

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



**DOKTORSKA DISERTACIJA**  
**MODEL ZA DONOŠENJE ODLUKA U PROCESIMA**  
**PREPOZNAVANJA TIPRA FUNKCIJE POUZDANOSTI BRODSKIH**  
**POSTROJENJA**

**KANDIDAT**  
**Mr sc. Marko Tomašević**

**Zrenjanin, 2007.**

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



**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**MODEL ZA DONOŠENJE ODLUKA U PROCESIMA  
PREPOZNAVANJA TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI  
BRODSKIH POSTROJENJA**

**Mentor:**

**Prof. dr Živoslav Adamović**

**Kandidat:**

**Mr sc. Marko Tomašević**

**Zrenjanin, 2007.**

*Moto: Što manje* **OTKAZA**  
*Što manje* **DEFEKATA**  
*Što manje zalihe* **REZERVNIH DELOVA**  
*Što bolje* **INFORMISANJE**  
*Što efikasnije* **ODLUČIVANJE**  
*Što niži* **TROŠKOVI**

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

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Monografska dokumentacija

Tip zapisa:

TZ

Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada:

VR

Doktorska disertacija

Autor:

AU

Mr Marko Tomašević

Mentor:

MN

Prof. dr Živoslav Adamović, red. prof.

Naslov rada:

NR

Model za donošenje odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja

Jezik publikacije:

JP

Srpski

Jezik izvod:

JI

Srpski

Zemlja publikovanja:

ZP

Srbija

Uže geografsko područje:

UGP

Srbija

Godina:

GO

2007.

Izdavač:

IZ

Autorski reprint

Mesto i adresa:

MA

Trg Dositeja Obradovića 6, Zrenjanin

Fizički opis rada:

FO

(broj poglavlja / strana / tabela / slika / priloga)

13 / 263 / 14 / 95 / 3

Naučna oblast:

NO

Mašinstvo

Naučna disciplina:

ND

pouzdanosti brodskih postrojenja, sigurnost funkcionisanja,  
prepoznavanje tipa funkcije pouzdanosti, donošenje odluka

Predmetna odrednica /

Ključne reči:

PO

UDK:

pouzdanost, sigurnost funkcionisanja, brodsko postrojenje, optimalni  
model, prepoznavanje tipa funkcije, donošenje odluka

Čuva se:

ČU

U biblioteci Tehničkog fakulteta "Mihajlo Pupin" u Zrenjaninu,  
Trg Dositeja Obradovića 6

## REZIME

Doktorska disertacija se bavi aktuelnom problematikom donošenja odluka u procesu prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja. U uvodnom delu doktorata objašnjeni su motivi za rad na doktorskoj disertaciji. Motivacija je proizašla iz nastojanja da se unapredi teorija i praksa donošenja odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja, koja se zasniva na analitičkim i matematičko-statističkim metodama. Pristup za rešavanje tog problema, koji je predložen u doktoratu, svodi se na teorijsku analizu radova i tehnologija, kao i na primenu systemske dinamike i simulacione tehnologije u eksploatacionom istraživanju, a koje se bave problematikom klasifikacije signala sa pragom za donošenje odluka o pouzdanosti brodskih postrojenja. To je uzrokovalo da se autor ove disertacije bavi istraživanjem novih metoda koje se mogu primeniti u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja. U doktoratu su razvijeni matematički i verbalni modeli ponašanja sistema pomoću signala na izlazu sistema za nekoliko slučajeva. U zaključku disertacije sistematično se interpretiraju rezultati istraživanja, potvrđuju hipoteze i komentarišu teorijska i praktična rešenja, daje se pregled mogućnosti daljih istraživanja rešenja koja su predložena disertacijom. Na primeru merenih i separiranih signala eksperimentalno, pomoću simulacione metodologije i systemske dinamike, verifikovana je hipoteza statističke nezavisnosti izvornih signala. Sintezom teorijskih i analitičkih saznanja i numerički potkrepljenim praktičnim rezultatima (simulacijama), težilo se osmišljavanju preporuka za usklađivanje procesa donošenja odluka na bazi prepoznavanja oblika pouzdanosti sa ukupnom sigurnošću brodskih postrojenja, na način kako se do sada nije činilo.

Datum prihvatanja teme od Nastavno-naučnog veća: 2006.

DP

Datum odbrane: \_\_\_\_\_

DO

Članovi komisije za odbranu doktorske disertacije:

KO

(Naučni stepen / ime i prezime / zvanje / fakultet)

**Predsednik:**

Prof. dr Momčilo Bjelica, redovni profesor  
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

**Član:**

Prof. dr Ilija Ćosić, redovni profesor  
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

**Član:**

Prof. dr Timofej Furman, redovni profesor  
Poljoprivredni fakultet, Novi Sad

**Član:**

Prof. dr Petar Hotomski, redovni profesor  
Tehnički fakultet "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

**Član - mentor:**

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

TEHNICAL FACULTY "MIHAJLO PUPIN"  
ZRENJANIN  
KEY WORDS DOCUMENTATION

**Curriculum vitae**

Accession number:

AN°

Identification number:

IN°

Document type:

DT

Monographic's publication

Type of record:

TR

Word printed record

Contents code:

CC

Dissertation

Author:

AU

Mr Marko Tomašević, Ph. M.

Menthor:

MN

Prof. dr Živoslav Adamović, Ph. D.

Title:

TI

Language of text:

LT

Serbian

Language of abstract:

LA

Serbian

Country of publication:

CP

Serbia

Publication year:

PY

2007.

Publisher:

PU

Author`s reprint

Publ. Place:

PP

Street Dositeja Obradovića 6, Zrenjanin

Physical description:

PD

(chapters / pages / table / pictures / additional lists)

13 / 263 / 14 / 95 / 3

Scientific field:

SF

Mechanical engineering

Scientific discipline:

SD

The safety of functioning of technical system, technical diagnostics, system monitoring

Subject / Key words:

UC

Safety of functioning,

Reliably, Maintenance, Diagnostics, Optimal model,

Holding data:

HD

At library of Technical faculty „Mihajlo Pupin“ in Zrenjanin

## RESUME

This doctoral thesis deals with up-to-date problems related to decision making in the process of recognizing forms of reliability of marine plants. Marine propulsion plant is very complex and includes a set of interrelated and dependent subsystems with a large number of components. The reliability and availability of such complex system depends on reliability of its all components.

In the introductory part motives for work on this thesis are explained. Motivation has come out of intention to develop the theory and practice of decision making in recognizing forms of reliability of marine plants based on analytical and mathematical-statistical methods. The approach to solving the problem, that is proposed in the thesis, corresponds to the theoretical analysis of works and technologies as well as to the application of system dynamics and simulation technology in exploitation research that again deal with the problems of classification of signals with the level of decision making on the reliability of marine plants. The above mentioned has lead the author to devote himself to researching new methods that can be applied in the field of reliability of marine plants. The thesis presents developed mathematical and verbal models of system behaviour with the use of signals observed at the system output for several cases. In the conclusion of the thesis results of the research are systematically interpreted, hypotheses are proved and theoretical and practical solutions commented on. Furthermore, a range of possibilities for further research of solutions proposed in the thesis are presented. On the example of measured and separated signals the hypothesis of statistical independence of original signals has been verified experimentally using simulation methodology and system dynamics. Synthesis of theoretical and analytical newly gained knowledge and numerically supported practical results (simulations) have been used with the aim to reach recommendations for matching the process of decision making based on recognizing forms of reliability with total safety of marine plants in a manner not used so far.



A – cepted by the Scentific Board on: 2006.

ASB

Defended:

DE

Thesis defend board:

DB

(Degree / name / surname / faculty)

**Chairman:**

Ph. D. Momčilo Bjelica full profesor,  
Tehnicl faculty „Mihajlo Pupin“, Zrenjanin

**Member:**

Ph. D. Ilija Ćosić, full professor,  
Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

**Member:**

Ph. D. Timofej Furman, full professor,  
Faculty of agriculture, Novi Sad

**Member:**

Ph. D. Petar Hotomski, full professor  
Tehnicl faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

**Member - Menthor:**

Ph. D. Živoslav Adamovic, full profesor,  
Tehnicl faculty "Mihajlo Pupin", Zrenjanin

# Sadržaj

<b>PREDGOVOR</b> .....	14
<b>1. METODOLOŠKI KONCEPT RADA</b> .....	16
1.1. Problem istraživanja.....	16
1.2. Pouzdanost brodskih postrojenja.....	17
1.3. Predmet istraživanja.....	20
1.4. Ciljevi istraživanja.....	23
1.5. Zadaci istraživanja.....	26
1.6. Hipoteze.....	27
1.7. Naučni i društveni doprinos istraživanja.....	28
1.8. Metode istraživanja.....	30
1.9. Tehnike i instrumenti istraživanja.....	32
1.10. Dosadašnja istraživanja u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja.....	33
<b>2. TEORIJSKE OSNOVE POUZDANOSTI</b> .....	37
2.1. Pojam i značaj pouzdanosti.....	37
2.1.1. Definicije pouzdanosti.....	40
2.1.1.1. Pouzdanost rezultata merenja.....	42
2.1.1.2. Značaj pouzdanosti.....	42
2.2. Osnovni pokazatelji pouzdanosti elemenata i sistema.....	43
2.3. Pregled nekih osnovnih metoda koje se primenjuju u teoriji pouzdanosti.....	48
<b>3. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA</b> .....	50
3.1. Modeli donošenja odluka.....	50
3.2. Modeli odlučivanja.....	52
3.2.1. Modeli odlučivanja-simbolični (matematički) modeli.....	52
3.3. Metode odlučivanja.....	52
3.3.1. Vrste odluka prema nivoima odlučivanja.....	54
3.3.2. Vrste odluka prema stepenu struktuiranosti.....	54
3.3.3. Vrste odluka s obzirom na njihovu pripremu.....	56
3.3.4. Vrste odluka s obzirom na njihovu ulogu u procesu odlučivanja.....	56
3.3.5. Struktura procesa odlučivanja.....	56
3.3.6. Okolina odlučivanja.....	63
3.4. Tehnologija i metode odlučivanja.....	64
3.4.1. Intuitivno odlučivanje, odlučivanje na temelju procenjivanja i racionalno odlučivanje.....	66
3.4.1.1. Intuitivno odlučivanje.....	66
3.4.1.2. Odlučivanje na osnovu procenjivanja.....	66
3.4.1.3. Racionalno odlučivanje.....	67

3.4.1.4. Deskriptivni model donošenja odluka.....	68
3.4.1.5. Teorija očekivane korisnosti.....	69
3.4.2. Okolnosti u kojima se odlučuje.....	70
3.4.3. Podela odlučivanja prema stepenu sigurnosti (izvesnosti).....	71
3.4.3.1. Odlučivanje u uslovima sigurnosti.....	71
3.4.3.2. Odlučivanje u uslovima rizika.....	72
3.4.3.3. Odlučivanje u uslovima nesigurnosti.....	74
<b>4. TEORIJSKE OSNOVE PRPOZNAVANJA TIP FUNKCIJE POUZDANOSTI.....</b>	<b>78</b>
4.1. Teorija statističkog prepoznavanja tipa funkcije.....	78
4.2. Linearne transformacije slušajnih vektora.....	85
4.3. Bajesovo pravilo odlučivanja minimalne greške.....	91
4.4. Bajesovo pravilo odlučivanja minimalne cene.....	94
4.5. Neyman-Pearsonov test.....	96
4.6. Minimax test.....	97
4.7. Operacione karakteristike.....	99
4.8. Burdikova (Burdick) karta.....	100
4.9. Ostali testovi hipoteza.....	101
4.9.1. Test više hipoteza.....	101
4.9.2. Test jedne hipoteze.....	102
4.9.3. Opcije odbacivana.....	103
4.9.4. Kompozitni test hipoteza.....	105
4.9.5. Sekvencijalno testiranje hipoteza.....	105
4.9.6. Waldov sekvencijalni test.....	107
4.9.7. Gornja granica Bajesove greške.....	109
4.9.8. Batačarijina (Bhattacharyya) granica.....	110
4.9.9. Metode grane i granice (branch and bound).....	112
<b>5. PRIMENA FAZI (FUZZY) LOGIKE I GRUBIH SKUPOVA ZA PREPOZNAVANJE OBLIKA POUZDANOSTI .....</b>	<b>114</b>
5.1. Osnovne teorije grubih skupova.....	116
5.1.1. Osnovne operacije teorije grubih skupova.....	116
5.1.2. Funkcija grube pripadnosti.....	117
5.1.3. Redukcija znanja i zavisnosti.....	118
5.1.4. Faktor verodostojnosti.....	118
5.1.5. Primena teorije grubih skupova.....	119
<b>6. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE I PREPOZNAVANJE TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI.....</b>	<b>123</b>
6.1. Pojam i suština neuronskih mreža.....	123
6.2. Osnovni modeli i pravila obučavanja.....	126
6.2.1. Elementi za procesuiranje.....	128

6.3. Višeslojna feedforward neuronska mreža.....	130
<b>7. SIMULACIONE METODE U PROCESU DONOŠENJA ODLUKA PREPOZNAVANJA TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI.....</b>	<b>132</b>
7.1. Definisanje pojma simulacije.....	132
7.2. Model i modelovanje.....	134
7.3. Simulacioni modeli.....	135
7.3.1. Simulacioni model donošenja odluke o prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti broskog postrojenja.....	137
7.4. Sistematska dinamika.....	140
7.4.1. Osnovni pojmovi sistematske dinamike.....	140
7.4.2. Metodologija sistematske dinamike.....	143
7.4.3. Uzročno-posledične veze kruga povratne sprege dinamičkih sistema.....	144
7.4.3.1. Struktura elemenata sistema.....	144
7.4.3.2. Osnovne jednačine dinamičkih sistema.....	145
7.4.4. Model systemske dinamike.....	148
7.4.4.1. Računarski simulacioni model.....	149
7.4.5. Modelovanje dinamičkih sistema primenom metodologije systemske dinamike.....	150
7.4.6. Jednačine systemske dinamike.....	152
7.4.7. Programski paket systemske dinamike.....	154
7.5. Eksploataciona istraživanja-simulacija delova broskog postrojenja.....	156
7.5.1. Opis pogonskog broda dizel motora M 503A-2.....	160
7.5.2. Model dizel motora M 503A-2.....	162
7.5.3. Algoritmi za razmatranje intenziteta otkaza (uz pretpostavke da je intenzitet otkaza konstantan).....	165
7.5.4. Određivanje granice poverenja za slučaj eksponencijalne distribucije pomoću $c^2$ distribucije.....	167
7.5.5. Mentalno-verbalni model.....	168
7.5.6. Sistem-dinamički modeli podsistema dizel motora M 503A-2.....	169
7.5.6.1. Podsystem turbine.....	169
7.5.6.2. Podsystem turbokompresora.....	175
7.5.6.3. Podsystem spojnice.....	182
7.5.6.4. Podsystem blok-cilindra.....	191
7.5.6.5. Podsystem klipa.....	194
7.5.6.6. Podsystem glavne klipnjače.....	199
7.5.6.7. Podsystem kliznih ležišta.....	205
7.5.6.8. Podsystem osnovice priključnog klipa.....	208
7.5.6.9. Podsystem izduvnog ventila.....	211
7.5.7. Određivanje predviđene pouzdanosti dizel motora M 503A-2 kao sistema.....	214

8. REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	232
8.1. Saopštavanje rezultata istraživanja.....	232
8.2. Dokazivanje glavne hipoteze.....	235
8.3. Vrednovanje rezultata istraživanja.....	237
9. ZAKLJUČAK.....	240
9.1. Rezime svakog poglavlja.....	240
9.2. Ključni zaključci.....	241
10. PREGLED DALJIH ISTRAŽIVANJA.....	247
10.1. Novi pravci istraživanja.....	247
10.2. Prognoze.....	249
11. LITERATURA.....	250
12. PRILOZI.....	259
13. BELEŠKA O AUTORU.....	261

## PREDGOVOR

Ova disertacija je nastala kao rezultat intenzivnog višegodišnjeg rada autora u oblasti statistike i pouzdanosti na Pomorskom fakultetu u Splitu. Motivisana je činjenicom da povećana kompleksnost na gotovo svim područjima ljudskog delovanja kao i nagle promene na području tehnologije i nauke, predstavljaju osnovne od najznačajnijih izazova novog tehnološkog doba. Pojačan intenzitet i složenost događaja koji nas svakodnevno prate dovodi do potrebe usvajanja novih znanja i prilagođavanja na nove interakcije, od kojih sve više zavisi uspeh ne samo pojedinaca već i svekolikog društva. Vreme u kojem živimo i koje dolazi vreme je promena. Događaju se u svim područjima ljudskog delovanja i života, a sve su one posledica ponajviše tehnološke prirode.

Osnovna svrha svakog tehničkog sistema je vršenje korisnog rada uz ostvarenje očekivanih ili zahtevanih izlaznih ili upotrebnih karakteristika. Jedan od baznih kriterijuma razlikovanja u oblasti saobraćajnih sredstava je funkcija namene. Sasvim različiti zahtevi namene i pogodnosti upotrebe se postavljaju tokom projektovanja, razvoja, proizvodnje, eksploatacije i održavanja nekog putničkog broda u poređenju sa zahtevima za transportni, sportski ili vojni, odnosno borbeni brod. Funkcionalna pogodnost je jedna od ključnih obeležja i funkcija efektivnosti proizvoda, usluge ili poslovnog sistema, koja je od izuzetne važnosti. Njene se bazične vrednosti definišu u ranim periodima razvoja (studija izvodljivosti i definisanje osnovnih parametara proizvoda, usluge ili sistema), u takozvanoj fazi konceptijskog razvoja. Dakako, i u svim ostalim fazama životnog ciklusa može se u velikoj meri uticati na vrednosti funkcionalne pogodnosti neprekidnim korektivnim merama i modifikacijama. Međutim, te promene daju znatno skromnije rezultate. Funkcionalna pogodnost na direktan način pokazuje stepen usklađenosti operativnih zahteva, ostvarenih izlaznih, upotrebnih i drugih karakteristika i definisanih uslova i ograničenja. To se nikako ne odnosi samo na tehničke sisteme, mašine, aparate i uređaje, nego se bez dilema može analizirati funkcionalna pogodnost bilo kojeg poslovnog objekta, proizvoda, usluge ili poslovnog sistema.

U procesu razvoja, planiranju nabavke ili kupovine nekog složenog saobraćajnog sredstva, pred donosiocima odluke uvek se postavlja čitav niz različitih, srazmerno složenih i protivrečnih zahteva, pitanja i problema. Treba pronaći odgovore na pitanja kao što su:

- koliki broj saobraćajnih sredstava treba proizvesti ili nabaviti (kupiti), u kom vremenskom razdoblju, kojom dinamikom i za koje korisnike, kako bi se ostvarili osnovni poslovni ciljevi preduzeća ili kompanije;
- koliko dugo i u kojim uslovima će ta saobraćajna sredstva biti u upotrebi;
- kakva struktura znanja je potrebna potencijalnim korisnicima i kako ga obezbediti;
- kojim sredstvima, metodama i postupcima saobraćajna sredstva treba logistički podržavati tokom sprovođenja zadataka funkcije namene;
- kako će se izabrana saobraćajna sredstva uklapati u postojeće okruženje po bitnim komponentama (komplementarnost i kompatibilnost), i mnoga druga pitanja.

Odgovor na svako postavljeno pitanje je vezan za **donošenje odluka**. U tom smislu u prvi plan se postavljaju činioci efektivnosti. Oni su: zahtevani nivo efektivnosti, **pouzdanosti** i operativne spremnosti. Dalje, intenzitet otkaza sistema i njegovih kritičnih elemenata, iznos ili očekivani nivo troškova osiguranja efektivnosti, parametri

pogodnosti za održavanje, srednje vreme korektivnog i preventivnog održavanja, dodatni zahtevi logističke podrške itd.

Ključni problem pouzdanosti se može razmatrati kao **prepoznavanje oblika** ponašanja nekog sistema, odnosno njegovog izlaza u odnosu na zadatak vrednost. Prepoznavanjem tipa funkcije i donošenjem odluka se bavi svaki čovek svakodnevno, počev od najjednostavnijih situacija pa do vrlo složenih problema. U tehnici su metode za prepoznavanje problema ili okruženja i donošenje odluka na osnovu takvog prepoznavanje vrlo korisne i često primenjive. Zahtevi pouzdanosti su naterali sve zainteresovane da se pozabave time koje su to stvarne okolnosti upotrebe proizvoda. Pored toga, postavljanje ciljeva pouzdanosti uopšte zahteva jedinstveno mišljenje o vrednosnom broju pouzdanosti, o uslovima i okolnostima u kojima taj broj treba da se primeni i o ostvarenju uspešne izrade. Predviđanje pouzdanosti je kontinualan proces, koji počinje predviđanjem na papiru, zasnovanom na konstrukciji i informacijama o ranijim otkazima, a završava se *merama* pouzdanosti, zasnovanim na podacima korisnika koji su proizvod koristili. Pouzdanost se ponajpre odnosi na sposobnost sistema za rad bez otkaza ili sprečavanje nedopuštenog pada vrednosti izlaznih karakteristika tokom zadanog ili predviđenog vremena upotrebe.

Pouzdanost celokupnog sistema je sastavni deo pouzdanosti različitih podсистema. Što su pouzdaniji podsystemi, to je pouzdaniji i celokupan sistem. S druge strane, tamo gde postoji cilj pouzdanosti za celokupan sistem, moraju postojati i pomoćni ciljevi pouzdanosti za podsysteme. Proces podele ili budžetiranja krajnjeg cilja pouzdanosti među podsystemima je poznat kao raspodela pouzdanosti. Konstruktori i organi upravljanja, kao i potrošači, odavno su ubeđeni u važnost visoke pouzdanosti. U specifikacijama se često zahtevalo da proizvod poseduje visoku pouzdanost ili maksimum pouzdanosti. Konstruktori su prihvatili takve stavove, ali obično nisu menjali svoje odluke o konstrukciji. Nije se radilo o tome da je konstruktor želeo slabu pouzdanost, isto kao što se poslodavac ne bi opredelio za loš kvalitet. Pridevi visok i maksimum jednostavno nisu dozvoljavali da se misli o dvema stranama. Pored toga, izrazi visok i maksimum su suviše dugo upotrebljavani, pa konstruktori na njih više ne reaguju. Povećanjem pouzdanosti broskog postrojenja smanjuju se potrebe korektivnog održavanja i obezbeđuju srazmerno visoke vrednosti spremnosti ili raspoloživosti broda. Međutim, povećanje pouzdanosti ima svoju cenu i ekonomsku opravdanost. Visoko pouzdani sistemi su sistemi posebne važnosti sa stanovišta funkcije namene. Njihovo dovođenje u ispravno stanje, nakon pojave otkaza, mora biti što kraće, a spremnost broda srazmerno visoka. To znači da se kod takvih postrojenja istovremeno sa zahtevima za visoku pouzdanost javljaju i zahtevi za visokim nivoom pogodnosti za održavanje. Postavlja se pitanje kako rešavati tu složenu problematiku.

Disertacija je urađena pod mentorstvom prof. dr Živoslava Adamovića, kome ovom prilikom najsrdačnije zahvaljujem na podršci, razumevanju i svim korisnim savetima i sugestijama koje mi je dao u toku njene izrade. Zahvaljujem prof. dr. sc. Anti Munitiću, dekanu Pomorskog fakulteta u Splitu, koji mi je pomogao pri obezbeđivanju potrebne opreme i literature. Takođe, zahvalan sam članovima komisije koji su pomogli u pregledu rukopisa i finalizaciji disertacije.

# 1. METODOLOŠKI KONCEPT RADA

## 1.1. Problem istraživanja

Brodsko postrojenja koja u funkcionisanju iskazuju nepredvidljivosti, pogotovo u okruženju čije se delovanje može smatrati da je slučajne prirode, treba proučavati ne samo inženjerskim, fizički determinisanim metodama, nego i pomoću verovatnoće i statističkim postupcima. Funkcionisanje sistema može se posmatrati ne samo na osnovu njihovih sastavnih i tehničkih svojstava, nego i na osnovu mogućih događaja u funkciji tokom veka njihovog postojanja i funkcionisanja. Mnogi su važni događaji vezani za delovanje nekog sistema manje ili više važni za njegovu postojanost u vremenu delovanja i rada. Mogu se zamisliti i manje važni, nepoznati, neodređeni, kao i međusobno nezavisni i zavisni događaji.

Poznavanje prirode slučajnih događaja je važno za primenu teorije verovatnoće. Međutim, poznavanje sistema i podсистema slučajnih događaja u delovanju brodskih postrojenja, prema važnosti njihovih ishoda i mogućih posledica za bezbednost ljudi i okruženja, pruža dodatne uvide u delotvornost, a obezbeđuje bolje razumevanje i sveobuhvatniju analizu, projektovanje, korišćenje i održavanje brodskih postrojenja za bezbednost i dobrobit ljudi i društva. Svi mogući događaji vezani za delovanje nekog sistema mogu se posmatrati kao sistem događaja koji opisuje moguće ishode u učestvovanju sistema u njegovoj okolini. Zavisno od poznavanja događaja svojstvenih nekom predmetu i njegovom ukupnom delovanju u radnom veku, sistemi se mogu posmatrati kao potpuni i manje ili više nepotpuni sistemi događaja. Mnogi se događaji po svojoj prirodi, važnosti, posledicama ili nekim drugim merilima mogu svrstati u podсистeme događaja na više nivoa od interesa i značaja za projektante, graditelje ili korisnike. Proučavanje podсистema događaja i njihovih međusobnih veza u okviru sistema omogućuje sagledavanje ukupnog delovanja sistema u svojoj okolini i to za ceo vek trajanja. Predstavljanjem delovanja broskog postrojenja sistemom događaja, uobičajeni pristup na bazi verovatnoće se može proširiti konceptom entropije u verovatnoću i tako podvrgnuti analizama utemeljenim na teoriji informacija.

Osnovna pretpostavka za rad na ovom problemu se bazira na činjenicama da dosadašnji posebni razvoj teorije brodskih konstrukcija, teorije verovatnoće, teorije informacija i statističkih postupaka za određivanje pouzdanosti, kao i pristupačna znanja i podaci o neizvesnim opterećenjima, uslovima izgradnje i korišćenja brodova, omogućavaju povezivanje fizičkog sveta, kako ga proučavaju prirodne i tehničke nauke, sa slučajnim događajima u veku eksploatacije, kako ih posmatraju teorija verovatnoće i teorija informacija. Međudelovanja strukturnih sistema, podсистema i osnovnih sklopova brodskih postrojenja opisivala bi se i vrednovala na osnovu novih mera, utemeljenih na mogućim događajima vezanim za delovanja broda u slučajnim okolnostima, kao što je plovidba na otvorenim morima i okeanima.



Glavni cilj projektovanja brodskih konstrukcija je da se ostvari sigurnost, funkcionalnost i zadovoljavajuća delotvornost, uz zahtevani nivo pouzdanosti kroz celi vek eksploatacije broda u svim okolnostima. Ali, kako se to ostvaruje u neizvesnim uslovima, neophodna je primena projektne procedure koja uzima u obzir više informacija nego determinističke metode u projektovanju konstrukcija. Te informacije uključuju neizvesnosti u pogledu svojstava materijala, izdržljivosti različitih komponenata konstrukcije, neizvesnosti opterećenja kojima su izloženi, kao i greške (neizvesnosti) modela i postupaka analiziranja.

Pouzdanost brodskih postrojenja potrebno je razmatrati za sve načine delovanja na svim opasnim mestima osnovnih sklopova gde mogu nastati oštećenja, a ta mesta se utvrđuju na osnovu teorije konstrukcija ili inženjerskog iskustva. Nastajanje pojedinih načina oštećenja se ustanovljava na osnovu kriterijuma oštećenja. Kriterijumi oštećenja se najčešće opisuju funkcijama graničnih stanja H. O. Madsen, S. Krenk, N. C. Lind, *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1986; O. Ditlevsen, H. O. Madsen, *Structural Reliability Methods*, Technical University of Denmark, Lyngby, (2nd ed.), 2003. Funkcije graničnih stanja daju diskretizovanu procenu stanja konstrukcije ili komponenata, koje mogu biti ili sigurne ili oštećene. Funkcije graničnih stanja određuju se iz tradicionalne determinističke analize, a neizvesni parametri se identifikuju i kvantifikuju. Poslednjih godina postupak projektovanja brodskih konstrukcija je usmeren ka razvoju racionalne projektne procedure, bazirane na oceni pouzdanosti nepremašivanja graničnih stanja. (B. M. Ayyub et. al, *Reliability-based Design of Ship Structures: Current Practice and Emerging Technologies*, SNAME Technical Report MM1C76, July, 1998; A. E. Mansour, P. H. Wirsching: 'Probabilistic-Based Design Requirements for Ship Structures', Proc. 7th Speciality Conf. on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, ASCE, Massachusetts, 1996, pp 98-10130; H. Okada et al., A method for reliability-based sensitivity analysis of ship's hull structures using combined plate and frame structure models, *Proceedings of OMAE'96*, Florence, Italy, 1996. p. 235}43. 31; O. W. Hughes, 'Ship Strucural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach', J. Wiley & Sons, New York, 1983).

## 1.2. Pouzdanost brodskih postrojenja

Otkazi brodskih postrojenja, pojam pouzdanosti brodskih postrojenja, pouzdanost s obzirom na slučajne otkaze i otkaze zbog dotrajalosti, složena pouzdanost, pouzdanost primenjena na brodske sisteme i procese, konfiguracija brodskih postrojenja i pouzdanost uz zahvate najčešća su problematika eksploataisanja brodskih postrojenja.

Brodaska postrojenja predstavljaju skup elemenata (delova) i relacija između njih i njihovih karakteristika, povezanih međusobno u celinu, na način pogodan za obavljanje rada. Pojam **sistem (system)** je izveden od grčke reči "to systema", a označava **celinu sastavljenu iz delova**. To znači da sistem predstavlja integralnu celinu, što podrazumeva međusobnu povezanost i uslovljenost delova, na bazi postavljene funkcije kriterijuma. To, dalje, znači da za funkcionisanje sistema nije dovoljan samo kvalitet delova već i potpuna određenost relacija između njih. Sistemski prilaz je novijeg vremena - rezultat je

savremenog načina mišljenja. Postoje sistemi u mašinstvu, pomorstvu, energetski, sistemi jednačina, kao i niz drugih sistema. Sistemi različitih vrsta su rezultat sistema projektovanja, dok je vrednovanje sistema problem systemske analize. Systemski prilaz omogućuje određivanje sistema u funkciji posmatrača.

Vrste sistema su u osnovi energetskog, tehnološkog i transportnog karaktera, i zavise od postavljene funkcije cilja i uslova okoline. U osnovi su to radni sistemi, koji pretvaraju ulazne u izlazne veličine shodno potrebama vršenja određenog rada. Ulazne veličine su, po pravilu, materijali, energija i informacija, a izlazne veličine proizvode različite vrste (snaga, obrtni momenat, količina toplote, reduktori, mašine, vozila, informacija). Pretvaranje ulaznih u izlazne veličine odvija se u procesu rada sistema, saglasno s utvrđenim postupcima rada i postavljenom funkcijom kriterijuma.

Pretvaranje ulaznih u izlazne veličine uslovljeno je projektovanim postupkom rada, odnosno potrebom da se zadovolji postavljena funkcija kriterijuma. Stepenn dobreće (Ž. Adamović: Totalno održavanje, Tehnički fakultet "M. Pupin" Zrenjanin, 2000, str.13) ostvarenja te funkcije, odnosno projektovanih postupaka rada, dat je odnosom izlaznih veličina  $y_i$  i ulaznih veličina  $x_i$  u obliku:

$$h = \frac{y_i}{x_i} = \frac{x_i - p}{x_i} = 1 - f,$$

gde su sa  $p$  označeni ponori - otkazi (gubici) u sistemu, nastali zbog najrazličitijih uticaja ili poremećaja na relaciji sistem - okolina i unutar procesa rada sistema.

Odnos  $f=p/x_i$  predstavlja osnovni predmet istraživanja, projektovanja i upravljanja sistemima.

Ciljevi sistema su određeni potrebama pretvaranja raspoloživih resursa u rad, odnosno u proizvode pogodne za zadovoljenje potreba pojedinaca, preduzeća i društva u celini. Na taj način uopšteni ciljevi obuhvataju težnju sistema za opstanak i potrebu razvoja i obezbeđenja novog kvaliteta (Ž. Adamović: Totalno održavanje, Tehnički fakultet „M. Pupin“ Zrenjanin, 2000. str.14) .

Modelovanje neizvesnosti delovanja i pouzdanosti tehničkih postrojenja pomoću pristupa na bazi verovatnoće, zasniva se na konceptu slučajnih promenljivih i distribucijama verovatnoće pridruženih im promenljivima. Specifikovanjem raspodele verovatnoće slučajne promenljive može se potpuno opisati slučajni proces, dok se složene pojave opisuju sa višedimenzionalnim združenim funkcijama raspodele verovatnoće svih slučajnih promenljivih kojima se problem može opisati.

Ostvarenje postavljenih ciljeva je rezultat promena stanja elemenata sistema u vremenu, odnosno u procesu rada sistema. Proces rada sistema se može definisati kao postupak uzastopnih promena stanja, dobijenih dejstvom - aktivnim radom sistema.

U svakodnevnom životu, stalno i na razne načine, donose se procene i odluke, pa se rezonovanjem dolazi do određenog zaključka. Procenjivanjem i odlučivanjem odabiru se ponuđene mogućnosti sa manje ili više mogućih pogrešaka. Klasične teorije odlučivanja pretpostavljaju da su ljudi prilikom donošenja odluka potpuno racionalni, dok su mnoga kasnija istraživanja osporila te postavke, pokazavši da je njihovo odlučivanje u stvarnom životu opterećeno mnogim pogreškama.

Donošenje odluka ili odlučivanje je proces biranja između više mogućnosti. To je bazični misaoni proces koji se sastoji od **prepoznavanja** i biranja mogućih rešenja koja vode do nekog željenog cilja. Odlučivanje rezultira odabirom akcije koju treba preduzeti ili strategije koju treba primeniti u praksi. Funkcija cilja sistema predstavlja meru

usaglašenost između zahteva donosilaca odluka, uslova okoline i parametara procesa rada. Postavljanje funkcije cilja u osnovi proističe iz logike postojanja budućeg sistema i traži produbljena razmatranja. Vremenski gledano, funkcija cilja može biti različita za iste sisteme u različitim vremenskim intervalima.

Za različite sisteme, funkcija cilja može biti data kao potreba ostvarenja:

- maksimalnog učinka, koji predstavlja meru tehničke funkcionalnosti procesa rada sistema i određen je količinom izvršenog rada u jedinici vremena;
- maksimalnog kvaliteta, koji predstavlja meru sposobnosti sistema u zadovoljenju uslova okoline;
- maksimalne ekonomičnosti, koja predstavlja meru ekonomske funkcionalnosti procesa rada sistema.

Stanje sistema predstavlja skup podataka koji daju potpunu informaciju o ponašanju sistema u datom trenutku vremena i datim uslovima okoline, potrebnu za podešavanje rada sistema, odnosno projektovanje njegovog ponašanja u periodu započetom tim trenutkom. Stanje sistema je prema tome funkcija vremena.

Neodređenost stanja podrazumeva stepen ostvarenja zadatih uslova i postupaka karakterističnih za određena stanja. Ako se za veličinu neodređenosti, na osnovu analogije sa termodinamičkim pojavama, uvede pojam *entropija* sistema, može se zaključiti da zbog dejstva uslova okoline, poremećaja razne vrste unutar i izvan procesa kao prirodne težnje za mirovanjem, entropija sistema stalno raste.

Osnovna stanja sistema određena su promenom parametara funkcije cilja u vremenu, a pod dejstvom uticaja različitih po veličini, pravcu i smeru, pri čemu:

- promena parametara funkcije cilja u okviru dozvoljenih granica određuje stanje sistem **zadovoljava**, što znači da sistem uspešno vrši funkciju kriterijuma.

(Stanje **zadovoljava**, označava **stanje sistema u radu**; sve dok se sistem nalazi u stanju "u radu", obezbeđeno je dobijanje projektovanih, potrebnih i dovoljnih izlaznih veličina, odnosno zadovoljenje funkcije kriterijuma);

- promena parametara postavljene funkcije kriterijuma izvan granica dozvoljenih odstupanja određuje stanje sistema **ne zadovoljava**, što znači da sistem ne vrši uspešno postavljenu funkciju kriterijuma. Stanje **ne zadovoljava** označava stanje **sistema u otkazu**.

Stanje sistema "u otkazu" znači da je u sistemu narušena utvrđena međuzavisnost elemenata i relacija između njih i njihovih karakteristika da sistem ne vrši postavljenu funkciju kriterijuma, te je potrebno preduzeti mere za vraćanje sistema u stanje "**u radu**". Ove mere se sastoje u različitim postupcima održavanja.

Pouzdanost komponenata i osnovnih sklopova brodskih konstrukcija se može definisati kao verovatnoća da posmatrani deo funkcioniše kako je predviđeno u svom veku trajanja. Da bi bilo moguće odrediti pouzdanost postupcima verovatnoće, potrebno je uvesti statističke varijable i stohastičke procese i definisati kada se brodsko postrojenje smatra oštećenim, a kada ne.

Sve metode pouzdanosti su približne i problemi postaju teži s porastom broja slučajnih promenljivih, a složenost funkcija raste u slučaju prisutnosti statističke zavisnosti slučajnih promenljivih. Osnovna prednost projektovanja održavanja brodskih postrojenja metodama pouzdanosti je uključivanje neizvesnosti delovanja brodskih konstrukcija u procese projektovanja, analiziranja i eksploatiranja postrojenja na racionalan i logičan način.

Svaki tehnički sistem ima neku pouzdanost. Mala pouzdanost uslovljava otkaze i zastoje u eksploataciji, što povećava troškove eksploatacije. Velika pouzdanost povećava cenu, odnosno investicione troškove. Težnje da brodsko postrojenje bude pouzdano i jeftino su protivrečne. Nivo tehnološkog razvoja diktira ekonomski prihvatljiv nivo pouzdanosti. Verovatnoća pojave otkaza uvek je veća od nule.

### 1.3. Predmet istraživanja

Ova doktorska disertacija razmatra osnovne modele (aparate) za donošenje odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja. Intuitivno je jasno da je proces donošenja odluke koji vrši čovek neka vrsta prepoznavanja oblika i u suštini jeste problem koji se svodi na specifičan oblik informacija kojima se raspolaže. Osnovni cilj je da se na osnovu modela teorije prepoznavanja oblika formalizuju ti složeni mehanizmi donošenja odluke i da se izvrši njihova automatizacija prilagođena računarima. Međutim, zbog kompleksne prirode problema o kojima je reč, naša najveća pažnja istraživanju u oblasti prepoznavanja oblika posvećena je određenim, konkretnim problemima, kao što su prepoznavanje karaktera ili klasifikacija otkaza u radu broskog postrojenja. Osnovna ideja ove disertacije je da se prikažu i analiziraju statističko-matematički i drugi modeli tih praktičnih problema i da se obezbede odgovarajući alati potrebni za njihovo rešavanje i interpretaciju.

#### Optimizacija procesa rada tehničkog sistema

##### Matematički model

Optimizacija obuhvata formalizovanje funkcija stanja i funkcija promene stanja s graničnim funkcijama procesa rada u smislu postavljanja konkretnog oblika funkcije cilja (funkcije kriterijuma, objektivne funkcije, funkcije reagovanja, funkcije kvaliteta) u vidu:

$$F_k = F_k \left( \begin{array}{c} \xrightarrow{x} \xrightarrow{z} \xrightarrow{y} \end{array} \right).$$

U teoriji tehnoeкономске optimizacije procesa rada mogu se izdvojiti četiri glavna kriterijuma optimizacije: ekonomičnost, produktivnost, rentabilnost i kvalitet.

Tehnoeкономska optimizacija procesa rada svodi se, s matematičkog aspekta, na definisanje ekstremuma funkcije cilja i odgovarajućih vrednosti upravljačkih ulaznih veličina u ograničenoj oblasti, koju obezbeđuju navedeni optimumi.

**Metode** optimizacije su razvijene za određivanje optimuma funkcije cilja po jednom od navedenih kriterijuma. Karakter posmatranog procesa rada i njegovog matematičkog modela opredeljuje podelu, izbor i upotrebu brojnih matematičkih metoda optimizacije.

Sistem matematičkih metoda optimizacije obuhvata različite metode, kao što su: matematičko programiranje, analitičke metode, Boks-Vilsonov gradijentni metod, simpleksni metod itd.

Analiza i optimizacija sistema održavanja pomoću matematičkih modela, u načelu:

- pruža mogućnost da se brodsko postrojenje posmatra kao celina, tj. kao entitet, te da se simulacionim ili drugim tehnikama omogući definisanje stepena i karaktera uticaja svih promenljivih parametara;
- omogućuje upoređenje više mogućih varijanti, što je od neposredne koristi u odabiru "najbolje" ili "optimalne" varijante;

- pomaže da se otkriju veze između pojedinih uticajnih parametara koje nisu ranije zapažene ili koje se ne mogu ustanoviti verbalnim ili iskustvenim metodama;
- ukazuje na podatke koje treba obezbediti da bi se sprovele potrebne analize;
- olakšava predviđanja budućih stanja ili događaja, uz procenu rizika ili granica poverenja, itd.

