862
N ₇	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	10,239	4,042	0,730	0,451	1,968

Tabela P.15. Određivanje parametara $\beta (t)$, $\eta (t)$, $\varphi (t)$, $\omega (t)$, $k(t)$ pri merenju pohabanosti ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica sa primenom parametara stanja komponenata

Naziv sastavne komponente	Vremenski interval $\Delta t_i (h)$	Parametri pri merenju pohabanosti ležajeva				
		$\beta (t)$	$\eta (t)$	$\varphi (t)$	$\omega (t)$	$k(t)$
N ₃	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	12,609	6,020	0,807	0,522	1,638
N ₄	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	12,211	5,023	0,811	0,528	1,843
N ₆	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	11,812	5,019	0,713	0,432	1,848
N ₇	$50000 \leq \Delta t_i \leq 62000$	10,223	4,024	0,716	0,437	1,953

Tabela P.16. Određivanje parametara $\beta (t)$, $\eta (t)$, $\varphi (t)$, $\omega (t)$, $k(t)$ pri merenju pohabanosti ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica sa primenom parametara stanja komponenata

Eksploataciono vreme rada sastavnih komponenti sklopova sa dozvoljenim rizikom (h)	Merno mesto 1				Merno mesto 2					Merno mesto 3					
	$N_1(t)$	$N_2(t)$	η_1	$\lambda_1 \max$	$N_3(t)$	$N_4(t)$	$N_5(t)$	$N_6(t)$	η_2	$\lambda_2 \max$	$N_7(t)$	$N_8(t)$	$N_9(t)$	η_3	$\lambda_3 \max$
50000	9,342	9,342	0,0218	$2,83 \cdot 10^{-4}$	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	$2,31 \cdot 10^{-4}$	8,726	8,726	8,726	11,427	$2,31 \cdot 10^{-4}$
50100	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50300	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50400	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50500	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,739	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50600	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	10,426	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50700	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50800	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50900	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	10,817	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
51000	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
51100	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	9,627	11,427	
52200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52300	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52400	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52700	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52950	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
54000	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	9,601	8,726	11,427	
54200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	10,607	9,731	8,341		8,726	8,726	8,976	11,427	
54600	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
54750	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	10,246	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
55100	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	10,246	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
55350	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	9,451	11,427			
55750	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
56000	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			

Tabela P.17. Vrednosti optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada komponenti sklopa HE "Vrla -3" Surdulica na izabranim mernim mestima sa primenom parametara stanja komponenata u eksploatacionom periodu rada sa dozvoljenim rizikom – primenom optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja za λ_{\max}

Eksloataciono vreme rada sastavnih komponenti sklopa sa dozvoljenim rizikom (h)	Merno mesto 1				Merno mesto 2						Merno mesto 3					
	$N_1(t)$	$N_2(t)$	η_1	$\lambda_1 \max$	$N_3(t)$	$N_4(t)$	η_2	$N_5(t)$	$N_6(t)$	η_3	$\lambda_2 \max$	$N_7(t)$	$N_8(t)$	$N_9(t)$	η_4	$\lambda_3 \max$
50000	8,842	8,842	16,381	$2,157 \cdot 10^{-4}$	8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643	$1,691 \cdot 10^{-4}$	8,103	8,103	8,103	3146,123	$4,596 \cdot 10^{-4}$
50100	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50200	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50300	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50400	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50500	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50600	8,842	8,842	16,381		9,124	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50700	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
50800	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,423	8,103	8,103	3146,123	
50900	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
51000	8,842	8,842	16,381		8,763	8,8468	234,112	8,763	8,791	9,643		8,103	8,467	8,103	3146,123	
51100	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
52200	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,914	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
52300	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,219	3146,123	
52400	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
52700	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
52950	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,919	9,643		8,244	8,103	8,103	3146,123	
54000	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,103	3146,123	
54200	8,842	8,842	16,381		8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,103	8,228	3146,123	
54600	8,911	8,842	17,194		8,763	8,831	234,112	8,763	8,763	9,643		8,103	8,557	8,103	3146,123	
54750	8,842	8,842	16,381	8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643	8,103	8,103	8,103	3146,123			
55100	8,842	8,842	16,381	8,763	8,763	234,112	8,897	8,763	9,643	8,103	8,103	8,103	3146,123			
55350	8,842	8,842	16,381	8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643	8,103	8,103	8,103	3146,123			
55750	8,842	8,842	16,381	8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643	8,103	8,103	8,103	3146,123			
56000	8,842	8,842	16,381	8,763	8,763	234,112	8,763	8,763	9,643	8,103	8,103	8,103	3146,123			

Tabela P.18. Vrednosti optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada komponenti sklopa HE "Vrla –3" Surdulica na izabranim mernim mestima sa primenom parametara stanja komponenata u eksploatacionom periodu rada sa dozvoljenim rizikom – primenom optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja za λ_{\max}

Eksploataciono vreme rada sastavnih komponenti sklopova sa dozvoljenim rizikom (h)	Merno mesto 1				Merno mesto 2						Merno mesto 3				
	$N_1(t)$	$N_2(t)$	η_1	$\lambda_1 \max$	$N_3(t)$	$N_4(t)$	$N_5(t)$	$N_6(t)$	η_2	$\lambda_2 \max$	$N_7(t)$	$N_8(t)$	$N_9(t)$	η_3	$\lambda_3 \max$
50000	9,342	9,342	0,0218	$2,83 \cdot 10^{-4}$	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	$2,31 \cdot 10^{-4}$	8,726	8,726	8,726	11,427	$2,31 \cdot 10^{-4}$
50100	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50300	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50400	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50500	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,739	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50600	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	10,426	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50700	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50800	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
50900	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	10,817	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
51000	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
51100	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	9,627	11,427	
52200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52300	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52400	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52700	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52950	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
54000	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	9,601	8,726	11,427	
54200	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	10,607	9,731	8,341		8,726	8,726	8,976	11,427	
54600	9,342	9,342	0,0218		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
54750	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	10,246	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
55100	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	10,246	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
55350	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	9,451	11,427			
55750	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			
56000	9,342	9,342	0,0218	9,731	9,731	9,731	9,731	8,341	8,726	8,726	8,726	11,427			

Tabela P.19. Vrednosti optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada komponenti sklopa HE "Vrla -3" Surdulica na izabranim mernim mestima sa primenom parametara stanja komponenata u eksploatacionom periodu rada sa dozvoljenim rizikom
– primenom optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja za λ_{\max}

Eksploataciono vreme rada sastavnih komponenti sklopova sa dozvoljenim rizikom (h)	Merno mesto 1				Merno mesto 2						Merno mesto 3				
	$N_1(t)$	$N_2(t)$	η_1	$\lambda_1 \max$	$N_3(t)$	$N_4(t)$	$N_5(t)$	$N_6(t)$	η_2	$\lambda_2 \max$	$N_7(t)$	$N_8(t)$	$N_9(t)$	η_3	$\lambda_3 \max$
50000	9,339	9,341	0,0213	$2,81 \cdot 10^{-4}$	9,730	9,730	9,730	9,730	8,340	$2,32 \cdot 10^{-4}$	8,722	8,723	8,721	11,424	$2,34 \cdot 10^{-4}$
50100	9,340	9,341	0,0213		9,731	9,730	9,730	9,730	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50200	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	9,730	9,730	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50300	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	9,730	9,731	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50400	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,730	9,730	9,731	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50500	9,341	9,341	0,0213		9,730	9,730	9,731	9,739	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50600	9,340	9,341	0,0212		9,730	9,730	10,426	9,731	8,340		8,722	8,723	8,721	11,424	
50700	9,340	9,341	0,0213		9,731	9,730	9,731	9,731	8,340		8,722	8,723	8,726	11,424	
50800	9,340	9,341	0,0213		9,731	9,730	9,731	9,731	8,340		8,722	8,723	8,726	11,424	
50900	9,340	9,340	0,0213		9,730	9,730	9,731	10,817	8,341		8,722	8,726	8,726	11,424	
51000	9,340	9,340	0,0213		9,730	9,730	9,731	9,731	8,341		8,722	8,726	8,726	11,424	
51100	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,730	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	9,627	11,427	
52200	9,340	9,341	0,0213		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52300	9,341	9,341	0,0213		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52400	9,340	9,341	0,0213		9,731	9,731	9,730	9,730	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52700	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
52950	9,341	9,340	0,0212		9,730	9,731	9,731	9,730	8,341		8,726	8,726	8,726	11,427	
54000	9,341	9,340	0,0213		9,730	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	9,601	8,726	11,424	
54200	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	10,607	9,731	8,341		8,726	8,726	8,976	11,424	
54600	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	9,731	9,731	8,340		8,722	8,726	8,726	11,427	
54750	9,340	9,340	0,0213		9,730	9,731	9,731	10,246	8,340		8,722	8,726	8,726	11,427	
55100	9,340	9,340	0,0213		9,730	9,731	9,731	10,246	8,340		8,722	8,723	8,726	11,427	
55350	9,340	9,341	0,0213		9,730	9,731	9,730	9,731	8,340		8,726	8,723	9,451	11,427	
55750	9,340	9,341	0,0212		9,730	9,731	9,730	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,424	
56000	9,340	9,340	0,0213		9,731	9,731	9,731	9,731	8,341		8,726	8,726	8,726	11,424	

Tabela P.20. Vrednosti optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja rada komponenti sklopa HE "Vrla -3" Surdulica na izabranim mernim mestima sa primenom parametara stanja komponenata u eksploatacionom periodu rada sa dozvoljenim rizikom – primenom optimalnog modela sigurnosti funkcionisanja za λ_{\max}