Empirijsko-heurističke metode za analizu sistema održavanja interesantne su zato što omogućavaju:

- obuhvatanje i činilaca koji se ne mogu uključiti u matematički model, odnosno koji se ne mogu analitički jednoznačno povezati s drugim činilcima;
- analizu subjektivnih i drugih činilaca koji se ne mogu analitički opisati;
- iskazivanje iskustva i kreativnosti, posebno u okviru dobro projektovanih i dobro programiranih ekspertnih sistema, itd.

Bez obzira na to koje metode se koriste, postupak optimizacije zahteva da se prethodno precizno definišu kriterijumi prema kojima treba odabrati "najbolje", odnosno "optimalno" rešenje, kao i bitna ograničenja o kojima treba voditi računa.

Stanje sistema u otkazu je uvek uslovljeno otkazom dela postrojenja (elementa ili modula). Stanje u otkazu može biti prouzrokovano: potpunim otkazom delova postrojenja, pri čemu radna sposobnost broskog postrojenja pada na nulu, odnosno onemogućeno je obavljanje funkcije cilja postrojenja u celini, i delimičnim otkazom delova postrojenja, pri čemu brod funkcioniše ispod donje granice postavljene funkcije cilja.

Radna sposobnost broda je određena parametrima funkcije cilja i procesa promene stanja u datom vremenu i datim uslovima rada (Ž. Adamović: Totalno održavanje, Tehnički fakultet "M. Pupin" Zrenjanin, 2000, str. 15).

Funkciju radne sposobnosti je moguće izraziti kao:

$$F_{RS} = f(\text{uslovi } F_k, x_i(p), y_j(q)),$$

pri čemu su:

- Ø uslovi  $F_k$  - određeni zahtevima donosilaca odluka, uslovima okoline i parametrima procesa rada;
- Ø  $x_i(p)$  - ulazne veličine uslovljene kvalitetom okoline i pripreme procesa rada sistema;
- Ø  $y_j(q)$  - ostvarene izlazne veličine sistema.

Ostvarena izlazna veličina se može uvek izraziti u vidu (Ž. Adamović: Totalno održavanje, Tehnički fakultet „M. Pupin“ Zrenjanin, 2000, str. 16):

$$y_j(q) = x_i(p) [T_{i,i+1}(t,p)],$$

pri čemu su:

$T_{i,i+1}$  - transformaciona matrica između svih ulaza i izlaza,

$t$  - vremenski parametri,

$p$  - prostorni parametri,

iz čega sledi da se radna sposobnost sistema sa  $n$  elemenata može izraziti kao  $n$ -dimenzionalna površina koja je sistematski i slučajno promenljiva u vremenu.

Tehničko održavanje sistema (mašina) predstavlja skup postupaka i aktivnosti čija je svrha sprečavanje pojave stanja u otkazu (ili u zastoju), kao i vraćanje sistema po

pojavi stanja u otkazu (ili pojavi otkaza) ponovo u stanje u radu (u radnosposobno stanje), u što kraćem vremenu i sa što manjim troškovima u datim uslovima okoline i organizacije rada.

U razvijenim zemljama, pa i na nivou odgovarajućih međunarodnih asocijacija, došlo je do promena u nekim bitnim terminološkim i pojmovnim opredeljenjima. To se pre svega odnosi na dokumente: standarde IEC, kao i na združene ISO/IEC standarde, koji služe kao osnova i za odgovarajuće JUS standarde. Pri tome treba naglasiti da standard asocijacije IEC, koja se bavi, pre svega, sistemima elektrotehnike i elektronike, samostalno ili u saradnji sa ISO asocijacijom, koja iste poslove obavlja u oblasti mašinstva, važi praktično za sve tehničke sisteme, pa i za sve vrste mašinskih sistema.

Poznato je da se ukupna svojstva jednog tehničkog sistema u pogledu izvršavanja njegovog zadatka, odnosno postavljene funkcije cilja, mogu dobro izraziti funkcijom efektivnosti. Pošto je rad broda u vremenu izložen brojnim slučajnim uticajima, a i pošto je sasvim izvesno da pojava otkaza, kao i svih drugih događaja u životu broskog postrojenja, ima stohastički karakter, funkcija efektivnosti se izražava kao verovatnoća da će posmatrani brod uspešno stupiti u dejstvo u trenutku potrebe i da će uspešno izvršavati zadatak funkciju kriterijuma u projektovanom vremenu i pod datim uslovima okoline.

Za rešavanje problema pouzdanosti zahteva se određivanje mnogih faktora, od kojih zavise pokazatelji pouzdanosti. Kao osnovni javljaju se faktori vremena i režima tehničke eksploatacije broda.

Za prognoziranje pouzdanosti brodskih postrojenja neophodna je **informacija** o izmeni radne sposobnosti sistemskih delova postrojenja u toku planiranog perioda rada. Informacija o pouzdanosti broda je neophodna u svim etapama njegovog stvaranja, pri projektovanju, izradi, ispitivanju, eksploataciji, održavanju i otpisu.

Statistička informacija o pouzdanosti sastavnih delova broda u procesu njegove eksploatacije dozvoljava da se odrede pokazatelji pouzdanosti za određeni tip modela, uzimanjem u obzir režim rada i uslove eksploatacije za određeni interval vremena.

Celokupnost faktora koji određuju pouzdanost sistemskih delova postrojenja karakteriše se slučajnim veličinama, pa se i sami pokazatelji pouzdanosti javljaju, takođe, kao slučajne veličine i određuju se na osnovu metoda verovatnoće i matematičke statistike.

Sve mere neprekidnih veličina zadaju se obično u diskretnom obliku. Svako vrednosti slučajne veličine  $t_i$  odgovara frekvencija pojavljivanja te vrednosti u eksperimentu  $m_i$ . Tako je ukupan broj ispitivanja (provera):

$$N = \sum_{i=1}^n m_i .$$

Odnos  $m/N$  je gustina ili relativna frekvencija pojave  $i$ -te vrednosti slučajne veličine.

Za neprekidne slučajne veličine određuje se frekvencija gustine dospevanja vrednosti slučajne veličine u nekim intervalima. Celokupnost, koja sadrži sve istraživane sisteme, naziva se generalnom celokupnošću, a izabrani iz nje  $N$  delova odražava uzorak obima  $N$ . Verovatnoća dospevanja vrednosti slučajne veličine u intervalu  $[t_1, t_2]$  je:

$$P(t) = \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = \frac{m}{n} .$$



U literaturi su poznati algoritmi za izbor modela održavanja sistema, razvijeni za određeni problem. Međutim, ti algoritmi, odnosno varijante, nisu od opšteg značaja - ograničene su primene, jer ne obuhvataju sve moguće modele održavanja prema stanju.

Na osnovu ulaznih podataka o otkazima sistema u obliku vremenskih slika stanja pojedinih sistemskih delova postrojenja vrši se utvrđivanje ponašanja sistema pri otkazu. U slučaju da se kod sistema ne zahteva maksimalna pouzdanost u radu, celishodno je odabrati održavanje prema stanju sa kontrolom parametara (samo ako su ukupni troškovi održavanja za različite varijante održavanja približno isti). Opisivanjem karaktera promene intenziteta otkaza može se svakom elementu sistema i/ili sistemu odrediti model održavanja prema stanju, ili konstrukciona dorada sa ciljem obezbeđenja mogućnosti odabiranja strategije održavanja prema stanju (nekada je potrebno izvršiti rekonstrukciju sistemskog dela postrojenja u cilju njegove prilagodljivosti za dijagnosticiranje).

Ukoliko se kao kriterijum optimalnosti ne uzima maksimalna pouzdanost sistema u radu, onda se izbor održavanja prema stanju vrši prema minimalnim ukupnim troškovima održavanja (direktni i indirektni), odnosno na bazi efektivnosti primenjene strategije održavanja prema stanju.

Operacija izbora održavanja prema stanju se obavlja sve dok svi delovi sistema ne budu razmotreni.

Za tehničke sisteme sa nekoliko hiljada sklopova, kao što su brodska postrojenja, formiranje varijanti održavanja prema stanju najcelishodnije je realizovati na računaru.

Primena predloženog algoritma odnosi se na one tehničke sisteme gde je uopšte celishodna primena održavanja prema stanju. U teoriji i praksi postoje i sistemi na kojima se isključivo primenjuju strategije korektivnog ili preventivnog održavanja (sistemi koji nisu u tehnološkom lancu, ne izazivaju gubitke u eksploataciji i njihovi otkazi ne utiču na bezbednost rukovalaca i održavalaca).

## 1.4. Ciljevi istraživanja

U okviru ovog naučnoistraživačkog rada postavljeni su sledeći opšiti ciljevi:

- § objasniti značaj problema pouzdanosti broskog postrojenja,
- § razviti analitičke metode korisne pri razmatranju problema prepoznavanja oblika pouzdanosti broskog postrojenja,
- § pronaći odgovarajuće teorijske i praktične metode u svrhu rešavanja problema donošenja odluka za prepoznavanje tipa funkcije pouzdanosti broskog postrojenja.

Prema postavljenim ciljevima, u okviru očekivanog izvornog naučnog doprinosa moguće je istaći sledeće potciljeve:

- § istražiti i analizirati aktuelne teorijske i praktične probleme donošenja odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti broskih postrojenja;
- § razvoj statističko-matematičkog modela za prepoznavanje tipa funkcije pouzdanosti prikladnog za kombinovanje dinamičkog i statičkog pristupa analizi putem dekompozicije matrica u svrhu prepoznavanja kritičnih tačaka broskog pogona, kao i definisanja funkcija karakterističnih za nastanak i razvoj problema

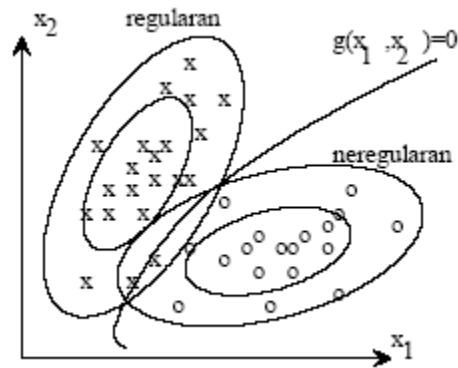
pouzdanosti broskog postrojenja i proračuna njihovih osjetljivosti s obzirom na parametre modela;

- § razvoj modela računarskog programa za simulaciju broskog motora u vremenskom domenu kombinovanjem dinamičkih i statičkih aspekata analize, a u svrhu razmatranja dinamičkih pojava u uslovima dužih prelaznih perioda smanjenog nivoa sigurnosti.

Ova doktorska disertacija ima za konačan cilj istraživanje i predlog *osnovnog modela (aparata) za donošenje odluka u procesima prepoznavanja tipa fukcije pouzdanosti broskih postrojenja*.

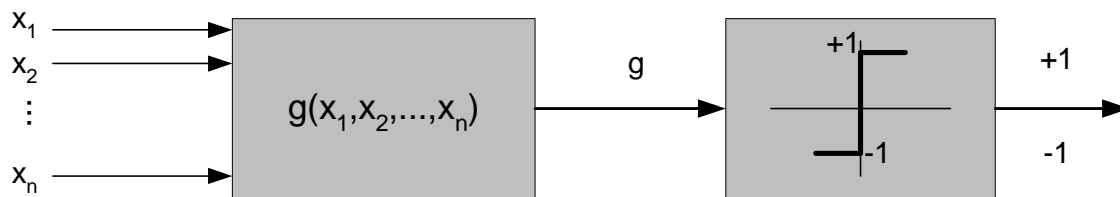
Teorija pouzdanosti se zasniva na teoriji verovatnoće i matematičkoj statistici, koje po svojoj prirodi ne predstavljaju discipline tako bliske inženjerima i stručnjacima koji se bave kvalitetom proizvoda ili sistemima za obezbeđivanje kvaliteta. Skoro svu literaturu iz tog područja su napisali matematičari i statističari koji pretpostavljaju da su termini: verovatnoća, uzorak, slučajna događaj, raspodela verovatnoće i sl; dobro poznati u nauci. Poslednjih godina opaža se sve veće interesovanje proizvođača da kvalitet svojih proizvoda izražavaju preko pouzdanosti, raspoloživosti, funkcionalne podobnosti i sigurnosti. Od prirode proizvoda zavisi broj i vrsta pokazatelja kvaliteta. Kod broskih postrojenja može se slobodno reći da je pouzdanost najčešće korišćeni pokazatelj njihovog kvaliteta. To je u stvari pokazatelj koji govori kolika je verovatnoća da će konkretno brosko postrojenje funkcionisati ispravno u određenom vremenu i zadatim uslovima rada. Da bi se mogle analizirati pouzdanost i raspoloživost nekog postrojenja potrebno je znati kako on radi, kako je napravljen i od kojih elemenata, koji su mehanizmi otkaza tih elemenata i čitavog postrojenja. Mnoge važne primene prepoznavanja tipa funkcije se mogu okarakterisati ili kao *klasifikacija* nekih *signala* ili kao *klasifikacija geometrijskih oblika*. Na primer, posmatrajmo problem testiranja broskog motora na kome se može detektovati normalni ili neregularni način rada i to na osnovu mernih signala na izlazu iz motora tokom izvesnog vremena. Taj se problem svodi na prepoznavanje signala u smislu: da li pripada klasi signala snimljenih na ispravnom ili neispravnom motoru. S druge strane, u nekom drugom slučaju, prepoznavanje štampanih karaktera odgovara problemu prepoznavanja geometrijskih oblika. Kao aktivnost koja prethodi klasifikaciji jeste određivanje koje su merne veličine koje će na što je moguće bolji način okarakterisati uzorak koji treba da se prepozna. Kada su oblici signala u pitanju, razumno je meriti vrednosti signala u nekim ekvidistantnim trenucima, dok je kod problema štampanih karaktera uobičajeno formirati sekvencu belih i crnih piksela. Ta, u opštem slučaju,  $n$  merenja sa jednog objekta ili oblika čini vektor  $X$ . Čak iako je motor ispravan i radi regularno, on ni u kom intervalu vremena neće generisati isti signal. Otuda je jasno da svaka od komponenti vektora  $X$  čini slučajnu promenljivu. Otuda ceo vektor merenja  $X$  čini slučajni vektor. Sličan rezon važi i kada su štampani karakteri u pitanju. Dakle, svaki signal ili karakter se može prikazati kao vektor, ili alternativno, kao tačka u  $n$ -dimenzionom prostoru. Otuda skup svih mogućih signala ili karaktera u takvom  $n$ -dimenzionom prostoru formira neku raspodelu. Na slici 1.1. je prikazan primer dvodimenzionog prostora u kome se jasno izdvajaju domeni ispravnog i neispravnog rada mašine. Regularan, odnosno neregularan, tj.  $g(x_1, x_2) = 0$ , odnosno  $g(x_1, x_2) = 1$ .





Slika 1.1. Prikaz položaja rezultata merenja

Na slici 1.1. tačke označavaju položaje slučajnih merenja, dok pune linije označavaju funkcije gustine verovatnoće. Ako bi raspodela tih tačka bila poznata na osnovu iskustva i dovoljno dugog merenja, mogla bi se postaviti linija razgraničenja  $g(x_1, x_2) = 0$ , koja bi podelila posmatranu ravan u dve oblasti. Onog momenta kada se klasifikaciona linija postavi, klasifikacija postaje vrlo jednostavna, na osnovu toga koja je od dveju nejednakosti  $g(x_1, x_2) > 0$  ili  $g(x_1, x_2) < 0$  zadovoljena. Funkcija  $g(x_1, x_2)$  se naziva **diskriminacionom funkcijom**, a mreža koja detektuje znak funkcije  $g(x_1, x_2)$  naziva se mreža za prepoznavanje oblika ili **klasifikator**. Slika 1.2. predstavlja blok dijagram klasifikatora generalno posmatrano u  $n$ -dimenzionom prostoru.



Slika 1.2. Blok dijagram klasifikatora za prepoznavanje oblika

Otuda u nameri da projektujemo klasifikator, kao zadatak istraživanja, moramo prethodno dobro proučiti raspodelu slučajnog vektora  $X$  za svaku od klasa ili kategorija, i na osnovu toga projektovati odgovarajuću diskriminacionu funkciju. Ovaj se proces naziva **učenje** ili **obučavanje**.

Dakle, prepoznavanje oblika se u nekom širokom smislu može tretirati kao problem estimacije funkcije raspodele u  $n$ -dimenzionom prostoru i podela tog prostora na oblasti koje čine klase ili kategorije. To je razlog zašto matematička statistika čini osnovu ovog problema. Slično tome, kako je skup merenja sa jednog oblika najjednostavnije predstaviti vektorom, a sve linearne operatore matricama, jasno je da je poznavanje linearne algebre neophodno za razumevanje materije koja će se izložiti u disertaciji.

Osnovni cilj prepoznavanja oblika kojim se bavi ova disertacija jeste da se donese **odluka** kojoj kategoriji posmatrani uzorak pripada. Na osnovu opservacija ili merenja formira se vektor merenja. Taj vektor služi kao ulaz u **pravilo odlučivanja** kroz koje se taj vektor pridružuje nekoj od analiziranih klasa. Pretpostavimo da je merni vektor slučajni vektor čija uslovna funkcija gustine verovatnoće zavisi od klase. Ukoliko su te

uslovne funkcije gustina verovatnoće poznate, tada se problem prepoznavanja oblika svodi na problem statističkog testiranja hipoteza. Nadalje, disertacija se bavi istraživanjem problema formalizacije zaključivanja i donošenja odluka u situacijama kada je znanje nepotpuno i/ili neprecizno ili svojim obimom prevazilazi realne mogućnosti donosilaca odluke.

Takođe, razmatraće se razvoj novih i proširivanje postojećih sistema matematičkog aparata za formalizaciju inteligentnog zaključivanja; ispitivanje problema neprotivrečnosti, potpunosti, odlučivosti i složenost problema pouzdanosti.

## 1.5. Zadaci istraživanja

U okviru disertacije rešavani su sledeći zadaci:

- Ø ispitivanje potpunosti, odlučivosti, složenosti i drugih osobina raznih logika,
- Ø konzervativno uopštavanje klasične do  $[0,1]$  - vrednosne polivalentne logike i primene,
- Ø uvođenje novih verovatnoća i fazi operatora u logiku,
- Ø razvoj, primena i adaptacija metoda dokazivanja i ispitivanja pouzdanosti,
- Ø nalaženje konačnih modela i kontramodela,
- Ø statističke metode nalaženje opštih i reproduktivnih rešenja i njihovih odnosa,
- Ø razvoj i primena simulacionog modela u istraživanju pouzdanosti broskog motora i njegovih delova,
- Ø analiza ostvarenih rezultata i njihov značaj.

Na osnovu svih iznetih razmatranja može se formirati matematički model pouzdanosti prema stanju sa kontrolom parametara koji predviđa primenu metoda za:

• *definisanje zakonitosti promene tehničkog stanja sistema (na osnovu istorijata), i to:*

- Ø analiza faktora koji određuju proces promene tehničkog stanja i određivanje parametara tehničkog stanja sistema;
- Ø određivanje zakonitosti promene tehničkog stanja sistema;
- Ø određivanje matematičkog modela procesa promene tehničkog stanja sistema;
- Ø određivanje granične vrednosti parametara tehničkog stanja sistema.

• *definisanje sistema dijagnostike stanja sistema, i to:*

- Ø definisanje i izbor dijagnostičkih parametara;
- Ø odabir i razrada metoda dijagnosticiranja;
- Ø odabir instrumenata (sredstva) za dijagnostiku.

**Ocena dijagnostičkih parametara, definisanje sistema anticipacije stanja sistema, dobijanje predstave o tehničkom stanju u budućnosti ili prognoziranje „rezerve upotrebljivosti“ vrši se pomoću:**

- Ø određivanja momenta prve dijagnostičke kontrole;
- Ø određivanja granične vrednosti parametara stanja;
- Ø određivanja momenta sledećih dijagnostičkih kontrola;
- Ø određivanje momenta sprovođenja aktivnosti održavanja.

Eksploataciona istraživanja pouzdanosti sistema brodskih postrojenja bezuslovno zahtevaju brojne podatke o značajnim pojavama u procesu rada posmatranog broskog postrojenja, odnosno objektivni i detaljan informacioni sistem, koji mora biti neposredno usklađen sa sistemom čija se pouzdanost izučava, odnosno prilagođen njegovim specifičnostima, a takođe usklađen s organizovanjem procesa rada. Zato se za svaki poseban slučaj posebno projektuje informacioni podsistem. Informacioni podsistem za eksploataciona istraživanja pouzdanosti mora biti detaljno razrađen, osiguravajući u osnovi podloge za dobijanje vremenske slike stanja i pružajući i neposredna uputstva za praktičan rad.

U načelu, projektom informacionog podsistema rešavaju se sledeća bitna pitanja:

- izvorište podataka i njihovi tokovi,
- obrada podataka i oblikovanje informacija,
- nosioci informacija,
- postupci analize tokova informacija.

Uz to se određuju i odgovarajući organizacioni uslovi, mesta provere kvaliteta informacija, zaduženja, nadležnost i način izveštavanja.

## 1.6. Hipoteze

### Glavna - radna hipoteza:

Primenom poznatih probabilističkih metoda i postupaka ocene pouzdanosti radi ocene verovatnoće mogućih događaja u vreme eksploatacije broskog postrojenja, omogućiće se ocene neizvesnosti delotvornosti samog broda u službi. Dostignuća u razvoju pojedinih naučnih disciplina mogu da doprinesu razvoju metoda za proučavanje pouzdanosti. Razmatranje međudelovanja svih komponenata sistema i odnosa među mogućim događajima prema značaju i važnosti, doprineće utvrđivanju modela (aparata) za donošenje odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti broskog postrojenja.

Zajedništvo tih svojstava sa svojstvom sigurnosti, omogućiće dobijanje mera za poboljšanja ukupne sigurnosti u korišćenju i održavanju brodskih postrojenja.

Pothipoteze (pomoćne hipoteze):

- 1) Osnovni problemi donošenja odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja su problemi transfera i distribucije znanja, a uzrokovani su multidisciplinarnošću samog procesa odlučivanja, kao i brzim izmenama tehnologije gradnje i eksploatacije brodskih postrojenja.
- 2) Rešavanje problema odlučivanja moguće je ostvariti reinženjeringom procesa donošenja odluka o prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja, korišćenjem statističkih i drugih analitičkih metoda.
- 3) Modeli bazirani na simulacijama mogu širem krugu donosilaca odluka olakšati pristup donošenju odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja.
- 4) Sistemi veštačke inteligencije simuliranjem različitih scenarija predloženih odluka, olakšavaju pronalaženje optimalnih rešenja donošenja odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti.

## 1.7. Naučni i društveni doprinos istraživanja

Jedan od osnovnih uzroka povećanog interesovanja svetske naučne i stručne javnosti za probleme brodskih postrojenja nalazi se u velikom približavanju mnogih sistema granicama pouzdanosti usled povećanog opterećenja sistema koje nije praćeno odgovarajućim povećanjem prenosne moći.

Globalna pojava više otkaza sa krajnjom posledicom raspada brodskog postrojenja uspostavila je problem pouzdanosti kao jednu od najznačajnijih i najzanimljivijih grana istraživanja u području eksploatacije brodskih postrojenja. Posledice otkaza obuhvataju:

- ljudske gubitke: broj poginulih i teško povređenih,
- materijalne gubitke: uništen materijal, oprema, postrojenje, brod, direktni i indirektni troškovi vezani za otkaz (troškovi zamene, popravke i zastoja),
- zagađivanje biološke okoline – ekosistema.

Pokretanjem aktivnosti vezanih za izradu doktorske disertacije nastoji se da se doprinese ranijem prepoznavanju oblika pouzdanosti brodskog postrojenja i donošenju odgovarajućih odluka u svrhu izbegavanja opasnih otkaza. Stohastički modeli su u svetskoj matematici jedna od glavnih tema. Sve što je uključeno u izradu disertacije razvija se u svetskim razmerama i pojavljuje se u radovima u vodećim časopisima i monografijama. Primene u pouzdanosti tehničkih sistema su u poslednjih 10 godina u samom vrhu interesovanja najboljih svetskih matematičara. Uloga ove disertacije je da nastavi tradiciju primenjujući dobijene rezultate u stohastičkim modelima, što je novost u okvirima naše nauke, ali se uklapa u svetske trendove. Doktorska disertacija u naučnom pogledu ima sledeći doprinos: model za donošenje odluka u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja poseduje teorijsku i pragmatičnu vrednost.

Pouzdanost brodskih postrojenja je važan faktor bezbednosti i sigurnosti ljudi i materijala, ekosistema i efikasnog funkcionisanja ekonomije. Tako se pouzdanost može razmatrati kao:

- § uticaj pouzdanosti na ličnu sigurnost korisnika,
- § uticaj pouzdanosti na izvršenje zadataka ili funkcije namene,
- § uticaj pouzdanosti na integralne logističke činioce (održavanje, modeli, organizacija i tehnologija, snabdevanje, zalihe, troškovi).

Problematika proučavanja pouzdanosti brodskih postrojenja ima i širi društveni značaj i to u prvom planu sa stanovišta ekosistema. S obzirom na dostignuti stepen zagađenja okoline, problem životne sredine je u središtu interesovanja, jer se zagađenje atmosfere približava prekoračenju prirodnih ravnotežnih granica. Tendencija primene sve raznovrsnije propulzije na brodovima ima u osnovi potrebu visoke rentabilnosti u očekivanom režimu eksploatacije i ekoloških ograničenja. Rentabilnost i ekološka prihvatljivost su funkcije tehničkog rešenja, eksploatacione upravljivosti i raspoloživosti broda, a do izražaja dolaze u eksploataciji broda. Potrebno je, stoga, sprovesti istraživanje i njihovo vrednovanje na osnovu pokazatelja iz eksploatacije, a potom definisati zahteve za buduće brodove. Vidljivo je da atmosfera neće moći i dalje prihvatati sve veće količine zagađivača iz saobraćajnih sredstava, uključujući i brodove, bez težih poremećaja ekosistema. Sprečavanje zagađenja atmosfere iziskuje saradnju pomorske privrede i javnog sektora, pri čemu nauka mora dati svoj doprinos u razumevanju i

rešavanju problema. Metode za poboljšanje i održavanje ekoloških standarda moraju pomoći pomorskoj privredi u celini za unapređenje, uključivanje i održavanje visokih standarda u sistemu brodskih energetske postrojenja, radi očuvanja kvaliteta atmosfere, i to oko međunarodno dogovorenog minimuma. U tome veliku ulogu igra pouzdanost brodskog postrojenja. Potrebno je unapred označiti mogući rizik i osjetljivu strukturu brodskih energetske sistema u odnosu na preventivne mere za sprečavanje zagađenja atmosfere, i obezbediti da zahtevi za zaštitu okoline budu integralni deo procesa funkcionisanja brodskog postrojenja. Interesovanje za održavanje dobrog imidža u pomorstvu raste. Takva filozofija i ekonomske kalkulacije moraju se podržati, i treba ustrajati u određivanju akcija protiv onih koji nanose štetu pomorstvu, jer se zbog toga mora uložiti još više znanja, napora, novčanih sredstava i vremena.

Prilikom ocenjivanja uticaja otkaza sistemskog dela na pouzdanost postrojenja u radu treba koristiti klasifikaciju stanja koja se predlaže u disertaciji, prema kojoj se sistem može naći. Normama tehničke eksploatacije sistema brodskog postrojenja mogu se utvrditi sledeća stanja:

- a) **stanje iskorišćenja**-normalan rad, bez pojava neispravnosti, manje složen i složen;
- b) **stanje održavanja**-to je stanje u otkazu (korektivne i preventivne opravke i dr.), u opravci (planirani remont), u zastoju zbog sprovođenja tehničke dijagnostike;
- c) **stanje u čekanju**-stanje zbog organizacionih i tehnoloških razloga.

Ocena uticaja otkaza sistemskog dela na pouzdanost tehničkog sistema u radu se vrši putem upoređenja verovatnoće pojave jednog od mogućih stanja sistema sa odgovarajućim dozvoljenim vrednostima koje daje proizvođač opreme. Pri tome se koriste metode matematičke statistike i analizira se intenzitet otkaza. Za formiranje dijagrama intenziteta otkaza neophodno je obrađivati statističke podatke po otkazima sistemskih delova postrojenja u procesu tehničke eksploatacije za period ne manji od dve-tri godine.

Analiza bezotkaznosti sistemskih delova postrojenja se može vršiti po poznatom redosledu:

- formiranje dijagrama intenziteta otkaza,
- prema karakteru promene intenziteta otkaza izvodi se pretpostavka o zakonu raspodele pojava otkaza,
- provera hipoteze o zakonu raspodele otkaza prema kriterijumima Pirsona i drugih.

Prema rezultatima matematičkog modeliranja se mogu odrediti:

- učestalost ulaska u pojedina stanja procesa eksploatacije,
- srednja količina otkrivenih otkaza sistemskih delova i/ili postrojenja u pojedinim stanjima i dr.

Pri tome se mogu izračunati i određeni pokazatelji efektivnosti programa održavanja, kao što su:

- verovatnoća ulaska u pojedina stanja procesa eksploatacije,
- koeficijent iskorišćenja sistemskog dela i/ili postrojenja prema nameni,
- specifična stajanja zbog održavanja,
- srednje vreme obnavljanja sistema,
- specifični troškovi održavanja sistemskog dela i/ili postrojenja i dr.

Uticaj konstrukciono-eksploatacionih osobina sistemskih delova postrojenja na efektivnost primene različitih strategija održavanja, a time i na efektivnost programa održavanja u celini, moguće je analizirati kroz promene pokazatelja pouzdanosti i troškova održavanja (direktnih i indirektnih).

## 1.8. Metode istraživanja

Da bi rešili raznovrsne probleme, ljudi se mogu koristiti različitim pomoćnim sredstvima, kao što su računari, pogotovo u eri interneta, ali u tom slučaju se zahtevaju kvalitetne programske alatke. Ugradnja elemenata ljudske inteligencije u računarske programe pomaže razvoju sistema sposobnih za samostalan rad i donošenje odluka u složenim, nepotpuno karakterisanim i/ili nejasnim situacijama, koje često predstavljaju opis realnosti. Problematika koja se razmatra disertacijom je složena i predstavlja doprinos za traženje optimalnih rešenja.

Za nedostatke determinističkog pristupa pouzdanosti tehničkih i sistema, razvijene su metode pouzdanosti utemeljene na postupcima teorije verovatnoće i sa statističkim obeležjima varijabli koje se kvantifikuju na temelju statističke analize podataka sakupljenih u tu svrhu. Pouzdanost komponenata i osnovnih sklopova brodskih postrojenja se definiše kao verovatnoća da razmatrani deo funkcioniše kako je predviđeno u svom veku trajanja. Za određivanje pouzdanosti verovatnosnih postupaka, uvedene su statističke varijable i stohastički procesi i definisano je kada se brodsko postrojenje smatra oštećenim, a kada ne. Određivanje pouzdanosti komponenata i sklopova broskog postrojenja ostvareno je na osnovu poznavanja načina delovanja, statističkih svojstava i veličina kojima se opisuje funkcionisanje brodskih postrojenja, statističkih svojstava opterećenja i materijala, kao i primene verovatnosnih postupaka.

S obzirom na kompleksnost matematičkog modela za donošenje odluka statističkim putem u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja, u radu su se koristile sistemska metodologija za teorijska istraživanja i eksperimentalna metoda simulacije za proveru teorijskog modela. U ovom primenjenom istraživanju koristila se i metoda modelovanja u cilju utvrđivanja i provere funkcionisanja hipotetičnog rešenja. Sistemski pristup u savremenoj nauci predstavlja specijalnu metodološku koncepciju, koja ima zadatak da u sistematičnom obliku formuliše sveukupnost metoda istraživanja i konstruisanja sistema različitih tipova i klasa. Važno je istaći da u takvom poimanju sistemski pristup ne pretenduje na iznalaženje opštih rešenja, već su to metodološka saznanja pomoću kojih se konkretizuju odgovarajuća pojedinačna rešenja. Sistemskom pristupu u rešavanju naučnih i stručnih problema pridaje se sve veći značaj, a metodologija sistemskih istraživanja čini osnovu naučnih istraživanja koja su primenjena u ovoj disertaciji.

Ovaj je pristup vrlo teško sprovodljiv u praksi, čak i pod pretpostavkom nezavisnih slučajnih promenljivih, uglavnom zbog teškoća, nemogućnosti prikupljanja relevantnih podataka za združene raspodele verovatnoće u složenim uslovima delovanja brodskih postrojenja. U ovom je radu pojedinim prepoznatljivim događajima u delovanju tehničkih predmeta pripisana verovatnoća pojavljivanja pomoću poznatih statističkih kvantitativnih i polukvantitativnih postupaka. Konkretno, u istraživanju se koriste sledeće metode naučnoistraživačkog rada:



**induktivna i deduktivna metoda**-za prikupljanje činjenica o problemima vezanim za procese prepoznavanja oblika pouzdanosti i odlučivanja, primenu kod definisanja mentalnih modela u simulaciji broskog motora kao i u razradi predloženih hipoteza i njihovoj verifikaciji;

**metoda analize i sinteze** procesa eksploatacije broskog motora-u metodi simulacije, definisanju mentalnog modela podsistema motora, donosioca odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti, transfera znanja između različitih nivoa unutar istog i različitih broskih postrojenja, i iskustava primene fazi logike, grubih skupova i neuronskih mreža u rešavanju sličnih problema prepoznavanja oblika pouzdanosti;

**metoda kompilacije** objavljenih naučnih dela iz područja fazi logike, grubih skupova, veštačke inteligencije, ekspertnih sistema, prepoznavanja oblika i njihov transfer na problematiku pouzdanosti broskih postrojenja;

**metoda vođenja dokumentacije**-za prikupljanje podataka, informacija i stavova donosioca odluka u procesima praćenja eksploatacije broskog motora u eksploatacionim istraživanjima o tradicionalnim metodama odlučivanja i mogućnostima primene novih tehnologija;

**genetička metoda**-za istraživanje i vrednovanje upotrebe sistema veštačke inteligencije – neuralnih mreža u procesima odlučivanja, kao i prognoze budućeg ponašanja broskog postrojenja.

U disertaciji su se, takođe koristile ideje o prostoru diskretnih događaja s elementarnim događajima definisanim u tom prostoru, njihovom grupisanju na različite načine u podsisteme događaja različitog značenja i važnosti s eksploatacijskog stanovišta, kao i vezama verovatnoće i neizvesnosti sistema, podsistema i događaja. Nedostatak statističkih podataka o varijablama u broskim postrojenjima, kao i složenost postupaka zasnovanih na verovatnoći, razlozi su postojanja više vrsta metoda pouzdanosti koje se mogu primeniti u eksploataciji broskih postrojenja. Pristup ocenjivanju pouzdanosti broskih postrojenja preko parcijalnih faktora sigurnosti naziva se i pristupom poluverovatnoćni, jer su korišćeni statistički podaci za prevrednovanje skalarnih mera sigurnosti uvedenih kroz determinističke pristupe. Neizvesnosti se modeluju preko jedne karakteristične vrednosti. Karakteristične vrednosti parcijalnih faktora sigurnosti baziraju se na iskustvu i kalibracionim metodama pouzdanosti viših nivoa. Parcijalni faktori sigurnosti se određuju za potrebe izračunavanja neizvesnosti opterećenja i izdržljivosti konstrukcije. Metode pouzdanosti drugog nivoa koriste statističke momente prvog i drugog reda, ali ne i funkcije raspodele, zbog čega se ti postupci označavaju i kao postupci bez statističkih raspodela. Neizvesnosti se modeluju preko srednjih vrednosti i varijansi kao koeficijenta korelacije između slučajnih varijabli. Slučajne varijable implicitno slede normalnu raspodelu. Verovatnoća oštećenja se ne može tačno izračunati, ali se mogu odrediti donje i gornje granice. Mera pouzdanosti je indeks pouzdanosti  $\beta$ . Napredne metode drugog nivoa dozvoljavaju da slučajne varijable imaju i druge raspodele, a ne samo normalnu.

Simulacione metode se koriste u ovoj disertaciji u delu eksploatacionih istraživanja. Velike mogućnosti modernih računara, savremeni usko specijalizovani simulacioni jezici, sniženje troškova po operaciji i veliki napredak u metodologiji simulacije vrlo brzo su proširili područje primene simulacije. Samim tim nametnulo se i

pitanje kada je simulacija odgovarajuće sredstvo za primenu, što je zaokupljalo mnoge autore koji su se bavili ovom oblašću. U ovoj disertaciji primena simulacionih metoda i tehnika se koristi iz sledećih razloga:

- za proučavanje i eksperimentisanje interakcijama složenog brodskog motora i njegovih delova,
- za analizu efekata promena u brodskom motoru ili promena u okruženju-mogu se simulirati, a ujedno posmatrati efekti tih promena na ponašanje modela,
- znanje stečeno u procesu izgradnje i simulacije modela može biti od velikog značaja kod poboljšanja pouzdanosti brodskog postrojenja koje se ispituje,
- simulacija se može koristiti kao sredstvo da pojača metodologije analitičkih rešenja,
- simulacija se može koristiti za eksperimentisanje, sa novim koncepcijama ili politikama pre nego što se izvrši njihova implementacija, tako da nas pripremi za ono što može nastupiti,
- simulacija se može koristiti za verifikaciju analitičkih rešenja.

## 1.9. Tehnike i instrumenti istraživanja

Karakter i metode istraživanja determinisale su i tehnike i instrumente istraživanja. Kompleksnost problematike istraživanja nalagala je kombinovanje različitih istraživačkih tehnika i instrumenata.

Osnovne istraživačke tehnike i instrumenti su:

### § *Analiza literature*

To je tehnika koja se primenjivala u postupku proučavanja dostupne literature iz domena odlučivanja, pouzdanosti i metoda za njihovo određivanje.

### § *Tehnika modelovanja*

Odabranom tehnikom modelovanja i definisanim skupom podataka za generisanje modela pristupilo se generisanju većeg broja tipičnih različitih modela. Razlog tome leži u činjenici što tehnike modelovanja tipično imaju određen broj parametara koji utiču na proces stvaranja modela, a time i na oblik i kvalitet generisanog modela. Stoga je proces generisanja modela u stvari iterativne prirode, u kojem se menjanjem tih parametara traži njihova optimalna kombinacija, koja daje najbolji rezultat na tesnom uzorku podataka. Konačni model (ili skup modela sličnih performansi) detaljno je interpretiran u smislu pouzdanosti njegovih rezultata. Osim toga, dat je opis modela u smislu njegove kompleksnosti (tipologija, broj i složenost konjunkcija u pravilima).

- *Testiranje* se vršilo u postupku provere ostvarenosti postavljenih hipoteza, ciljeva i zadataka istraživanja.
- *Posmatranje* procesa praćenja i provere je korišćena u eksperimentalnom istraživanju.
- *Obrada podataka* je kvantitativna i kvalitativna. Statistička obrada podataka je korišćena kada su u pitanju kvantitativni podaci.



## 1.10. Dosadašnja istraživanja u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja

Tokom istraživanja relevantne literature o pouzdanosti brodskih postrojenja konstatovao sam ozbiljan nedostatak naučnih i stručnih radova iz te oblasti u Hrvatskoj, mada u Republici Hrvatskoj postoje studijski predmeti na kojima se izučavaju sadržaji iz pouzdanosti-na pomorskim fakultetima u Rijeci, Dubrovniku, Splitu i Zadru. Naučno-stručna problematika iz oblasti pomorstva u Republici Hrvatskoj je predmet bavljenja časopisa "Naše more". Na primer o pouzdanosti i održavanju brodskih sistema postoji literatura: Josip Lovrić, "Osnove brodske terotehnologije", Pomorski fakultet u Dubrovniku–skripta. Autorizovana su predavanja Pouzdanost: M. Tomašević, Pomorski fakultet Split, u časopisu "Brodsko strojarstvo", mr sc. Mato Tudor s Pomorskog fakulteta u Rijeci objavio je rad pod naslovom "O pouzdanosti brodskih sustava". U radu su izloženi načini proračuna pouzdanosti brodskih sistema.

Tu problematiku razmatra rad autora: Belka, S., Čičin-Šani, D., "Menadžment sustava sa stajališta troškova posjedovanja", časopis "Održavanje i eksploatacija", Vol. 7, br. 1, Hrvatsko društvo održavatelja, Zagreb, april 2005, str. 6. Živko Kondić je napisao knjigu koja se uopšteno bavi pitanjima pouzdanosti: "Kvaliteta i pouzdanost tehničkih sistema", izdavač Tiva, Varaždin, 1999.