HIDROELEKTRAN A	AGREGAT A	MERNO MESTO	OZNAKA MERNOG MESTA	MERNI PRAVAC	DVOSTRUKE VRŠNE AMPLITUDE – $A_i(t)_{op}$ [$\mu m / s$]											
					PRAZAN HOD				AGREGAT NA MREZI							
					NEPOBUDJEN		POBUDJEN		$P_A = 5,2$ MW		$P_A = 7,8$ MW		$P_A = 10,4$ MW		$P_A = 13$ MW	
					A (f_0)	2Σ	$2A$ (f_0)	2Σ	A (f_0)	2Σ	A (f_0)	2Σ	A (f_0)	2Σ	A (f_0)	2Σ
VRLA - 3	A	ZONA TURBINSKOG LEZAJA	1	R	96	104	90	98	76	80	78	82	80	86	80	86
			1	R	109	112	105	108	104	110	104	108	101	104	94	99
		ZONA DONJEG GENERATORSKOG LEZAJA	2	R	258	259	256	257	222	222	204	206	200	202	192	195
			2	R	304	305	326	327	330	334	315	318	300	302	280	283
		ZONA GORNJEG GENERATORSKOG LEZAJA	3	R	252	254	245	246	218	218	298	201	199	201	188	191
			3	R	298	299	315	316	319	3321	303	3305	289	291	279	281

Tabela P.21. Dvostruke vršne amplitude po radnim mestima i zonama ležajeva HE "Vrla – 3" Surdulica

VRLA - 3	HIDROELEKTRANA	MERNO MESTO	OZNAKA MERNOG MESTA	MERNI PRAVAC	VRŠNE AMPLITUDE APSOLUTNIH VIBRACIJA POMERAJA – $A_i(t)_{op}$ [$\mu\text{m} / \text{s}$]																																					
	AGREGAT				PRAZAN HOD								AGREGAT NA MREZI																													
					NEPOBUDJEN				POBUDJEN				P _A = 5,5 MW		P _A = 8,0 MW		P _A = 10,5 MW		P _A = 13 MW																							
					0.4f ₀	f ₀	2f ₀	3f ₀	4f ₀	F _e	0.4f ₀	f ₀	2f ₀	3f ₀	4f ₀	F _e	0.4f ₀	f ₀	2f ₀	3f ₀	4f ₀	F _e																				
A	TURBINSKI LEZAJ	1	R		1.1								2.5	1.3	0.3	0.1	0.2		2.0	1.4	0.3	0.1	0.2		2.2	1.4	0.3	0.1	0.1		2.0	1.1	0.4	0.1	0.1							
				DONJI GENERATOR. LEZAJ	2	R		20.6	2.5	3.0	1.0						25.9	3.0	4.0	1.0										26.4	3.0	6.0	1.0									
							GORNJI GENERATORS. LEZAJ	3	R		18.9	12.0	2.0						17.5	13.0	2.5	1.0											15.5	11.0	2.5	0.5						
										NOSECI LEZAJ	4	A		5.1	1.7	1.0	0.4					2.2	2.1	1.0	0.2											5.1	1.7	1.0	0.3			
		5.1	1.7										1.0	0.4					2.2	2.1	1.0	0.2												5.1	1.7	1.0	0.3					
		5.1	1.7	1.0	0.4											2.2	2.1	1.0	0.2													5.1	1.7	1.0	0.3							
		5.1	1.7	1.0	0.4								2.2	2.1	1.0	0.2													5.1	1.7	1.0	0.3										

Tabela P.22. Vršne amplitude agregata – A, HE "Vrla – 3" Surdulica po radnim mestima i zonama ležajeva

HIDROELEKTRANA	AGREGAT	MERNO MESTO	OZNAKA MERNOG MESTA	MERNI PRAVAC	VRŠNE AMPLITUDE APSOLUTNIH VIBRACIJA POMERAJA – $A_i(t)_{op}$ [$\mu\text{m/s}$]																		
					PRAZAN HOD								AGREGAT NA MREZI										
					NEPOBUDJEN				POBUDJEN				$P_A = 12$ MW		$P_A = 16$ MW		$P_A = 20$ MW		$P_A = 25$ MW				
					$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e	$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e	$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e	
ĐERDAP II	A	TURBINSKI LEZAJ	1	R		1.3																	
						1.6																	
							1.2																
							0.7																
		DONJI GENERATOR. LEZAJ	2	R		21.6																	
						2.9																	
						3.5																	
						1.0																	
	GORNJI GENERATORS. LEZAJ	3	R		19.2																		
					13.1																		
					2.7																		
						18.3																	
	NOSECI LEZAJ	4	A		6.3																		
					1.8																		
					1.2																		
					0.4																		
		2.8																					
		2.4																					
		1.2																					
		0.6																					
		5.3																					
		1.9																					
		1.2																					
		0.3																					
		5.1																					
		1.7																					
		1.2																					
		0.3																					
		2.3																					
		2.1																					
		1.3																					
		0.3																					
		5.9																					
		0.9																					
		0.7																					

Tabela P.24. Vršne amplitude agregata – A, "Đerdap II" kod Kladova po radnim mestima i zonama ležajeva