Mr sc. Mato Tudor, mr sc. Ante Bukša, mr sc. Predrag Kralj, Pomorski fakultet u Rijeci su autori rada koji je objavljen u časopisu "Naše more" 2004. pod naslovom: "Održavanje brodskih sistema". U radu su izloženi različiti pristupi održavanju brodskih postrojenja. Troškovi održavanja, po njihovim navodima, predstavljaju bitan ekonomski činilac u poslovanju broda. S jedne strane, dobrom politikom održavanja povećava se profitabilnost broda, a sa druge, raste cena troškova održavanja. Brodari nastoje da pronađu rešenja održavanja pomoću kojih će se postići najpovoljniji nivo troškova održavanja. Uvođenjem informatičkih tehnologija, na brodu se implementiraju metode održavanja bazirane na računarima. Zadovoljavanje ciljeva broskog održavanja postiže se analizom ponašanja brodskih postrojenja, kada se dogodi otkaz (tzv. analiza uzroka i posledica otkaza). Na osnovu takve analize, koja se zasniva na bazi podataka o otkazima, određuje se koji će se pristup održavanju primeniti. Analiza pokazuje reakciju pojedinog postrojenja ili njegovog dela na pojavu otkaza. Za pokazatelje takvih reakcija najčešće se uzimaju parametri kao što su pouzdanost ili raspoloživost. U radu je prikazana metoda zasnovana na pouzdanosti RCM (Reliability Centered Maintenance). Kako njome nije u potpunosti predviđen rizik posledice otkaza, data je i varijanta RCM metode zasnovana na riziku (Risk Centered Maintenance).

Autori Marko Valčić i mr sc. Julije Skenderović, sa Pomorskog fakulteta u Rijeci, u navedenom časopisu iz 2004. godine su objavili rad pod naslovom "Inteligentni sistemi nadzora i dijagnostike otkaza temeljeni na veštačkim neuronskim mrežama".

Razvoj i primena novih računarskih tehnologija, baziranih na algoritmima veštačke inteligencije, mogu znatno poboljšati kvalitet i performanse sistema za nadzor rada i dijagnostiku otkaza brodskih pogonskih postrojenja. Rad je strukturno podeljen u tri gotovo nezavisna dela. Prvi deo predstavlja kratak uvod u veštačke neuronske mreže,

kako bi se ta tematika približila studentima i inženjerima pomorskog saobraćaja, koji se tokom svog školovanja s njom gotovo i ne susreću. U drugom delu su analizirani postojeći, većinom ekspertni, sistemi nadzora i dijagnostike otkaza koje koriste vodeći svetski proizvođači brodskih motora. Treći deo predstavlja mogućnosti poboljšanja postojećih sistema implementacijom novih tehnologija, kao što su veštačke neuronske mreže, fazi (rasplinute) logike i njihove kombinacije, a sve u svrhu povećanja sigurnosti i pouzdanosti u radu brodskih pogonskih postrojenja.

Takođe, autori Marko Valčić i mr sc. Julije Skenderović s Pomorskog fakulteta u Rijeci objavili su rad pod naslovom "Vizualizacija radnih parametara parno-turbinskog postrojenja pomoću veštačke neuronske mreže", u citiranom časopisu iz 2004. godine. Praćenje rada složenih sistema pomoću veštačkih neuronskih mreža omogućuje kvalitetne informacije o karakteristikama sistema, kao i o njihovom međusobnom uticaju. U radu je opisana Kohonenova samoorganizujuća neuronska mreža, pomoću koje su izvršene klasterizacija, vizualizacija i analiza vrednosti radnih parametara industrijske trostepene parne turbine, nominalne snage 210 MW. Korišćeni su programski paketi MATLAB 6.5 i SOM Toolbox 2.0. Dobijeni rezultati predstavljaju klasifikaciju pojedinih parametara u odgovarajuće klastere, kao i njihovu međusobnu zavisnost, a u svrhu kvalitetnijeg nadzora rada parno-turbinskog postrojenja. Posebno je naglašena grafička vizualizacija obrađenih parametara, kako bi se olakšala analiza dobijenih rezultata.

Mr sc. Predrag Kralj s Pomorskog fakulteta u Rijeci, u radu "Analiza otkaza brodskih redundantnih sistema" objavljenom juna 2004, razmatra problematiku za poboljšanje pouzdanosti brodskog pokretačkog sistema, odnosno redukovanje stope otkaza, a to se postiže analizom otkaza brodskih redundantnih postrojenja. Najveći broj otkaza ima pogonski sistem. Najugroženija komponenta pogonskog sistema (pogonskog postrojenja) sa najvećim procentom otkaza, jesu izduvni ventili i pumpa visokog pritiska. Povećanje pouzdanosti može se postići podešavanjem postojećeg koncepta održavanja pomoću analize operativnih podataka brodskog pogona. Da bi brodski pogonski sistem bio otporniji na otkaze, zbog nedostataka konvencionalnih pogonskih sistema (jedna pogonska mašina – jedan brodski vijak), potrebno je ugraditi više pogonskih mašina i kormila s potrebnom pomoćnom servisnom podrškom za svaku mašinu, više sistema osovina i obezbediti višestruki prostor, zbog opasnosti od požara ili poplave.

Dr sc. Vinko Tomas u svom radu "Tehnike tolerisanja otkaza u dijagnostičkom sistemu" piše da se pri projektovanju dijagnostičkih sistema za brodsko elektroenergetsko postrojenje moraju uskladiti različiti ciljevi. Pored ostvarenja predviđenih funkcija, sistem mora imati odgovarajuću pouzdanost, sigurnost, raspoloživost, ekonomičnost, merljivost itd. U tom radu se daje pregled mogućih rešenja kojima se brodski elektroenergetski procesi mogu voditi uz znatno povoljniju bezotkaznost. Pri tom se razmatra postizanje i obezbeđenje raspoloživosti sistema kao jedne od odlučujućih komponenti ukupne tehničke i korisničke delotvornosti. Prikazane su tehnike za detektovanje, dijagnozu, ograničavanje, prikrivanje, kompenzaciju i popravku grešaka. Opisani postupci su ilustrovani na primeru sistema sa greškom na aktivnoj jedinici u redundantnom paru. Te tehnike mogu biti korišćene za projektovanje dijagnostičkog sistema koji toleriše greške. Koje će se tehnike koristiti, ne zavisi samo od date aplikacije, već i od ideja i filozofije projektanta.

Detaljnijim proučavanjem inostrane literature uočio sam nedostatak statističkih podataka o varijablama o brodskim postrojenjima, kao i složenost postupaka na bazi verovatnoće, i to su razlozi postojanja više metoda proučavanja pouzdanosti. U sadržajima proučene literature moguće je primetiti da se proučavanje pouzdanosti brodskih postrojenja bazira pretežno na aspektu konstrukcije brodskih postrojenja. Podela metoda pouzdanosti uobičajeno se daje na četiri nivoa:

a) nivo parcijalnih faktora sigurnosti, tzv. LRFD pristup (*Load and Resistance Factor Design*), razmatra se u sledećim literaturnim izvorima:

1. International Standard ISO 2394, General principles on reliability for structures, Second Edition, 1998-06-01, 1998.
2. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design. ENV 1991-1, 1994.
3. Sørensen, J. D., Structural reliability: Level 1 approaches, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, April 2000.
4. Ravindra, M. K., Galambos T. V., Load and Resistance Factor Design for Steel, ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 104, N0. ST9, pp. 1337-1353, 1978.
5. Östlund, L., General European Principles of Codes Concerning Reliability, Proc. ICOSSAR'89, pp. 1943-1948, 1989.

b) nivo drugih momenata, tzv. FORM (*First Order Reliability Method*) pristup i njegova naprednija verzija AFORM (*Advanced First Order Reliability Method*)

6. Hohenbichler, M., Rackwitz R, First-Order Concepts in Systems Reliability, Structural Safety, Vol. 1, No. 3, pp. 177-188, 1983.
7. Thoft-Christensen, P., Murotsu Y., Applications of Structural Systems Reliability Theory, Springer Verlag, New York, 1986.
8. Melchers, R. E., Structural Reliability Analysis & Prediction, Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, (2nd ed.), 1999.
9. Madsen, H. O., Krenk S., Lind N. C., Methods of Structural Safety, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1986.
10. Dolinski, K., First-order Second-moment Approximation of Structural Systems: Critical Review and Alternative Approach, Struct. Safety, 1, 3, 1983, pp. 211-231

c) nivo višedimenzionalnih grupnih raspodela verovatnoća

11. Ditlevsen, O., Madsen H. O., Structural Reliability Methods, Technical University of Denmark, Lyngby, (2nd ed.), 2003.
12. Thoft-Christensen P., Baker M. J., Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer Verlag, New York, 1983, 13-35.

d) nivo koji uključuje bilo koji prethodni nivo, ali uvodi ekonomske parametre za postizanje minimalne cene ili maksimalne korisnosti

13. Ang, A. H-S., Tang W. H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 2, Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons, New York, 1983, pp. 186-228; 450-3.
14. Baker, M J., Review of the Theoretical Basis for Risk and Reliability Assessment of Structures, Proc. I Mech E Seminar, 'Risk Assessment of Structures', 10 December, 1999, London.

Proučena i analizirana dostupna literatura omogućila je uvid u istraživanja problematike pouzdanosti brodskih postrojenja i potvrdila našu ispravnost postavke cilja i hipoteza za istraživanja pouzdanosti brodskih postrojenja na nov i originalan način.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE POUZDANOSTI

### 2.1. Pojam i značaj pouzdanosti

Dobro je poznato da su i u najstarijim proizvodnim, saobraćajnim, energetskim i drugim pogonima, tokom XIX veka, postojala posebna odeljenja ili službe za održavanje. To je bio rezultat saznanja i ubedenja da mašine, saobraćajna sredstva, vozila, lokomotive, parni kotlovi, elektrogeneratori i svi drugi tehnički sistemi mogu ispravno da rade samo ako se redovno održavaju. I to ne samo tako da se popravljaju kada otkazu, već i da se redovno pregledaju i podešavaju tokom rada, kako bi se otkazi sprečili ili što više odložili. Drugim rečima, važnost i značaj održavanja prepoznata je još davno, čim su različiti tehnički sistemi počeli da se proizvode i koriste. Začudujuće je zato da se održavanje veoma dugo nije takoreći ni spominjalo u programima tehničkih fakulteta, odnosno da studenti o tim važnim i opšte prepoznatim poslovima i tehnologijama koje se sprovode tokom celog životnog veka tehničkih sistema nisu dobijali čak ni osnovne informacije. U akademskim krugovima je očigledno preovladavalo mišljenje da su poslovi održavanja elementarni i "majstorski", da tu nema nauke, da o tome ne treba da se govori na nivou fakultetskih studija. Nije to tako bilo samo kod nas, već i u drugim, čak i najrazvijenijim zemljama.

Život je, međutim, išao drugim tokovima. Brzo se pokazalo da su takvi prilazi pogrešni. Pokazalo se da su sistemi održavanja kompleksni i zahtevni i da je održavanje na način kako se to tada radilo skupo i nedovoljno efikasno, da su troškovi održavanja veliki, a ostvarene raspoloživosti i gotovosti nedovoljne. Zato su procesi i tehnologije održavanja počeli da se detaljno izučavaju, tragalo se za naučnim osnovama na kojima ovi procesi počivaju i na kojima mogu da se unapređuju. To je tokom druge polovine XX veka, paralelno s intenzivnim razvojem nauka o sistemima, odnosno sa razvojem različitih disciplina sistemskih nauka, posebno **teorije pouzdanosti**, dovelo i do razvoja "teorije održavanja" ili "nauke o održavanju tehničkih sistema", tj. disciplina koje na naučnim podlogama izučavaju procese i postupke održavanja, tako da se ostvare što veći efekti, uz što manje troškova.

Nakon Drugog svetskog rata, kao i nakon svakog razdoblja velikih ekonomskih ili socijalnih potresa, postojala je potreba u velikom broju industrijskih grana, uključujući i proizvođače sredstava za rad, za velikim proizvodnim naporima kako bi se nadomestila sredstva izgubljena tokom ratnih zbivanja. Postojala je, takođe, potreba za ubrzanom proizvodnjom kako bi se nadoknadili proizvodni gubici nastali zbog usmeravanja proizvodnih sistema u ratne svrhe. U isto vreme, unapređivanje tehnologije omogućilo je dizajniranje tehnički mnogo naprednijih fabrika i zgrada u odnosu na one predratne. Ta dva faktora dovela su do potrebe i zahteva za održavanje velikih i vrednih poslovnih sistema, koji su se povećali kapacitetom i u smislu same sofisticiranosti. U velikom broju slučajeva to je rezultiralo povećanim troškovima održavanja, a istovremeno smanjenom iskorišćenošću sistema. Odgovornost za takvu situaciju je često neopravdano nametnuta funkciji održavanja u preduzećima. U međuvremenu su uspostavljeni i međunarodni standardi sa smernicama upravljanja kvalitetom.

Međutim, aspektima održavanja i održivost istovremeno nije posvećena jednaka pažnja. Održivost i neki oblici podrške održavanju danas se ipak rešavaju u dogovoru između Međunarodne elektrotehničke organizacije i Međunarodne organizacije za standardizaciju.

U godinama neposredno nakon Drugog svetskog rata u Velikoj Britaniji su upravo menadžeri koji su bili zaduženi za upravljanje funkcijom održavanja u preduzećima, prvi privukli pažnju na potrebu izbora poslovnih sistema ne samo na temelju kriterijuma visine početnih nabavnih troškova, već na temelju procene njihovih ukupnih troškova tokom celog veka korišćenja. Dok su inicijalni, odnosno kapitalni troškovi sredstava sami po sebi sastavni deo ukupnih troškova korišćenja poslovnih sistema, troškovi njihovog održavanja tokom celog veka korišćenja i, konačno, njihovog odlaganja jednako su važni i mogu često biti mnogo veće vrednosti od kapitalnih troškova sistema.

Takve primedbe menadžera održavanja postajale su sve češće i glasnije tokom šezdestih godina prošloga veka i konačno se negde 1970. godine počela razvijati, kao jedna od malobrojnih, nova industrijska tehnologija od strane tadašnjeg britanskog Ministarstva industrije. Istovremeno se, takođe, osetila potreba za razvojem novog prikladnog termina

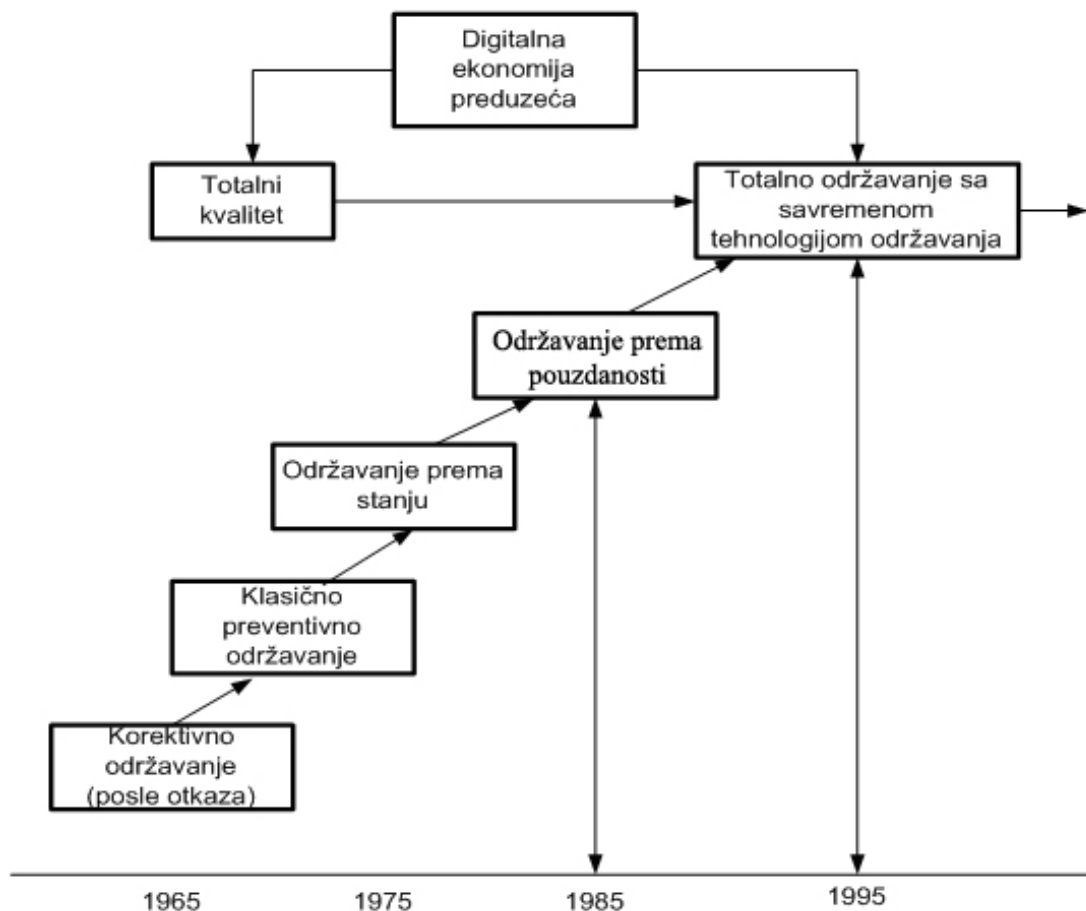
kojim bi se identifikovao ovaj novi koncept ekonomskog upravljanja materijalnim poslovnim sistemima i taj se posao prepustio celom nizu leksikografa. Oni su preporučili termin "terotehnologija", koji potiče od grčke reči "tereni" što znači "brinuti se". Ovo je prvi put objavljeno u Oxford English Dictionary, odnosno u njegovoj nadopuni iz 1986. godine, iako je taj termin prvi put upotrebljen još 1970. Koristio se već tada, a i danas se koristi u istoj formi i u nekim drugim zemljama.

Termin je prvi put upotrebilo britansko Ministarstvo industrije 1970. godine, kada je osnovan Odbor za terotehnologiju, a nakon prvog izveštaja pomenutog odbora, koji je objavljen 1973, i Ministarstvo okoline je prepoznalo principe terotehnologije kao primenjive na izgradnju i održavanje zgrada, te je 1974. godine osnovalo Odbor za terotehnologiju zgrada. Već je sledeće godine osnovan i Nacionalni centar za terotehnologiju, čiji je temeljni zadatak bio promocija terotehnoloških koncepata. Međutim, Centar je zatvoren nakon svega nekoliko godina. U međuvremenu, Britanski institut za standardizaciju proširio je nadležnosti svoga Odbora za održavanje na šire područje terotehnološkog koncepta.

Prvu definiciju terotehnologije postavio je Odbor Ministarstva za industriju u Velikoj Britaniji i ona je ostala gotovo neizmenjena sve do danas. Trenutno prihvaćena definicija terotehnologije, kako je izloženo u Britanskim standardima, glasi: "kombinacija menadžmenta, financiranja, inženjeringa, izgradnje i drugih disciplina primenjenih na fizička poslovna sredstva preduzeća s aspekta ekonomičnosti troškova tokom njihovog korisnog veka trajanja" (Belak, S., Čičin-Šain, D., Menadžment sustava sa stajališta troškova posjedovanja, časopis "Održavanje i eksploatacija", Vol. 7. , br. 1, Hrvatsko društvo održavatelja, Zagreb, travanj 2005, str. 6). Najčešće pomenutu definiciju prate i dve napomene, kako bi se bolje ilustrovao nameravani opseg terotehnologije. Jednostavno rečeno, koncept terotehnologije promoviše primenu svih potrebnih tehnika kojima se može obezbediti da korisnik sistema dobije najveću moguću vrednost za svoj novac. Terotehnološki pristup proučava troškove proizvodnog sistema, za razliku od ekonomskog pristupa, koji zanimaju troškovi proizvoda. Često se troškovi proizvodnog



sistema pogrešno shvate kao njegova vrednost. Stvarna vrednost proizvodnog sistema se može utvrditi samo ako se uporedi rezultat poslovanja sistema i svih njegovih komponenti s ukupnim troškovima koji su pri tome nastali. (Belak, S., Čičin-Šain, D., Komparativna analiza upravljanja proizvodnim kapacitetom, terotehnologije i LCC sa stajališta troškova, Zbornik radova 11. međunarodnog savjetovanja HDO, Šibenik, 2005, str. 64). Iako je očigledna prednost u upotrebljavanju jedne reči za oslikavanje takvog koncepta, pojam "terotehnologija" ipak nije postao opšteprihvaćen. Po tome se svakako razlikuje od pojma "tribologija", koji je nastao otprilike u isto vreme i danas se nalazi u širokoj upotrebi. Delimično razlog za to leži u činjenici da termin "terotehnologija", sa svojim prilično čudnim korenom reči, nije najprikladniji za brzu i jasnu interpretaciju njegovog značenja. Na slici 2.1. se vide koncepcije održavanja.



Slika 2.1. Koncepcije održavanja

(Izvor: Adamović, Ž., Šukalo B., Menadžment održavanja, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "M. Pupin" Zrenjanin, 2005, str. 24)

Počeci proučavanja pouzdanosti vezani su za razvoj nemačkog projektila V1 za vreme Drugog svetskog rata, koji je sadržao u sebi mnoge elemente pouzdanosti. Prvobitni koncept pouzdanosti za V1 bio je izražen pravilom da je »jačina lanca jednaka jačini najslabije karike u njemu«. Međutim, iako su sve aktivnosti bile usmerene u tom pravcu, projektil V1 imao je 100% otkaza. Najzad, shvaćeno je da je jačina lanca jačina

njegove najslabije karike. Kao rezultat toga postignuta su velika poboljšanja pouzdanosti, tako da je od svih lansiranih projektila V1 uspešno funkcionisalo 60%.

Oružane strane SAD su posledice nepouzdanosti svoje ratne opreme osetile još u Drugom svetskom ratu. Oko 60% opreme koju su transportovali na Daleki istok bilo je neispravno, kao i 50% rezervnih delova i opreme u skladištima, a elektronika na njihovim bombarderima imala je srednje vreme između otkaza svega 20 sati. Rezultati u pogledu pouzdanosti ratne opreme za vreme korejskog rat bili su isto tako poražavajući. Na početku tog rata, oko 70% mornaričke elektronske opreme nije funkcionisalo. Jedna studija napravljena u to vreme pokazala je da je, na primer, za svaki dolar vrednosti elektronske opreme potrebno godišnje dva dolara za održavanje te iste opreme. Druga studija iznela je podatak da se od  $\frac{2}{3}$  do  $\frac{3}{4}$  opreme nalazi na popravci ili se ne može koristiti.

Tako poražavajući rezultati naterali su oružane snage SAD da vrlo rano počnu svestrano proučavanje načela pouzdanosti. Najveći problemi uočeni su u slučaju elektronskih vakumskih cevi. Sprovedena je veoma opsežna studija, pri čemu je analizirano oko 150 000 neispravnih cevi. Od 1949. do 1953. godine obavljene su slične studije i za ostale elektronske komponente, kao što su otpornici, kondenzatori, transformatori, releji itd. Godine 1950. Ministarstvo odbrane je osnovalo komitet za pouzdanost, koji je od 1952. stalan i poznat je pod nazivom AGREE. Njegov zadatak je da upravlja i stimuliše interes u vezi sa pouzdanošću, kao i da predlaže mere koje će doprineti pouzdanijoj elektronskoj opremi. Kasnije su stvoreni i drugi organizacioni oblici, na primer Komitet za pouzdanost vođenih raketa, osnovan 1958. godine, te studijska grupa za specifikaciju pouzdanosti delova, takođe uspostavljena 1958. godine.

Uporedo s tim aktivnostima, popisivane su specifikacije u kojima su precizirani zahtevi za pouzdanost, koje proizvođač mora zadovoljiti da bi se kvalifikovao kao isporučila robe Ministarstvu odbrane. U sadašnjim specifikacijama se zahteva od proizvođača da bude u stanju da demonstrira postignutu pouzdanost. Nacionalna uprava za astronautiku i svemirska ispitivanja SAD (NASA) takođe ima svoj dokument u kome su navedeni zahtevi po pitanju pouzdanosti, koje mora ispuniti proizvođač koji se pojavljuje kao isporučilac. I ostale razvijene zemlje, među kojima Rusija, Japan, Francuska, V. Britanija i druge, u svim oblastima tehnike razmatraju i koriste metode pouzdanosti.

Navedeni primeri samo delimično ukazuju na ogromnu korist koja se može očekivati primenom osnovnih principa pouzdanosti, kako u vojnoj tako i u civilnoj industriji.

### 2.1.1. Definicije pouzdanosti

Pouzdanost intuitivno podrazumeva uspeh i predstavlja verovatnoću da će uređaj, odnosno sistem, uspešno funkcionisati u određenom vremenskom intervalu. Drugim rečima, pouzdanost podrazumeva da u određenom intervalu vremena neće doći do otkaza.

Primena pouzdanosti (teorija pouzdanosti) je u ekonomiji, telekomunikacijama (procesu drugog reda) u održavanju složenih sistema (električne centrale, proizvodnja, saobraćaj), u primenjenoj statistici (teorija raspodela, ocenjivanje parametara, stabilnost



karakterizacije), u mehanici (stohastičke diferencijalne jednačine), identifikaciji i kontroli nelinearnih dinamičkih sistema, predikciji nestacionarnih vremenskih serija, analizi teksta u dokumentima (inteligentno pretraživanje, ekstrakcija informacija, kategorizacija dokumenata), operacionim istraživanjima i optimizaciji, kao i u proceni rizika (statistički algoritmi mašinskog učenja). Pod pojmom pouzdanosti podrazumevaćemo "verovatnoću da će sistem uspešno vršiti funkciju kriterijuma u projektovanom vremenu rada i datim uslovima okoline" ( Ž. Adamović i R. Brkić, Inženjerstvo pouzdanosti, Beograd, 2004, TEHDIS str. 5).

U mnogobrojnoj literaturi iz skoro svih oblasti nauke, tehnike, privrede, pedagogije, psihologije, društva itd., javlja se pojam pouzdanosti.

**Pouzdanost** kao verovatnoća je broj između 0 i 1 ili 0% i 100%, a može se predstaviti kao odnos između broja uspešnih zadataka i ukupnog broja zadataka u vremenu specifičnom za funkcionisanje sistema, tj.

$$\underline{R}(t) = \frac{n_1(t)}{n(t)},$$

pri čemu je:

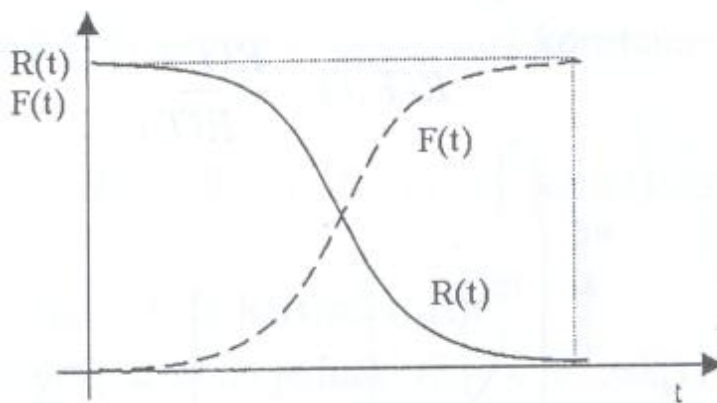
$\underline{R}(t)$  - procena pouzdanosti,

$n_1(t)$  - broj uspešnih zadataka u vremenu  $t$ ,

$n(t)$  - ukupan broj izvedenih zadataka u vremenu  $t$ ,

$t$  - vreme specificirano za funkcionisanje sistema.

Vrednost  $R(t)$  predstavlja procenjenju pouzdanost usled toga što je broj zadataka  $n(t)$  konačan. Zato se stvarna pouzdanost  $R(t)$  dobija kada broj zadataka  $n$  teži beskonačnosti. Na slici 2.2. prikazan je odnos pouzdanosti i nepouzdanosti određen relacijom (2.1.) (Ž. Adamović i B. Šukalo, "Menadžment održavanja", Univerzitet u Novom Sadu, Tehnički fakultet "M. Pupin" Zrenjanin, 2005, str. 43).



Slika 2.2. Funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti

$$\begin{aligned} F(t) + R(t) &= 1 \\ R(t) &= 1 - F(t) \end{aligned}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.1)$$

### 2.1.1.1. Pouzdanost rezultata merenja

Kad se prilikom ponavljanja istraživačkog postupka dobiju slični rezultati i time potvrde dosadašnja saznanja, govori se o pouzdanosti rezultata. Pouzdanost je osobina istraživanja koja omogućuje ponavljanje postupka, bez obzira na to ko sprovedi postupak, isti ili različiti istraživač. Tu se zapravo radi o temeljnim (fundamentalnim, čistim) istraživanjima. Ona se sprovode zbog proširivanja granica same nauke.

Ponovljena istraživanja dovode ili do starih saznanja, ili pak otkrivaju nova.

U ovom istraživanju je teško sprovesti eksperiment prema načelima naučne metode, jer je brodsko postrojenje na kojem se istraživanje sprovodi vrlo dinamičan sistem i nemoguće je dobiti dva ili više puta iste rezultate. Takođe, javlja se problem kvaliteta instrumenta istraživanja ili uzorka: ako je instrument niže klase ili uzorak loše odabran, pouzdanost rezultata biće mala.

Postoje tri mogućnosti određivanja pouzdanosti:

#### 1. Pouzdanost uz pomoć ponovnog merenja

Obavlja se ponovno merenje uz iste merne instrumente i u istim okolnostima. Ako i dođe do nekih varijacija, one će se otkriti u razlikama dvaju merenja. Ako nema razlike između rezultata prvog i drugog merenja, instrument smatramo stabilnim.

#### 2. Pouzdanost uz pomoć ekvivalentnih mernih instrumenata

Pouzdanost dobijena na ovaj način izbegava neke nedostatke prvog pristupa jer koristi ekvivalentne merne instrumente (dva slična, ne jednaka). Razlika između prvog pristupa i ovog je upravo u tome što se koriste dva merna instrumenta, a u prvom slučaju jedan.

#### 3. Pouzdanost uz pomoć unutrašnje konsistencije

Pouzdanost dobijena na ovaj način meri se na osnovu mogućnosti da se dođe do istih rezultata na različitim uzorcima, a merenje se obavlja istovremeno. Teorija interne konsistencije temelji se na ekvivalenciji: koliko se pogreške unosi time što se merenje sprovodi na različitim uzorcima, (1. i 2. savetovanje o pouzdanosti u elektrotehnici, Elektrotehnika, časopis SEITH i udruženih izdavača, godišta 1980, 1981, 1983, Zagreb).

**Pouzdanost, odnosno ponovljivost**, označava do koje se mere metoda merenja konsistentno i postojano ponaša, a uključuje: unutar ili međuposmatračku pouzdanost, pouzdanost unutrašnje konsistencije, pouzdanost alternativnih formi i test-retest pouzdanost. "Računari su nepouzdana, no ljudi još više. Svaki sistem koji zavisi od ljudske pouzdanosti je nepouzdan". (Marfijev zakon).

### 2.1.1.2. Značaj pouzdanosti

Generalno posmatrano, značaj pouzdanosti se može uočiti na primerima koji govore o pouzdanosti tehničkih sistema.

U 1958. godini Amerikanci su lansirali uspešno samo 28% satelita, dok je sada taj procenat 92 i ima stalnu tendenciju porasta.

U 1959. godini period garancije za automobil iznosio je 90 dana ili 6.000 km, dok danas neki proizvođači već nude garanciju od pet godina ili 80.000 km.

Hidraulična pumpa na avionu DC-8 u početku je imala srednje vreme između remonta 1200 h. Neprekidnim prikupljanjem podataka o otkazima omogućene su konstrukcione izmene koje su povećale pouzdanost pumpe. Kao rezultat toga povećano je srednje vreme između remonta na 2000 h, zatim 4000 h i najzad 5.800 h. Znači, povećana pouzdanost rezultirala je smanjenjem troškova održavanja. Izračunato je da za srednje

vreme između remonta od 4000 h uštede za jedan remont na jednom avionu iznose 1.840 dolara.

Dobro postavljenim i vođenim programom, pouzdanost sistema naoružanja na avionu F-105 podignuta je sa 0,7263 na 0,8986. Troškovi pouzdanosti bili su visoki i iznosili su 25,5 miliona dolara, ali su zato i uštede bile ogromne, veličine 54 miliona dolara godišnje u troškovima održavanja.

Primena pouzdanosti ima višestruki značaj:

- Ø produženje životnog veka proizvoda, uređaja i smanjenje broja otkaza u eksploataciji,
  - Ø smanjenje troškova održavanja,
  - Ø smanjenje troškova garancija,
  - Ø smanjenje ciklusa razvoja,
  - Ø povećanje kvaliteta uređaja,
  - Ø veće zadovoljstvo kupaca,
  - Ø povećanje bezbednosti sistema, odnosno uređaja.
- § Pouzdanost je svojstvo tehničkih sistema čiji je nivo veoma bitan za ukupan kvalitet.
  - § Pouzdanost je verovatnoća određenog događaja i može se predstaviti na osnovu: funkcije pouzdanosti, funkcije nepouzdanosti, funkcije gustine otkaza i intenziteta otkaza pojedinih delova, kao i sistema.
  - § Utvrđivanje pouzdanosti se može obaviti na tri načina: prognoziranjem na osnovu poznavanja sličnih sistema, ispitivanjem u laboratoriji i na osnovu podataka iz eksploatacije realnih sistema.
  - § Struktura sistema je veoma bitna za nivo pouzdanosti.
  - § Alokacija pouzdanosti podrazumeva takav model pri kome se utvrđuje pouzdanost delova na osnovu zahteva za pouzdanost ukupnog sistema.
  - § Kako je pouzdanost konstrukciona karakteristika, postoji metodologija ugrađivanja pouzdanosti u projektna rešenja. Pri tome postoji čitav niz specificiranih zahteva u procesu konstruisanja, koji se ugrađuju u sistem, odnosno deo sistema.
  - § Postoji odnos između troškova proizvođača, korisnika i nivoa pouzdanosti, koji je veoma bitan kako u postupku konstruisanja tako i u postupku eksploatacije.

## 2.2. Osnovni pokazatelji pouzdanosti elemenata i sistema

Sve formule koje su vezane za analizu raspoloživosti pojedinačnih komponenata sistema (mašina) nalaze se na jednom mestu zato što redosled kojim su one navedene odgovara redosledu koraka kojim se dolazi do formula koje su od najvećeg interesa za praktičnu primenu, a to su izrazi za [funkciju raspoloživosti](#) pojedinačnih brodskih postrojenja. Ti izrazi se ne mogu izvesti bez prethodnih objašnjenja vezanih za [neodržavane](#) i [održavane](#) sisteme, koji obuhvataju definisanje sledećih funkcija:

- [Funkcija nepouzdanosti](#) predstavlja verovatnoću da će do otkaza neke komponente doći pre nekog trenutka vremena  $t$ , odnosno da je vreme nastanka otkaza manje ili jednako  $t$ .

- [Funkcija pouzdanosti](#) predstavlja verovatnoću da će do otkaza neke komponente doći posle nekog trenutka vremena  $t$ , odnosno da će komponenta "preživeti" taj trenutak.
- [Gustina verovatnoće otkaza](#) predstavlja odnos broja komponenti koje su otkazale u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i ukupnog broja komponenti na početku intervala.
- [MTTF](#) predstavlja očekivano vreme pojave otkaza (*Mean Time To Failure*).
- [Intenzitet otkaza](#) predstavlja odnos broja komponenti koje su otkazale u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i broja komponenti koje su bile ispravne u trenutku  $T=t$ .
- [Funkcija opravke](#) predstavlja verovatnoću da će komponenta biti opravljena u intervalu vremena  $[0, t]$ .
- [Gustina verovatnoće opravke](#) predstavlja odnos broja komponenti koje su opravljene u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i broja komponenti koje su bile u otkazu u trenutku  $t=0$ .
- [MTTR](#) predstavlja očekivano vreme do izvršenja opravke (*Mean Time To Repair*).
- [Intenzitet opravke](#) predstavlja odnos broja komponenti koje su otkazale u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i broja komponentata koje su bile u otkazu u trenutku  $T=t$ .
- [MTBF](#) predstavlja očekivano vreme trajanja jednog ciklusa (*Mean Time Between Failure*).
- [Funkcija raspoloživosti](#), ili kraće raspoloživost, predstavlja verovatnoću da se komponenta nalazi u operativnom stanju  $S_1$  u nekom trenutku  $t$ .
- [Funkcija nerasploživosti](#), ili kraće nerasploživost, predstavlja verovatnoću da se komponenta nalazi u neoperativnom stanju  $S_2$  u nekom trenutku  $t$ .

Navedene definicije znače:

- [Funkcija nepouzdanosti](#) predstavlja verovatnoću da će do otkaza neke komponente doći pre nekog trenutka vremena  $t$ , odnosno da je vreme nastanka otkaza manje ili jednako  $t$ .

Tabela 2.1

Statistička definicija funkcije nepouzdanosti:	$F = \frac{n_f}{n}$
Veza funkcije nepouzdanosti sa funkcijom pouzdanosti:	$F(t) + R(t) = 1$
Probabilistička definicija funkcije nepouzdanosti, uz uslov $F(0)=0$ :	$F(t) = \int_0^t f(t) dt$
U slučaju da je $\lambda$ intenzitet otkaza konstantan, funkcija nepouzdanosti je:	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

- [Funkcija pouzdanosti](#) predstavlja verovatnoću da će do otkaza neke komponente doći posle nekog trenutka vremena  $t$ , odnosno da će komponenta "preživeti" taj trenutak.

Tabela 2.2.

Statistička definicija funkcije pouzdanosti:	$R = \frac{(n - n_f)}{n}$
Veza funkcije pouzdanosti $R(t)$ sa funkcijom nepouzdanosti $F(t)$ :	$F(t) + R(t) = 1$
Probabilistička definicija, uz uslov $F(\infty) = 1$ :	$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$
U slučaju da je $\lambda$ konstantno, funkcija pouzdanosti je:	$R(t) = e^{-\lambda t}$

Razlika između intenziteta otkaza i gustine verovatnoće otkaza je u tome što se intenzitet otkaza računa u odnosu na broj komponentata koje su bile ispravne u trenutku  $T=t$ , dok se gustina verovatnoće otkaza računa u odnosu na ukupan broj komponentata.

Ukoliko je intenzitet konstantan u toku vremena, onda on predstavlja očekivani broj otkaza u jedinici vremena.

Tabela 2.3.

Statistička definicija intenziteta otkaza:	$I(t) = \frac{n_f(t + \Delta t) - n_f(t)}{(n - n_f(t)) \cdot \Delta t}$
Probabilistička definicija intenziteta otkaza:	$I(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR}{dt}$

- [Funkcija opravke](#) predstavlja verovatnoću da će komponenta biti opravljena u intervalu vremena  $[0, t]$ .

Tabela 2.4.

Statistička definicija funkcije opravke:	$M(t) = \frac{n_m(t)}{n_f(t)}$
Probabilistička definicija funkcije opravke, uz uslov $F(0)=0$ :	$M(t) = \int_0^t m(t) dt$
U slučaju da je $\mu$ konstantno:	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$

Intenzitet opravke predstavlja odnos broja komponenti koje su otkazale u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i broja komponentata koje su bile u otkazu u trenutku  $T=t$ .

Razlika između intenziteta opravke i gustine verovatnoće opravke je u tome što se intenzitet opravke računa u odnosu na broj komponentata koje su bile u otkazu u trenutku  $T=t$ , dok se gustina verovatnoće opravke računa u odnosu na broj komponentata koje su bile u otkazu u trenutku  $T=0$ .

Ukoliko je intenzitet konstantan u toku vremena onda on predstavlja očekivani broj opravljenih komponenti u jedinici vremena.

Tabela 2.5.

Statistička definicija intenziteta opravke:	$m(t) = \frac{n_m(t+\Delta t) - n_m(t)}{n_f(t)\Delta t}$
Probabilistička definicija intenziteta opravke:	$m(t) = \frac{1}{1-M(t)} \frac{dM}{dt}$

- [Gustina verovatnoće opravke](#) predstavlja odnos broja komponenti koje su opravljene u intervalu  $[t, t+\Delta t]$  i broja komponenti koje su bile u otkazu u trenutku  $t=0$ .

Tabela 2.6.

Statistička definicija gustine verovatnoće opravke:	$m(t) = \frac{n_m(t+\Delta t) - n_m(t)}{N_f(0) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta M}{\Delta t}$
Probabilistička definicija gustine verovatnoće opravke:	$m(t) = \frac{dM}{dt}$
U slučaju da je $\mu$ konstantno, gustina verovatnoće opravke je:	$m(t) = m \cdot e^{-\mu t}$

Ako su poznate karakteristične funkcije pojedinačnih komponenti ( $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $R$ ,  $A$ ), mogu se definisati sledeće funkcije za sistem:

### Nezavisni otkazi

Tabela 2.7.