HIDROELEKTRANA	AGREGAT	MERNO MESTO	OZNAKA MERNOG MESTA	MERNI PRAVAC	VRŠNE AMPLITUDE APSOLUTNIH VIBRACIJA POMERAJA – $A_i(t)_{op}$ [$\mu\text{m}/\text{s}$]																	
					PRAZAN HOD								AGREGAT NA MREZI									
					NEPOBUDJEN				POBUDJEN				$P_B = 12 \text{ MW}$		$P_B = 16 \text{ MW}$		$P_B = 20 \text{ MW}$		$P_B = 25 \text{ MW}$			
					$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e	$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e	$0.4f_0$	f_0	$2f_0$	$3f_0$	$4f_0$	F_e
					ĐERDAP II	B	TURBINSKI LEZAJ	1	R													
DONJI GENERATOR. LEZAJ	2	R																				
GORNJI GENERATORS. LEZAJ	3	R																				
NOSECI LEZAJ	4	A																				
					6.5	1.8	1.3	0.5														
					2.7	2.4	1.2	0.7														
					18.4	13.5	2.7	1.5														
					15.6	13.1	3.4	0.4														
					27.4	4.2	5.1	1.2														
					15.7	14.0	3.0	0.5														
					26.5	3.3	6.2	1.3														
					15.5	11.3	2.5	0.6														
					17.8	7.2	2.2	0.7														
					5.6	0.7	0.6															
					2.2	1.3	0.4															
					2.2	0.4	0.3															
					2.5	0.3	0.2															
					1.4	0.3	0.4															
					26.4	3.3	6.1	1.1														
					15.5	11.3	2.5	0.6														
					17.8	7.2	2.2	0.7														
					5.6	0.7	0.6															
					2.2	1.3	0.4															
					2.2	0.4	0.3															
					2.5	0.3	0.2															
					1.4	0.3	0.4															
					26.4	3.3	6.1	1.1														
					15.5	11.3	2.5	0.6														
					17.8	7.2	2.2	0.7														
					5.6	0.7	0.6															
					2.2	1.3	0.4															
					2.2	0.4	0.3															
					2.5	0.3	0.2															
					1.4	0.3	0.4															
					26.4	3.3	6.1	1.1														

Tabela P.25. Vršne amplitude agregata – B, "Đerdap II" kod Kladova po radnim mestima i zonama ležajeva

HIDROELEKTRANA (PUMPNA STANICA)	AGREGAT	BROJ OBRTAJA n (ob/min)	PREČ. RAD KOLA Ø D (mm)	BROJ LOPAT. RAD. KOLA Z_{RK}	BROJ SEGMENTA U TURB. LEŽAJU k	MAKSIM. PAD. H (m)
HE "VRLA – 1"	A	600	1555	16	18	338
	B		1648	17	18	
	C					
	D					
HE "VRLA – 2"	A	500	1440	15	20	153,9
	B	600	1360	17	18	
HE "VRLA – 3"	A	600	1440	15	20	197,4
	B		1360	17	18	192,3
HE "VRLA – 4"	A	500	1440	15	18	164,2
	B	600	1360	17		158,7

Tabela P.26. Karakteristike pojedinih komponenata sklopova HE "VRLA – 1, 2, 3 i 4" Surdulica

BIOGRAFSKI PRIKAZ

Mr Dragan (Stojana) Nikolić, rođen je 07.10.1961. god. u Surdulici. Osnovnu, mašinsko-tehničku školu završio je u Surdulici. Diplomom diplomiranog mašinskog inženjera stekao je na Mašinskom fakultetu u Nišu.

Poslediplomske studije završio je na Mašinskom fakultetu u Beogradu 2000. god., odbranom magistarske teze pod nazivom "Dijagnostika, pouzdanost i efektivnost motora SUS u eksploataciji" i stekao akademsko zvanje magistra tehničkih nauka.

RADNA, NASTAVNA I PEDAGOŠKA DELATNOST

Mr Dragan Nikolić, započeo je radno iskustvo 28.02.1989., u fabrici "Mačkatica" u Surdulici na poslovima tehnologa. Bio je zaposlen kao konstruktor alata, a kasnije direktor u radnoj organizaciji "5. Septembar" - Zastava Kragujevac. Na ovim poslovima je sproveo niz rekonstrukcija opreme i instalacija, alata, uvođenjem novih tehnologija u funkciji procesa rada. Godine 1993. je dobio od inženjerske komore Srbije licencu za glavnog projektanta i izvođača radova iz oblasti termotehnike, termoenergetike, procesne i gasne tehnike. Radio kao profesor u srednjoj tehničkoj školi "Nikola Tesla" u Surdulici, a kasnije obavljao dužnost direktora škole.

Sada je zaposlen u zvanju višeg predavača na Visokoj školi strukovnih studija u Vranju od 22.10.1998. godine i izvodi nastavu iz predmeta: Mašinski elementi, Industrijske mašine i Održavanje mašina i uređaja. Do danas je objavio 49 naučnih i stručnih radova i 24 monografija i udžbenika iz oblasti održavanja i dijagnostike energetske postrojenja.

Mr Dragan Nikolić je podpredsednik Društva za Tehničku dijagnostiku Srbije – TEHDIS, i direktor Instituta za metode dijagnostike u Vranju, a u okviru Društva i:

- član izdavačkog saveta časopisa "Hidraulika i pneumatika", Niš,
- član izdavačkog saveta časopisa "Održavanje mašina", Smederevo,
- član izdavačkog saveta časopisa "Menadžment znanja", Smederevo.