Ako su otkazi nezavisni, pouzdanost sistema se računa formulom:	$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$
Pouzdanost sistema se računa pomoću intenziteta otkaza $\lambda_i$ , pri čemu je $\lambda_i$ konstantan, formulom:	$R(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}$
U slučaju da je $\mu$ konstantno, gustina verovatnoće opravke je:	$m(t) = m \cdot e^{-\mu t}$
Raspoloživost sistema se računa formulom:	$A(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t)$
Raspoloživost sistema konstantne vrednosti $\lambda_i$ i $\mu_i$ se računa formulom:	$A^* = \prod_{i=1}^n \frac{m_i}{\lambda_i + m_i}$
Očekivani praktični učinak sistema:	$U_e^* = \min U_{pj} \cdot A^*$

### Zavisni otkazi

Tabela 2.8.

Ako su otkazi zavisni raspoloživost sistema konstantne vrednosti $\lambda_i$ i $\mu_i$ računa se formulom:	$A^* = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$
Očekivani praktični učinak sistema računa se formulom:	$U_e^* = \min U_{pj} \cdot A^*$



## 2.3. Pregled nekih osnovnih metoda koje se primenjuju u teoriji pouzdanosti

Prepoznavanje oblika bavi se sa osnovnim tehnikama koje se koriste u mnogim oblastima kada treba doneti odluku o nekoj pojavi, procesu ili stanju u sistemu. Samo prepoznavanje oblika je interdisciplinarna naučna oblast koja podrazumeva znanje i alate iz digitalne obrade signala, veštačke inteligencije, teorije stohastičkih procesa i estimacije, kao i teorije ekspertskih sistema. Prepoznavanjem oblika i donošenjem odluka bavi se svaki čovek svakodnevno, počev od jednostavnih situacija kao što je izbor mesta i trenutka prelaska ulice, kupovine u samoposluzi, jutarnjeg izbora odeće, pa do nekih mnogo značajnijih situacija, kao što su izbor fakulteta na koji će se upisati, kupovina automobila, stana, izbor radnog mesta, izbor bračnog druga i tako dalje. U tehniци su te metode za prepoznavanje problema ili okruženja i donošenje odluka na osnovu takvog prepoznavanje vrlo korisne i često primenjive. Optičko prepoznavanje napisanih karaktera (štampanih ili rukom pisanih), prepoznavanje govora, detekcija havarijskih stanja u industriji, autorizacija korisnika na osnovu otiska prsta, retine, dlana ili glasa, automatsko postavljanje medicinske dijagnoze, donošenje odluke u vezi sa kupovinom ili prodajom akcija na berzi samo su neki od primera u kojima tehnike prepoznavanje oblika u velikoj meri mogu da automatizuju ili pojednostave proces odlučivanja, u kome će se minimizirati verovatnoća greške ili šteta definisana na odgovarajući način. U teoriji prepoznavanja oblika poznate su i druge metode (prof. dr Željko Đurović: Veštačke neuralne mreže i njihova primena u prepoznavanju oblika, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, autorizovana predavanja), koje ćemo pomenuti, ali ih nećemo dalje razmatrati, jer prevazilaze okvire disertacije, a to su:

### 1. Parametarske metode u prepoznavanju oblika:

- Ø projektovanje linearnih klasifikatora, deo-po-deo,
- Ø linearni klasifikatori,
- Ø kvadratni klasifikatori.

### 2. Neparametarske metode:

Neparametarske metode za estimaciju funkcija gustina verovatnoće, metod najbližih suseda.

### 3. Redukcija dimenzije problema:

Karhunen-Loeve ekspanzija, redukcija dimenzija na bazi matrice rasejanja.

### 4. Klasterizacija:

- Ø metod klasterizacije na bazi najbližih srednjih vrednosti,
- Ø kvadratna dekompozicija,
- Ø metod maksimalne verodostojnosti.

Teorijske podloge koje se koriste za prepoznavanje oblika i koje će se izložiti u ovoj disertaciji su sledeće:

#### 1. Statističke metode

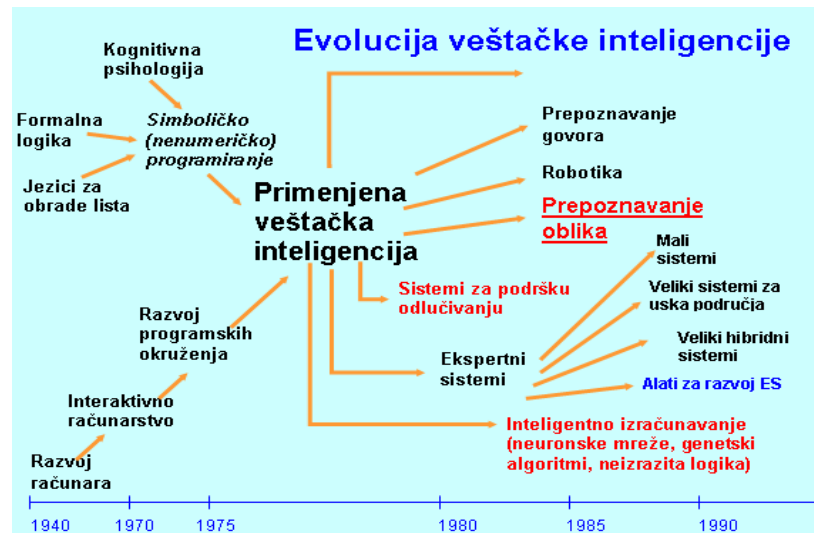
Bajesov metod testiranja hipoteza, test hipoteza minimalne cene, Neyman-Pearsonov test, min-max test, sekvencijalno testiranje hipoteza, Waldov sekvencijalni test.

## 2. Primena fazi logike u prepoznavanju oblika

Primena veštačkih neuralnih mreža za prepoznavanje oblika.

## 3. Primena simulacionih metoda za prepoznavanje oblika.

Svaka od navedenih metoda je obrađena u posebnom poglavlju (4, 5, 6 i 7). Na slici 2.3. prikazana je evolucija veštačke inteligencije sa posebnim naznakama (crveno) na problematiku koja se razmatra u disertaciji. Kao što je rečeno, problematika prepoznavanja pouzdanosti brodskih postrojenja može se razmatrati, prema našim istraživanjima, i drugim metodama, prikazanim na slici 2.4.



Slika 2. 3. Prikaz evolucije veštačke inteligencije

Vrste približnog računanja:

- **fuzzy (neizrazita) logika**

pripadnost nekom skupu nije jednostavno izražena binarnim vrednostima (0, 1), već se izražava vrednostima iz intervala (0,1)

- **neuronske mreže**

stvaranje modela postupnim učenjem na prethodnim podacima

- **genetski algoritmi**

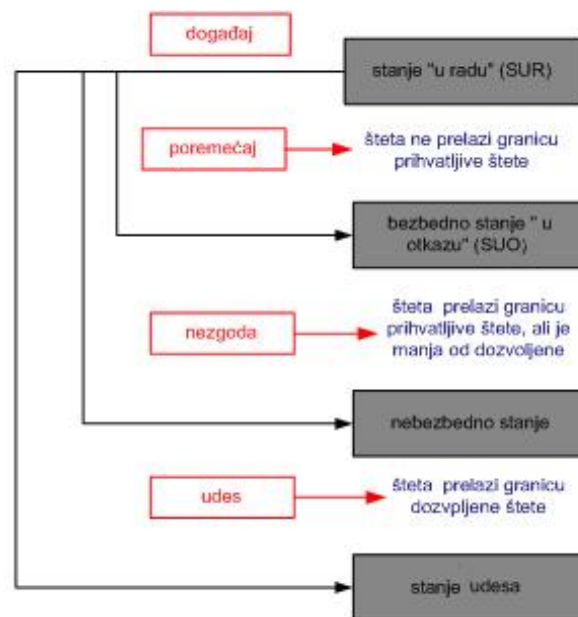
traženje najprikladnijeg rešenja prema uzoru na evolucijske procese

Slika 2.4. Metode prepoznavanja oblika pouzdanosti

## 3. TEORIJSKA ISTRAŽIVANJA

### 3.1. Modeli donošenja odluka

Ova disertacija se bavi i problematikom donošenja odluka u procesima prepoznavanja pouzdanosti tehničkih sistema, konkretno brodskih postrojenja, pa je stoga neophodno da se razmotre teorijske osnove procesa odlučivanja. Kao što je u uvodu napomenuto, zbog sve starije tehnike u upotrebi, nemogućnosti njene zamene, pa i subjektivnih razloga, pri čemu se zanemaruju neka pravila pri upotrebi, kao i niza drugih faktora, može se reći da problem proučavanja pouzdanosti tehničkih sistema u toku njihove eksploatacije ima ogroman značaj. Zbog toga je važna i neophodna razrada metodologije upravljanja pouzdanošću tehničkih sistema u eksploataciji. Pri analizi pouzdanosti tehničkih sistema (proizvoda) sve događaje je pogodno grupisati na **poremećaje, nezgode i udes**, kao što je to pokazano na slici 3.1.



Slika 3.1. Klasifikacija osnovnih događaja i stanja pri analizi pouzdanosti brodskih postrojenja

U praksi, u toku upotrebe brodskih sistema (BS), najčešće se registruju poremećaji, ređe nezgode, a vrlo retko udesi. Broj poremećaja eksploatacije je za nekoliko redova (od 10 do 100 puta) veći od ozbiljnih nezgoda i udesa. Zbog toga je logično da se operativno upravljanje pouzdanošću zasnuje na rezultatima analize poremećaja. Jedan od važnih aspekata sistemskog prilaza pouzdanosti složenih tehničkih sredstava povezan je s utvrđivanjem najtežih (najznačajnijih) poremećaja radi preduzimanja efikasnih korektivnih mera.

Očigledno da je eksploatacija nekog brodskog postrojenja, čak i sa visokopouzdanim elementima, dobrim uputstvima za upotrebu i kvalifikovanim ljudstvom, neizbežno praćena slučajnim poremećajima, od kojih se svaki može okarakterisati određenom vrednošću rejtinga  $R(t_i)$  u trenutku  $t_i$ , koji se kreće u određenim granicama.

Te promene vrednosti rejtinga imaju slučajni karakter, ako se pretpostavi da se sistematski uzroci promene rejting takođe menjaju. Procena bezbednosti postrojenja, pored proračuna verovatnoće otkaza, što je jedan od zadataka procene pouzdanosti, zahteva i procenu posledica otkaza, odnosno štete od nastalog otkaza, posebno kada se radi o mogućnosti udesa koji može imati velike društveno-ekonomske i ekološke posledice različitih razmera. U najjednostavnijem slučaju problem teorije odlučivanja sastoji se u odabiru jedne od dveju mogućih hipoteza na bazi raspoloživih podataka (merenja). Statističari nazivaju ovaj problem testiranje hipoteze. Kod analize signala potrebno je odlučiti da li se traženi signal nalazi ili ne nalazi u primljenom zašumljenom signalu.

Modelovanje problema odlučivanja kao zadatka optimizacije ima više dobrih osobina. Pre svega, u okviru matematičkog programiranja razvijeno je puno efikasnih algoritama za rešavanje karakterističnih tipova zadataka.

Samo naučno proučavanje odlučivanja počinje tek tridesetih godina prošlog veka. Odlučivanje predstavlja proces pripreme i donošenja odluka. Odluka je izbor iz skupa od najmanje dve opcije kojima možemo da ostvarimo željeni cilj. Ako raspoložemo samo jednom opcijom, onda nema dileme u vezi sa izborom, a time nema ni problema sa odlučivanjem. Donošenje odluka može se definisati kao izbor između više alternativa. Odlučivanje čini izbor između alternativnih aktivnosti za postizanje nekog cilja, na osnovu razmatranja ishoda svake alternative po nekom utvrđenom kriterijumu izbora. Rezultat procesa odlučivanja je odluka. Kvalitet odluke zavisi od logičkog okvira za odlučivanje i načina odlučivanja donosioca odluke. Izučavanje procesa odlučivanja predstavlja jednu od vrlo značajnih istraživačkih aktivnosti procesa upravljanja. Teorija odlučivanja je interdisciplinarna nauka koja se u svojim istraživanjima koristi saznanjima iz ekonomije, matematike, statistike, psihologije, sociologije, organizacione teorije, filozofije itd. Teorija odlučivanja je analitički i sistematski pristup proučavanju procesa donošenja odluka. Ta teorija se bavi pitanjima: kako treba odlučivati (*normativna teorija*), kako (ali i o čemu, zašto itd.) se odlučuje u praksi (*deskriptivna teorija*), pri čemu su takva pitanja deo istraživanja, u prvom redu, psihologije i socijalne psihologije.

Unutar teorije odlučivanja ponuđen je veliki broj odgovora na pitanje kako i šta treba prvenstveno istraživati u pojmu odlučivanja, praktično toliko odgovora ima koliko i istraživača iz tog područja. Od tako dobijenih mnogobrojnih karakteristika odlučivanja mogu se istaći sledeće:

1. Modeli procesa odlučivanja i vrste odluka;
2. Modeli pristupa odlučivanju;
3. Stilovi odlučivanja i načini rukovođenja;
4. Mere za poboljšanje sistema odlučivanja;
5. Sistem odlučivanja i sistem menadžmenta;
6. Metodologija projektovanja i izgradnje sistema odlučivanja s činiocima odlučivanja.

## 3.2. Modeli odlučivanja

Model odlučivanja je izražen u uslovima performansi, ograničenja i varijabli odlučivanja. Svrha takvog modela je pronalaženje optimalnih ili zadovoljavajućih vrednosti varijabli odlučivanja, koje poboljšavaju performanse sistema unutar promenljivih ograničenja. Takvi modeli mogu, onda, pomoći u usmeravanju donosilaca odluka. Identifikacijom alternativnih rešenja (varijanti) i njihovim testiranjem, kao izborom najboljeg rešenja i njegovom implementacijom, model zauzima nezamenjivo mesto i ulogu u procesu donošenja odluka.

### 3.2.1. Modeli odlučivanja - simbolični (matematički) modeli

Prema M. P. Wahlu (prema Harold, Koontz, i Heinz, Weihrich, Essentials of Management, Fifth Edition, Mc Graw-Hill publishing Company, New York, 1990, str.115), simbolični modeli se mogu podeliti na:

- Ø verbalne modele,
- Ø matematičke modele.

Kod verbalnih modela upotrebljava se običan svakodnevni govor, koji je nedovoljan, pa se razvio stručni jezik sa sopstvenom terminologijom (emotivni delovi su još sadržani).

Većina simboličnih modela koristi matematičke simbole, npr. matematička jednačina je simboličan model, dok je njen korespondirajući graf analogni model.

## 3.3. Metode odlučivanja

Pod naučnim metodama odlučivanja smatraju se one metode odlučivanja koje se u celosti ili u znatnom delu izvode iz teorije odlučivanja.

Uz pojam naučnih metoda odlučivanja vezan je pojam modela odlučivanja. Naime, za pojedinačne naučne metode odlučivanja ili za skup više metoda povezanih po nekom zajedničkom svojstvu, u upotrebi je još naziv modeli odlučivanja.

Polazeći od interdisciplinarnog karaktera, **teorije odlučivanja** moguće je podeliti na:

- normativnu,
- deskriptivnu,
- preskriptivnu.

### Normativna teorija odlučivanja

Ova teorija se zasniva na ekonomiji, matematici i statistici. Pretpostavlja potpunu racionalnost donosioca odluke, čemu sledi racionalni model odlučivanja.

### Deskriptivna teorija odlučivanja

Deskriptivna teorija odlučivanja pokušava opisati ono što se zbiva u realnoj situaciji odlučivanja bez stvaranja vrednosnih sudova o kvalitetu odluke. Bitna karakteristika deskriptivne teorije odlučivanja je često korišćenje eksperimenta. Ne postoji jedinstvena deskriptivna teorija, ona je doprinos više naučnih disciplina – psihologije, socijalne psihologije, sociologije...

### Preskriptivna teorija odlučivanja

Preskriptivna teorija odlučivanja je razvijena tokom posleratnog razdoblja kao proširenje normativne teorije u područje rešavanja realnih problema odlučivanja. Ona

savladava jaz između teorije u odlučivanju i stvarnog ponašanja prilikom donošenja odluke. Preskriptivna teorija odlučivanja naziva se još **kvantitativna teorija odlučivanja** ili **Management science**. Na slici 3.2. data je struktura teorije odlučivanja.

Najčešće metode koje se koriste u kvantitativnom odlučivanju su:

- Ø sistemska analiza,
- Ø metode operacionog istraživanja,
- Ø metode simulacije.

### **Sistemska analiza obuhvata:**

1. identifikaciju potreba;
2. studiju opravdanosti (feasibility study);
3. ekonomsku analizu (troškovi i dobit);
4. tehničku analizu (performanse, *pouzdanost*, održavanje, produktivnost);
5. alociranje (dodela koja se odnosi na sistemske funkcije, sistemske elemente, tj. šta čime izvršiti (tzv. trade off).

Ostale metode, kao što su: linearno programiranje, dinamičko programiranje, teorija redova i teorija igara slabije su zastupljene, svega između 1% i 9%.

Zanimljivo je istaknuti da 19% hrvatskih menadžera i čak 24% američkih ne koristi nikakve naučne metode u odlučivanju.

"Teško je, međutim, verovati u tačnost ovih odgovora, kako za hrvatske tako isto i za američke menadžere, s obzirom na vrste odluka, te način odlučivanja menadžera u ovim preduzećima." (Sikavica, P., *Komparativna analiza funkcioniranja menadžmenta u američkim i hrvatskim preduzećima*, Zbornik radova sa savetovanja "Gospodarska politika Hrvatske-Što i kako u 1997, godini?", Opatija, 21. i 22. novembar 1996, str. 149).

Jedan od faktora koji utiče na kvalitet odlučivanja, posebno u fazi pripremanja odluka, jeste sklonost, odnosno nesklonost, donosilaca odluka da se u odlučivanju koriste savremenim matematičko-statističkim metodama. Statističke metode predstavljaju osnovni alat u procesu odlučivanja i imaju za cilj prevazilaženje razlike između onoga što se želi i onoga što bi se ostvarilo ako se odluka ne donese.

Naime, što je problem odlučivanja složeniji i teži, to je i mogućnost primene matematičkog modela u odlučivanju manja. Matematičke modele u odlučivanju treba koristiti kao značajno sredstvo u procesu odlučivanja kada su u pitanju problemi prepoznavanja pouzdanosti tehničkih sistema.

Proces odlučivanja može se sprovesti kroz tri faze:

#### **Ø Faza identifikacije**

U fazi identifikacije prepoznaje se problem ili mogućnost, donosi se dijagnoza.

#### **Ø Faza razvoja**

U fazi razvoja pretražuju se postojeće standardne procedure ili rešenja, odnosno dizajniraju se nova, specifično problemu prilagođena rešenja.

### Ø Faza izbora

Faza izbora se obično obavlja na tri načina:

- procenjivanje na osnovu iskustva ili intuicije, bez logičke analize;
- logičkom i sistemskom analizom alternativa;
- pregovorom i "cenkanjem", kad se izbor vrši u grupi, te kad je prisutno političko "manevrisanje" zainteresovanih strana.

#### 3.3.1. Vrste odluka prema nivoima odlučivanja

Odluke prema nivoima odlučivanja mogu biti:

- **Strateške** - dugoročne, odnose se na planiranje razvoja, a kriterijum vrednovanja je efektivnost (delotvornost) sistema. Donosi ga najviše rukovodstvo.
- **Taktičke** - obezbeđuju realizaciju strateških odluka, kriterijum je efikasnost sistema. Donosi ih srednje rukovodstvo.
- **Operativne** - svakodnevne odluke, koje se kreću u tehničkom domenu, a kojima se stvara osnova za ostvarenje obaveza dodeljenih od strane viših nivoa. Taktičke odluke se odnose na raspored resursa na način da se postignu ranije utvrđeni ciljevi, odnosno da se postigne optimalni odnos između inputa i outputa. Od taktičkih odluka se očekuje povećanje efikasnosti postrojenja (tj. što veći output u odnosu na input).

#### 3.3.2. Vrste odluka prema stepenu strukturiranosti

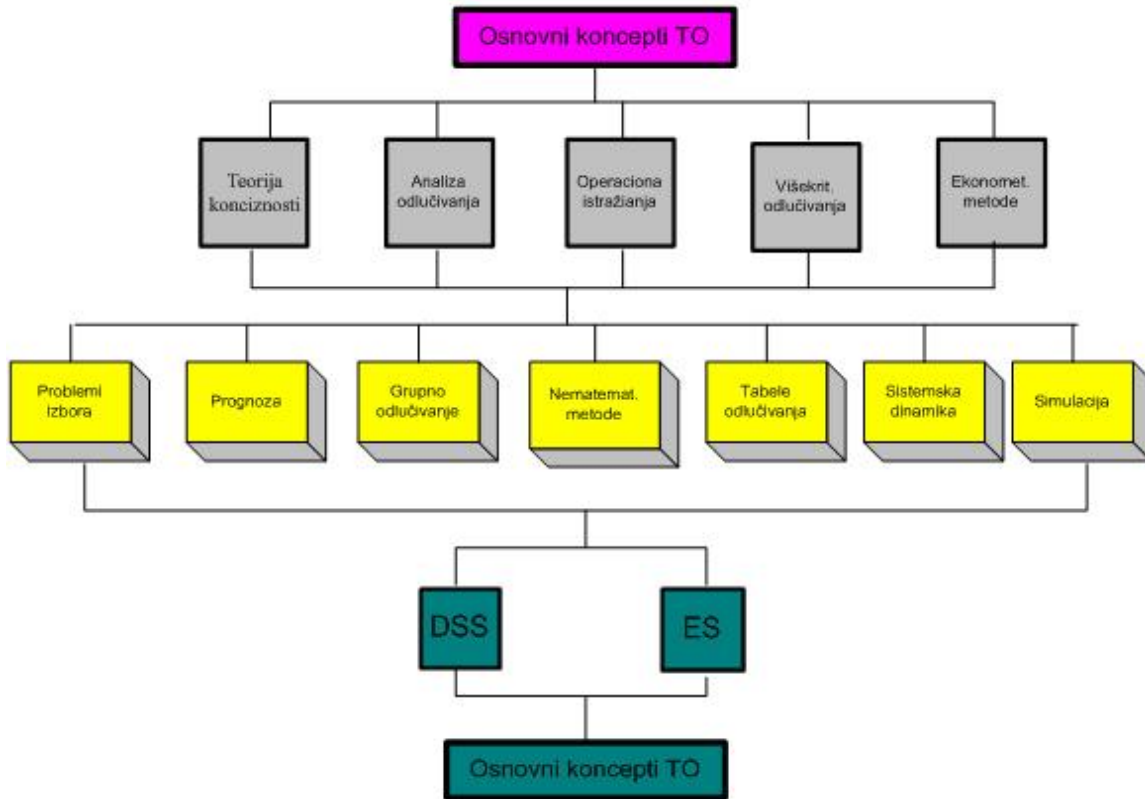
**Stepen strukturiranosti odluke** označava u kojoj su one meri rutinske i koliko se često ponavljaju.

**Visokostrukturirane odluke** su one koje su se već često donosile. Donosioci poseduju znanje o tome koje su informacije i metode potrebne za njihovo donošenje. Opcije između kojih se pravi izbor dobro su poznate i mogu se lako proceniti sa stanovišta ciljeva sistema. Problem odlučivanja je **visokostrukturiran** u onoj meri u kojoj su donosiocu odluke poznate sve tri komponente problema. Dobro strukturiran problem omogućuje donosiocu odluke da u njegovom rešavanju primeni iskustvo iz prošlosti. Rutinske odluke donose se uz primenu standardnih procedura. To mogu biti postupci s konačnim brojem logički poređanih koraka koji dovode do očekivanog rešenja. Takođe, to mogu biti i heuristike ili "pravila palca" (rules of thumb), koja se mogu uspešno primeniti u traženju rešenja. Međutim, takva pravila ne garantuju uspeh.

**Polustrukturirane odluke** su one kod kojih je znanje o nekim aspektima odlučivanja dobro poznato, ali se o drugim aspektima malo zna. Zato je potrebno sakupiti odgovarajuće znanje da bi se odluka mogla doneti.

**Nestrukturirane odluke** se donose u izvanrednim situacijama, pa se one po pravilu donose samo jednom. Takve odluke odnose se ili na potpuno nove situacije, prouzrokovane neočekivanim zbivanjima unutar ili izvan sistema, ili su vrlo retke. Kod njih je opcije teško formulirati, a nekada i proceniti sa stanovišta ciljeva sistema. Često nedostaje i znanje o načinu odlučivanja. U kojoj meri je problem odlučivanja **slabo (loše) strukturiran** određeno je time koliko su sve tri komponente problema odlučivanja (slika 3.2) ili neke od njih nepoznate donosiocu odluke. U rešavanju takvog problema donosilac odluke orijentisan je na onu komponentu koja mu je najbolje poznata.





Slika 3.2. Osnovni koncepti teorije odlučivanja

• Ako mu je poznato samo sadašnje stanje, on će pomake raditi na osnovu provere da li ide u smeru poboljšanja performansi.

• Ako zna konačno (željeno) stanje, pokušaće povratnom dedukcijom identifikovati transformacije koje bi to stanje povezale s polaznim.

• Ako su mu poznati samo postupci (transformacije) kojima se može menjati stanje sistema o kojem odlučuje, on će pokušati specifikovati početno i konačno stanje tako da može primeniti ono što zna. Slaboj strukturiranosti problema odlučivanja najviše doprinose uslovi iz okruženja. Oni se karakterišu kao:

- nesigurnost (neizvesnost),
- kompleksnost,
- konfliktnost.

Za donošenje **nestrukturiranih** odluka potrebne su kreativnost, mašta, intuicija i sposobnost istraživanja. Prilikom donošenja takvih odluka koriste se sledeći postupci:

- lateralno razmišljanje (svestan napor da se stvari vide iz nekonvencionalne perspektive),
- analogija (s prethodno donošanim odlukama),
- istraživanje (traženje novog znanja koje bi pomoglo da se bolje razumeju aspekti koji čine sadašnju situaciju),
- sinteza (kombinovanje poznatih specifičnih metoda),
- kreativnost (korišćenje mašte za stvaranje novog znanja potrebnog za donošenje odluke),
- "oluja mozgova" (široka rasprava grupe eksperata s ciljem iznošenja niza ideja koje bi se mogle koristiti u donošenju odluke).

### 3.3.3. Vrste odluka s obzirom na njihovu pripremu

Vrste odluka s obzirom na njihovu pripremu su:

- Naučno–stručne odluke;
- Programirane odluke;
- Rutinske odluke.

### 3.3.4. Vrste odluka s obzirom na njihovu ulogu u procesu odlučivanja

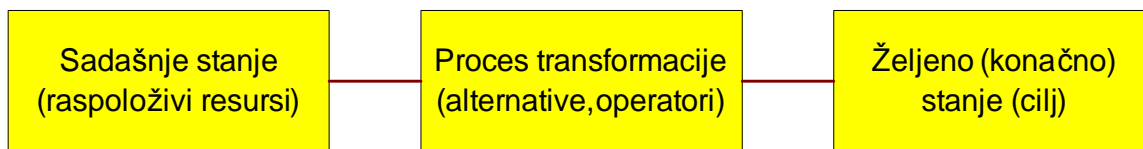
Vrste odluka s obzirom na njihovu ulogu u procesu odlučivanja su:

- Investicione odluke;
- Tekuće odluke;
- Korekzione odluke.

### 3.3.5. Struktura procesa odlučivanja

#### Proces odlučivanja

Problem odlučivanja može se najjednostavnije modelirati kao trojka sa sledećim komponentama:



Slika 3.3. Komponente problema odlučivanja

U procesu odlučivanja potrebno je izvršiti:

- 1) definisanje problema, tj. sistema i njegovih parametara;
- 2) utvrđivanje kriterijuma odlučivanja;
- 3) formulisanje veza između parametara i kriterijuma, tj. modela;
- 4) generisanje alternativa, najčešće promenom vrednosti parametara;
- 5) izbor akcije koja najviše zadovoljava postavljene kriterijume.

Sličan stav o odlučivanju ima i Velimir Srića (Srića, V., *Principi modernog menadžmenta*, Zagrebačka poslovna škola, Zagreb, 1992, str. 33-34), koji ističe da je kod svih situacija odlučivanja moguće naći sledeće zajedničke elemente:

- Ø **cilj** odlučivanja,
- Ø **alternativne** odluke,
- Ø **ograničenja**,
- Ø **rezultati** odluka,
- Ø **kriterijum** izbora odluke.

## Faze donošenja odluka

Postupak odlučivanja obično ima sledeće faze:

- identifikacija problema,
- definisanje ciljeva,
- donošenje preliminarne odluke,
- generisanje liste mogućih rešenja,
- evaluacija mogućih rešenja,
- odabir rešenja,
- sprovođenje odluke u praksu,
- praćenje izvršenja odluke.

## Cilj

To je željeno stanje sistema, željeni izlaz ili željeni podskup u skupu stanja sistema, tj. skupu izlaza. Iskazuje se funkcijom cilja. Cilj se ostvaruje u uslovima različitih ograničenja. Prvi važan korak u čitavom procesu donošenja odluka jeste razumevanje potrebe da se ovaj proces primeni, odnosno razumevanje problema koji želimo rešiti. To je konačan cilj donošenja odluka. Konkretni problemi mogu biti vrlo različiti. Da bi smo mogli efikasno rešiti problem, treba:

- razumeti problem iz perspektive domena, tj. ograničenja u njegovom rešavanju,
- otkriti važne činioce koji mogu uticati na konačni rezultat donošenja odluka.

## Ograničenja

Posledica su prirode sistema, ograničenosti resursa, tehničkih mogućnosti postrojenja, mogućnosti čoveka. Među najvažnija ograničenja u odlučivanju ubrajamo nedovoljna i ograničena sredstva, informacije i vreme koje nam stoji na raspolaganju za potrebe odlučivanja.

Ograničenja se definišu sistemom jednačina ili nejednačina u kojima figurišu iste nepoznate kao i u funkciji cilja. Donosilac odluke mora poznavati ograničenja u odlučivanju kako bi definisao prostor, odnosno područje delovanja ili akcije koje će preduzeti.

Ograničenja u odlučivanju limitiraju mogući broj varijanata rešavanja nekog problema.

Ograničenja mogu biti manja ili veća, tako da se sloboda izbora neke odluke može kretati u rasponu od potpune slobode do potpune neslobode.

## Akcija ili alternativa

To je ono što donosiocu odluke stoji na raspolaganju kao mogućnost izbora prilikom odlučivanja. Skup takvih akcija se često zove strategijom.

## Izbor

Izbor između raznih mogućnosti se sprovodi na taj način što se ishodi svake alternative upoređuju sa stanjem nazvanim cilj, pri čemu se kao merilo, tj. kriterijum

kvaliteta izbora, može postaviti veći ili manji stepen slaganja sa ciljem (maksimalno slaganje **optimalna odluka**, zadovoljavajuće slaganje **zadovoljavajuća odluka**).

### Rezultat izbora

Rezultat izbora, odnosno rezultat odlučivanja jeste odluka. Proces odlučivanja završava se u trenutku **donošnja odluke**, tj u trenutku kada je izvršen konkretan izbor.



Slika 3.4. Model osnove procesa odlučivanja

### Opšte karakteristike odluke su:

- Ø važnost odluke;
- Ø vreme i troškovi (potrebni za donošenje odluke);
- Ø složenost odluke.

### Raspoloživa sredstva

Uvek ćemo se na samom početku procesa odlučivanja suočiti sa problemom raspoloživih sredstava koja stoje na raspolaganju za rešavanje problema. Ako su želje u nerazmeri sa mogućnostima sistema, donosilac odluke će u odlučivanju izabrati prioritete, budući da ne može sve probleme rešiti, baš zbog nedostatka sredstava.

### Dostupne informacije

Prema H. Simonovom "modelu administrativnog čoveka" ( Simon, H. A., *Administrative Behavior*, MacMillan, 1959, str. 80), donosilac odluke ne donosi najbolja rešenja, već zadovoljavajuća, u prvom redu zato što nema kompletne informacije o svemu, pa zbog toga ne može biti potpuno svestan nekih aspekata odluke.

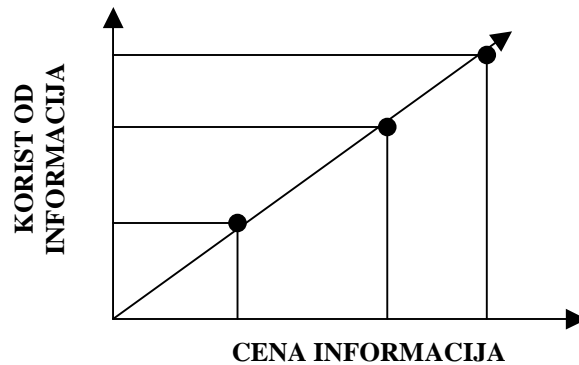
U današnje vreme informatičke tehnologije, telekomunikacija i globalizacije poslovanja, vrednost informacija uopšte, a za poslovno odlučivanje posebno, još je veća. Svaki sistem je u interakciji s okolinom s kojom razmenjuje materijale, ali i informacije. Informacije su neprekidno u kretanju u sistemu i iz sistema, a jednom kada uđu u sistem, kreću se vertikalno i horizontalno.

Za svaki sistem važne su i interne, a još više eksterne informacije. Danas sve više uspeh sistema zavisi od kvaliteta, pravovremenosti i dostupnosti informacija iz njegove okoline. Te informacije u velikoj meri određuju ciljeve i strategiju, te poslovnu politiku sistema.

Informacija je vrlo vredan resurs, pogotovo za odlučivanje. Bez pravovremene i odgovarajuće informacije teško je zamisliti racionalan proces odlučivanja. Informacija, kao i svaki drugi resurs, ima svoju cenu, koju treba platiti.

Donosilac odluka mora biti u stanju da proceni odnos između vrednosti, odnosno korisnosti informacija potrebnih za odlučivanje i cene koja se za te informacije mora platiti.

Ono što je činjenično i sa čime se svaki donosilac odluka suočava jesu količina informacija koja mu je potrebna, njihova vrednost i cena.



Slika 3.5. Odnos koristi i cene informacije

Dok je god vrednost, odnosno korist informacija veća od cene koja se za tu informaciju mora platiti, donosilac odluka mora prikupljati dodatne informacije sve do onog nivoa kada njihova granična vrednost bude jednaka nuli.

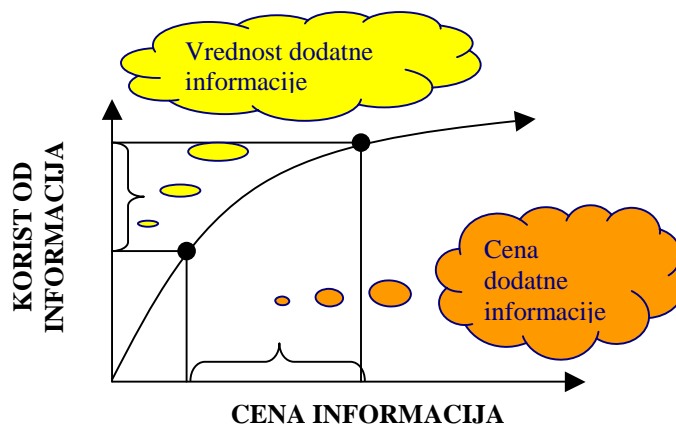
Tri su moguća odnosa između vrednosti, odnosno korisnosti koje donosilac odluka ima od dodatnih informacija i njihove cene. Taj odnos može biti linearan, progresivan i degresivan.

### Proporcionalan odnos

Odnos između vrednosti, odnosno koristi informacija u odnosu na cenu jeste proporcionalan. To znači da svaka dodatna informacija zahteva i dodatnu cenu koju treba platiti za tu informaciju. Donosilac odluke mora biti u mogućnosti odrediti trenutak kada će prestati priliv dodatnih informacija, koje su, istina, korisne, ali produžavaju proces odlučivanja u nedogled. Pri odlučivanju o tome od pomoći su i ostala dva ograničenja u odlučivanju-raspoloživa sredstva i vreme.

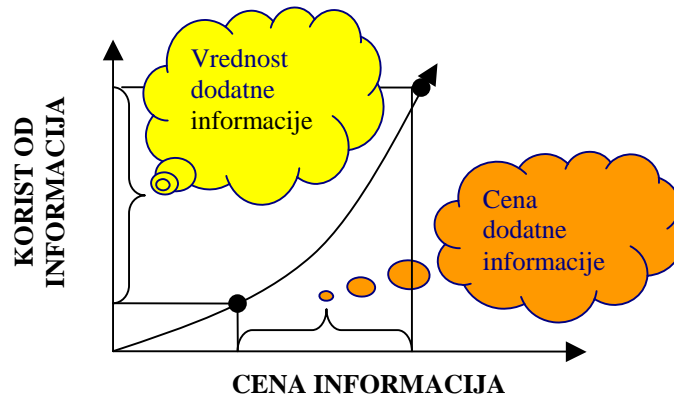
Nakon određene količine prikupljenih informacija nastupa **progresivan rast cene informacija** u odnosu na vrednost, odnosno korist koja se dobija za odlučivanje zahvaljujući tim dodatnim informacijama.

U onom trenutku kad cena dodatne informacije postane veća od dodatne vrednosti, odnosno koristi koja se dobija tom informacijom, donosilac odluke treba da prestane sa prikupljanjem informacija i mora otpočeti proces odlučivanja.

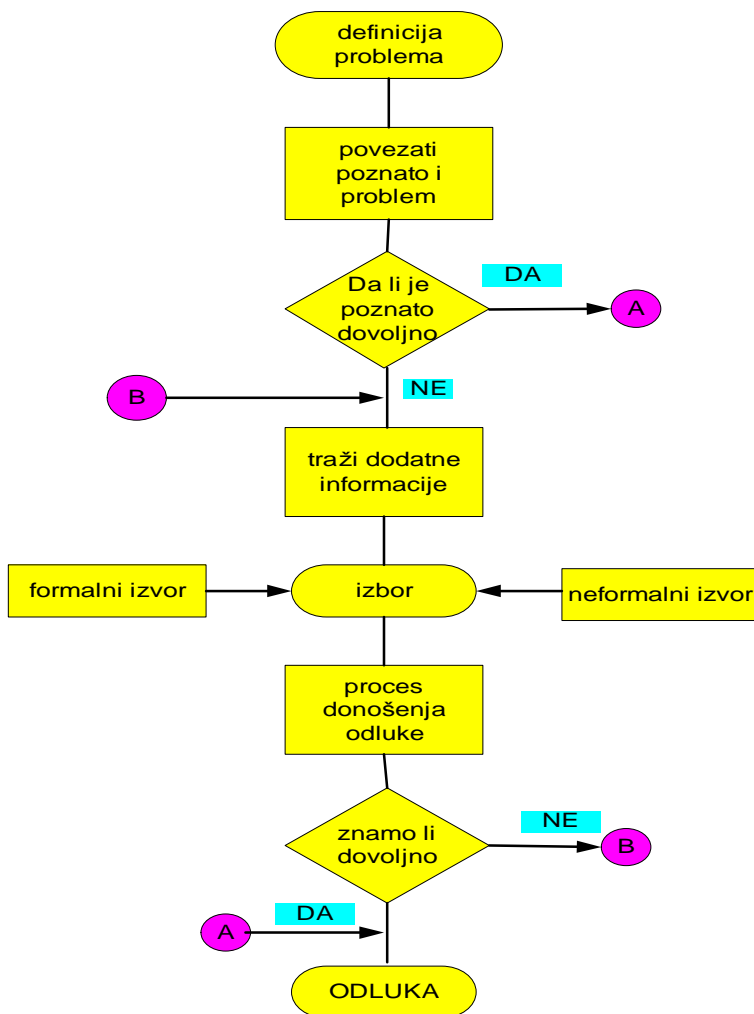


Slika 3.6. Progresivan odnos između vrednosti informacije i cene

I prilikom degresivnog rasta cene dodatnih informacija u odnosu na njihovu dodatnu vrednost, odnosno korist treba imati meru i znati kada prestati prikupljati dodatne informacije potrebne za odlučivanje, bez obzira na to što su one jeftinije od vrednosti, odnosno koristi koju pružaju donosiocu odluke. Odluka kada će donosilac odluke prestati s prikupljanjem dodatnih informacija biće određena dostupnim sredstvima za informacije, a još više raspoloživim vremenom za odlučivanje.



Slika 3.7. Degresivan odnos između vrednosti informacije i cene



Slika 3.8. Informacije i odlučivanje (model je preuzet iz knjige "Primjena računala", A. Munitić, str. 56, Pomorski fakultet, Split)

Ponekad je pravovremena informacija isuviše skupa pa u tom trenutku, s obzirom na svoju vrednost, ne bi mogla pokriti troškove, odnosno cenu koja se za nju mora platiti. U takvoj situaciji donosilac odluke može postupiti na dva načina. Algoritam odlučivanja od podataka do odluke prikazan je na slici 3.9. Prvi je odlučivanje bez te informacije, uz rizik donošenja pogrešne odluke. Druga je mogućnost sačekati neko vreme da padne cena informacije. Ovo drugo rešenje moguće je koristiti ako je odluka takve prirode da joj vremenski pomak ne oduzima ništa od kvaliteta.