Dobitnik je zlatne plakete 2005 god. za izuzetan doprinos razvoja tehničke dijagnostike Srbije, od strane Društva za Tehničku dijagnostiku, Beograd.

Dobitnik je zahvalnice 2007 god. od strane Akademije inženjerstva održavanja, za angažovanje u njenom osnivanju.

Iz sadržaja radne, nastavne, pedagoške i stručne delatnosti proizilazi da mr Dragan Nikolić, proučava i bavi se različitim naučnim oblastima proizvodnih tehnologija u mašinskom inženjerstvu, tehničkoj dijagnostici i tribologiji, održavanju mašina i uređaja, različitim oblastima inženjerske tehnike u proizvodnom inženjerstvu i podmazivanjem.

Pregled objavljenih monografija i udžbenika:

1. Adamović, Ž., Nikolić, D., **TEORIJA SISTEMA, Udžbenik**, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, VTTŠ, Vranje, 2002.
2. Ž. Adamović, D. Avramović, D. Jovanović, D. Nikolić, **ZBIRKA ZADATAKA IZ MAŠINSKIH ELEMENATA, Udžbenik**, Tiraž 250, Strana: 191, Izdavač: Viša tehnička tehnološka škola, Vranje, 2003, Saradnik na izuradi dr Slobodan Stefanović.
3. S. Stefanović, D. Nikolić, **MAŠINSKI MATERIJALI, Udžbenik**, I Izdanje: 2003., Tiraž: 100, Strana: 125, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Novica Grujić.
4. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, **INDUSTRIJSKE MAŠINE - za ekonomiste u industriji, Udžbenik**, I Izdanje: 2003., Tiraž: 300, Strana: 205, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
5. S. Stefanović, D. Nikolić, **AUTOMATIZACIJA SISTEMA UPRAVLJANJA, Autorizovana predavanja**, I Izdanje: 2003., Tiraž: 100, Strana: 183, Izdavač: VTTŠ, Vranje Recezenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić, Mr Slobodan Radojković.
6. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, **INDUSTRIJSKE MAŠINE - u mašinskoj industriji, Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 230, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
7. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, **INDUSTRIJSKE MAŠINE - u drvnoj industriji, Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 244, Izdavač: VTTŠ, Vranje Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
8. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, **INDUSTRIJSKE MAŠINE - u prehrambenoj industriji, Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 216, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
9. S. Stefanović, D. Nikolić, **MAŠINSKI MATERIJALI - NEMETALI – (knjiga II), Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 50, Strana: 57, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Zoran Prijić.
10. S. Stefanović, D. Nikolić, **MATERIJALI u industriji, Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 182, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Novica Grujić.
11. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, V. Mitić, **MAŠINSKI ELEMENTI, Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 232, Izdavač: VTTŠ, Vranje Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Spasoje Grujin, Prof. dr Dragiša Tolmač.
12. Ž. Adamović, D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, V. Mitić, **MAŠINSKI ELEMENTI - tablice - Udžbenik**, I Izdanje: 2004., Tiraž: 200, Strana: 140, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Recezenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Spasoje Grujin, Prof. dr Dragiša Tolmač.

13. Adamović, Ž., Nikolić, D., **INŽENJERSTVO DIJAGNOSTIKE, Udžbenik**, Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin, 2004.
14. D. Nikolić, N. Janjić, **MAŠINSKI MELEMENTI, Udžbenik**, II Izdanje, 2005, Tiraž: 200, Strana: 232, Izdavač: VTTŠ Vranje, Receptenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Spasoje Grujić, Prof. dr Dragiša Tolmač.
15. S. Stefanović, D. Nikolić, **AUTOMATIZACIJA PROIZVODNJE, Autorizovana predavanja**, I Izdanje: 2005., Tiraž: 80, Strana: 111, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Novica Grujić.
16. S. Stefanović, D. Nikolić, **MAŠINSKI MATERIJALI, Udžbenik**, II Dopunjeno izdanje: 2005., Tiraž: 100, Strana: 185, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Slobodan Stojadinović.
17. Ž. Adamović, S. Stefanović, D. Nikolić, N. Janjić, **PROJEKTOVANJE PROIZVODNJE, Udžbenik**, I Izdanje: 2006., Tiraž: 50, Strana: 144, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Receptenti: Prof. dr Miroslav Lambić, Prof. dr Zvonko Sajfert.
18. S. Stefanović, Ž. Adamović, D. Nikolić, **OSNOVI KONSTRUISANJA I PROJEKTOVANJA KONSTRUKCIJA I MAŠINA**, Monografija, (I Izdanje): 2006., Tiraž: 100, Strana: 155, Izdavač: TEHDIS, Smederevo, Receptent: Prof. dr Slobodan Navalušić.
19. S. Stefanović, D. Nikolić, **AUTOMATIZACIJA PNEUMATSKIH I HIDRAULIČNIH SISTEMA UPRAVLJANJA**, Udžbenik, III Izdanje, 2007, Tiraž: 100, Strana: 101, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić.
20. D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, **INDUSTRIJSKE MAŠINE ZA EKONOMISTE U INDUSTRIJI, Udžbenik**, (II Dopunjeno izdanje): 2007., Tiraž: 200, Strana: 258, Izdavač: VTTŠ, Vranje, Receptenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
21. D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, **INDUSTRIJSKE MAŠINE u mašinskoj industriji** (II dopunjeno izdanje), **Udžbenik**, Izdavač: Viša tehnička tehnološka škola, Vranje, 2007., Tiraž: 200, Strana: 254, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač.
22. D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, **INDUSTRIJSKE MAŠINE u drvnoj industriji** (II dopunjeno izdanje), **Udžbenik**, Izdavač: Viša tehnička tehnološka škola, Vranje, 2007., Tiraž: 200, Strana: 284, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Dragoljub Vujić.
23. D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, **INDUSTRIJSKE MAŠINE u prehrambenoj industriji** (II dopunjeno izdanje), **Udžbenik**, Izdavač: Viša tehnička tehnološka škola, Vranje, 2007., Tiraž: 200, Strana: 256, Receptenti: Prof. dr Dragoljub Vujić, Prof. dr Dragiša Tolmač, Prof. dr Cvijan Žepinić.
24. D. Nikolić, S. Stefanović, N. Janjić, **ZBIRKA ZADATAKA IZ MAŠINSKIH ELEMENATA, Udžbenik**, Izdavač: Viša tehnička tehnološka škola, Vranje, 2007., Tiraž: 100, Strana: 179, Receptenti: Prof. dr Živoslav Adamović, Prof. dr Novica Grujić, Prof. dr Dragoljub Vujić.

Pregled objavljenih radova nacionalnog i međunarodnog značaja:

1. A. *Stefanović*, D. *Nikolić*, Metoda za proveru koeficijenata viška vazduha kod motora sa biogasom kao osnovnim gorivom, Peti simpozijum MVM, Beograd, CG-12297 B10, br. 1. 18-21.05.1994, Beograd.
2. S. *Petrović*, D. *Nikolić*, Koncept alternativnih goriva motora u ogledalu tržišno-tehničkih mogućnosti i zakonskih ograničenja, Šesti simpozijum MVM, Novi Sad, Yu - 93643, br. 3. 11-14.05.1995, Novi Sad.
3. S. *Petrović*, D. *Nikolić*, Smanjenje toksične izduvne emisije dizel motora, Šesti simpozijum MVM, Titograd, Yu - 91909, br. 5. 21-24.05.1995, Titograd
4. S. *Petrović*, D. *Nikolić*, Eksploatacija ispitivanja motornih vozila, Deveti simpozijum MVM, Kragujevac, Yu - 95106, br. 12. 04-06.05.1996, Kragujevac.
5. D. *Nikolić*, Eksploataciski vek kočnica gradskog autobusa, Deveti simpozijum MVM, Kragujevac, Yu - 96203, br. 12. 04-06.05.1996, Kragujevac.
6. S. *Petrović*, M. *Tomić*, D. *Nikolić*, Promena triboločkih osobina disk-kočnica u toku kočenja, Jedanaesti simpozijum MVM, Beograd, Yu - 99461, br. 18. 17-19.05.1998, Beograd.
7. D. *Nikolić*, Ž. *Adamović*, S. *Stefanović*, V. *Jevremović*, The examination of the hydraulic of the rotating table by means of a mathematical model, " 3 Internacionalna konferencija o mašinskoj industriji "RaDMI 2003." , Zbornik radova str. 877-882., 19-23. Septembar, Herceg Novi.
8. S. *Stefanović*, D. *Nikolić*, Izbor maziva za podmazivanje mehaničkih prenosnika, "8 Internacionalna konferencija o tribologiji", Zbornik radova str. 253-257., Mašinski fakultet u Kragujevacu i Mašinski fakultet u Beogradu, 8 - 10. Oktobar, 2003. Beograd.
9. D. *Nikolić*, S. *Stefanović*, S. *Cvetković*, Modeli otkaza hidrauličnih sistema, "Oktobarski simpozijum inženjerstva pouzdanosti, dijagnostike i održavanja 2004. ", TEHDIS, 25 - 26. 10. 2004. Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
10. S. *Stefanović*, D. *Nikolić*, Sistemski pristup tehničkom održavanju – Model za reinženjering, 7 međunarodna konferencija "Upravljanje kvalitetom i pouzdanošću "DQM 2004.", str. 80 – 86, 16 – 17. Jun, Građevinski fakultet, Beograd, 2004.
11. N. *Šubara*, S. *Stefanović*, D. *Nikolić*, S. *Cvetković*, Nastanak i širenje oštećenja usled zamora železničkih konstrukcija i metode za sprečavanje, "Oktobarski simpozijum inženjerstva pouzdanosti, dijagnostike i održavanja 2004. ", TEHDIS, 25-26. 10. 2004. , Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
12. S. *Stefanović*, Ž. *Adamović*, D. *Nikolić*, R. *Knežević*, Statističke karakteristike elektrohidrauličnih instalacija, Naučno – stručni skup sa međunarodnim učešćem "HIPNEF", str. 101 – 106, Mašinski fakultet u Nišu, Vrnjačka Banja, 19 – 21.05.2004.
13. S. *Stefanović*, N. *Šubara*, D. *Nikolić*, S. *Cvetković*, Tok plastične deformacije i razvoj razaranja u mikrostrukturama ugljeničnih čelika železničkih konstrukcija pri istezanju i savijanju, " Oktobarski simpozijum inženjerstva pouzdanosti, dijagnostike i održavanja 2004. ", TEHDIS, 25 – 26. 10. 2004. Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
14. S. *Stefanović*, D. *Nikolić*, Models of failure of hydraulic systems, Zbornik radova, 4 Međunarodna konferencija, "RaDMI 2004.", 31. 08. – 04.09.2004., Zlatibor. (zbornik radova na CD-u).
15. S. *Stefanović*, S. *Cvetković*, D. *Nikolić*, Maziva ulja i sintetičke tečnosti koja se koriste za podmazivanje hidrauličnih tehničkih sistema, 28 Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore, "Menadžment održavanja, digitalna ekonomija u održavanju i upravljanje znanjem", TEHDIS, 19 – 20. 05. 2005. , Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
16. D. *Nikolić*, Ž. *Adamović*, S. *Stefanović*, Opšti principi ispitivanja i osnovne karakteristike hidropumpi i hidromotora, Naučno stručni časopis časopis " Hidraulika i Pneumatika ", broj 1., str. 18 – 24, TEHDIS, Niš, 2004.