Slika 3.9. Od podataka do odluke (model je rezultat originalne sinteze autora disertacije)

### Raspoloživo vreme

Vreme je po mnogo čemu specifičan resurs. To je jedini resurs koji se troši nezavisno od naše volje. Ako ne koristimo vreme na najbolji mogući način, naše će odlučivanje biti često nepotrebno.

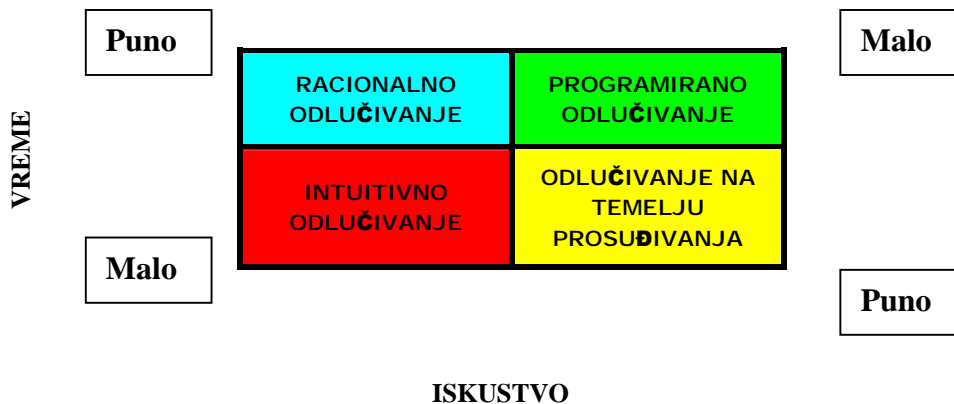
Jedna od teškoća upravljačkog odlučivanja ogleda se i u odlučivanju pod vremenskim pritiskom, kao i u odlučivanju u kriznim situacijama. U oba slučaja postoji velika verovatnoća da se donese pogrešna odluka. Ako je donosilac odluke u vremenskom tesnacu, ne može vrednovati sve raspoložive varijante, jer je pod pritiskom da odluka mora biti donešena brzo, a to na određeni način blokira odluku.

Tri su osnovna razloga zašto treba vremenu, kao ograničavajućem činiocu odlučivanja, posvetiti odgovarajuću pažnju.

Jedan se tiče činjenice što su neki procesi prirodno vremenski limitirani i pojedine odluke, odnosno poslove u vezi s tim odlukama, treba obaviti na vreme (npr. u pomorstvu).

Drugi razlog zbog kojeg treba vremenu, kao ograničavajućem činiocu odlučivanja, posvetiti znatnu pažnju jeste taj što ponekad neku odluku moramo doneti iznenada, neočekivano i u vremenskoj oskudici, kad nema mogućnosti ni za prikupljanje potrebnih informacija niti za vrednovanje većeg broja varijanti rešenja problema.

Treći je razlog zašto vremenu u kojem se odluka donosi treba posvetiti izuzetnu pažnju taj što u slučaju zakašnjenja u odlučivanju, informacije, odnosno podaci na osnovu kojih se odlučuje, gube na vrednosti, odnosno s vremenom zastarevaju.



Slika 3.10. Matrica raspoloživog vremena i iskustva

Na vreme kao činioca odlučivanja utiče i iskustvo koje donosilac odluke ima u procesu odlučivanja. U zavisnosti od iskustva donosilaca odluka, kao i raspoloživog vremena za odlučivanje, razlikovaće se i načini odlučivanja.

Ako u određenoj situaciji odlučivanja donosilac odluke ima na raspolaganju:

- a) dovoljno vremena, ali istovremeno ne poseduje i dovoljno iskustva u tom procesu, tada će se odlučiti za racionalno odlučivanje;
- b) dovoljno vremena i iskustva u procesu odlučivanja, odlučiće se za programirano odlučivanje;
- c) nedovoljno vremena i iskustva, tada jedino preostaje intuitivno odlučivanje;
- d) nedovoljno vremena a dovoljno iskustva, tada će odlučivati na temelju procenjivanja, poučen odlukama koje je doneo ranije.

### 3.3.6. Okolina odlučivanja

Na odlučivanje uopšte, a na tehničko odlučivanje posebno, utiču i činioci okoline. Pod okolinom sistema podrazumeva se deo okruženja s kojim on dolazi u kontakt. Okolina je sve ono što se nalazi izvan sistema. Okolnosti ili stanja prirode su faktori na koje donosilac odluke ne može uticati, a od kojih zavise posledice različitih odluka, tj. izabranih akcija.

Činioci okoline različito utiču na odlučivanje u sistemu. Stoga će se razlikovati odlučivanje u uslovima stabilne okoline od odlučivanja u uslovima nestabilne okoline, odnosno promenljive ili turbulentne okoline.

U uslovima stabilne okoline promene su spore i slabe pa je i odlučivanje lakše, a dominira centralizovan način odlučivanja, nasuprot odlučivanju u uslovima nestabilne okoline u kome su promene brze pa je potrebno decentralizovano odlučivanje.

U zavisnosti od stabilnosti, odnosno nestabilnosti okoline zavise i prioriteta u odlučivanju. Nestabilna okolina, za razliku od stabilne, menja listu prioriteta.

U stabilnoj okolini odluke se, po pravilu, donose sa manjim stepenom neizvesnosti i rizika, za razliku od nestabilne okoline, u kojoj će postojati visok stepen rizika i visok nivo neizvesnosti očekivanog rezultata.

Nasuprot stabilnosti i nestabilnosti okoline, druge dve dimenzije okoline su jednostavnost i složenost. Pod jednostavnošću i složenošću okoline misli se na broj faktora koji utiču na odlučivanje u sistemu.

Jednostavna je okolina takva u kojoj na odlučivanje utiče mali broj faktora, za razliku od složene okoline, u kojoj na odlučivanje utiče veliki broj faktora.

Najlakše je donositi odluke u onim sistemima koji posluju u stabilnoj i jednostavnoj okolini. Nešto će teže biti odlučivati u uslovima stabilne i složene okoline. Još je teže odlučivanje u uslovima jednostavne i nestabilne okoline, a najteže u uslovima nestabilne i složene okoline.

### 3.4. Tehnologija i metode odlučivanja

Do danas je razvijen veliki broj metoda odlučivanja za široku klasu problemskih situacija, delimično teorijske prirode, ali i za niz praktičnih problema. Na kvalitet odlučivanja utiče i tehnologija (procedura) odlučivanja, koja je kod pojedinih vrsta odluka jako duga, neracionalna i skupa. Procedura odlučivanja morala bi biti što kraća i jednostavnija, kako bi se odluka mogla doneti u najkraćem mogućem roku.

Na trajanje procesa odlučivanja u najvećoj meri utiču vrste odluka, donosioci odluka i nivo na kojem se odluke donose.

Odluke i načini njihovog pripremanja mogu se klasifikovati na nekoliko načina, među kojima se mogu izdvojiti:

- Ako se pri upotrebi određenog algoritma može dobiti potpuno određen rezultat, sa verovatnoćom koja je jednaka jedinici, kaže se da je upravljačka odluka **deterministička**.
- Može se dogoditi da su u postavci određenog zadatka svi ili samo neki parametri slučajne veličine s poznatom raspodelom, tada i rezultat koji se dobija ima određenu verovatnoću svoje verodostojnosti, što neposredno utiče na karakter odluke. Takva upravljačka odluka se naziva **stohastičkom**.
- Ako na donošenje odluke, pored sopstvenih promenljivih veličina, utiču promenljive veličine koje zavise, u najširem smislu, od okruženja, onda se takve odluke nazivaju **strategijskim**.
- U četvrtu grupu spadaju odluke koje se nazivaju **statističkim**. To su odluke koje se zasnivaju na rešavanju zadataka u koje ulaze kao parametri stalne veličine koje su procenjene približno (s greškom), ili su to slučajne veličine s nepoznatom raspodelom.

#### Strategije za redukovanje kompleksnosti problema odlučivanja

Glavni faktori kompleksnosti problema odlučivanja su:

- broj alternativa,
- brojnost i vrsta kriterijuma koji se koriste za njihovo upoređivanje,
- broj donosilaca odluka,
- složenost postupka koji se primenjuje za donošenje odluke.

### **Formulisanje alternativa**

Primenjuju se dve strategije: *morfološka analiza* (bazira se na identifikovanju ključnih dimenzija rešenja problema, identifikovanju vrednosti tih dimenzija, a postupak se sprovodi sa ciljem da se smanji verovatnoća formulisanja alternative koja ne bi sadržala neke elemente važne za odluku) i *relacijski algoritam* (postupak koji obezbeđuje dobru povezanost elemenata rešenja).

### **Dijagnoza i specifikovanje problema**

*Dijagnozom* se utvrđuje šta jeste a šta nije deo problema, a *fokusiranjem na promene* pokušava se utvrditi šta je uzrokovalo problem.

### **Rastavljanje na potprobleme**

Složena odluka dekomponuje se na potprobleme koji se mogu podeliti među članovima grupe i rešavati paralelno. Mogu uslediti nepovoljnosti, jer problem koordinacije može biti veći od koristi.

### **Means-end analiza**

Ova analiza se uspešno koristi kada postoji više ciljeva, ili je razvijena hijerarhija ciljeva. Analiziraju se koraci koje treba sukcesivno preduzeti da bi se zatvorio jaz između postojećeg i željenog konačnog (ciljnog) stanja.

### **Kontrolabilnost**

To je uspešna strategija za redukovanje kompleksnosti i povećavanje mogućnosti upravljanja, te može klasifikovati faktore u problemu odlučivanja na kontrolabilne i nekontrolabilne. Zatim se traže rešenja za one faktore koji se mogu kontrolisati.

### **Rad unapred i unazad**

Da bi se rešio složeni problem, može se raditi tako da se primene postupci za promene stanja i analizira se da li se napreduje prema željenom cilju. Međutim, kod nekih problema je lakše naći rešenje tako da se ide unazad, od željenog stanja. Najbolje je kombinovati ove dve metode.

### **Agregiranje informacija**

Kompleksnost se može redukovati prikupljanjem dodatnih informacija. Te informacije mogu se izvesti iz raspoloživih podataka ili se pribaviti iz spoljnih izvora.

### **Deli (Delhi) metoda**

Ovo je metoda za agregiranje informacija od strane grupe eksperata. Pomoću odgovarajućih upitnika, u nekoliko iteracija dobije se željena informacija.

### **Agregiranje preferencije**

Ovo je pogodna metoda za redukovanje kompleksnosti u situacijama kada se donose slične odluke. Pomoću odgovarajućeg matematičkog modela oblikuje se ponašanje donosioca odluke.

### **Subjektivno ponderisanje**

Ova metoda radi na sličan način kao prethodna, ali se oslanja na ponderisanje kriterijuma koji se koriste u merenju dostizanja ciljeva.

## Metoda matematičkog programiranja

Koristi se kada alternativna rešenja problema odlučivanja nisu definisana eksplicitno nego pomoću ograničenja.

### Zadovoljenje

Donosilac odluke postavlja nivoe kriterijalnih vrednosti koje ga zadovoljavaju i koristi ih kao ograničenja u pretraživanju skupa alternativa.

### 3.4.1. Intuitivno odlučivanje, odlučivanje na temelju procenjivanja i racionalno odlučivanje

Svaka je odluka spoj tri činioca: intuicije, procene i racionalnosti, pa se može govoriti o: **intuitivnom odlučivanju, odlučivanju na osnovu procenjivanja i o racionalnom odlučivanju**. Operativne odluke bi se, po pravilu, morale donositi intuitivno, taktičke na bazi procenjivanja, a strateške racionalnim odlučivanjem, mada to nije uvek tako.

#### 3.4.1.1. Intuitivno odlučivanje

Intuitivno odlučivanje je, kao što mu i sam naziv govori, odlučivanje na bazi intuicije, odnosno osećaja donosioca odluke. Donosilac odluka nije u mogućnosti da objasni razloge zašto je u odlučivanju postupio tako kako jeste. Donosilac odluke jednostavno bira između više varijanti. Ukoliko je broj varijanti manji, veća je verovatnoća da će se intuitivnim odlučivanjem izabrati prava mogućnost.

Dakle, moglo bi se reći kako na kvalitet intuitivnog odlučivanja utiče, u prvom redu, broj mogućnosti za rešavanje problema, kao i verovatnoća nastupanja svake od više mogućnosti. Kada je reč o poslovnom odlučivanju gde je moguć veliki broj varijanti rešenja problema, odlučivanje na osnovu intuicije pruža male mogućnosti za izbor najpovoljnije odluke, pa ga treba svesti na najmanju moguću meru.

U mnogim slučajevima intuicija ima neku racionalnu podlogu, koje možda ni donosilac odluka nije svestan, a zasniva se na znanju, odnosno iskustvu, mada to odlučivanje ima sve odlike intuitivnog odlučivanja. Intuitivno odlučivanje dobro je koristiti u situaciji velike nesigurnosti, gde su informacije ograničene i postoji samo nekoliko uporišta na koja se može eventualno osloniti.

U intuitivnom odlučivanju radije se upotrebljavaju iskustvo i posmatranje nego dosledna logika ili izrazito rasuđivanje. Intuitivno odlučivanje može se koristiti u svim fazama procesa odlučivanja, a posebno u fazi identifikacije problema, kao i u fazi odlučivanja o načinu rešavanja problema.

#### 3.4.1.2. Odlučivanje na osnovu procenjivanja

Odlučivanje na osnovu procenjivanja, gledajući ga vrednosno u skali načina odlučivanja, ima veću vrednost od intuitivnog odlučivanja, a manju od racionalnog odlučivanja. Ovaj način odlučivanja bliži je intuitivnom nego racionalnom odlučivanju.

Odlučivanje na osnovu procenjivanja koristi se u situacijama koje se ponavljaju, dakle u programiranom odlučivanju. To je, dakle, odlučivanje na temelju ranijih iskustava i znanja za iste ili vrlo slične situacije.

Mogućnosti korišćenja odlučivanja na bazi procenjivanja zavisi o toga hoće li se ponovljena odluka donositi u istim ili barem približno istim uslovima.

Odlučivanje na temelju procenjivanja jedan je od najčešćih načina odlučivanja upravljača, a bazira se na njihovom iskustvu, dok mu je velika prednost i to što se odlučuje brzo i bez dodatnih troškova. Što se odlukama spušta niže u organizacijskoj hijerarhiji, sve će više biti onih koje se donose na osnovu procenjivanja.

### 3.4.1.3. Racionalno odlučivanje

Racionalno odlučivanje se zasniva na analitičkom postupku koji se sastoji od određenih faza i koristi se u situacijama koje se ne ponavljaju. Jedan od najuticajnijih zastupnika ideje racionalnosti u odlučivanju bio je Max Weber. Herbert Simon bio je prvi koji je ideju racionalnog odlučivanja primenio na poslovno odlučivanje.

Racionalno odlučivanje zahteva informisanog donosioca odluka i predstavlja onaj deo upravljanja koji je najdirektnije povezan sa naučnim metodama odlučivanja. To je jedan od razloga zbog kojeg se racionalno odlučivanje naziva naučnim odlučivanjem. Racionalno odlučivanje najpogodniji je način odlučivanja ukoliko se u međuvremenu parametri, odnosno faktori uticaja iznenada ne promene. Ovaj je način odlučivanja, zbog svog analitičkog postupka, relativno spor, a ujedno i skup. Međutim, koristi se u situacijama u kojima su troškovi tog načina odlučivanja manji od učinka koji se postiže donošenjem odluka na taj način.

Racionalno se odlučivanje odvija kroz sledeće faze:

- § dijagnostifikovanje problema;
- § prepoznavanje ograničenja u odlučivanju;
- § prepoznavanje mogućnosti, odnosno određivanje varijanti;
- § procena mogućnosti, odnosno ocena varijanti;
- § izbor određene varijante, odnosno donošenje najbolje odluke.

Operaciona istraživanja naziv je discipline primene naprednih analitičkih metoda za potporu odlučivanju. Modelovanjem tehničkih problema, kao i njihovom analizom, operaciona istraživanja pronalaze najbolje rešenje i za najkompleksnije tehničke probleme. Mnoge metode koje nose privlačnije nazive zapravo koriste metodologiju operacionih istraživanja.

**Optimizacija.** Pronaći najbolje rešenje postavljenog problema čest je zadatak upravljača. U situacijama kad postoje stotine, hiljade ili milioni mogućih rešenja, nemoguće je pronaći optimalno rešenje na temelju iskustva. Postoji velik broj optimizacionih tehnika: od linearnog programiranja do heurističkih tehnika, kao i genetskih algoritama, a za specijalne probleme, poput transporta ili raspoređivanja, postoje i specijalne tehnike.

**Simulacija.** Simulacija omogućava testiranje određenog rešenja bez eksperimentisanja stvarnim sistemom.

**Statistika.** Osim deskriptivne statistike koja se koristi u svakodnevnom poslovanju opisujući poslovne varijable, statističke metode omogućuju da se rade prognoze i pronalaze veze među varijablama.

### **3.4.1.4. Deskriptivni modeli donošenja odluka**

#### **Heuristika**

Heuristika predstavlja, uglavnom, lična pravila dobrog prosuđivanja i postavljanja hipoteza koje karakterišu ekspertni nivo u datom području. Heuristika dostupnosti je pravilo po kojem ljudi donose odluku, odlučuju o frekventnosti i verovatnosti nekog događaja prema tome koliko je taj događaj lako zamisliti. Uobičajene događaje lakše je zamisliti i zapamtiti nego neuobičajene. Amos Tversky i Daniel Kahneman Edwards, W., Tversky, A., 1967, *Decision making*, England, Middlesex, Harmondsworth: Penguin Books, istraživali su kako ljudi donose odluke i zaključili da postoje određena pravila koja se u tom procesu uglavnom koriste, a ona najčešće dovode do pogrešnih i manje verovatnih odgovora, ali zbog praktičnosti i uštede vremena posla kod odabira mogućih odgovora, ljudi ih ipak u većini slučajeva koriste. Najčešće korišćeno pravilo pri procesu donošenja odluka da specifičniji konkretni opisi izgledaju mnogo više verovatni nego oni uopšteniji, zbog toga što se čine više sličnima zamišljenim konkretnim događajima.

Što je opis specifičniji, manja je verovatnoća njegovog pojavljivanja nego kada je manje konkretan, tj. više uopšten. Jedno od pravila je i "pravilo malih brojeva", kada se od ljudi, recimo, zahteva da napišu niz ishoda slučajnog bacanja novčića. Najčešće će taj niz imati male razlike između brojeva pismo i glava, tj. neće se uzastopno pojavljivati veći broj pisama ili glava, iako bi se to slučajno i moglo očekivati.

Postoji više teorija odlučivanja:

#### **1. Teorija zadovoljenja**

Jednu od najranijih alternativa teoriji očekivane korisnosti predložio je Herbert Simon, prema kojem ljudi odabiru zadovoljavajuće odluke, a ne teže pronalaženju optimalne odluke.

#### **2. Teorija pogleda**

Teoriju pogleda razvili su Daniel Kahneman i Amos Tversky. Prema njoj, izbor donosilaca odluke zavisi od toga kako je problem formulisan. Ako je formulisan tako da se sagledaju dobici, donosioci odluke će biti skloni manjem riziku nego što bi bili skloni riziku kada bi se sagledali gubici.

#### **3. Efekt sigurnosti**

Redukcija verovatnosti ishoda za konstantan faktor ima veće značenje kada je ishod nakon toga siguran, nego kada je nesiguran.

#### **4. Teorija žaljenja**

Teorija žaljenja počiva na dve osnovne pretpostavke: prvo, većina ljudi doživljava iskustvo koje nazivamo žaljenjem i drugo, kada donose odluke u uslovima nesigurnosti, upoređuju posledice svoje odluke s onim što se moglo dogoditi da su doneli drugačiju odluku.



## 5. Višeatribucijska teorija

Kada su donosioci odluke suočeni sa jednostavnim izborom između dve alternative često upotrebljavaju kompenzacijske strategije koje se temelje na odmeravanju između niske vrednosti u jednoj dimenziji i visoke vrednosti u drugoj.

## 6. Nekompenzacijske strategije

Postoje četiri osnovne nekompenzacijske strategije kojima se ljudi koriste kada su suočeni s kompleksnim izborima između većeg broja alternativa.

- a. **Konjunktivna strategija:** donosioci odluke eliminišu svaku alternativu koja se nalazi izvan određenih granica.
- b. **Disjunktivna strategija:** svaka alternativa se ocenjuje sa stanovišta njenog najboljeg atributa (obeležja), bez obzira na to koliko su loši ostali aspekti odnosno alternative.
- c. **Leksikografska strategija:** donosioci odluke biraju najbitniju dimenziju za poređenje i izbor najprivlačnije alternative ili alternative u toj dimenziji.
- d. **Eliminacija po obeležjima:** prvo se aspekti poređenja hijerarhijski poređaju prema njihovoj značajnosti i nakon toga se alternative upoređuju prema najbitnijem aspektu, potom po drugom najbitnijem aspektu i tako sve dok ne ostane samo jedna alternativa.

### 3.4.1.5. Teorija očekivane korisnosti

Teoriju očekivane korisnosti postavili su John von Neumann i Oskar Morgenstern (von Neumann John i Morgenstern Oskar. Teorija igara i ekonomska interpretacija, ruski prevod 1970, Mir, Moskva), opisavši je kao normativnu teoriju ponašanja. To znači da njena namera nije bila da opiše kako se ljudi zaista ponašaju, već kako bi se ponašali kada bi sledili određene zahteve racionalnog donošenja odluka.

Neumann i Morgenstern su postavili niz pravila koja bi racionalni donosioci odluka trebalo da poštuju prilikom izbora alternative:

#### Redosled alternativa

Racionalni donosioci odluka trebalo bi da budu u stanju da uporede sve alternative i između njih izaberu onu sa najvećom očekivanom korisnošću. Ukoliko više alternativa ima istu očekivanu korist, trebalo bi da budu indiferentni prema izboru među njima.

#### Dominacija

Racionalni subjekti nikada ne bi smeli izabrati alternativu koja je prevladana od neke druge.

#### Isključivanje (izbor)

Izbor između alternativa treba da zavisi samo od onih faktora po kojima se one razlikuju, a faktore koji su jednaki za obe mogućnosti treba isključiti.

### Tranzitivnost

Ako racionalan donosilac odluke preferira ishod A pred ishodom B, a ishod B pred ishodom C, trebalo bi isto tako da preferira ishod A pred ishodom C.

### Kontinuitet

Za bilo koji set ishoda, racionalan donosilac odluka uvek bi trebalo da prihvati rizik kod izbora između najboljeg i najlošijeg ishoda u odnosu na siguran srednji ishod, ako je verovatnoća nastupanja najgoreg ishoda dovoljno mala.

### Invarijantnost

Donosilac odluka ne bi trebalo da bude pod uticajem načina na koji su alternative prezentovane.

## 3.4.2. Okolnosti u kojima se odlučuje

Okolnosti mogu biti povoljne i nepovoljne, zavisno od toga kakvom se verovatnoćom odnosno *pouzdanosti*, može proceniti očekivani rezultat. Da bi upravljači doneli najbolju odluku, moraju dobro poznavati situaciju, odnosno okolnosti u kojima se odlučuje. Ako je situacija u kojoj se odlučuje potpuno poznata i jasna, tada je lako odlučivati, pa u tom slučaju reč je o determinističkom odlučivanju. Međutim, u tehnološkom odlučivanju često nije tako. Tada je reč o stohastičkom odlučivanju. Rezultate odluka lakše je proceniti ako se one donose u sigurnim uslovima, za razliku od onih odluka koje se donose u uslovima rizika, odnosno nesigurnosti.

S obzirom na okolnosti u kojima se odlučuje, može se govoriti o odlučivanju u uslovima:

#### 1. Pri sigurnosti

To je slučaj kada su sve činjenice vezane za stanje funkcionalnosti broskog postrojenja poznate. Kada postoji samo jedno stanje ili postoji veći broj stanja, ali se pouzdano zna koje će se stanje odigrati.

#### 2. Pri riziku

Stanje funkcionalnosti broskog postrojenja je nepoznato, ali se može na osnovu evidencije npr. različitih stanja proceniti verovatnoća nastupanja pojedinih otkaza.

#### 3. Pri neizvesnosti

Stanje funkcionalnosti broskog postrojenja nepoznato i nepoznate su sve informacije na osnovu kojih bi se mogla proceniti verovatnoća nastupanja određenih stanja.

#### 4. Pri konfliktu

Slučaj kada postoji sukob interesa onih koji odlučuju u pogledu odluka koje treba doneti. **Konfliktna situacija** je stanje latentne opasnosti od izbijanja sukoba. **Konfliktna akcija** je manifestacija sukoba. **Sukob** je suprotstavljanje između dve ili više strana koje imaju različite ciljeve, ideje, filozofiju i poslovnu orijentaciju.

Tri su bitna elementa sukoba:

- § za njega su potrebne barem dve strane,
- § strane u sukobu mogu biti pojedinci, grupe ili organizacije,
- § interesi suprotstavljenih strana su suprotstavljeni.

Prema klasičnoj i neoklasičnoj teoriji, organizacioni sukobi su negativna i nepoželjna pojava, koju po svaku cenu treba izbeći. Prema modernoj teoriji, sukobi su normalna, neizbežna pa i poželjna pojava, oni u određenoj meri mogu doprineti većoj delotvornosti preduzeća, mogu povećati kreativnost, dinamičnost, omogućiti različite poglede na probleme.

Vera donosioca odluke u realizaciju odluke znatna je za odluke koje se donose u uslovima sigurnosti, znatno manja za odluke koje se donose u uslovima rizika, a najmanja za odluke koje se donose u uslovima nesigurnosti.

### 3.4.3. Podela odlučivanja prema stepenu sigurnosti (izvesnosti)

Statistička teorija odlučivanja razlikuje odlučivanje u uslovima:

1. sigurnosti, odnosno izvesnosti,
2. rizika,
3. neizvesnosti,
4. konflikta.

#### 3.4.3.1. Odlučivanje u uslovima sigurnosti

Odluka se donosi u uslovima sigurnosti kad se može tačno predvideti rezultat svake od mogućnosti, odnosno varijante rešavanja problema.

Donosilac odluke tačno zna što će se dogoditi s odlukom ako izabere bilo koju od mogućnosti. Što se više udaljava od operativnih odnosno rutinskih odluka prema taktičkim i strateškim odlukama, to su uslovi odlučivanja sve rizičniji, odnosno nesigurniji. Isto tako, što se više ide u hijerarhiji od nižih prema višim nivoima upravljanja, to je veći broj odluka koje se donose na tim višim nivoima u uslovima rizika i nesigurnosti.

Čak i odluke koje se donose u uslovima sigurnosti, donose se više u uslovima relativne nego apsolutne sigurnosti.

Ako možemo sa sigurnošću znati koje će situacije u datim okolnostima nastupiti, tada se govori o odlučivanju u uslovima sigurnosti i određenosti. Danas se za rešavanje problema u takvim okolnostima najčešće koriste modeli i tehnike operacionih istraživanja iz oblasti linearnog i nelinearnog programiranja;

- odgovarajuća tehnika za rešavanje takvih problema dobro je poznata simpleks tehnika;

- primer optimizacije putem modela linearnog programiranja je primer donošenja odluka u uslovima sigurnosti i određenosti.

Simpleks tehnika predstavlja računski postupak (algoritam) kojim se kroz seriju repetitivnih operacija postupno dolazi do optimalnog rešenja problema. Teoretski, simpleks metoda može služiti za rešavanje problema s bilo kojim brojem varijabli i ograničenja.

S obzirom na to da danas postoji veliki broj programskih paketa za rešavanje modela linearnog programiranja, i činjenicu da je za kvalitetno odlučivanje potrebno raspolagati sa što više korisnih informacija, ovde ćemo se više usmeriti u pravcu postoptimalne analize kao pretpostavke za kvalitetno odlučivanje.

### 3.4.3.2. Odlučivanje u uslovima rizika

Odlučivanje u uslovima rizika karakteriše činjenica da su donosiocu odluka poznate moguće varijante rešavanja problema, međutim, nisu mu sa sigurnošću poznate posledice svake varijanate. Dakle, odlučivanje u uslovima rizika je odlučivanje u okolnostima u kojima rezultati nisu sigurni, ali su poznate verovatnoće za različite rezultate. Upravljanje rizikom je proces kroz koji se potvrđuje poslovna opravdanost odabira sigurnosnih rešenja i kontrola koje će obezbediti dovoljan nivo sigurnosti. Takođe, proces upravljanja rizikom omogućava razvoj strategije i postavljanje ciljeva u području sigurnosti broskog postrojenja. Najvažniji deo tog procesa, ali i najpodložniji pogreškama, jeste prvi korak koji predstavlja procenu rizika. Literatura {[1] ISO/IEC TR 13335-3, Information technology – Guidelines for the management of IT security, 1st edition, 1998; [2] PD 3002:2002, Guide to BS 7799 Risk Assessment, British Standards Institution, 2002; [3] Ronald L. Krutz, Russell Dean Vines, The CISSP Prep Guide—Mastering the Ten Domains of Computer Security, John Wiley & Sons, Inc., 2001; [4] H. Šegudović, Upravljanje sigurnošću informacijskih sustava, KOM 2003 p III-31, 2003 (in Croatian); [5] CARNRT CERT & LSS, Upravljanje sigurnosnim rizicima, CARNet CERT, 2003, (in Croatian); [6] ISO/IEC 27001, Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements, 1st edition, 2005; [7] ISO/IEC 17799, Information technology – Security techniques – Code of practice for Information security management, 2nd edition, 2005} uglavnom razlikuje kvalitativnu i kvantitativnu procenu rizika. Kvalitativnom procenom rizik se procenjuje iskustveno, odnosno opisno, za razliku od kvantitativne procene, kod koje se rizik opisuje numerički (finansijski). Uprkos teoretskoj osnovi (kvantitativni pristup), koja omogućuje preciznu procenu rizika, praksa pokazuje da takav pristup, kojim se vrednost resursa broskog postrojenja uglavnom opisuje njihovom knjigovodstvenom vrednošću, nije adekvatan. Zbog toga se pri proceni rizika u broskim postrojenjima preferira kvalitativni, odnosno kombinacija kvalitativnog i kvantitativnog pristupa.

Pošto se kvalitativna procena rizika izrazito oslanja na subjektivnu procenu, podložna je pogreškama. Ovde su analizirane neke od metoda za kvalitativnu (kvantitativno-kvalitativnu) procenu rizika, s posebnim naglaskom na to kako različiti elementi mogu uticati na pouzdanost rezultata procene rizika.

Uopšteno, rizik kao pojam predstavlja kombinaciju verovatnoće nekog događaja i uticaja, odnosno (negativne) posledice tog događaja u slučaju realizacije pretnji koje iskorišćuju neku od ranjivosti.

Kad se govori o sigurnosti broda, rizik (R) za pojedini resurs procenjuje se procenom njegove vrednosti (eng. asset value – AV), ranjivosti tog resursa (eng. vulnerability – V), pretnji koje mogu iskoristiti te ranjivosti (eng. threat – T), verovatnoće ostvarenja pretnji (eng. probability – P) i posledica (eng. impact – I) koje se mogu dogoditi ukoliko se određena pretnja ostvari. Dakle, matematički, rizik predstavlja funkciju navedenih varijabli:

$$R = f(AV, V, T, P, D) .$$

Takođe, da bi se rezultati procene rizika mogli smatrati valjanim, sam proces mora zadovoljiti sledeće kriterijume:

- jednoznačnost,
- objektivnost,
- pouzdanost,
- repetabilnost.

Kvantitativni pristup proceni rizika oslanja se na primenu egzaktnih numeričkih vrednosti. U tom slučaju, parametrima za izračunavanje rizika nastoji se da se odrede tačne vrednosti. Vrednost resursa prikazuje se u novčanim jedinicama. Ranjivosti, pretnje i posledice u slučaju realizacije posmatraju se kao tzv. faktor izloženosti (EF), koji se izražava procentom gubitka vrednosti resursa u slučaju ostvarenja pojedine pretnje (Izvor: Ronald L. Krutz, Russell Dean Vines, *The CISSP Prep Guide—Mastering the Ten Domains of Computer Security*, John Wiley & Sons, Inc., 2001). Verovatnoća, koja takođe zavisi od ranjivosti i pretnji, obično se posmatra u zadanom vremenskom periodu, pa se u skladu s tim sprovodi i kvantifikacija rizika za taj vremenski period.

$$R = AV \cdot EFI, V, T \cdot PV, T.$$

Iako se kvantitativnim pristupom dobijaju egzaktne, tj. apsolutne vrednosti rizika, pri proceni rizika u sigurnosti broskog postrojenja, ovaj pristup nije adekvatan iz više razloga. Kao prvo, novčana vrednost resursa obično se određuje na osnovu knjigovodstvene vrednosti, što uopšte ne mora predstavljati pravu vrednost resursa za pojedini poslovni proces. Bilo da je reč o delu postrojenja koje je knjigovodstveno na nuli, a funkcionalno odgovara, ili obrnuto, neki deo opreme ima knjigovodstvenu vrednost, ali je funkcionalno neupotrebljiv.

Verovatnoću ostvarenja je takođe prilično teško proceniti. Čak i u slučajevima kada se mogu pronaći statistički podaci, njihovo korišćenje može prouzrokovati unošenje dodatne pogreške u procenu rizika.

Na osnovu pomenutih činjenica, može se zaključiti da kvantitativni pristup proceni rizika u sistemima za upravljanje sigurnošću brodskih postrojenja nije prikladan, jer egzaktne numeričke vrednosti dobijene kao rezultat procene rizika nisu pouzdane, zbog nepouzdanosti svih parametara koji se koriste za proračun.

Za razliku od kvantitativnog pristupa, kvalitativni pristup proceni rizika ne koristi apsolutne vrednosti parametara, nego kvalitativno evoluira njihov uticaj na rizik. Kod kvalitativnog pristupa veliku važnost imaju iskustvo, stručnost i iznad svega, sposobnost osoba koje sprovode procenu rizika. Procena se sprovodi kvalitativno, ali zbog lakše interpretacije rezultata, kod kvalitativne procene rizika parametri se, isto kao i procenjeni rizik, kvantifikuju. Za razliku od kvantitativnog pristupa, dobijene numeričke vrednosti nisu apsolutne, već relativne. Osim subjektivnosti, koja je inherentni problem kvalitativnog pristupa proceni rizika, pa samim tim i direktan uzrok nepouzdanosti, dodatni faktor koji može uticati na pouzdanost rezultata kvalitativne procene jeste metoda kvantifikacije subjektivno procenjenih parametara, kvantifikovanje rizika pa ponovna reinterpretacija tako dobijenih numeričkih vrednosti.

S obzirom na to da se kvalitativne veličine parametara procenjuju subjektivno, da bi se postigla repetabilnost, vrlo je bitno da sam način procene više kompetentnih osoba može jednoznačno interpretirati i sprovesti, s istim ili sličnim rezultatima.

Kvalitativna procena rizika je osnov za prepoznavanje oblika pouzdanosti brodskih postrojenja. Međutim, obezbeđenje jednoznačnosti, pouzdanosti, objektivnosti i repetabilnosti u postupcima kvalitativne procene je često problematično. Metode koje predlažu postojeći standardi imaju određene nedostatke, zbog kojih ne ispunjavaju sve kriterijume potrebne za procenu rizika.

Verovatnoća svake pojedine varijante može se utvrditi matematičkim modelima, ali isto tako i procenom, odnosno iskustvom. Verovatnoća realizacije određene varijante koju utvrđujemo matematičkim putem, a na osnovu istorijskih podataka, naziva se objektivna verovatnoća, za razliku od subjektivne verovatnoće, do koje se dolazi procenom na osnovu ranijih iskustava. Time se mogu utvrditi troškovi osiguranja rizika – Insurance - (trup, mašina, osiguranje od odgovornosti posade, ratni rizik). Što je brod vredniji, veća je premija osiguranja. Eventualne havarije utiču na franšizu.

Statistički modeli odlučivanja najčešće se prikazuju kao skup vektora: alternativa (akcija, strategija) i mogućih okolnosti (stanja prirode). Kombinovanjem parametara vektora akcija sa parametrima vektora stanja obezbeđuje se određeni efekat. Prikladno sredstvo prikazivanja modela odlučivanja su: tabele odlučivanja i stablo odlučivanja. Tabela ili matrica odlučivanja (matrica efikasnosti, tabela uslovnih vrednosti) jeste matrica kvantitativno izraženih posledica akcija i stanja prirode, uz određenu verovatnoću stanja. Očekivani (uslovni) ishodi mogu se izraziti kao finansijski efekti i efekti izraženi u jedinicama mera korisnosti. Ako su finansijski efekti u matrici odlučivanja izraženi kao očekivani profiti ili dobit (koji mogu poprimiti i negativnu vrednost), tabela odlučivanja se naziva "tabela ostvarenih finansijskih efekata" (payoff table, conditional profit table), a u domaćoj literaturi se prevodi kao "tabela plaćanja".

#### **3.4.3.3. Odlučivanje u uslovima nesigurnosti**

Nesigurnu situaciju karakteriše:

- Ø nedostatak informacija,
- Ø nesigurnost dostupnih informacija,
- Ø nedostatak saznanja o mogućnostima procene situacije odlučivanja,
- Ø nepoznavanje povezanosti između različitih varijabli koje utiču na odluku, odnosno na verovatnoću njenog ostvarivanja.

Odlučivanje u uslovima nesigurnosti javlja se u dva slučaja:

- a) donosilac odluke ne zna sve moguće varijante za rešavanje problema,
- b) donosilac odluke zna moguće varijante rešenja problema, ali ne zna verovatnoće svake od mogućnosti.

Nije svejedno da li donosilac odluke nema nikakve ili nema sigurne informacije. Nesigurnost odlučivanja najveća je upravo u uslovima nepostojanja ikakvih informacija o verovatnoći mogućnosti rešenja problema. Iako su u praksi retke situacije kad se odluka mora doneti u uslovima totalne nesigurnosti, donosilac odluke morao bi nastojati dodatnim, odnosno sigurnim informacijama ovo odlučivanje pretvoriti barem u odlučivanje u uslovima rizika. Ako nema drugih mogućnosti, potrebno je na bazi



iskustva, odnosno intuicije, proceniti subjektivnu verovatnoću za svaku mogućnost. Zavisno od toga kako se i kada donosilac odluke uključuje u rešavanje problema, razlikuju se tri osnovna pristupa, odnosno tri grupe metoda rešavanja:

- **aposteriorni pristup,**
- **apriorni pristup,**
- **interaktivni i kooperativni pristup.**

Donosilac odluke se u *aposteriornom* pristupu uključuje u analizu i rešavanje svog problema posle određivanja skupa dominantnih rešenja, dakle a posteriori. On sam treba da izabere najbolje rešenje. Zadatak analitičara je da iz dopustivog skupa izdvoji podskup dominantnih rešenja. Ovaj pristup je više teorijskog nego praktičnog značaja. Dva su osnovna razloga za to. Prvi je taj što je izdvajanje podskupa dominantnih rešenja analitički često nerešiv problem. Za izvesne zadatke diskretne optimizacije i za višekriterijumsko linearno programiranje to je u principu moguće uraditi, ali prilično teško. Drugi razlog je taj što podskup dominantnih rešenja može da bude veoma širok (velik ili beskonačan broj elemenata skupa), tako da donosilac odluke ne može lako da odabere rešenje.

U *apriornom* pristupu donošenja odluke treba unapred, pre rešavanja zadatka višekriterijalnog odlučivanja, iskazati svoj odnos prema kriterijumima. Ovo može da se uradi utvrđivanjem prioriteta ili hijerarhije kriterijuma, dodeljivanjem estema pojedinim kriterijumima, određivanjem relativnog odnosa između svaka dva kriterijuma ili na neki drugi način. Na osnovu toga analitičar treba, rešavanjem zadatka, da predloži donošenje odluke-jedno rešenje koje najviše odgovara njegovim iskazanim preferencijama. Nedostatak ovog pristupa je u tome što donosilac odluke teško može iz jednog pokušaja da precizno odredi svoj stav prema kriterijumima, naročito na način koji zahtevaju određeni matematički model i metoda. On se po pravilu protivi da unapred eksplicitno kaže kakav odnos između kriterijuma postoji, ako će mo to kasnije predstavljati obavezu. Jedino što je izvesno jeste to da on rešenje traži u skupu dominantnih rešenja. Analizom rešenja za razne skupove težinskih koeficijenata, na primer, donosilac odluke može da prepozna međusobni odnos kriterijuma i rešenja i dobije bolji uvid u suštinu problema.

Apriorni pristup je teorijski najviše razmatran i praktično najčešće primenjivan. Razvijeno je puno metoda apriornog višekriterijalnog odlučivanja. Neke od njih su prilično jednostavne i to im daje veliku prednost za praktične primene u posebnim situacijama.

Odlučivanje bez određivanja apriori verovatnoća primenjuje se onda kada donosilac odluke ne može ili ne želi proceniti verovatnoće stanja prirode. U takvim situacijama model odlučivanja se formira u vidu matrice efikasnosti ili matrice propuštenih dobiti i na njih se primenjuju kriterijumi odlučivanja u uslovima neizvesnosti. Ovi kriterijumi se nazivaju "neprobalistički kriterijumi" i u njih se ubraja:

1. **Maksim in kriterijum;**
2. **Maksim aks kriterijum;**
3. **Laplaceov kriterijum (Equally likely - jednako verovatni);**
4. **Kriterijum realizma (Hurwicov kriterijum);**
5. **Minim aks kriterijum žaljenja.**

Prva četiri kriterijuma koriste direktno matricu odluke (payoff matrix), dok poslednji, minimaks kriterijum žaljenja, zahteva korišćenje tabele žaljenja (opportunity loss table). Navedeni kriterijumi predstavljaju deo teorijskih istraživanja ove disertacije.

**Maksim kriterijum.** Maksimin kriterijum pretpostavlja da donosilac odluke može odrediti najgori mogući ishod svake strategije (alternative) i tada odabrati onu strategiju koja daje najbolji od mogućih loših ishoda. Taj kriterijum odabire, dakle, onu alternativu koja maksimizira minimalni ishod ili posledicu za svaku moguću situaciju. Dakle, prvo treba locirati minimalni (najlošiji) ishod za svaku alternativu (redak matrice odluke), i tada odabrati alternativu sa maksimalnim takvim brojem, tj. odabire se najmanje loša alternativa. Budući da maksimin kriterijum odabire strategiju koja ima najmanji mogući gubitak, tretira se kao pesimistički kriterijum odlučivanja i smatra se jednom od konzervativnijih pravila odlučivanja (odabire ga onaj donosilac odluke koji nije sklon riziku).

**Maksimaks kriterijum.** Maksimaks kriterijum, za razliku od maksimina, odabire onu strategiju ili alternativu koja maksimizira najbolji, odnosno maksimalan ishod ili posledicu svake strategije. Prvo se odabere maksimalan ishod za svaku alternativu, a potom se odabire ona alternativa s maksimalnim takvim brojem.

Budući da taj kriterijum odlučivanja bira alternativu s najvećim mogućim dobitkom, tretira se kao optimistički kriterijum odlučivanja i odabiru ga oni donosioci odluke koji su skloni riziku.

**Laplaceov kriterijum (equally likely).** Laplaceov kriterijum određuje alternativu ili strategiju s najvećim prosečnim ishodom. Taj pristup pretpostavlja da su verovatnoće pojavljivanja svih mogućih situacija jednake i da su zbog toga i sve moguće situacije jednako verovatne (equally likely), odnosno jednako moguće.

Potrebno je izračunati prosečan rezultat za svaku alternativu kao sumu svih rezultata podeljenu s brojem mogućih situacija, te tada izabrati onu alternativu čiji je taj prosek najveći.

**Kriterijum realizma (Hurwiczov kriterijum).** Kriterijum realizma, često nazivan kriterijumom ponderisanog proseka, kompromis je između optimističke i pesimističke odluke. Da bi se startovalo s tim kriterijem, bira se koeficijent realnosti  $\alpha$ . Taj koeficijent je broj između 0 i 1. Što je  $\alpha$  bliže jedinici, donosilac odluke je optimističniji u pogledu budućnosti, a što je  $\alpha$  bliže nuli, donosilac odluke je pesimističniji. Prednost je ovog pristupa što dozvoljava donosiocu odluke da po ličnom osećaju gradi relativni optimizam ili pesimizam. Kriterijum realizma je, u stvari, kombinacija maksimin i maximaks metode, jer se ponderirani prosek za svaku alternativu, odnosno strategiju, računa po formuli:

$$\text{ponderirani prosek} = \alpha (\text{maksimalan u retku}) + (1 - \alpha) (\text{minimalan u retku})$$

Maksimalan element u retku predstavlja najbolji mogući ishod za pojedinu strategiju po svim mogućim situacijama, a najmanji element u retku je najgori mogući ishod za tu strategiju. Nakon što su izračunati svi ponderirani proseci, bira se alternativa koja ima maksimalan ponderirani prosek.

**Minimaks kriterijum žaljenja.** Minimaks kriterijum žaljenja pretpostavlja da će donosilac odluke izabrati onu strategiju koja minimizira maksimalno žaljenje (opportunity loss) loše odluke pod bilo kojim uslovima, odnosno u bilo kojoj situaciji.



Žaljenje (gubitak prilike) meri se kao razlika između "payoffa" date strategije i "payoffa" najbolje strategije u okviru iste moguće situacije (state of nature). Naravno, ako izaberemo najbolju strategiju, tj. onu sa najvećim profitom (payoff), tada nema nikakvog žaljenja. Međutim, ako izaberemo bilo koju drugu strategiju, žaljenje je razlika između payoffa najbolje strategije i payoffa izabrane strategije u datoj situaciji. Nakon određivanja maksimalnog žaljenja za svaku strategiju, donosilac odluke odabire onu strategiju koja ima minimalno maksimalno žaljenje (minimaks). Na taj način odabrana strategija (alternativa) jeste ona koja minimizira maksimalni gubitak prilike ili žaljenja.

**Interaktivni** pristup obuhvata metode koje kombinuju apriorni i aposteriorni pristup s aktivnim učešćem u donošenju odluke. Pristup se zasniva na neprekidnom korišćenju računara u fazi odlučivanja i korisnički realizovanom okruženju. Savremeni softverski alati treba da pruže donosiocu odluke snažnu podršku u eksperimentisanju različitim skupovima svojih referenci. Jednostavno i brzo obavljanje raznovrsnih analiza treba da olakša donosiocu odluke konačni izbor.

### Delphi metoda

Ovo je metoda posrednog kolektivnog ispitivanja, ali s povratnom vezom. Sastoji se od osam koraka:

1. izbor prognostičkog zadatka, definisanje osnovnih pitanja i područja,
2. izbor eksperata,
3. priprema anketnih listova,
4. dostava anketnih listova stručnjacima,
5. prikupljanje i vrednovanje odgovora,
6. analiza i interpretacija odgovora,
7. ponavljanje ispitivanja,
8. interpretacija odgovora i postavljanje konačne prognoze.

Prednosti metode:

1. može obuhvatiti veliki broj ispitanika,
2. izjave mogu biti objektivnije jer stručnjaci do završetka kruga ne znaju izjave drugih,
3. moguće je ispitati mišljenje i stav pojedinca prema nekom zadatku,
4. metoda jača osećaj zajedništva i podstiče na razmišljanje o budućnosti organizacije.

## 4. TEORIJSKE OSNOVE PREPOZNAVANJA TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI

Ova disertacija se bavi problematikom prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja, pri čemu se u teorijskim razmatranjima mogu koristiti sledeće metode:

### 4.1. Teorija statističkog prepoznavanja tipa funkcije

U teoriji statističkog prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti je merna vrednost dobijena od jednog oblika ili objekta, a tretira se kao slučajni vektor. Neophodno je proučiti osnovne metode za karakterizaciju slučajnih vektora. Pri tome je vrlo važno poznavati i osnovne rezultate linearne algebre, na osnovu kojih se vrše transformacije slučajnih vektora.

#### *Slučajne promenljive i njihove statistike*

Matematički, strogo govoreći, slučajna promenljiva  $X$  je preslikavanje skupa svih elementarnih događaja jednog eksperimenta u skup realnih brojeva, odnosno  $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ . Međutim, u kontekstu u kome mi koristimo teoriju slučajnih promenljivih, najjednostavnije objašnjenje je da se prilikom merenja neke fizičke veličine dobija jedna realizacija, odnosno jedna konkretna vrednost iz skupa realnih brojeva. Jasno je da ćemo, ukoliko merenje ponovimo, dobiti neku drugu vrednost, što nas navodi na ideju da merenje fizičke veličine okarakterišemo kao slučajnu promenljivu koja pri svakoj realizaciji daje neku novu, drugačiju vrednost, ali pri tom te vrednosti nisu potpuno slučajne, već podležu nekim zakonitostima. U želji da se te zakonitosti, na neki način, formalizuju, uvedene su dve funkcije, koje se pridružuju posmatranoj slučajnoj promenljivoj. Jedna od njih je *funkcija raspodele slučajne promenljive* koja se obično obeležava kao  $F_X(x)$ , a druga je *funkcija gustine verovatnoće*, s oznakom  $f_X(x)$ . Funkcija raspodele se definiše na sledeći način:

$$F_X(x) = \Pr\{X \leq x\} \quad (4.1)$$

i predstavlja verovatnoću da će slučajna promenljiva  $X$  uzeti vrednost koja je manja ili jednaka od argumenta  $x$ . S obzirom na ovakvu definiciju funkcije raspodele, jasno je da ona poseduje sledeća tri svojstva:

$$F_X(\infty) = 1 \Leftrightarrow \Pr\{X \leq \infty\} = 1 \quad (4.2)$$

$$F_X(-\infty) = 0 \Leftrightarrow \Pr\{X \leq -\infty\} = 0 \quad (4.3)$$

$$x_1 \leq x_2 \Rightarrow F_X(x_1) \leq F_X(x_2) \quad (4.4)$$

Treća osobina, relacija (4.4), govori nam o tome da funkcija raspodele mora biti monotono neopadajuća funkcija argumenta  $x$ . Paralelno sa funkcijom raspodele, može se koristiti i funkcija gustine verovatnoće koja se definiše kao prvi izvod funkcije raspodele:

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (4.5)$$

odnosno:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt \quad (4.6)$$

pri čemu je  $t \rightarrow f_X(t)$  ( $t \in \mathbb{R}$ ), nenegativna funkcija.

Na osnovu definicije funkcije raspodele, i funkcija gustine verovatnoće mora da zadovolji dva ograničenja:

$$F_X(\infty) = 1 \Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx = 1 \quad (4.7)$$

$$(x_1 \leq x_2 \Rightarrow F_X(x_1) \leq F_X(x_2)) \Rightarrow (\forall x) f_X(x) \geq 0 \quad (4.8)$$

Dva najčešće korišćena tipa raspodele su uniformna i normalna (ili Gausova) raspodela slučajnih promenljivih. Za slučajnu promenljivu  $X$  kažemo da ima uniformnu raspodelu na intervalu  $[a, b]$ , u oznaci  $X \sim U[a, b]$ , ukoliko je njena funkcija gustine verovatnoće u sledećoj formi:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & ; x \in [a, b] \\ 0 & ; x \notin [a, b] \end{cases} \quad (4.9)$$

Tada je odgovarajuća funkcija raspodele:

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & ; a < x \leq b \\ 1 & ; x > b \end{cases} \quad (4.10)$$

Za slučajnu promenljivu koja ima normalnu raspodelu sa parametrima  $m$  i  $\sigma^2$  koristimo oznaku  $X \sim N(m, \sigma^2)$  i pri tome funkcija gustine verovatnoće ima oblik:

$$f_X(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{s^2}\right) \quad (4.11)$$

Nažalost, funkcija raspodele za slučajnu promenljivu se ne može predstaviti u kompaktnoj formi, već se obično daje u obliku integrala ili korišćenjem takozvane *erf* funkcije:

$$F_X = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-m)^2}{s^2}\right) dt = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{m-x}{s}\right) & ; x \leq m \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \operatorname{erf}\left(\frac{x-m}{s}\right) & ; x > m \end{cases} \quad (4.12)$$

pri čemu se  $erf$  funkcija definiše na sledeći način:

$$erf(x) = \int_0^x \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt. \quad (4.13)$$

Ukoliko je slučajna promenljiva  $X$  diskretna, što znači da može uzimati vrednost iz konačnog ili beskonačnog ali prebrojivog skupa vrednosti, funkcija raspodele se definiše na isti način, ali se funkcija gustine verovatnoće ne može definisati pomoću relacije (4.5) jer funkcija raspodele nije diferencijabilna. Takva slučajna promenljiva se obično definiše na sledeći način:

$$X: \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \dots \\ p_0 & p_1 & p_2 & \dots \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

gde je jasno definisano koje vrednosti slučajna promenljiva može uzeti i sa kojom verovatnoćom. Tada se umesto funkcije gustine verovatnoće za takvu slučajnu promenljivu koristi takozvani zakon raspodele verovatnoća:

$$f_X(x) = \sum_i p_i d(x - x_i) \quad (4.15)$$

pri čemu  $d(x - x_i)$  označava Dirakovu (Diracovu) impulsnu funkciju.

### Slučajni vektori i njihova raspodela

Neka je  $X$  slučajni vektor, tj.

$$X = [X_1 X_2 \dots X_n]^t. \quad (4.16)$$

Takvom slučajnom vektoru se može pridružiti **funkcija raspodele verovatnoće** na sledeći način:

$$F_X(x_1, x_2, \dots, x_n) = \Pr\{X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_n \leq x_n\} \quad (4.17)$$

pri čemu  $P_r[\mathbf{A}]$  označava verovatnoću događaja  $\mathbf{A}$ . Iako je u pitanju vektor, uobičajen je sledeći zapis:

$$F_X(x) = \Pr\{X \leq x\} \quad (4.18)$$

u kojem se pod  $X \leq x$  podrazumeva da slučajni vektor  $X$  poprima vrednost koja ne premašuje  $x$ .

Drugi način da se okarakteriše slučajni vektor je pomoću **funkcije gustine verovatnoće**. Ova se funkcija definiše preko odgovarajućih parcijalnih izvoda funkcije raspodele:

$$f_X(x) = \lim_{\substack{\Delta x_1 \rightarrow 0 \\ \mathbf{M} \\ \Delta x_n \rightarrow 0}} \frac{\Pr\{x_1 < X_1 \leq x_1 + \Delta x_1, \mathbf{L} < X_n \leq X_n \leq x_n + \Delta x_n\}}{\Delta x_1 \dots \Delta x_n} = \frac{\partial^n P(x)}{\partial x_1 \dots \partial x_n} \quad (4.19)$$

Obrnuto tome, funkcija raspodele se može izraziti preko funkcije gustine:

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(y) dy = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_1} \mathbf{L} \int_{-\infty}^{x_n} f_X(y_1, y_2, \mathbf{L}, y_n) dy_1 dy_2 \mathbf{L} dy_n \quad (4.20)$$

U teoriji prepoznavanja tipa funkcije operiše se slučajnim vektorima dobijenim iz različitih klasa (kategorija), i svaka od njih je okarakterisana svojom funkcijom raspodele. Ove se raspodele nazivaju uslovnom raspedelom za  $i$ -tu klasu i označavaju na sledeći način:

$$f(x/w_i) \text{ ili } f_i(x) ; i=1,2,\dots,L$$

pri čemu  $w_i$  označava klasu  $i$ , a  $L$  ukupan broj klasa. Bezuslovana funkcija raspodele slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ , koja se često naziva miksovanom funkcijom raspodele, data je kao:

$$f(x) = \sum_{i=1}^L P_i f_i(x) \quad (4.21)$$

gde  $P_i$  označava apriornu verovatnoću pojave  $i$ -te klase.

Aposteriorna verovatnoća klase kada je dat slučajni vektor  $\mathbf{X}$  označava se kao  $P(w_i/x)$ , a može se izračunati na osnovu Bajesove teoreme:

$$q_i(x) = \frac{P_i f_i(x)}{f(x)} \quad (4.22)$$

### Parametri raspodele

Slučajni vektor  $\mathbf{X}$  je u potpunosti okarakterisan funkcijom raspodele verovatnoće ili funkcijom gustine verovatnoće. Međutim, često u praksi tu funkciju nije moguće odrediti, ili je u toj meri kompleksna da nije od velike koristi. U takvim slučajevima slučajne vektore je pogodnije karakterisati nekim pokazateljima koji nose manje informacije od navedenih funkcija raspodele i gustine, ali koji su mnogo jednostavniji i pogodniji u numeričkom smislu.

Prvi i najvažniji takav pokazatelj jeste matematičko očekivanje ili srednja vrednost slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ , a definiše se na sledeći način:

$$M_x = E\{X\} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (4.23)$$

pri čemu se integracija vrši po kompletnom prostoru slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ .

Komponenta  $i$ -ta očekivane vrednosti  $M_x, m_i$  definiše se kao:

$$m_i = \int_{-\infty}^{\infty} x_i f(x_i) dx_i \quad (4.24)$$

pri čemu je  $f(x_i)$  marginalna funkcija gustine verovatnoće  $i$ -te komponente vektora  $\mathbf{X}$ :

$$f(x_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{L} \int_{-\infty}^{\infty} f_X(x) dx_1 \dots dx_{i-1} dx_{i+1} \dots dx_n \quad (4.25)$$

Dakle, svaka komponenta vektora  $\mathbf{M}_X$  se računa kao matematičko očekivanje pojedinih slučajnih promenljivih u slučajnom vektoru  $\mathbf{X}$ , s odgovarajućim marginalnim gustinama verovatnoće.

Uslovno matematičko očekivanje slučajnog vektora  $\mathbf{X}$  za klasu  $\omega_I$  je integral:

$$M_i = E\{X/w_i\} = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x/w_i)dx \quad (4.26)$$

Drugi vrlo važan parametar koji karakteriše slučajni vektor je kovarijaciona matrica. Kovarijaciona matrica vektora  $\mathbf{X}$  je :

$$\begin{aligned} \sum E\{(X - M_X)(X - M_X)^t\} &= E \left\{ \begin{bmatrix} X_1 & - & m_1 \\ & \cdot & \\ & \cdot & \\ & \cdot & \\ X_n & & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 - m_1 \dots X_n - m_n \end{bmatrix} \right\} = \\ &= E \left\{ \begin{bmatrix} (X_1 - m_1)(X_1 - m_1) & \dots & (X_1 - m_1)(X_n - m_n) \\ \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \\ \cdot & \cdot & \\ (X_n - m_n)(X_1 - m_1) & \dots & (X_n - m_n)(X_n - m_n) \end{bmatrix} \right\} = \begin{pmatrix} c_{11} & \mathbf{K} & c_{1n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ c_{n1} & \mathbf{L} & c_{nn} \end{pmatrix} = C \quad (4.27) \end{aligned}$$

Komponente  $c_{ij}$  matrice C je:

$$c_{ij} = E\{(X_i - m_i)(X_j - m_j)\}; \quad (i, j = 1, \dots, n) \quad (4.28)$$

Dakle, dijagonalni elementi kovarijacione matrice čine varijanse pojedinih slučajnih promenljivih u slučajnom vektoru, dok vandijagonalni elementi predstavljaju kovarijanse između slučajnih promenljivih  $X_i$  i  $X_j$ . Pri tome je važno primetiti da sve kovarijacione matrice moraju biti simetrične. Ova će nam činjenica omogućiti da iskoristimo mnoge rezultate koji važe isključivo za simetrične matrice.

Relacija za kovarijacionu matricu se može napisati na sledeći način:

$$\Sigma = E\{XX^t\} - E\{X\}M_X^t - M_X E\{X^t\} + M_X M_X^t = S - M_X M_X^t, \quad (4.29)$$

pri čemu je:

$$S = E\{XX^t\} = \begin{bmatrix} E\{X_1X_1\} & \dots & E\{X_1X_n\} \\ \vdots & & \vdots \\ E\{X_nX_1\} & \dots & E\{X_nX_n\} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Matrica  $S$  se naziva autokorelacionom matricom slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ . Poslednja relacija govori o tome da kovarijaciona i autokorelaciona matrica nose jednaku količinu informacija o slučajnom vektoru  $\mathbf{X}$ .

Uobičajeno je da se elementi kovarijacione matrice  $C$  predstave na sledeći način:

$$c_{ii} = s_i^2 \text{ i } c_{ij} = r_{ij}s_i s_j \quad (4.31)$$

gde je  $\sigma_i^2$  varijansa slučajne promenljive  $X_i$ , odnosno  $\sigma_i$  njena standardna devijacija, dok je  $\rho_{ij}$  takozvani koeficijent korelacije između slučajnih promenljivih  $X_i$  i  $X_j$ . Tada je

$$\Sigma = \Gamma R \Gamma \quad (4.32)$$

pri čemu je:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} s_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & s_n^2 \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 1 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{12} & 1 & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{1n} & s_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}; \left( |s_{ij}| \leq 1 \right) \quad (4.33)$$

Kovarijaciona matrica  $\Sigma$  jeste kombinacija dvaju tipova matrica: jedna od njih je dijagonalna matrica standardnih devijacija, dok je druga matrica koeficijenata korelacije. Uobičajeno je da se matrica  $R$  naziva matricom korelacionih koeficijenata slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ . Kako su standardne devijacije vrlo osetljive na skaliranje koordinatnog sistema u kome se slučajni vektori predstavljaju, korelaciona matrica nosi suštinsku informaciju o odnosu između pojedinih slučajnih promenljivih.

### Normalna raspodela

Poseban slučaj funkcije gustine verovatnoće  $f(\mathbf{X})$  jeste normalna raspodela slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ :

$$N_X(M, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} d^2(X)\right) \quad (4.34)$$

gde  $N_X(M, \Sigma)$  jeste skraćena notacija za normalnu raspodelu sa matematičkim očekivanjem  $M$  i kovarijansionom matricom  $\Sigma$ , pri čemu je



$$\begin{aligned}
 d^2(X) &= (X-M)^t \Sigma^{-1} (X-M) = \text{tr} \left\{ \Sigma^{-1} (X-M)(X-M)^t \right\} = \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} (X_i - m_i)(X_j - m_j)
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

gde  $h_{ij}$  označava  $(i,j)$ -ti elemenat matrice  $\Sigma^{-1}$ . Oznaka  $\text{tr}A$  se čita kao trag matrice  $A$  i predstavlja zbir svih dijagonalnih elemenata matrice  $A$ . Dakle, normalna funkcija gustine verovatnoće predstavlja prosti eksponent funkcije rastojanja  $d^2(X)$ , koja je pozitivno definitna kvadratna funkcija slučajnih promenljivih. Koeficijent  $(2\pi)^{-n/2} |\Sigma|^{-1/2}$  izabran je tako da se zadovolji osnovni uslov normiranosti funkcije gustine verovatnoće

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x) dx = 1 \tag{4.36}$$

Normalna raspodela se uveliko koristi zbog vrlo važnih osobina koje poseduje. Neke od njih su:

1) Matematičko očekivanje  $M$  i kovarijaciona matrica  $\Sigma$  su sasvim dovoljni deskriptori da bi se normalna raspodela opisala jedinstveno. Svi sledeći momenti normalne raspodele mogu se predstaviti u funkciji ova prva dva momenta.

2) Ako su slučajne promenljive  $X$  i  $Y$  normalno raspodeljene i pri tome nekorelisane, tada su one i nezavisne.

3) Marginalne i uslovne funkcije gustine verovatnoće dobijene na osnovu normalne raspodele su takođe normalne.

4) Karakteristična funkcija  $\Phi_X(\omega)$  slučajne promenljive sa normalnom raspodelom  $N_x(m, \sigma^2)$  ima jednostavnu formu:

$$\Phi_X(w) = E\{\exp(jXw)\} = \exp\left[-\frac{1}{2}sw^2 + jms\right] \tag{4.37}$$

dok u slučaju slučajnog vektora ona postaje

$$\Phi_X(\Omega) = E\left\{\exp\left(j\Omega^t X\right)\right\} = \exp\left[-\frac{1}{2}\Omega^t \Sigma \Omega + j\Omega M\right] \tag{4.38}$$

gde je  $\Omega = [\omega_1 \dots \omega_n]^t$ , a  $\omega_i$   $i$ -ta komponenta vektora učestalosti.

5) Posle bilo koje nesingularne linearne transformacije funkcija rastojanja čuva svoju kvadratnu formu i ne gubi pozitivnu definitnost. Dakle, posle nesingularne linearne transformacije, normalna raspodela ostaje normalna, s tim što se menjaju parametri raspodele. Važno je napomenuti da je uvek moguće pronaći takvu nesingularnu linearnu transformaciju, koja novu kovarijacionu matricu čini dijagonalnom. Kako dijagonalna kovarijaciona matrica znači da su pojedine komponente nekorelisane, a u slučaju normalne raspodele i nezavisne, to znači da u slučaju normalne raspodele uvek možemo naći skup osa takvih da su u novom koordinatnom sistemu slučajni vektori nezavisni.

6) Pretpostavka da su izmereni podaci normalno raspodeljeni je vrlo opravdana u velikom broju realnih snimanja podataka. Ova pretpostavka ima naročito opravdanje kada se rezultat merenja dobija kao zbir više slučajnih promenljivih, jer tada se može primeniti centralna granična teorema, koja tvrdi da se upravo u takvim slučajevima kao zbir dobija normalno raspodeljena slučajna promenljive, pri čemu je njena normalnost utoliko više izražena ukoliko je više sabiraka.

### **Estimacija parametara**

Mada su matematičko očekivanje i autokorelaciona matrica vrlo važni parametri kojima se opisuje raspodela slučajnog vektora, oni su u praksi uglavnom nepoznati i potrebno ih je estimirati na bazi izmerenih uzoraka. Ovakav se postupak naziva **tehnika estimacije na uzorku**. Ova se tehnika najčešće koristi za procenu srednje vrednosti i varijanse jedne slučajne promenljive. Naime, ukoliko je potrebno proceniti srednju vrednost slučajne promenljive  $Y$  čije su realizacije poznate, najjednostavniji način estimacije je aritmetička sredina slučajnih promenljivih  $Y_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , a definiše se:

$$\hat{m}_Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (4.39)$$

Pokazuje se da ovakva procena matematičkog očekivanja ima vrlo dobre osobine. Naime, ova procena je nepomerena, odnosno:

$$E\{\hat{m}_Y\} = E\{Y\} = m_Y \quad (4.40)$$

dok je sa druge strane varjansa konzistentna, tj.:

$$s_{m_Y}^2 = \frac{s_Y^2}{N} \Rightarrow \lim_{N \rightarrow \infty} s_{m_Y}^2 = 0 \quad (4.41)$$

Slično tome, procena varijanse se može izvršiti na sledeći način:

$$\hat{s}_Y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{m}_Y)^2 \quad (4.42)$$

## **4.2. Linearne transformacije slučajnih vektora**

Neka se primenom neke linearne transformacije od slučajnog  $n$ -dimenzionog vektora  $X$  dobije  $n$ -dimenzioni slučajni vektor  $Y$ , odnosno:

$$Y = A^t X$$

gde je matrica  $A$  kvadratna dimenzije  $n$ . Tada će matematičko očekivanje i kovarijaciona matrica slučajnog vektora  $Y$  biti:

$$M_Y = E\{Y\} = E\{A^t X\} = A^t E\{X\} = A^t M_X$$

$$\Sigma = E\{(Y - M_Y)(Y - M_Y)^t\} = A^t E\{(X - M_X)(X - M_X)^t\} A = A^t \Sigma_X A$$

pri čemu je iskorišćena sledeća jednakost koja važi za kvadratne matrice:

$$(AB)^t = B^t A^t$$

Slično tome, u vezi s inverznim matricama biće korišćena sledeća jednakost:

$$(AB)^{-1} = B^{-1}A^{-1}$$

Funkcija rastojanja slučajnog vektora  $\mathbf{Y}$  biće

$$\begin{aligned} d_Y^2(Y) &= (Y - M_Y)^t \Sigma_Y^{-1} (Y - M_Y) = \\ &= (X - M_X)^t A A^{-1} \Sigma_X^{-1} (A^t)^{-1} A^t (X - M_X) = \\ &= (X - M_X)^t \Sigma_X^{-1} (X - M_X) = d_X^2(X) \end{aligned}$$

što znači da se linearnom transformacijom ova funkcija ne menja.

Ukoliko je slučajni vektor  $\mathbf{X}$  bio normalno raspodeljen, tada će i slučajni vektor  $\mathbf{Y}$  biti normalno raspodeljen i pri tome će njegova funkcija gustine verovatnoće biti:

$$\begin{aligned} f(Y) &= \frac{1}{(2p)^{n/2} |\Sigma_x|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} d_Y^2(Y)\right) = \\ &= \frac{1}{|A| (2p)^{n/2} |\Sigma_x|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} d_Y^2(Y)\right) \end{aligned}$$

### Ortonormalna transformacija

Izvršimo transliranje koordinatnog sistema tako da matematičko očekivanje slučajnog vektora postane nula vektor. Dakle, umesto slučajnog vektora  $\mathbf{X}$  posmatračemo slučajni vektor  $\mathbf{Z}$ , takav da je

$$Z = X - M$$

Jasno je da će oba slučajna vektora i  $\mathbf{X}$  i  $\mathbf{Z}$  imati iste kovarijacione matrice. Funkcija rastojanja vektora  $\mathbf{Z}$  biće tada:

$$d_z^2(Z) = Z^t \Sigma^{-1} Z$$

Potražimo takav vektor  $\mathbf{Z}$  koji maksimizira funkciju rastojanja  $d_z^2(\mathbf{Z})$ , ali pod uslovom  $\mathbf{Z}^t \mathbf{Z} = 1$ . Ovaj se problem može rešiti minimizacijom sledeće funkcije, u kojoj je sa  $\mu$  označen Lagranžev multiplikator:

$$J = Z^t \Sigma^{-1} Z - \mu (Z^t Z - 1)$$

Primenom parcijalnog izvoda  $\partial J / \partial Z$  (gde parcijalni izvod po vektoru označava vektor parcijalnih izvoda po pojedinim skalarnim komponentama) i njegovim izjednačavanjem sa nulom dobija se rešenje:

$$\frac{\partial J}{\partial Z} = 2\Sigma^{-1}Z - 2mZ = 0 \Rightarrow$$

$$\Sigma^{-1}Z = mZ \text{ ili } \Sigma Z = IZ \left( I = \frac{1}{m} \right)$$

uz uslov:

$$Z^t Z = 1$$

Ukoliko želimo da postoji nenulti vektor  $Z$  koji zadovoljava jednakost

$$\Sigma Z = IZ \Leftrightarrow (\Sigma - I)Z = 0$$

neophodno je potražiti takav parametar  $\lambda$  koji proizilazi iz takozvane *karakteristične matične jednačine*:

$$|\Sigma - I| = 0.$$

Svako  $\lambda$  koje zadovoljava karakterističnu jednačinu naziva se *sopstvenom vrednošću* matrice  $\Sigma$ , dok se vektor  $Z$  koji odgovara sopstvenoj vrednosti naziva *sopstvenim vektorom*. Kada je matrica  $\Sigma$  simetrična matrica dimenzija  $n \times n$ , tada postoji  $n$  realnih sopstvenih vrednosti  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  i  $n$  realnih sopstvenih vektora  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ . Sopstveni vektori koji odgovaraju različitim sopstvenim vrednostima su međusobno ortogonalni. Ovo se tvrđenje jednostavno dokazuje: neka su  $\lambda_i$  i  $\lambda_j$  dve različite sopstvene vrednosti i njima odgovarajući sopstveni vektori  $\Phi_i$  i  $\Phi_j$ . Tada je:

$$\Sigma \Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad \text{i} \quad \Sigma \Phi_j = \lambda_j \Phi_j$$

Ako prvu jednakost pomnožimo sa  $\Phi_j^t$  a drugu sa  $\Phi_i^t$  sa leve strane, a zatim od prve oduzmemo drugu, dobija se:

$$(\lambda_i - \lambda_j) \Phi_j^t \Phi_i = \Phi_j^t \Sigma \Phi_i - \Phi_i^t \Sigma \Phi_j = 0$$

jer je  $\Sigma$  simetrična matrica. Kako smo pretpostavili da su  $\lambda_i$  i  $\lambda_j$  različiti, jasno je da važi ortogonalnost među sopstvenim vektorima  $\Phi_i$  i  $\Phi_j$ :

$$\Phi_j^t \Phi_i = 0$$

Tada se može napisati matična jednakost oblika:

$$\Sigma \Phi = \Phi \Lambda$$

$$\Phi^t \Phi = I$$

pri čemu je  $\Phi$  kvadratna matrica dimenzije  $n \times n$  koja se sastoji od svih sopstvenih vektora:

$$\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n]$$

dok je  $\Lambda$  dijagonalna matrica sopstvenih vrednosti:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & I_2 & \mathbf{L} & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ 0 & 0 & \mathbf{L} & I_n \end{bmatrix}$$

a  $\mathbf{I}$  je jedinična matrica. Matrice  $\Phi$  i  $\Lambda$  nazivaju se matricom sopstvenih vektora, odnosno matricom sopstvenih vrednosti.

Upotrebimo matricu  $\Phi$  (neka je to matrica sopstvenih vektora kovarijacione matrice slučajnog vektora  $\mathbf{X}$ ) kao transformacionu matricu u linearnom preslikavanju slučajnih vektora:

$$Y = \Phi^t X$$

Tada će kovarijaciona matrica slučajnog vektora  $\mathbf{Y}$  biti:

$$\Sigma_Y = \Phi^t \Sigma_X \Phi$$

Uzimajući u obzir relacije

$$\begin{aligned} (\Phi^t)^t &= \Phi \\ \Phi^{-1} &= \Phi^t \end{aligned}$$

dobija se:

$$\Sigma_Y = \Lambda.$$

Na osnovu poslednje relacije mogu se izvući sledeći vrlo važni zaključci:

1) Transformacija  $Y = \Phi^t X$  može se razumeti kao  $n$  odvojenih jednačina oblika  $Y_i = \Phi_i^t \mathbf{0} X$  ( $i=1, \dots, n$ ). Kako je  $Y = \Phi^t \mathbf{0} X = \|\Phi_i\| \|X\| \cos \theta$ , gde je  $\theta$  ugao između vektora  $X$  i vektora  $\Phi_i$ , tada se vrednost  $Y_i$  može shvatiti kao projekcija  $X$  na  $\Phi_i$ . To znači da vektor  $Y$  predstavlja vektor  $X$  u novom koordinatnom sistemu čije su ose vektori  $\Phi_1, \dots, \Phi_n$ , pa se cela transformacija može smatrati transformacijom koordinata.

2) Ovom transformacijom dobili smo slučajni vektor  $Y$  čija je kovarijaciona matrica dijagonalna (izvršen je takozvani proces dijagonalizacije), što znači da su komponente ovako dobijenog slučajnog vektora nekorelisane, a ukoliko je raspodela vektora normalna, to automatski znači da su njegove koordinate i nezavisne.

3) Iskorišćena transformaciona matrica je matrica sopstvenih vektora kovarijacione matrice  $\Sigma_X$ . Kako su pak sopstveni vektori proizašli iz optimizacionog kriterijuma kojim se maksimizira funkcija odstojanja  $d_Z^2(Z)$ , to znači da su za nove koordinatne ose izabrane informativne ili principijelne komponente u slučajnom vektoru.

4) Sopstvene vrednosti matrice  $\Sigma_X$  su varijanse slučajnih promenljivih  $Y_i$ .

5) Ovakva transformacija se naziva ortonormalnom jer za transformacionu matricu važi relacija:

$$\Phi^t \Phi = I.$$

Treba naglasiti da se u svim ortonormalni transformacijama Euklidovo odstojanje čuva:

$$\|Y\|^2 = Y^t Y = X^t \Phi \Phi^t X = X^t X = \|X\|^2$$

### Transformacija beljenja

Posle primene ortonormalne transformacije može se dodati transformacionoj matrici član  $\Lambda^{-1/2}$  tako da nova kovarijaciona matrica postane jedinična matrica:

$$Y = \Lambda^{-1/2} \Phi^t X = \left( \Phi \Lambda^{-1/2} \right)^t X$$

$$\Sigma_Y = \Lambda^{-1/2} \Phi^t \Phi \Lambda^{-1/2} = \Lambda^{-1/2} \Lambda \Lambda^{-1/2} = I$$

Transformacija  $\Phi \Lambda^{-1/2}$  se naziva **transformacijom beljenja** ili procesom beljenja. Cilj dodavanja člana  $\Lambda^{-1/2}$  je da se promene skale u informativnim komponentama, proporcionalno članu  $\frac{1}{\sqrt{I_i}}$ .

Važne osobine transformacije beljenja su sledeće:

- 1) Transformacija beljenja nije ortonormalna transformacija:

$$\left( \Phi \Lambda^{-1/2} \right)^t \left( \Phi \Lambda^{-1/2} \right) = \Lambda^{-1/2} \Phi^t \Phi \Lambda^{-1/2} = \Lambda^{-1} \neq I.$$

Samim tim, ne čuva se ni Euklidovo odstojanje:

$$\|Y\|^2 = Y^t Y = Y^t \Phi \Lambda^{-1} \Phi^t X = X^t \Sigma_X^{-1} X \neq \|X\|^2.$$

- 2) Posle transformacije beljenja kovarijacione matrice su invarijantne na bilo koje ortonormalne transformacije:

$$\Psi^t I \Psi = \Psi^t \Psi = I.$$

Ova se osobina koristi kod simultane dijagonalizacije dveju matrica.

U eksperimentima prepoznavanja oblika obično se javlja potreba generisanja uzoraka koji su normalno raspodeljeni sa vektorom matematičkog očekivanja  $M$  i kovarijacionom matricom  $\Sigma$ . Međutim, najveći broj programskih jezika i programskih paketa omogućava generisanje uzoraka sa nultim vektorom matematičkog očekivanja i jediničnom kovarijacionom matricom. Problem generisanja željenih semplova se tada rešava kroz sledeće korake:

- 1) Na osnovu zadate kovarijacione matrice  $\Sigma$  odredi se transformacija beljenja  $Y = \Lambda^{-1/2} \Phi^t X$  tako da je u transformisanom prostoru  $\Sigma_Y = I$ .

2) Formira se  $N$  nezavisnih normalno raspodeljenih slučajnih vektora sa nultim vektorom matematičkog očekivanja i jediničnom kovarijacionom matricom,  $Y_1, \dots, Y_N$ .

3) Inverznom transformacijom vratimo se u prostor  $X$  relacijom:

$$X_i = \Phi \Lambda^{1/2} Y_i \quad i = 1, \dots, N.$$

4) Svakom od vektora  $X_i$  doda se vektor matematičkog očekivanja  $M$ .

### **Simultana dijagonalizacija**

Moguće je istovremeno izvršiti dijagonalizaciju dveju kovarijacionih matrica  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$ , pomoću linearnih transformacija. Proces se odvija u sledećim koracima:

1) Prvo se obeli matrica  $\Sigma$  :

$$Y = \Theta^{-1/2} \Phi^t X.$$

gde su matrice  $\Theta$  i  $\Phi$  matrica sopstvenih vrednosti i matrica sopstvenih vektora matrice  $\Sigma_1$ :

$$\Sigma_1 \Phi = \Phi \Theta \quad \Phi^t \Phi = I.$$

Takvom transformacijom će matrice  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$  dobiti nove vrednosti:

$$\begin{aligned} \Theta^{-1/2} \Phi^t \Sigma_1 \Phi \Theta^{-1/2} &= I \\ \Theta^{-1/2} \Phi^t \Sigma_2 \Phi \Theta^{-1/2} &= K \end{aligned}$$

Uopšteno govoreći, matrica  $K$  nije dijagonalna matrica.

2) Zatim se primeni ortonormalna transformacija koja će dijagonalizovati matricu  $K$ :

$$Z = \Psi^t Y.$$

Već je pokazano da je jedinična matrica invarijantna na ortogonalne transformacije, tako da:

$$\begin{aligned} \Psi^t I \Psi &= \Psi^t \Psi = I \\ \Psi^t K \Psi &= \Lambda \end{aligned}$$

Time su obe kovarijacione matrice dijagonalizovane. Kombinacija koraka 1) i 2) definitivno rezultira u transformacionu matricu  $\Phi \Theta^{-1/2} \Psi$ .

Može se pokazati da se do transformacione matrice  $\Phi \Theta^{-1/2} \Psi$  može doći i na jednostavniji način.

**Teorema:** Dve simetrične matrice  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$  mogu se dijagonalizovati istovremeno:

$$A^t \Sigma_1 A = I \quad \text{i} \quad A^t \Sigma_2 A = \Lambda,$$



pri čemu su  $\Lambda$  i  $A$  matrica sopstvenih vrednosti i matrica sopstvenih vektora matrice  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$ . Dokaz ove teoreme se izostavlja, s tim što je vredno dati sledeću napomenu: sopstveni vektori  $\Phi_i$  simetrične matrice su ortogonalni i zadovoljavaju uslov  $\Phi_i^t \Phi_j = 0$  za  $i \neq j$ . Međutim, uopšteno govoreći, matrice  $\Sigma_1$  i  $\Sigma_2$  nisu simetrične i, shodno tome, njihovi sopstveni vektori  $\zeta_j$  nisu međusobno ortogonalni. Umesto toga, oni su ortogonalni spram matrice  $\Sigma_1$ , odnosno  $\zeta_i^t \Sigma_1 \zeta_j = 0$  za  $i \neq j$ . U želji da se ovi vektori učine *ortonormalnim* neophodno je da se svaki od njih podeli vrednošću  $\sqrt{x_i^t \Sigma_1 x_i}$  tako da će biti zadovoljena relacija

$$\frac{x_i^t}{\sqrt{x_i^t \Sigma_1 x_i}} \Sigma_1 \frac{x_i}{\sqrt{x_i^t \Sigma_1 x_i}} = 1.$$

Simultana dijagonalizacija dveju matrica je vrlo moćan alat u problemima prepoznavanja oblika, zbog toga što se ovaj problem najčešće pojavljuje u formi klasifikacije oblika iz dveju klasa.