17. *D. Nikolić, S. Stefanović, R. Knežević*, Organizaciona struktura procesa održavanja u tekstilnom preduzeću, 7 međunarodna konferencija "Upravljanje kvalitetom i pouzdanošću DQM 2004.", str. 87, 16 – 17 Jun, Građevinski fakultet, Beograd, 2004. (objavljen rad u rezimeu).
18. *S. Stefanović, D. Nikolić, N. Šubara*, Analiza zajedničkog rada motora sa unutrašnjim sagorevanjem, benzinskog motora i hidrodinamičkog pretvarača obrtnog momenta (hidrodinamičkog menjača), Naučno stručni časopis "Hidraulika i pneumatika", broj 1., str. 47 – 53, TEHDIS, Niš, 2004.
19. *D. Nikolić, S. Stefanović, R. Knežević*, Statističke i dinamičke zaptivke u hidraulici, Naučno – stručni skup sa međunarodnim učešćem "HIPNEF", str. 106 – 110, Mašinski fakultet u Nišu, Vrnjačka Banja, 19 – 21.05.2004.
20. *S. Stefanović, D. Golubović, V. Stošić, D. Nikolić, M. Redžić*, Konstruktivne i proračunske šeme oscilacije lopatica turbine i kompresora, Časopis "Održavanje mašina", TEHDIS, Smederevo, br. 5, str. 28 – 32, 2005 god.
21. *S. Stefanović, S. Vujković, D. Nikolić, Lj. Petrović, S. Cvetković*, Struktura i sredstva dijagnostike hidrauličnog sistema, 28 Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore, "Menadžment održavanja, digitalna ekonomija u održavanju i upravljanje znanjem", TEHDIS, 19 – 20. 05. 2005., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
22. *S. Stefanović, S. Vujković, D. Nikolić, Lj. Petrović, S. Cvetković*, Struktura i sredstva dijagnostike hidrauličnog sistema, 28 Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore, "Menadžment održavanja, digitalna ekonomija u održavanju i upravljanje znanjem", TEHDIS, 19 – 20. 05. 2005., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
23. *Nikolić, D.*, Primena tehničke dijagnostike i rezultati ispitivanja vibracionog stanja u hidroelektranama, Časopis "Tehnička dijagnostika", br.1 str. 18-22, Vrnjačka Banja, 2005.
24. *Nikolić, D.*, Primena sopstvenog modela optimizacije na pouzdanost ležaja hidroelektrane, časopis "Tehnička dijagnostika", br. 3 str. 83-87, Vrnjačka banja, 2006.
25. *Nikolić, D.*, Upotreba sopstvenog modela optimizacije postupaka i praćenja temperature ležaja hidroelektrana, časopis "Tehnička dijagnostika", br. 2 str. 88-92, Vrnjačka banja, 2006.
26. *S. Stefanović, D. Nikolić, Ž. Adamović*, Mathematical model the examination of hzdraulic drive of the rotating table, XXIX Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore "Menadžment znanja u održavanju", Zbornik radova, 18-19. 05. 2006., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
27. *Nikolić, D.*, Formiranje univerzalnog optimalnog modela na izabranim mernim mestima hidroelektrane pri merenju vibracija, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 3. str. 61-66, Vrnjačka banja, 2006.
28. *S. Stefanović, D. Nikolić, S. Cvetković*, Maziva za podmazivanje mehaničkih prenosnika – reduktora, XXIX Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore "Menadžment znanja u održavanju", Zbornik radova, 18-19. 05. 2006., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
29. *S. Stefanović, D. Nikoloć*, Logička sinteza pneumatskog upravljanja vratima autobusa za gradski saobraćaj, Časopis "HIDRAULIKA I PNEUMATIKA", br. 2, str. 25-29, TEHDIS, Niš, 2006.
30. *S. Stefanović, Ž. Adamović, D. Nikolić, B. Ristić*, Struktura i sredstva dijagnostike hidrauličkog sistema, Časopis HIDRAULIKA I PNEUMATIKA, br. 2, str. 9-15, TEHDIS, Niš, 2006.
31. *Z. Špirić, S. Stefanović, D. Nikolić*, Uloga modernizacije tehničkih sistema u praksi, Naučno stručni časopis "HIDRAULIKA I PNEUMATIKA", br. 3. str.7-12, Niš, 2006.
32. *S. Stefanović, D. Nikolić, Ž. Adamović*, Mathematical model the examination of hzdraulic drive of the rotating table, XXIX Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore "Menadžment znanja u održavanju", Zbornik radova, 18-19. 05. 2006., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
33. *S. Stefanović, D. Nikolić, S. Cvetković*, Maziva za podmazivanje mehaničkih prenosnika – reduktora, XXIX Majski skup održavalaca Srbije i Crne Gore "Menadžment znanja u održavanju", Zbornik radova, 18-19. 05. 2006., Vrnjačka Banja. (zbornik radova na CD-u).
34. *N. Jeftić, S. Stefanović, Ž. Đurić, N. Šubara, D. Nikolić*, Nekompleksni hidrodinamički pretvarač obrtnog momenta, Naučno stručni časopis "HIDRAULIKA I PNEUMATIKA", br. 3. str.49 - 54, Niš, 2006.