Osnovni cilj prepoznavanja oblika jeste da se donese odluka kojoj kategoriji posmatrani uzorak pripada. Na osnovu opservacija ili merenja formira se vektor merenja. Taj vektor služi kao ulaz u pravilo odlučivanja kroz koje se ovaj vektor pridružuje nekoj od analiziranih klasa. Pretpostavimo da je merni vektor slučajni vektor čija uslovna funkcija gustine verovatnoće zavisi od klase. Ukoliko su ove uslovne funkcije gustina verovatnoće poznate, tada se problem prepoznavanja oblika svodi na problem statističkog testiranja hipoteza. Posmatrajmo za početak slučaj dveju klasa  $\omega_1$  i  $\omega_2$  čije su nam apriorne verovatnoće pojavljivanja poznate, kao i odgovarajuće aposteriorne funkcije gustine verovatnoće mernih vektora.

### 4.3. Bajesovo pravilo odlučivanja minimalne greške

Neka je  $X$  merni vektor i neka je naš trenutni zadatak da odredimo kojoj od dveju analiziranih klasa ovaj vektor pripada. Jednostavno pravilo odlučivanja može se bazirati na osnovu verovatnoća  $q_1(X) = \Pr(\omega_1/X)$  i  $q_2 = \Pr(\omega_2/X)$  na sledeći način:

$$\begin{aligned} q_1(X) > q_2(X) &\Rightarrow X \in w_1 \\ q_1(X) < q_2(X) &\Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

Aposteriorne verovatnoće  $q_i(X)$  se mogu izračunati na osnovu apriornih verovatnoća pojava klasa  $P_i$  i aposteriornih funkcija gustina verovatnoća mernih vektora

$f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ , koristeći Bajesovu teoremu:

$$q_i(X) = \frac{f_i(X)P_i}{f(X)} = \frac{f_i(X)P_i}{f_1(X)P_1 + f_2(X)P_2}.$$

Kako je miksovana (apriorna) funkcija gustine verovatnoće pozitivna i zajednička za obe aposteriorne verovatnoće, pravilo odlučivanja se može napisati u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} P_1 f_1(X) > P_2 f_2(X) &\Rightarrow X \in w_1 \\ P_1 f_1(X) < P_2 f_2(X) &\Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

ili.

$$\begin{aligned} l(X) = \frac{f_1(X)}{f_2(X)} > \frac{P_2}{P_1} &\Rightarrow X \in w_1 \\ l(X) = \frac{f_1(X)}{f_2(X)} < \frac{P_2}{P_1} &\Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

Izraz  $l(X)$  se naziva *količnikom verodostojnosti* (likelihood ratio) i to je vrlo važna veličina u prepoznavanju oblika. Količnik  $P_2 / P_1$  naziva se *vrednošću praga* (threshold value), odnosno količnik verodostojnosti u odlučivanju. Uobičajeno je da se na količnik verodostojnosti primeni funkcija negativnog prirodnog logaritma, i tada pravilo odlučivanja dobija formu:

$$\begin{aligned} h(X) = -\ln(l(X)) = -\ln(f_1(X)) + \ln(f_2(X)) < \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) &\Rightarrow X \in w_1 \\ h(X) = -\ln(l(X)) = -\ln(f_1(X)) + \ln(f_2(X)) > \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) &\Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

Znak nejednakosti je promenio smer jer smo primenili funkciju negativnog algoritma. Izraz  $h(X)$  se naziva *diskriminacionom funkcijom*. Dalje ćemo podrazumevati da je  $P_1 = P_2 = 0,5$  i  $\ln P_1 / P_2 = 0$ , ukoliko drugačije ne bude bilo naglašeno. Navedena pravila odlučivanja se nazivaju **Bajesovim pravilom odlučivanja minimalne greške**.

U analizi navedenog pravila vrlo je važno odrediti verovatnoću greške odlučivanja. Jasno je da ovakvo i svako drugo pravilo ne obezbeđuje savršeno klasifikovanje. Pod verovatnoćom greške se podrazumeva verovatnoća događaja da će pravilo doneti pogrešnu odluku o pripadanju mernog vektora klasi. Uslovna verovatnoća greške za zadati merni vektor  $X$ , označimo je sa  $r(X)$ , jednaka je manjoj od verovatnoća  $q_i$ ,  $i=1,2$ , tj.:

$$r(X) = \min[q_1(X), q_2(X)].$$

Ukupna greška koja se naziva **Bajesovom greškom**, označimo je sa  $\epsilon$ , računa se na sledeći način:

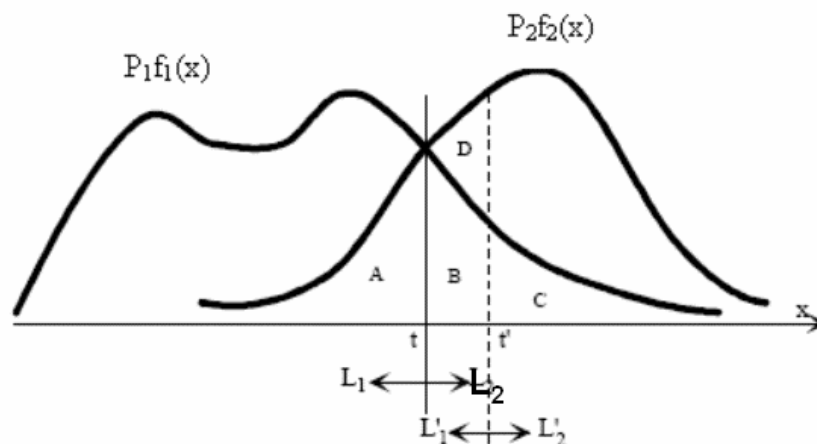
$$\begin{aligned} \epsilon &= E\{r(X)\} = \int_{\Omega_x} r(X) f(X) dX = \int_{\Omega_x} \min[q_1(X), q_2(X)] f(X) dX = \\ &= \int_{\Omega_x} \min[P_1 f_1(X), P_2 f_2(X)] dX = P_1 \int_{L_2} f_1(X) dX + P_2 \int_{L_1} f_2(X) dX = P_1 e_1 + P_2 e_2 \end{aligned}$$

pri čemu je:

$$e_1 = \int_{L_2} f_1(X) dX; \quad e_2 = \int_{L_1} f_2(X) dX,$$

a  $\Omega_x = L_1 \cup L_2$  i  $L_1 \cap L_2 = \emptyset$ , a  $f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ .

Pretposlednja relacija omogućava nekoliko načina da se odredi Bajesova greška  $\varepsilon$ . Prva jednakost predstavlja definiciju te greške, dok je druga dobijena primenom Bajesove teoreme. Oblast integracije  $L_1$  je ona oblast iz koje pravilo odlučivanja merne vektore  $X$  pridružuje klasi  $\omega_1$  i analogno tome oblast integracije  $L_2$  odgovara vektorima  $X$  koje pravilo odlučivanja klasifikuje u klasu  $\omega_2$ . Shodno tome, te se oblasti često nazivaju  $\omega_1$ -oblast i  $\omega_2$ -oblast, respektivno. Za merne vektore  $L_1$  iz oblasti važi relacija  $P_1 f_1(X) > P_2 f_2(X)$  i shodno tome uslovna verovatnoća greške iznosi  $r(X) = P_2 f_2(X) / f(X)$ , i analogno tome za vektore iz oblasti  $L_2$  važi  $r(X) = P_1 f_1(X) / f(X)$ . Možemo reći da se Bajesova verovatnoća greške sastoji iz dva člana. Jedan od njih se odnosi na loše klasifikovane vektore iz klase  $\omega_1$ , dok se drugi odnosi na loše klasifikovane vektore iz klase  $\omega_2$ . Na slici 4.1. je prikazan problem pravila odlučivanja jednodimenzionalnih mernih vektora:



Slika 4.1. Primer klasifikacije jednodimenzionalnih slučajnih promenljivih

Granica odluke je postavljena na  $x = t$  gde je  $P_1 f_1(x)$ , i oblasti  $x < t$  i  $x > t$  su označene kao  $L_1$  i  $L_2$ , respektivno. Na taj način verovatnoće grešak postaju  $P_1 \varepsilon_1 = B + C$  i  $P_2 \varepsilon_2 = A$  i, shodno tome, ukupna Bajesova greška postaje  $\varepsilon = A + B + C$ , gde  $A$ ,  $B$  i  $C$  označavaju naznačene površine, na primer:

$$B = \int_t^{t'} P_1 f_1(x) dx.$$

Ovakvo pravilo odlučivanja generiše najmanju moguću verovatnoću greške odlučivanja. Ovo se tvrđenje vrlo jednostavno može dokazati. Pretpostavimo da je granica odlučivanja pomerena iz tačke  $t$  u tačku  $t'$ . Tada se oblast mernog vektora  $X$  deli u oblasti označene kao  $L_1'$  i  $L_2'$ , a ukupna verovatnoća grešaka postaje  $\varepsilon' = A + B + C + D$ . Kako je  $D$  veće od nule, jasno je da važi relacija  $\varepsilon' > \varepsilon$ . Analogan rezultat se može dobiti ukoliko se granica odlučivanja  $t$  pomeri ulevo. Ovakav način razmišljanja se može proširiti i na  $n$ -dimenzione merne vektore.

Izračunavanje Bajesove verovatnoće greške je vrlo kompleksan problem, jer se ova verovatnoća izračunava integriranjem funkcije gustine verovatnoće, koja je funkcija

više promenljivih, po vrlo kompleksnim oblastima. Zbog toga je, vrlo često, mnogo zgodnije problem posmatrati u domenu diskriminacione funkcije, i integriranjem vršiti po njoj, što omogućava integriranje u jednodimenzionom prostoru. Drugim rečima,

$$e_1 = \int_{-\infty}^{\ln(P_1/P_2)} f_h(h/w_1) dh$$

$$e_2 = \int_{\ln(P_1/P_2)}^{\infty} f_h(h/w_2) dh,$$

pri čemu je  $f(h/\omega_i)$  aposteriorna funkcija gustine verovatnoće vrednosti diskriminacione funkcije  $h$ .

#### 4.4. Bajesovo pravilo odlučivanja minimalne cene

Vrlo često u praksi minimizacija verovatnoće greške nije najbolji kriterijum za projektovanje pravila odlučivanja. Naime, često se dešava da greška kada se merni vektor iz prve klase pridruži drugoj nema istu težinu kao kada se merni vektor iz druge klase pridruži prvoj. Dobar primer za ilustraciju ovakve situacije jeste prepoznavanje otkaza na brodom postrojenju. Zbog toga se uvode cene za svaku od mogućih odluka, na sledeći način:

$c_{ij}$  = cena odluke kada je  $X \in \omega_i$ , zapravo  $X \in \omega_j$ .

Tada uslovna cena odluke  $X \in \omega_i$ , kada je dat merni vektor  $X$ , označimo je sa  $r_i(X)$  iznosi:

$$r_i(X) = c_{i1}q_1(X) + c_{i2}q_2(X).$$

Logično je da, shodno ovako definisanom kriterijumu, pravilo odlučivanja dobije formu:

$$\begin{aligned} r_1(X) < r_2(X) &\Rightarrow X \in \omega_1 \\ r_1(X) > r_2(X) &\Rightarrow X \in \omega_2 \end{aligned}$$

pri čemu je:

$$\begin{aligned} r_1(X) &= c_{11}q_1(X) + c_{12}q_2(X) \quad i \\ r_2(X) &= c_{21}q_1(X) + c_{22}q_2(X) \end{aligned}$$

a tada apriorni rizik dobija oblik:

$$r(X) = \min[r_1(X), r_2(X)].$$

Ukupna cena ovakvog odlučivanja se može izračunati na sledeći način:

$$\begin{aligned}
r &= E\{r(X)\} = \int_{\Omega_x} \min[r_1(X), r_2(X)] f(X) dX = \\
&= \int_{\Omega_x} \min[c_{11}q_1(X) + c_{12}q_2(X), c_{21}q_1(X) + c_{22}q_2(X)] f(X) dX = \\
&= \int_{\Omega_x} \min[c_{11}P_1f_1(X) + c_{12}P_2f_2(X), c_{21}P_1f_1(X) + c_{22}P_2f_2(X)] f(X) dX = \\
&= \int_{L_1} [c_{11}P_1f_1(X) + c_{12}P_2f_2(X)] dX + \int_{L_2} [c_{21}P_1f_1(X) + c_{22}P_2f_2(X)] dX
\end{aligned}$$

pri čemu su sa  $L_1$  i  $L_2$  označene oblasti u prostoru vektora merenja, iz kojih pravilo klasifikacije merne vektore klasifikuje u prvu, odnosno u drugu klasu, a  $\Omega_x = L_1 \cup L_2$  i  $L_1 \cap L_2 = \emptyset$ .

Pravilo odlučivanja koje će minimizirati ukupnu cenu odlučivanja  $r$  može se isprojektovati na sledeći način: prepíšimo poslednju relaciju tako da ona ostane samo funkcija od oblasti  $L_1$ , uzimajući u obzir jednakost:

$$\int_{L_2} f_i(X) dX = 1 - \int_{L_1} f_i(X) dX$$

koja važi usled činjenica  $L_1 \cup L_2 = \Omega_x$  i  $L_1 \cap L_2 = \emptyset$ . Tada ukupna cena postaje:

$$r = (c_{21}P_1 + c_{22}P_2) + \int_{L_1} [(c_{11} - c_{21})P_1f_1(X) + (c_{12} - c_{22})P_2f_2(X)] dX,$$

pri čemu su:

$P_i$   $i=1,2$  aposteriorne funkcije gustina verovatnoće mernih vektora  $f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ .

Sada se problem minimizacije cene  $r$  svodi na problem određivanja optimalne oblasti  $L_1$ . Pretpostavimo da je za neki merni vektor  $X$  podintegralna funkcija u poslednjoj relaciji negativna. Takav merni vektor treba pridružiti prvoj klasi jer se na taj način smanjuje ukupna cena  $r$ . Obrnuto, ukoliko za merni vektor  $X$  podintegralna funkcija ima pozitivnu vrednost, taj vektor ne treba da se nalazi u oblasti  $L_1$  jer bi se na taj način povećavala cena odlučivanja. Shodno tome, zaključujemo da granicu odlučivanja treba da čini geometrijsko mesto slučajnih vektora za koje podintegralna funkcija ima vrednost nula, odnosno optimalno pravilo odlučivanja koje minimizira cenu odlučivanja ima formu:

$$(c_{12} - c_{22})P_2f_2(X) < (c_{21} - c_{11})P_1f_1(X) \Rightarrow X \in w_1$$

$$(c_{12} - c_{22})P_2f_2(X) > (c_{21} - c_{11})P_1f_1(X) \Rightarrow X \in w_2$$

ili, drugačije zapisano:

$$\frac{f_1(X)}{f_2(X)} > \frac{(c_{12} - c_{22})P_2}{(c_{21} - c_{11})P_1} \Rightarrow X \in w_1$$

$$\frac{f_1(X)}{f_2(X)} < \frac{(c_{12} - c_{22})P_2}{(c_{21} - c_{11})P_1} \Rightarrow X \in w_2.$$

Ovakvo se pravilo odlučivanja naziva *Bajesovim pravilom odlučivanja minimalne cene*. Primetimo da se ovakvo pravilo odlučivanja može smatrati Bajesovim pravilom odlučivanja minimalne greške, samo sa promenjenim pragom odlučivanja. Minimalna cena postaje isto što i minimalna verovatnoća greške odlučivanja ukoliko se primene takozvane *simetrične cene odlučivanja*:

$$c_{21} - c_{11} = c_{12} - c_{22}.$$

Različite cene odluka se primenjuju onda kada je pogrešna odluka za jednu klasu mnogo kritičnija od pogrešne odluke za drugu klasu.

## 4.5. Neyman-Pearsonov test

Neyman-Pearsonov test predstavlja treće moguće rešenje problema testiranja hipoteza. Podsetimo se da prilikom donošenja odluke kojoj od dvaju mogućih klasa posmatrani merni vektor pripada, postoje dva tipa greške. Ponovo označimo dve greške kao  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ . Neyman-Pearsonov test za svoj cilj postavlja minimizaciju jedne od njih, recimo  $\varepsilon_1$ , dok grešku  $\varepsilon_2$  čuva konstantnom, recimo  $\varepsilon_2 = \varepsilon_0$ . Dakle, kreće se od minimizacije kriterijuma:

$$r = e_1 + m(e_2 - e_0),$$

pri čemu  $\mu$  označava Lagranžev multiplikator. Uvrštavajući izraze za  $e_1 = \int_{L_2} f_1(x)dx$  i

$e_2 = \int_{L_1} f_2(x)dx$  u poslednju relaciju, dobijamo da kriterijumska funkcija  $r$  postaje:

$$\begin{aligned} r &= \int_{L_2} f_1(X) dX + m \left\{ \int_{L_1} f_2(X) dX - e_0 \right\} = \\ &= (1 - m e_0) + \int_{L_1} [m f_2(X) - f_1(X)] dX \end{aligned}$$

Koristeći potpuno iste argumente kakvi su korišćeni za formiranje pravila Bajesovog odlučivanja minimalne cene, formira se Neyman-Pearsonovo pravilo odlučivanja na sledeći način:

$$m f_2(X) < f_1(X) \Rightarrow X \in w_1$$

$$m f_2(X) > f_1(X) \Rightarrow X \in w_2$$

ili, drugačije zapisano:

$$\frac{f_1(X)}{f_2(X)} > m \Rightarrow X \in w_1$$

$$\frac{f_1(X)}{f_2(X)} < m \Rightarrow X \in w_2.$$

Na osnovu poslednje relacije se opet može doneti zaključak da Neyman-Pearsonov test nije ništa drugo do Bajesov test hipoteza sa promenjenim pragom odlučivanja. Prethodna analiza pokazuje da se test količnika verodostojnosti može protumačiti i kao test koji minimizira jedan tip greške, dok verovatnoću greške drugog tipa držimo konstantnom. Prag  $\mu$  se, za zadato  $\varepsilon_0$ , dobija iz sledeće jednakosti:

$$e_2 = \int_{L_1} f_2(X) dX = e_0,$$

pri čemu parametar  $\mu$  figuriše u površini po kojoj se integriše, drugim rečima  $L_1 = L_1(\mu)$ . Ta činjenica postaje još jasnija ukoliko se verovatnoća greške drugog tipa napiše preko diskriminacione funkcije:

$$e_2 = \int_{-\infty}^{-\ln(m)} f_h(h/w_2) dh = e_0.$$

Problem se sastoji u tome što se poslednja relacija ne može eksplicitno rešiti po parametru  $\mu$ , već se rešenje traži pomoću numeričkih metoda. Kako je  $f_h(h/w_2) \geq 0$ ,  $e_2$  je monotono opadajuća funkcija parametra  $\mu$ , otuda se izračunavanjem ove funkcije za nekoliko vrednosti parametara vrlo tačno može odrediti željeno  $\mu$ , za koje će biti zadovoljena relacija  $\varepsilon_2 = \varepsilon_0$ .

## 4.6. Minimax test

Podsetimo se da je u Bajesovom testu minimalne cene, količnik verodostojnosti poređen sa vrednošću praga koji je, pak, funkcija od klasa apriornih verovatnoća. Dakle, prilikom projektovanja Bajesovog pravila odlučivanja minimalne cene neophodno je prethodno poznavati te verovatnoće i posle završenog projektovanja procedura će ostati optimalna samo pod uslovom da se verovatnoće  $P_i$  ne menjaju. Na nesreću, u praksi se to gotovo nikada ne događa, naprotiv te se verovatnoće često menjaju.

Minimaxni test se projektuje tako da zaštiti performanse pravila odlučivanja čak i ako se te verovatnoće menjaju drastično i potpuno neočekivano. Podsetimo se izraza za ukupnu cenu prilikom odlučivanja:

$$r = (c_{21}P_1 + c_{22}P_2) + \int_{L_1} [(c_{11} - c_{21})P_1f_1(X) + (c_{12} - c_{22})P_2f_2(X)] dX,$$

pri čemu su:

$P_i$   $i=1,2$  aposteriorne funkcije gustina verovatnoće mernih vektora  $f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ ,  
za  $i=1,2$ .



Ukoliko se u poslednjem izrazu uzme u obzir da je:

$$P_2 = 1 - P_1 \quad \text{tj.} \quad \int_{L_1} f_1(X) dX = 1 - \int_{L_2} f_2(X) dX$$

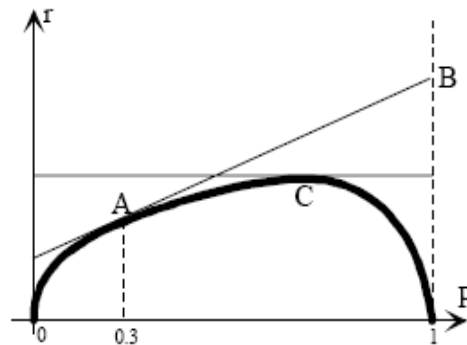
dobija se sledeći rezultat:

$$r = c_{22} + (c_{12} - c_{22}) \int_{L_1} f_2(X) dX + \\ + P_1 \left[ (c_{21} - c_{22}) - (c_{21} - c_{11}) \int_{L_2} f_1(X) dX - (c_{12} - c_{22}) \int_{L_1} f_2(X) dX \right]$$

pri čemu su:

$P_i$   $i=1,2$  aposteriorne funkcije gustina verovatnoće mernih vektora  $f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ .

Poslednja relacija pokazuje da je  $r$ , onog momenta kada se granice  $L_1$  i  $L_2$  odrede, linearna funkcija verovatnoće  $P_1$ . Na slici 4.2. kriva linija predstavlja primer zavisnosti Bajesove cene od ove verovatnoće, pri čemu su granice  $L_1$  i  $L_2$  izabrane optimalno za svako pojedinačno  $P_i$ ,  $i=1,2$ .



Slika 4.2. Zavisnost rizika od vrednosti apriorne verovatnoće

Ako su, na primer, granice  $L_1$  i  $L_2$  fiksne za  $P_1=0.3$ , a verovatnoća  $P_1$  počne da se menja, jasno je da će ukupna cena, na osnovu prethodne analize, početi da se kreće po pravoj  $AB$ , pri čemu će najveća vrednost ove cene biti dostignuta baš u tački  $B$  kada je  $P_1=1$ . U želji da se ovakva destrukcija performansi pravila odlučivanja spreči, potrebno je granice  $L_1$  i  $L_2$  izabrati za tačku  $C$  na slici, jer se tada, promenom verovatnoće  $P_1$  neće menjati ukupna cena odlučivanja. Shodno ovom razmišljanju, granice odlučivanja treba postaviti tako da koeficijent koji množi verovatnoću  $P_1$  u poslednjoj relaciji bude jednak nuli:

$$(c_{21} - c_{22}) - (c_{21} - c_{11}) \int_{L_1} f_1(X) dX - (c_{12} - c_{22}) \int_{L_1} f_2(X) dX = 0,$$

što znači da se oblasti  $L_1$  i  $L_2$  odrede tako da bude zadovoljena sledeća relacija:

$$\int_{L_1} [(c_{21} - c_{11})f_1(X) + (c_{12} - c_{22})f_2(X)]dX = (c_{21} - c_{22})$$

što opet predstavlja problem koji treba numerički rešavati. U specijalnom slučaju, kada je  $c_{11} = c_{22}$  i  $c_{12} = c_{21}$ , minimaxno pravilo odlučivanja postaje:

$$\int_{L_2} f_1(X)dX = \int_{L_1} f_2(X)dX \Leftrightarrow 1 = \int_{L_1} (f_1(X) + f_2(X))dX,$$

pri čemu su:

$$f_i(X) = f_X(X/\omega_i), \text{ za } i=1,2,$$

merni vektori aposteriorne funkcije gustina verovatnoće  $P_i$ ,  $i=1,2$ , što će rezultirati pravilom odlučivanja u kome su verovatnoće greške prvog i drugog tipa jednake:

$$e_1 = e_2,$$

pri čemu je:

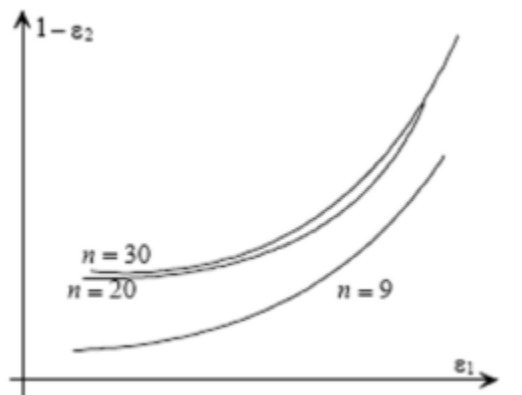
$$e_1 = \int_{L_2} f_1(X)dX; \quad e_2 = \int_{L_1} f_2(X)dX,$$

a

$$\Omega_x = L_1 \cup L_2 \text{ i } L_1 \cap L_2 = \emptyset, \text{ a } f_i(X) = f_X(X/\omega_i), \text{ za } i=1,2.$$

## 4.7. Operacione karakteristike

Na osnovu prethodna navedena četiri testa hipoteza može se zaključiti da se za svaki od njih kao klasifikator koristi količnik verodostojnosti, s tim što se različiti testovi razlikuju jedino u pragu sa kojim se količnik verodostojnosti poredi. U skladu sa tim, vrlo se često koristi grafikon koji pokazuje kako se menja verovatnoća greške prvog tipa  $\varepsilon_1$  u odnosu na verovatnoću greške drugog tipa  $\varepsilon_2$  sa promenom praga. Takva kriva se naziva **operacionom karakteristikom**. Tipična operaciona karakteristika data je na slici 4.3, pri čemu ose označavaju vrednosti  $\varepsilon_1$  i  $1 - \varepsilon_2$  i prikazane su u logaritamskoj razmeri. Tri krive na toj slici predstavljaju performanse testa količnika verodostojnosti za 30, 20 i 9 obeležja koja su selektovana iz istog skupa podataka. Te krive ukazuju na to da se za 30 i 20 obeležja dobijaju gotovo iste performanse u celom opsegu operacione karakteristike, dok se za devet obeležja dobijaju znatno gore performanse. Sa takve krive, onaj ko projektuje klasifikator, jednostavno, može izabrati željenu radnu tačku, te na osnovu nje odrediti željeni prag sa kojim treba porediti količnik verodostojnosti.



Slika 4.3. Grafikon operacione karakteristike

## 4.8. Burdikova (Burdick) karta

Različite kombinacije logaritamskih i linearnih skala su u upotrebi prilikom crtanja operacionih karakteristika. Međutim, zgodno je izabrati takvu skalu da operaciona karakteristika bude linearna ukoliko su diskriminacione funkcije normalno raspoređene za obe klase podataka. Naime, označimo sa  $\Phi(\alpha)$  normalnu funkciju greške:

$$\Phi(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

Ako je pri tome

$$h\left(\frac{X}{w_1}\right) \sim N(m_1, s_1^2) \quad \text{i} \quad h\left(\frac{X}{w_2}\right) \sim N(m_2, s_2^2)$$

i ako sa  $t$  označimo vrednost praga, onda na osnovu slike 4.4 možemo pisati:

Slika 4.4. Verovatnoća greške prvog i drugog tipa

$$\begin{aligned}
e_1 &= \int_{-\infty}^t \frac{1}{s_1 \sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(h - m_1)^2}{s_1^2}\right) dh = \\
&= \int_{-\infty}^{\frac{m_1-t}{s_1}} \frac{1}{\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2} x^2\right) dx = \Phi\left(\frac{m_1-t}{s_1}\right), \\
e_2 &= \int_{-\infty}^t \frac{1}{s_2 \sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(h - m_2)^2}{s_2^2}\right) dh = \\
&= \int_{-\infty}^{\frac{t-m_2}{s_2}} \frac{1}{\sqrt{2p}} \exp\left(-\frac{1}{2} x^2\right) dx = \Phi\left(\frac{t-m_2}{s_2}\right)
\end{aligned}$$

pri čemu su:

$m_i$ ,  $i = 1, 2$  očekivanje slučajnih promenljivih  $\frac{X}{w_i}$ ,  $i = 1, 2$ , a  $s_i^2$  varijansa tih slučajnih promenljivih. Primenjujući inverznu operaciju na poslednje relacije dobija se:

$$\frac{m_1-t}{s_1} = \Phi^{-1}(e_1) ; \quad \frac{t-m_2}{s_2} = \Phi^{-1}(e_2).$$

Eliminišući  $t$  iz poslednje dve relacije, dobija se veza između  $\Phi^{-1}(e_1)$  i  $\Phi^{-1}(e_2)$ :

$$\Phi^{-1}(e_2) = -\frac{s_1}{s_2} \Phi^{-1}(e_1) + \frac{m_1 - m_2}{s_2}.$$

Drugim rečima, ako se na  $x$  i  $y$  osu nanese vrednosti  $\Phi^{-1}(e_1)$  i  $\Phi^{-1}(e_2)$ , respektivno, dobijena operaciona karakteristika će biti linearna sa nagibom  $-\sigma_1/\sigma_2$  i tačkom preseka na  $y$  osi  $(m_1 - m_2) / \sigma_2$ . Ovakva linearna karakteristika se naziva *Burdikovom kartom*.

## 4.9. Ostali testovi hipoteza

### 4.9.1. Test više hipoteza

Ukoliko je poznato da oblici dolaze iz  $L$  klasa, potrebno je izvršiti generalizaciju testova koji su izvedeni pod pretpostavkom dveju klasa.

Ukoliko se naša odluka bazira isključivo na verovatnoći, pravilo odlučivanja postaje:

$$q_k(X) = \Pr(w_1 / X) = \max_i q_i(X) \Rightarrow X \in w_k$$

ili na osnovu Bajesove teoreme:

$$P_k f_k(X) = \max_i P_k f_k(X) \Rightarrow X \in w_k.$$

Kako oblik  $X$  pripada klasi  $\omega_i$  sa verovatnoćom  $q_i(X)$ ;  $i = 1, \dots, L$  prilikom donošenja odluke da je oblik iz  $k$ -te klase, verovatnoća pogrešne odluke iznosi:

$$r(X) = q_1(X) + \dots + q_{k-1}(X) + q_{k+1}(X) + \dots + q_L(X) = 1 - q_k(X),$$

pa je shodno tome Bajesova greška jednaka očekivanju funkcije  $r(X)$  po svim mogućim oblicima  $X$ . Odnosno:

$$r(X) = 1 - \max_i q_i(X) ; e = E\{r(X)\}.$$

Kada se u proces odlučivanja uključe odgovarajuće cene, pravilo odlučivanja postaje:

$$r_k(X) = \min_i r_i(X) \Rightarrow X \in w_k$$

pri čemu je sa  $r_i(X)$  označena cena koja se plaća ukoliko se oblik  $X$  pridruži  $i$ -toj klasi:

$$r_i(X) = \sum_{j=1}^L c_{ij} q_j(X),$$

pri čemu je, pak, sa  $c_{ij}$  označena cena odluke da je  $X \in \omega_i$  kada je  $X_j \in \omega_j$ . Sada, primenom Bajesove teoreme, pravilo odlučivanja postaje:

$$\sum_{j=1}^L c_{ij} P_j f_j(X) = \min_i \sum_{j=1}^L c_{ij} P_j f_j(X) \Rightarrow X \in w_k$$

pri čemu je:

$c_{ij}$  kovaraciona matrica vektora  $X$ , a  $P_j$ ,  $j=1,2,\dots,L$  aposteriorne funkcije gustine verovatnoće mernih vektora  $f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2,\dots,L$ .

Rezultirajuća uslovna cena za zadati  $X_i$  ukupna cena tada postaje:

$$r(X) = \min_i r_i(X) ; r = E\{r(X)\}.$$

#### 4.9.2. Test jedne hipoteze

Do sada je naš zadatak bio da se izvrši pridruživanje dobijenog oblika jednoj od poznatih  $L$  klasa. Međutim, u praksi je često prisutan problem: samo je jedna klasa jasno definisana, a ostale nisu. Na primer, kada se želi napraviti razlika između cilja na moru u odnosu na sve ostalo što nije cilj, kao što je pojava lažnih odraza reljefa, ostrva, drveća itd. Zbog velike raznolikosti svega onoga što nije cilj, vrlo je teško proučiti raspodelu i statistiku ostalih objekata koje radarski sistem može da detektuje. Tada se primenjuje test jedne hipoteze, i to na taj način što se meri distanca dobijenog oblika od srednje vrednosti ciljeva. Ova tehnika je vrlo uspešna ukoliko je dimenzionalnost oblika vrlo mala (1 ili 2). Za veću dimenzionalnost verovatnoća greške znatno raste. Radi toga, proučimo statistike distance. Posmatrajmo raspodelu slučajnog vektora  $X$  sa vektorom srednje vrednosti  $M$  i

kovarijacionom matricom  $\Sigma$ . Tada je normalizovana distanca vektora  $X$  od vektora  $M$  data sledećim izrazom:

$$d^2 = (X - M)^t \Sigma^{-1} (X - M) = Z^t Z = \sum_{i=1}^n z_i^2,$$

pri čemu je  $Z = A^t (X - M)$ , a matrica  $A$  transformacija beljenja. S obzirom na to da je vektor matematičkog očekivanja vektora  $Z$  jednak nuli, a njegova kovarijaciona matrica jedinična matrica, komponente su nekorelisane, pri čemu je  $E\{Z_i\}=0$ , a  $\text{Var}\{Z_i\}=1$ . Tada je matematičko očekivanje distance:

$$E\{d^2\} = nE\{Z_i^2\} = n,$$

a varijansa:

$$\begin{aligned} \text{Var}\{d^2\} &= E\left\{\left(d^2\right)^2\right\} - E^2\{d^2\} = \\ &= \sum_{i=1}^n E\left\{z_i^4\right\} + \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \left\{z_i^2 z_j^2\right\} - n^2 \end{aligned}$$

pri čemu je:

$d$  distanca vektora  $X$  od vektora  $M$ , a  $Z_i$  standardizovana slučajne promenljive čije je  $E(Z_i)=0$ , a  $\text{Var}(Z_i)=1$ ,  $i=1,2,\dots, n$ .

Analiza poslednjeg izraza je vrlo složena, ali se može pokazati da je ova varijansa direktno proporcionalna dimenzionalnosti oblika:

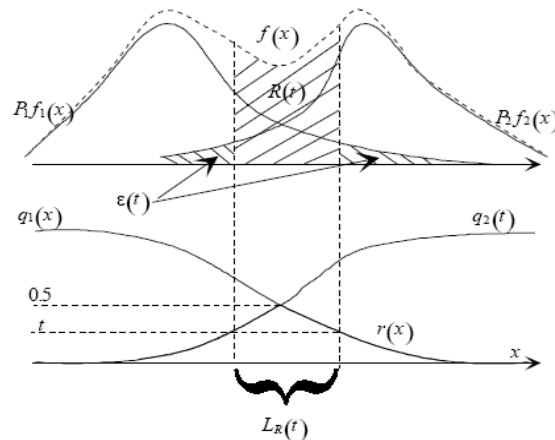
$$\text{Var}\{d^2\} = ng,$$

pri čemu  $\gamma$  ne zavisi od  $n$ . Na osnovu poslednjeg rezultata se zaključuje da statističko odstojanje slučajnog vektora  $X$  od vektora srednjih vrednosti  $M$  postaje slučajna promenljiva čija se varijansa linearno povećava sa povećanjem dimenzionalnosti  $n$ , te je tehnika odlučivanja bazirana na ovoj distanci neprimenljiva.

### 4.9.3. Opcija odbacivanja

Kada je uslovna verovatnoća greške ( $r(X)=\min(q_1(X), q_2(X))$ ) blizu 0,5, uputno je za takav oblik ne donositi nikakvu odluku klasifikacije, jer je verovatnoća da ćemo doneti pogrešnu odluku vrlo velika. Drugim rečima, ovakav oblik zahteva dalje testiranje. Ovakva opcija se naziva *opcijom odbacivanja*.

Postavljajući prag za odbacivanje sa kojim se poredi uslovna verovatnoća greške  $r(X)$ , možemo definisati *oblast odbacivanja*  $L_R(t)$ , i *verovatnoću odbacivanja*  $R(t)$ , na sledeći način (slika 4.5):



Slika 4.5. Grafikon oblasti odbacivanja

Tada je rezultujuća verovatnoća greške  $\varepsilon(t)$ :

$$\varepsilon(t) = \int_{\bar{L}_R(t)} \min[P_1 f_1(X), P_2 f_2(X)] dX,$$

pri čemu je sa  $\bar{L}_R(t)$  označena komplementarna oblast područja  $L_R(t)$ .

Ukoliko želimo opciju odbacivanja da definišemo u svetlu diskriminacione funkcije, poslužićemo se sledećim relacijama:

$$r(X) = \frac{P_2 f_2(X)}{P_1 f_1(X) + P_2 f_2(X)} \geq t \quad i \quad \frac{P_1 f_1(X)}{P_2 f_2(X)} > 1$$

$$r(X) = \frac{P_1 f_1(X)}{P_1 f_1(X) + P_2 f_2(X)} \geq t \quad i \quad \frac{P_2 f_2(X)}{P_1 f_1(X)} < 1$$

$$\ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \ln\left(\frac{t}{1-t}\right) \leq h(X) = -\ln\left(\frac{f_1(X)}{f_2(X)}\right) \leq \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \ln\left(\frac{1-t}{t}\right),$$

pri čemu su:

$f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ , merni vektori aposteriornih funkcija gustina verovatnoće  $P_i$   $i=1,2$ .

Drugim rečima, odbirci iz klase  $\omega_1$  za koje je

$$h(X) > \ln\left(\frac{1-t}{t}\right) + \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

biće pogrešno klasifikovani, kao i odbirci iz klase  $\omega_2$  za koje je

$$h(X) < \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + \ln\left(\frac{t}{1-t}\right).$$



Kao što se vidi sa slici 4.5, kako se prag  $t$  menja od 0 do 0,5, verovatnoća greške se penje od 0 do Bajesovske greške, a verovatnoća odbacivanja pada od 1 do 0.

#### 4.9.4. Kompozitni test hipoteza

Ponekad a posteriorne funkcije gustine verovatnoće  $f_i(X)$  nisu date direktno, već su date kao kombinacija funkcija  $f(X/\Theta_i)$  i  $f(\omega_i/\Theta_i)$ , gde su  $f(X/\Theta_i)$  uslovne funkcije gustine verovatnoće slučajnog vektora  $X$  kada je dat skup parametara vektora  $\Theta_i$ , a  $f(\omega_i/\Theta_i)$  uslovna funkcija gustine verovatnoće slučajnog vektora  $\Theta_i$  pod pretpostavkom da je u pitanju  $i$ -ta klasa. U tom slučaju se može izračunati a posteriorna funkcija gustine verovatnoće  $f_i(X)$  na sledeći način:

$$\begin{aligned} f_i(X) &= \frac{f(X, w_i)}{P_i} = \int \frac{f(X, w_i, \Theta_i)}{P_i} d\Theta_i \\ &= \int \frac{f(X/w_i, \Theta_i) f(\Theta_i/w_i) P_i}{P_i} d\Theta_i \\ &= \int f(X/\Theta_i) f(\Theta_i/w_i) d\Theta_i \end{aligned}$$

pri čemu je:

$f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ , merni vektori a posteriornih funkcija gustina verovatnoće  $P_i$   $i=1,2$ .

Shodno tome, količnik verodostojnosti se može formirati na sledeći način:

$$l(X) = \frac{f_1(X)}{f_2(X)} = \frac{\int f(X/\Theta_1) f(\Theta_1/w_1) d\Theta_1}{\int f(X/\Theta_2) f(\Theta_2/w_2) d\Theta_2},$$

pa se na osnovu njega i pogodno izabranog praga može obrazovati pravilo odlučivanja.

#### 4.9.5. Sekvencijalno testiranje hipoteza

U problemima koji su do sada razmatrani podrazumevalo se da su sve relevantne informacije za klasifikaciju prisutne u trenutku odlučivanja. Klasifikator koristi dati vektor merenja radi formiranja odluke i ne očekuje da se vrše dodatna merenja. Međutim, u mnogim praktičnim problemima opservacije su po prirodi sekvencijalne i kako vreme prolazi, sve nam više i više informacija pristiže. Uzmimo za primer merenje vibracija mašine u cilju određivanja moda rada mašine, ispravan ili neispravan. Tada se kao ilustracija može navesti primer radarske detekcije ciljeva. Sekvencijalno testiranje hipoteza je matematički aparat koji se koristi za rešavanje ovakve vrste problema.