35. *Nikolić, D.*, Konstruktivna rešenja podesna za dijagnostiku stanja hidroelektrane, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema" br.1. str. 23-29, Vrnjačka banja, 2007.
36. *D. Nikolić, S. Stefanovi*, Matematička zavisnost primene modela optimizacije kod hidroelektrana, Naučno stručni časopis HIDRAULIKA I PNEUMATIKA, br. 4-5, str. 34-37, Niš, 2007.
37. *S. Stefanović, N. Despotović, D. Nikolić*, Organizacija efikasnog razvoja softverskih projekata, Naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Zbornik radova na CD-u br.rada EE53, Vrnjačka Banja, 01-03.11.2007.
38. *Nikolić, D.*, Analiza modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike hidroelektrana, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema " br.1. str. 30-37, Vrnjačka banja, 2007.
39. *Nikolić, D.*, Razvoj sopstvenog modela optimizacije postupaka tehničke dijagnostike pri merenju mehaničkih vibracija hidroelektrane, Zbornik radova Majski skup održavaoca, "Održavanje tehničkih sistema" br.1. str. 38-50, Vrnjačka banja, 2007.
40. *Nikolić D.*, Matematički model optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane pri merenju mehaničkih vibracija, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 2, str. 19-25, Vrnjačka banja, 2007.
41. *Nikolić D.*, Matematički model optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane pri merenju temperature, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 3, str. 23-29, Vrnjačka banja, 2007.
42. *Nikolić D.*, Matematički model optimizacije tehničke dijagnostike hidroelektrane za određivanje pohabanosti, Časopis "Tehnička dijagnostika", br. 3, str. 16-23, Vrnjačka banja, 2007.
43. *Nikolić D.*, Održavanje modela optimizacije na pozdanost ležaja hidroelektrana, Časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 4 i 5, ISSN 1452-967X, str. 11-15, Niš, 2007.
44. *Nikolić D., Stefanović S.*, Matematička zavisnost primene modela optimizacije tehničke dijagnostike kod hidroelektrane, Časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 4 i 5, ISSN 1452-967X, str. 34-38, Niš, 2007.
45. *S. Stefanović, N. Despotović, D. Nikolić, D. Milenković, D. Ivić*, Tolerancija u primeni računarskih sistema, Naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Zbornik radova na CD-u br.rada EE54, Vrnjačka Banja, 01-03.11.2007.
46. *S. Stefanović, N. Despotović, N. Grbić, D. Milenković, D. Nikolić, M. Krstić*, Tolerancija na neispravnost računarskih sistema, Naučno – stručni skup „Energetska efikasnost“, Zbornik radova na CD-u br.rada EE54, Vrnjačka Banja, 01-03.11.2007.
47. *S. Stefanović, B. Dinić, N. Šubara, D. Milenković, D. Veljković*, Cilj integralnog transporta u kontejnerskom saobraćaju, Naučno – stručni skup „Razvoj, korišćenje i održavanje hidrauličnih i pneumatskih komponenti i sistema“, Zbornik radova na CD-u br. rada HIP 38, Vršac, 16.11.2007.
48. *Nikolic, D.*, Matematička zavisnost primene modela optimizacije kod hidroelektrane, Časopis "Hidraulika i pneumatika", br. 4 i 5, ISSN 1452-9677, str. 34-45, Niš, 2007.
49. *Nikolic, D., Adamovic, Ž.*, The analysis of the univerzal model optimization technical diagnostic procedures for power plants , Časopis "Strojarstvo", (u toku objavljivanje), Zagreb, 2007.