Neka su  $X_1, \dots, X_m$  slučajni vektori opservacije dobijeni sekvencijalno. Pretpostavimo da su ovi slučajni vektori nezavisni i jednako raspodeljeni. Formirajmo združenu funkciju gustine verovatnoće za  $m$  slučajnih vektora i na količnik verodostojnosti primenimo negativni logaritam:

$$s = -\ln \frac{f_1(X_1, \dots, X_m)}{f_2(X_2, \dots, X_m)} = \sum_{i=1}^m \left[ -\ln \frac{f_1(X_i)}{f_2(X_i)} \right] = \sum_{i=1}^m h(X_i)$$

pri čemu je

$$h(X) = -\ln \frac{f_1(X)}{f_2(X)}$$

količnik verodostojnosti za pojedinačne merne vektore. Logično je da tada veličinu  $s$  poredimo sa pragom  $\ln(P_1/P_2)$ , kako to radi Bajesov klasifikator, i da se na osnovu tog poređenja donese odluka da li dati niz merenje indikuje pripadnost prvoj ili drugoj klasi.

Zanimljivo je pogledati kako se ponašaju matematičko očekivanje i varijansa veličine  $s$  u zavisnosti od toga kojoj klasi pripada oblik:

$$E(s/w_i) = \sum_{j=1}^m E\{h(X_j)/w_i\} = mh_i$$

$$\text{Var}(s/w_i) = \sum_{j=1}^m \text{Var}\{h(X_j)/w_i\} = m\sigma_i^2$$

Poslednji izrazi su dobijeni pod pretpostavkom da su  $h(X_j)$  nezavisne i jednako raspodeljene slučajne promenljive sa srednjom vrednošću  $\eta_i$  i varijansom  $\sigma_i^2$ .

Kada se Bajesov klasifikator koristi za  $h(X)$ , može se pokazati da je  $\eta_1 \leq 0$  i da je  $\eta_2 \geq 0$ :

$$\begin{aligned} h_1 &= E\left\{-\ln \frac{f_1(X)}{f_2(X)} / w_1\right\} = \int \left\{\ln \frac{f_2(X)}{f_1(X)}\right\} f_1(X) dX \leq \\ &\leq \int \left\{\frac{f_2(X)}{f_1(X)} - 1\right\} f_1(X) dx = \int f_2(X) dX - \int f_1(X) dX = 0 \\ h_2 &= E\left\{-\ln \frac{f_1(X)}{f_2(X)} / w_2\right\} = -\int \left\{\ln \frac{f_1(X)}{f_2(X)}\right\} f_2(X) dX = \\ &\geq -\int \left\{\frac{f_1(X)}{f_2(X)} - 1\right\} f_2(X) dx = \int f_1(X) dX - \int f_2(X) dX = 0 \end{aligned}$$

pri čemu je:

$f_i(X) = f_X(X/\omega_i)$ , za  $i=1,2$ , merni vektori aposteriorni funkcija gustina verovatnoće  $P_i$   $i=1,2$ .

Poslednje nejednakosti su dobijene korišćenjem nejednakosti  $\ln x \leq x-1$ . Jednakost u poslednjim relacijama važi pod uslovom da je  $f_1(X) = f_2(X)$ .

Drugim rečima, kako se  $m$  povećava,  $E\{s/\omega_1\}$  se smanjuje, a  $E\{s/\omega_2\}$  se povećava linearno sa povećavanjem  $m$ , dok se standardna devijacija za  $s$  u obe klase povećava proporcionalno sa  $\sqrt{m}$ . Dakle, povećavanjem broja mernih vektora  $m$  separabilnost između klasa  $\omega_1$  i  $\omega_2$  se povećava. Na osnovu centralne granične teoreme, možemo tvrditi da sa povećanjem broja  $m$  raspodela izraza  $s$  asimptotski teži ka normalnoj raspodeli.

Međutim, u primeni sekvencijalnog testa se pojavljuju dva oprečna zahteva. Jedan od njih je da odluku treba doneti što pre, što podrazumeva mali broj mernih vektora, dok

je drugi zahtev da klasifikacija mora biti sa što većom verovatnoćom tačna, što opet podrazumeva veliki broj mernih vektora. Kompromis se uspostavlja primenom takozvanog *Waldovg sekvencijalnog testa*.

#### 4.9.6. Wald-ov sekvencijalni test

Umesto fiksnog broja  $m$  mernih vektora koji koristimo, proces prikupljanja podataka možemo zaustaviti kada izraz  $s$  dostigne neke pragove, na sledeći način:

$$\begin{aligned} s_m \leq a &\Rightarrow X \in w_1 \\ a < s_m < b &\Rightarrow \text{uzeti } (m+1)\text{-vi vektor} \\ b \leq s_m &\Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

Greška koju obrađuje Waldov sekvencijalni test se kontroliše pomoću parametara  $a$  i  $b$ , i to na sledeći način: kada se apsolutne vrednosti tih parametara povećavaju, greška se smanjuje, ali se povećava broj potrebnih mernih vektora, i obrnuto. Verovatnoće greške prvog i drugog tipa se mogu odrediti na sledeći način:

$$\begin{aligned} e_1 &= \sum_{j=1}^{\infty} \int_b^{\infty} f_{s_j} \left( s_j / w_1 \right) ds_j \\ e_2 &= \sum_{j=1-\infty}^{\infty} \int_a^{\infty} f_{s_j} \left( s_j / w_2 \right) ds_j. \end{aligned}$$

Teoretski gledano, mogli bismo naći takvo  $a$  i takvo  $b$  koji nam obezbeđuju željene verovatnoće greške prvog i drugog tipa. Međutim, očigledno da je takav postupak krajnje nepodesan. Jednostavan način je predložio Wald i on se sastoji u sledećem: pri pristizanju  $m$ -te opservacije testira se količnik verodostojnosti:

$$\begin{aligned} l_m &= \frac{f_1(X_1, \dots, X_m)}{f_2(X_1, \dots, X_m)} \geq A \Rightarrow X \in w_1 \\ l_m &= \frac{f_1(X_1, \dots, X_m)}{f_2(X_1, \dots, X_m)} \leq B \Rightarrow X \in w_2 \end{aligned}$$

Shodno poslednjim nejednakostima, možemo pisati:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} \int_{l_m \geq A} f_1(X_1, \dots, X_m) dX_1 \dots dX_m &\geq \\ \geq A \sum_{m=1}^{\infty} \int_{l_m \geq A} f_2(X_1, \dots, X_m) dX_1 \dots dX_m & \\ \sum_{m=1}^{\infty} \int_{l_m \leq B} f_1(X_1, \dots, X_m) dX_1 \dots dX_m &\leq \\ \leq B \sum_{m=1}^{\infty} \int_{l_m \leq B} f_2(X_1, \dots, X_m) dX_1 \dots dX_m & \end{aligned}$$

Leva strana prve od nejednakosti predstavlja verovatnoću da su oblici iz prve klase dobro klasifikovani ( $1-\varepsilon_1$ ), dok desna strana predstavlja verovatnoću da su oblici iz druge klase pogrešno klasifikovani ( $\varepsilon_2$ ). Otuda se poslednje dve nejednakosti svode na:

$$1 - e_1 \geq Ae_2$$

$$e_1 \leq B(1 - e_2),$$

odnosno:

$$\frac{1 - e_1}{e_2} \geq A$$

$$\frac{e_1}{1 - e_2} \leq B,$$

što znači da se za zadate vrednosti verovatnoće greške prvog i drugog tipa mogu odrediti parametri  $A$  i  $B$ . Primenom negativnog logaritma dobija se:

$$a = -\ln A \geq -\ln \frac{1 - e_1}{e_2}$$

$$b = -\ln B \leq -\ln \frac{e_1}{1 - e_2}$$

Kada su inkrementi funkcije  $h(X_j)$  mali, tada će količnik verodostojnosti vrlo malo preći vrednosti  $A$  odnosno  $B$  pre donošenja odluke, otuda se u poslednjim nejednakostima znak nejednakosti može zameniti znakom jednakosti. Zato su verovatnoće greške prvog i drugog tipa direktno zavisne od parametara  $A$  i  $B$ , na sledeći način:

$$e_1 \cong \frac{B(A-1)}{A-B}; \quad e_2 \cong \frac{1-B}{A-B}.$$

Treba istaći sledeće osobine Waldovog sekvencijalnog testa:

- 1) Izrazi za vezu između verovatnoća prvog i drugog tipa sa parametrima  $A$  i  $B$  važi i ukoliko merenja  $X_1, \dots, X_m$  nisu nezavisna i jednako raspodeljena;
- 2) Waldov sekvencijalni test se završava verovatnoćom 1;
- 3) Waldov sekvencijalni test minimizira srednju vrednost potrebnog broja merenja za zadato  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ .

Još je zanimljivo pokazati koliki je srednji broj potrebnih merenja da bi se donela odluka. Označimo sa  $m$  broj potrebnih merenja. Tada je vrednost veličine  $s$ :

$$s = \sum_{j=1}^m h(X_j)$$

a pošto je odluka doneta, veličina  $s$  ima vrednost  $a$  ili  $b$ , i to na sledeći način:

$$s = a \left( \text{odluka je } X \in \omega_1 \right)$$

onda je odluka doneta sa verovatnoćom  $1 - \varepsilon_1$  ako  $X \in \omega_1$ , odnosno odluka je doneta sa verovatnoćom  $e_2$  ako je  $X \in \omega_2$ ;

$$s = b \left( \text{odluka je } X \in \omega_2 \right)$$

onda je odluka doneta sa verovatnoćom  $1-\varepsilon_2$  ako  $X \in \omega_2$ , odnosno odluka je doneta sa

+++

+verovatnoćom  $e_1$  ako je  $X \in w_1$ .

Otuda je:

$$\begin{aligned} E(s/w_1) &= a(1-e_1) + be_1 \\ E(s/w_2) &= ae_2 + b(1-e_2) \end{aligned}$$

S druge strane, kako je  $s$  slučajna veličina, možemo pisati:

$$E\{s/w_i\} = E_m\{E\{s/m, w_i\}\} = E\{mh_i/w_i\} = h_i E\{m/w_i\}.$$

Tada se jednostavno može odrediti srednji broj potrebnih merenja da bi se donela odluka:

$$\begin{aligned} E\{m/w_1\} &= \frac{a(1-e_1) + be_1}{h_1} \\ E\{m/w_2\} &= \frac{ae_2 + b(1-e_2)}{h_2} \end{aligned}$$

gde je

$$\begin{aligned} h_i &= E\{h(X_j)/w_i\} \\ s &= b \left( \text{odluka je } X \in \omega_2 \right). \end{aligned}$$

#### 4.9.7. Gornja granica Bajesove greške

Pokazuje se da je određivanje Bajesove greške izuzetno složen problem jer se uvek svodi na izračunavanje složenih integrala. U svim takvim slučajevima gde se verovatnoća greške ne može naći u zatvorenoj formi, pogodno je odrediti gornju granicu te verovatnoće.

##### Černofova (Chernoff) granica:

Bajesova greška je data sledećim izrazom:

$$e = \int \min[P_1 f_1(X), P_2 f_2(X)] dx$$

Gornja granica ovog integrala se može odrediti na osnovu sledeće aproksimacije:

$$\min[a, b] \leq a^s b^{1-s} ; 0 \leq s \leq 1$$

ukoliko je  $a, b \geq 0$ . Poslednju nejednakost je vrlo jednostavno dokazati. Primenom te aproksimacije gornja granica Bajesove verovatnoće greške postaje:

$$e_u = P_1^s P_2^{1-s} \int f_1^s(X) f_1^{1-s}(X) dX ; 0 \leq s \leq 1$$

Ovakva gornja granica se zove *Černofova gornja granica*. Optimalna vrednost  $s$  se dobija minimizacijom izraza  $\varepsilon_u$ .

Ako su raspodele klasa normalne

$$N_x(M_1, \Sigma_1) \text{ i } N_x(M_2, \Sigma_2)$$

pokazuje se da se Černofova granica može napisati u zatvorenoj formi:

$$\int f_1^s(X) f_1^{1-s}(X) dX = \exp(-m(s)),$$

pri čemu je

$$m(s) = \frac{s(1-s)}{2} (M_2 - M_1)^t [s\Sigma_1 + (1-s)\Sigma_2]^{-1} (M_2 - M_1) + \frac{1}{2} \ln \frac{|s\Sigma_1 + (1-s)\Sigma_2|}{|\Sigma_1|^s |\Sigma_2|^{1-s}}.$$

Poslednji izraz se naziva *Černofova distanca*. Sada se optimalno  $s$  lako određuje crtanjem funkcije  $\mu(s)$  za zadato  $\Sigma_i$  i  $M_i$ .

#### 4.9.8. Batačarijina (Bhattacharyya) granica

Ukoliko se ne insistira na optimalnom izboru parametra  $s$ , može se dobiti mnogo jednostavnija a u velikoj meri korišćena gornja granica. Jedna od mogućnosti je za  $s=0,5$ . Tada se gornja granica Bajesove verovatnoće greške svodi na:

$$e_u = \sqrt{P_1 P_2} \int \sqrt{f_1(X) f_2(X)} dX = \sqrt{P_1 P_2} \exp(-m(1/2))$$

u generalnom slučaju, a za normalnu raspodelu  $m(s)$  za  $s=0,5$  to postaje:

$$m\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{8} (M_2 - M_1)^t \left[ \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right]^{-1} (M_2 - M_1) + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} \right|}{\sqrt{|\Sigma_1| + |\Sigma_2|}}.$$

Izraz  $\mu(1/2)$  se naziva *Batačarijina distanca* i koristi se kao vrlo značajna mera separabilnosti između dveju klasa. Vidi se da Batačarijina distanca predstavlja zbir dvaju članova, pri čemu prvi od njih ukazuje na separabilnost koja potiče od udaljenosti srednjih vektora klasa, dok drugi član ukazuje na separabilnost koja potiče od raznolikosti kovarijacionih matrica.

Kada je  $\Sigma_1 = \Sigma_2 = \Sigma$ , Černofova distanca postaje:

$$m(s) = \frac{s(1-s)}{2} (M_2 - M_1)^t \Sigma^{-1} (M_2 - M_1).$$

U tom se slučaju optimalno  $s$  nalazi na sledeći način:

$$\frac{dm(s)}{ds} = \frac{1-2s}{2} (M_2 - M_1)^t \Sigma^{-1} (M_2 - M_1) = 0 \Rightarrow s = \frac{1}{2}.$$

Dakle, Batačarijina distanca je optimalna Černofova distanca za  $\Sigma_1 = \Sigma_2$ .

Vrlo često se na osnovu nekog apriornog znanja o oblicima koje treba klasifikovati poseduje informacija o tipu raspodele oblika koje treba klasifikovati i tada se pristupa estimaciji parametara te raspodele. Ti parametri su uglavnom statistike prvog i drugog reda, a cela metodologija se u literaturi označava kao parametarska identifikacija, a zatim i klasifikacija. Međutim, mnogo je češći slučaj kada se ta informacija ne poseduje i tada se pristupa neparametarskoj estimaciji funkcije gustine verovatnoće, a zatim i neparametarskoj klasifikaciji. Kako je ovaj problem složen, zahteva veliki broj oblika iz svih klasa među kojima treba izvršiti klasifikaciju.

U metode neparametarske estimacije gustine verovatnoće ubraja se: Parzenova estimacija funkcije gustine verovatnoće, zatim metod  $k$  najbližih suseda ( $knn$  metod), kao i razvoj funkcije gustine verovatnoće u funkcionalni red, čija se gustina verovatnoće može razviti u funkcionalan red po bazi  $s$  zadatih funkcija. Drugim rečima, ova metodologija se bazira na ideji da su funkcija  $\Phi_i$  i  $f(x)$  u relaciji:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \Phi_i(X).$$

Procedura Parzenove estimacije se sastoji u tome da se fiksira  $V$  (zapremina prostora skoncentrisana oko tačke  $X$ ), a da je  $k$  slučajna promenljiva koja zavisi od položaja tačke u kojoj se estimira funkcija gustine verovatnoće. Druga mogućnost je da se fiksira  $k$ , a da  $V$  bude slučajna promenljiva. Dakle, ukoliko se procenjuje funkcija gustine verovatnoće u tački  $X$ , treba širiti oblast oko ove tačke sve dok ona ne postane toliko velika da obuhvati  $k$  odbiraka iz serije uzoraka koja je na raspolaganju. Dakle, ta oblast  $L(X)$  postaje slučajna promenljiva, kao i njena zapremina  $V(X)$ , a obe su funkcije od  $X$ . Ovakav se pristup naziva  $k$  najbližih suseda ( $k$  nearest neighbours,  $knn$ ). Metod  $knn$  se može protumačiti kao Parzenova estimacija s uniformnim kernelima čija se širina podešava automatski, zavisno od položaja tačke. Širina je veća tamo gde je funkcija gustine verovatnoće manja i obrnuto.

Primena neparametarske estimacije funkcija klasifikacije vrlo je jednostavna. Ako se baziramo na količini estimaciji funkcije gustine verovatnoće, dobijene Parzenovom metodom za estimaciju funkcije gustine verovatnoće, pravilo za klasifikaciju postaje:

$$-\ln \frac{\hat{f}_1(x)}{\hat{f}_2(x)} = \ln \left( \frac{\frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} K \left( X - X_j^{(1)} \right)}{\frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} K \left( X - X_j^{(2)} \right)} \right) > t \Rightarrow X \in w_2$$

$$-\ln \frac{\hat{f}_1(x)}{\hat{f}_2(x)} = -\ln \left( \frac{\frac{1}{N_1} \sum_{j=1}^{N_1} K \left( X - X_j^{(1)} \right)}{\frac{1}{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} K \left( X - X_j^{(2)} \right)} \right) < t \Rightarrow X \in w_1.$$

Ukoliko poželimo da estimiramo verovatnoću greške tako isprojektovanog klasifikatora, na raspolaganju su nam dve metode. To su metoda resupstitucije (R) i metoda leave-one-out (L). Ove metode zapravo služe da odrede gornju i donju granicu

Bajesove greške. U R metodi svi poznati oblici se iskoriste za projektovanje klasifikatora i ti isti oblici se zatim upotrebe za estimaciju verovatnoće greške. Naime, prilikom testiranja semplova, svi semplovi su iz prve klase za koje je diskriminaciona funkcija veća od praga i svi semplovi iz druge klase za koje je diskriminaciona funkcija manja od praga, te se računaju kao pogrešno klasifikovani oblici. Na taj način se računaju verovatnoće greške prvog i drugog tipa po metodi R. Metoda L se koristi tako što se sempl  $X_k^{(1)}$  isključi iz skupa poznatih oblika i klasifikator se isprojektuje bez njega, a zatim se klasifikator testira na baš tom obliku. Procedura se ponavlja za  $k=1, \dots, N_1$ .

**Klasterizacija** podrazumeva problem klasifikacije u odsustvu obučavajućeg skupa. Ovakav se postupak često naziva i klasifikacija bez supervizije. Mnogo je primera kada se mora primeniti takav oblik klasifikacije, bez apriornog znanja. Jedan od takvih problema jeste problem sistematizacije rezervnih delova u priručnom magacinu broda. Svi delovi su kategorizovani prema nekim svojim očiglednim osobinama, bez dodatne supervizije.

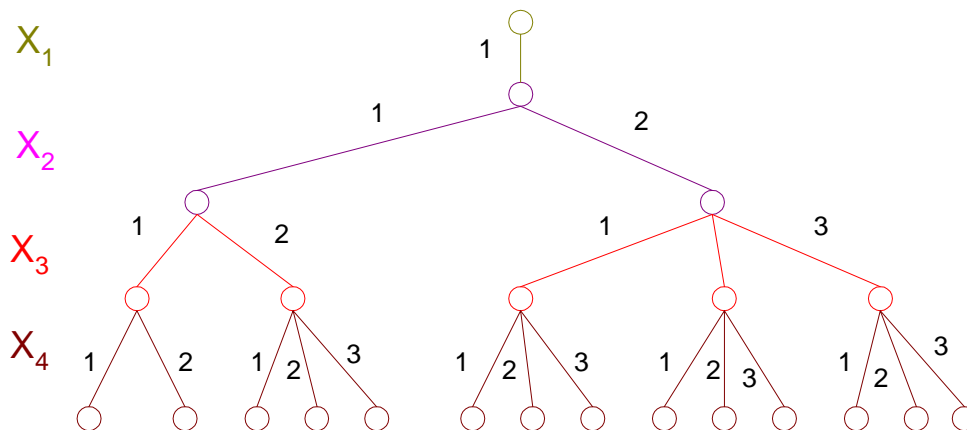
Problem klasterizacije nije jasno definisan dok god se ne zahteva da klase oblika koje se pojavljuju kao rezultat klasterizacije ne poseduju neke osobine. Izbor tih osobina ili onoga što je ekvivalentno definiciji klastera, jeste fundamentalna naznaka problema klasterizacije. Onog momenta kada se klaster definiše, tada je vrlo lako napraviti razliku između dobre i loše klasifikacije. Problem klasterizacije se može rešavati na dva načina. Poznati su pristupi parametarske i neparametarske klasterizacije. U većini parametarskih pristupa definiše se klasterizacioni kriterijum, a semplovi se klasifikuju u određeni broj klasa, tako da se optimizira postavljeni kriterijum. Najčešće se taj kriterijum definiše tako da u sebi sadrži meru separabilnosti klasa. Tada je granica između klasa određena postavljenim kriterijumom. Algoritam klasterizacije koji rešava klasifikaciju, optimalnu u smislu postavljenog kriterijuma, obično se realizuje iterativno. Postoji parametarski pristup u kome se pretpostavi tip funkcije gustine verovatnoće za semplove (obično je to zbir Gausovih raspodela), a zatim se traže parametri te raspodele koji najbolje fituju uzorke.

S druge strane, neparametarske metode ne uzimaju u obzir nikakve kriterijume, niti se usvaja tip raspodele semplova. Neparametarski pristup se bazira na tome što se traže doline u funkciji gustine verovatnoće podataka, jer se prirodno očekuje da one predstavljaju granicu između klasa. Međutim, te granice su često vrlo kompleksne i teško da se mogu izraziti u nekoj parametarskoj formi.

#### 4.9.9. Metod grane i granice (branch and bound)

Metod grane i granice je ilustrovan sledećom šemom klasterizacije (drvetom odlučivanja) za primer četiri sempla i tri klase (slika 4.6):





Slika 4.6. Drvo odlučivanja

Na taj način se broj kombinacija koje se uzimaju u obzir znatno smanjuje (recimo, kombinacije 1122 i 1133 su identične, pa se ne pojavljuju obe u drvetu klasifikacije). Ovaj metod daje još jednu mogućnost efikasne restrikcije broja kombinacija koje se razmatraju. Naime, kada se izvrši formiranje grafa po prijemu sempla  $L$ , za svaki od čvorova (klasterizacija) iz ovog nivoa odredi se kriterijumska funkcija, pa se odredi klasterizacija sa najmanjom vrednošću ovog kriterijuma. Zatim se vratimo u prethodni nivo, i ukoliko u prethodnom nivou postoji čvor koji ima veći kriterijum od najmanjeg u  $l$ -tom nivou, ceo taj deo grafa se izbacuje. Ovakav mehanizam redukcije grafa je moguće sprovesti samo pod uslovom da primenjeni kriterijum poseduje osobinu monotonosti (da sa povećanjem broja semplova koje treba klasterizovati kriterijum raste). Treba napomenuti da je usvojeni kriterijum  $t_r(S_m^{-1}S_w)$  monoton. Ne postoji procedura za izbor funkcionalnog reda, naročito u višedimenzionom slučaju.

U jednodimenzionom slučaju postoji nekoliko dobro poznatih funkcionalnih baza, kao što su: Furijeova serija, Ležendrovi polinomi, Gegenbauerovi polinomi, Jacobovi, Hermiteovi i Ležerovi polinomi.

## 5. PRIMENA FAZI (FUZZY) LOGIKE I GRUBIH SKUPOVA ZA PREPOZNAVANJE OBLIKA POUZDANOSTI

Na slici 5.1. prikazana je problematika približnog računanja.



Slika 5.1. Problematika približnog računanja

Matematički modeli koji se zasnivaju na klasičnoj dvovalentnoj logici i koji koriste isključivo egzaktne vrednosti često nisu pogodni za rešavanje stvarnih problema. Realno okruženje i situacije se ne mogu uvek precizno i potpuno opisati. Kao posledica nepotpunih, nepreciznih i nedoslednih informacija ili relacija među njima, pojavljuje se bitno prisustvo elemenata neodređenosti i neizvesnosti. Sa ciljem da se na adekvatan način odgovori ovakvom problemu, pojavljuju se neklasične polivalentne logike, praćene odgovarajućim alternativnim zasnivanjima matematike, koje se prevashodno ogledaju u različitim pristupima tretiranju bazičnog matematičkog pojma – pojma skupa.

Osnovna ideja fazi skupova je veoma jednostavna. U klasičnim (nefazi) skupovima neki određeni elementi su merna veličina posmatranog procesa-pripadnik univerzalnog skupa ili pripada ili ne pripada nekom određenom skupu (pokazatelju ispravnog rada). Dakle, pripadnost elementa skupu je krajnje distinktna (ili jeste ili nije član skupa), odnosno, brodsko postrojenje je pouzdano ili nepouzvano. Fazi skup je, u

tom smislu, generalizacija klasičnog skupa jer se pripadnost elementa skupu može okarakterisati brojem iz intervala  $[0,1]$ . Dakle, **funkcija pripadnosti (membership function) fazi skupa preslikava svaki element univerzalnog skupa u ovaj interval realnih brojeva.** Jedna od najvećih razlika između klasičnih i fazi skupova i jeste u tome što klasični skupovi uvek imaju jedinstvenu funkciju pripadnosti, dok za fazi skup postoji beskonačno mnogo različitih funkcija pripadnosti kojima se on može opisati. Ova činjenica omogućava fazi sistemima da se prilagođavaju na odgovarajući način situacijama u kojima se primenjuju. To je naglasio još *Lotfi Zade* definišući fazi skupove, s posebnom napomenom da se svaka oblast može fazifikovati i, shodno tome, generalizovati do tada konvencionalan klasičan (*crisp*) pristup teoriji skupova. Na taj način od neuralnih mreža, genetičkih algoritama, teorije stabilnosti, prepoznavanja oblika i matematičkog programiranja možemo dobiti fazi neuralne mreže, fazi genetičke algoritme, fazi prepoznavanje oblika, fazi teoriju stabilnosti i fazi matematičko programiranje. Prednost ovakve fazifikacije se sastoji u višem nivou generalizacije i iskazivanja, s većom mogućnošću modelovanje realnih problema specifičnom metodologijom za analizu tolerancije u nepreciznostima.

Fazi logika je po svojoj prirodi vrlo primerena metodama za prepoznavanje oblika, iz jednostavnog razloga što su pojmovi klasa, klastera i klasifikacije često subjektivne prirode definisani nenumeričkim atributima. Fazi logika se u proces prepoznavanja oblika može uvesti na dva načina. Jedan od njih je fazifikacijom prostora u kome se definiše vektor obeležja, dok je drugi vezan za fazifikaciju klasifikatora.

Teorija fazi skupova (rasutih, rasplnutih skupova) predstavlja pogodan matematički aparat za modeliranje različitih procesa u kojima dominiraju neizvesnost, višeznačnost, subjektivnost, neodređenost itd. Prvi rad posvećen pojmu rasutih skupova objavio je 1965. godine, američki profesor Lotfi Zadeh. To je ujedno ključni razlog što se pomenuti profesor smatra tvorcem teorije fazi (fuzzy, odnosno rasutih) skupova. Od tog perioda do današnjih dana, u svetu je objavljeno na stotine radova i održano mnogo naučnih skupova posvećenih razvoju teorije fazi sistema i njihovoj praktičnoj primeni. Ustanovljen je i specijalizovani svetski naučni časopis iz ove oblasti, pod nazivom "Fuzzy Sets and Systems".

Za proteklih dvadesetak godina fazi sistemi su u velikoj meri postali zamena konvencionalnim tehnologijama u velikom broju naučnih aplikacija i inženjerskih sistema, naročito u oblasti upravljanjima sistemima i prepoznavanju oblika. Mogućnost upotrebe fazi logike je u vrlo raznorodnim komercijalnim aplikacijama i industrijskim sistemima. Mogućnosti primene je i u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja, kao što su: brodski motori, merni instrumenti, kamere s autofokusiranjem, klimauređaji, navigacioni uređaji, kompresori i mnogi drugi dovoljan su dokaz velike primenljivosti ovakve tehnike. Fazi tehnologija je u formi aproksimativnog rezonovanja takođe našla primenu u informacionim tehnologijama, gde se koristi kao podrška pri odlučivanju, kao i u ekspertskim sistemima.

Fazi logika pokriva subjektivnost ljudskog mišljenja, osećanja, jezika, dok verovatnoća pokriva objektivnu statistiku u prirodnim naukama. S druge strane, fazi modeli i modeli na bazi verovatnoće u sebi nose drugačiji vid informacija: fazi funkcija pripadnosti predstavlja sličnost objekata u kontekstu neprecizne definicije osobina, dok verovatnoća daje informaciju o frekvenciji ponavljanja.

Jedna od najvažnijih osobina fazi logike jeste njena mogućnost da izrazi stepen neodređenosti u čovekovom mišljenju i njegovu subjektivnost. Otuda su najčešći slučajevi kada se oseća velika potreba za fazi logikom okarakterisani nepostojanjem matematičkog modela, ili zbog toga što je suviše komplikovano doći do njega, ili zbog toga što je suviše komplikovano baratati njime u realnom vremenu; dalje su to slučajevi kada se radi sa vrlo visokim nivoom šuma ambijenta, a neophodno je koristiti jeftine senzore, pa je nužno uključiti čovekovu interakciju i njegovu intuiciju; to su takođe situacije kada se projektuje ekspertski sistem, pri čemu funkcije pripadnosti na odgovarajući način treba da opišu valjanost pojedinih svojstava. Otuda je fazi logika našla primenu u teoriji upravljanja, prepoznavanju oblika, kvantitativnoj analizi, **ekspertskim sistemima za dijagnosticiranje**, planiranje i predikciju, informacionim sistemima itd.

Pre svega, teorija *fazi skupova* omogućava tretiranje nedovoljno preciznih pojava koje se ne mogu modelirati samo teorijom verovatnoće ili intervalnom matematikom.

Prema tome, neodređenost kao pojam se može posmatrati kroz sledeće kategorije:

- kada dati uslovi koji karakterišu pojam ne određuju jedinstveno očekivani rezultat, takve pojave se obično modeliraju teorijom verovatnoće;
- kada nije moguće (a nije ni potrebno) precizno znati posmatrane vrednosti, ovakve neodređenosti se obično tretiraju intervalnom matematikom.

## 5.1. Osnove teorije grubih skupova

Osnovna pretpostavka u teoriji grubih skupova je da se svaki predmet (objekat) procesa povezuje s nekom informacijom (podatkom). To znači da je svaki objekat prikazan pomoću određenih informacija o njemu. Više objekata opisanih istom informacijom su plauzibilni (međusobno slični), odnosno ne mogu se međusobno razlikovati s obzirom na dostupne informacije. Relacija generisana na taj način naziva se relacija **plauzibilnosti** (nerazdvojivosti objekata) i ona predstavlja matematičku osnovu teorije grubih skupova.

Nakon definisanja relacije plauzibilnosti, problem teorije grubih skupova se definiše na sledeći način:

Pretpostavlja se da se posmatra **konačan skup objekata**  $U$ , koji se naziva Univerzum i **binarna relacija**  $I$  nad  $U$ , koja se naziva **relacija plauzibilnosti (nerazdvojivosti objekata)**. Ta relacija može da bude jednačina ili nejednačina. Relacija  $I$  treba da objasni činjenicu da je naše znanje o elementima posmatranog univerzuma ograničeno i da smo zato u nemogućnosti da ih razlikujemo. To znači da ne možemo operisati pojedinim elementima (objektima) već skupovima sličnih objekata, koji su s matematičke tačke gledišta klase ekvivalencije relacije  $I$ .

### 5.1.1. Osnovne operacije teorije grubih skupova

Bilo koji skup plauzibilnih objekata na osnovu poznatih informacija naziva se elementarni skup. Bilo koja unija nekih elementarnih skupova ili pripada određenim skupovima, ili, u protivnom, to je grubi skup. Znači, svaki grubi skup sačinjavaju objekti koji se ne mogu sa sigurnošću svrstati u članove skupa ili njegovih komplementa. To

znači da se ti objekti ne mogu ispravno svrstati u bilo koji određeni skup korišćenjem raspoloživih znanja (informacija).

Pristup teorije grubih skupova ovaj problem rešava pretpostavkom da se bilo koji neodređeni objekat može opisati parom određenih pojmova koji se nazivaju donja i gornja aproksimacija. Donja i gornja aproksimacija su dve osnovne operacije u teoriji grubih skupova. *Donja aproksimacija* se sastoji iz svih objekata koji sigurno pripadaju skupu, a *gornja aproksimacija* sadrži sve objekte koji mu verovatno pripadaju (oni koji sigurno pripadaju i oni za koje se ne može sa sigurnošću tvrditi da pripadaju). Razlika između gornje i donje aproksimacije čini *graničnu oblast* neodređenog pojma (objekta). Matematički iskazano, ovi pojmovi se definišu na sledeći način (Pawlak, Z., "Rough Set Approach to KnowledgeBased Decision Support", EURO XIV Conference Jerusalem, Jul 1995):

Neka je  $X \subseteq U$ , *gornja aproksimacija*  $I^*(X)$  i *donja aproksimacija*  $I_*(X)$  definišu se kao:

$$I^*(X) = \left\{ X \in U : I(X) \cap X \neq \emptyset \right\}$$

$$I_*(X) = \left\{ X \in U : I(X) \subseteq X \right\}$$

pri čemu je  $I(X)$  skup svih plauzibilnih objekata sa objektom  $X$ .

**Granična oblast objekta  $X$ :**

$$BN_i(X) = I^*(X) - I_*(X).$$

Ako je  $BN_i(X) = \emptyset$ , skup je precizan; u suprotnom, ako je  $BN_i(X) \neq \emptyset$ , skup je grub prema I.

**Grubost (neodređenost) skupa** iskazuje se brojno *koeficijentom tačnosti aproksimacije* objekta  $X$ :

$$a_i(X) = \frac{|I_*(X)|}{|I^*(X)|},$$

pri čemu je  $|X|$  kardinalnost skupa  $X$ .

Ako je  $\alpha_i(X) = 1$ , skup je precizan; u suprotnom, ako je  $\alpha_i(X) < 1$ , skup je grub prema I.

### 5.1.2. Funkcija grube pripadnosti

Prema prethodno izloženom, u teoriji grubih skupova postoje elementi (objekti) univerzuma koji se ne mogu sa sigurnošću svrstati u elemente nekog određenog skupa, i koji čine grubi skup. Zbog toga, da bi se problem nesigurnosti otklonio treba uvesti funkciju pripadnosti elemenata grubom skupu, koja se naziva *funkcija grube pripadnosti*.

**Funkcija grube pripadnosti** objekta  $X$  grubom skupu se definiše na sledeći način (Pawlak, Z., "Rough Set Approach to KnowledgeBased Decision Support", EURO XIV Conference Jerusalem, Jul 1995):

$$m_X^i(X) = \frac{|X \cap I(X)|}{|I(X)|}.$$

Ako je  $\mu_X^i(X) = 0$ ,  $X$  ne pripada grubom skupu; zatim, ako je  $\mu_X^i(X) = 1$ ,  $X$  pripada grubom skupu; ako je  $0 < \mu_X^i(X) < 1$ ,  $X$  verovatno pripada grubom skupu.

Uz pomoć funkcije grube pripadnosti moguće je definisati aproksimacije i graničnu oblast grubog skupa na sledeći način:

$$I^*(X) = \left\{ X \in U : m_X^i(X) > 0 \right\}$$

$$I^*(X) = \left\{ X \in U : m_X^i(X) = 1 \right\}$$

$$BN_i = \left\{ X \in U : 0 < m_X^i(X) < L_1 \right\}.$$

Nakon definisane funkcije grube pripadnosti, u nastavku se prikazuju osnovni problemi redukcije znanja.

### 5.1.3. Redukcija znanja i zavisnosti

Da bi se izvršila pravilna klasifikacija posmatranih objekata u određene skupove, obično se koristi više informacija, odnosno atributa. To znači da se ne posmatra samo jedna, već čitava familija relacija plauzibilnosti (nerazdvoljivosti objekata)  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  nad univerzumom  $U$ . Teoretski, presek skupova relacija ekvivalencije  $I_1, I_2, \dots, I_n$  takođe je relacija ekvivalencije (Pawlak, Z., "Rough Set Approach to KnowledgeBased Decision Support", EURO XIV Conference Jerusalem, Jul 1995):

$$\cap I = \bigcap_{i=1}^n I_i.$$

U ovom slučaju elementarni skupovi su klase ekvivalencije relacije ekvivalencije  $\mathcal{C}I$ . S obzirom na to da elementarni skupovi određuju naše znanje o univerzumu, postavlja se pitanje da li se neki atributi po kojima klasifikujemo objekte mogu izbaciti a da se ne naruši plauzibilnost? To je moguće i štaviše poželjno. Pa tako, najmanji podskup  $I'$  skupa  $I$ , takav da važi  $\mathcal{C}I = \mathcal{C}I'$ , naziva se **redukcija**. Nad bilo kojim univerzumom moguće je izvršiti više redukcija.

Takođe, postavlja se pitanje **odnosa (zavisnosti)** između relacija ekvivalencije u familiji  $I$ . Relacija plauzibilnosti  $I$  zavisi od relacije plauzibilnosti  $I'$  ako je svaka klasa ekvivalencije  $I'$  uključena u neku klasu ekvivalencije  $I$ :

### 5.1.4. Faktor verodostojnosti

Do sada je implementirano više sistema za podršku odlučivanju čiju osnovu čini teorija grubih skupova. Sa računarske tačke gledišta, u osnovi teorije grubih skupova su tabele podataka (tabele odlučivanja). Kolone tabela su atributi (stanja ili odluke), a redovi su elementi (objekti) posmatranja. U tabeli se nalaze vrednosti atributa za svaki

posmatrani element. Svaki red tabele posmatra se kao posebna informacija o određenom elementu.

Svaka tabela odlučivanja može se prikazati kao algoritam odlučivanja koji se sastoji iz pravila odlučivanja oblika 'IF...THEN.. '.

Prilikom rešavanja problema veoma često se sreće situacija kada su za dva ili više posmatranih elemenata uslovi (vrednosti atributa stanja) isti, ali su odluke (vrednosti atributa odluke) različite, pa se ne može doneti ispravna odluka primenom ovih pravila. Ova pravila se nazivaju nekonzistentna (nesigurna) pravila, dok su ostala konzistentna (sigurna) pravila. Da bi se rešio problem nekonzistentnih pravila, svakom pravilu se pridružuje tzv. **faktor verodostojnosti**, koji računa verodostojnost svake moguće odluke predložene nekim pravilom. Faktor verodostojnosti se može definisati, između ostalog preko funkcije pripadnosti ( $\mu_x^i(x)$ ).

Neka  $\delta(x)$  označava pravilo odlučivanja pridruženo objektu  $x$ , pa se **faktor verodostojnosti** definiše na sledeći način (Pawlak, Z., "Rough Set Approach to KnowledgeBased Decision Support", EURO XIV Conference Jerusalem, Jul 1995):

$$C(d(X)) = \begin{cases} 1 & \text{za } m_x^i(x) = 0 \text{ ili } 1 ; \\ m_x^i(x) & \text{za } 0 < m_x^i(x) < 1 \end{cases}$$

pri čemu je  $\mu_x^i(x)$  definisano formulom (5.1).

Za svako konzistentno pravilo vrednost faktora verodostojnosti će biti jednaka jedinici, a vrednost faktora verodostojnosti za nekonzistentna pravila biće jednaka vrednosti funkcije pripadnosti tog elementa posmatranom skupu, što znači između nula i jedan. Što je vrednost faktora verodostojnosti bliža jedinici, to je pravilo verodostojnije.

### 5.1.5. Primena teorije grubih skupova

Teorija grubih skupova uspešno se primenjuje za analiziranje i rešavanje mnogih problema odlučivanja u različitim oblastima, kao što su: ekonomija, lingvistika, baze podataka, medicina, farmakologija, inženjerstvo i dr. Kod problema odlučivanja svi objekti koji se analiziraju opisuju se uređenim parom (atribut, vrednost). Svi raspoloživi podaci smeštaju se u odlučujuće tabele, tako da je u svakom retku opisan jedan objekat, a u svakoj koloni (stupcu) po jedan atribut. Atributi su podeljeni na uslovne i odlučujuće. Važna stvar je redukcija atributa, tj. eliminacija atributa iz odlučujuće tabele. Redukcija omogućava brži i lakši rad prilikom rešavanja zadatka i ona se koristi samo u slučajevima kada ne narušava kvalitet aproksimacije.

Ulazni podaci mogu biti istorijski (uzeti iz prakse) ili simulirani (izmišljeni), i mogu biti kvantitativne i kvalitativne prirode. Izlazni podaci su odlučujuća pravila u obliku iskaza "ako... onda...", koja mogu biti egzaktna ili aproksimativna. Na osnovu njih donose se odluke koje se odnose na novoposmatrane objekte. Osnovni problemi kojima se bavimo kada rešavamo neki zadatak korišćenjem teorije grubih skupova su:

- Ø opisivanje svih objekata pomoću datih vrednosti atributa,
- Ø izračunavanje gornje i donje aproksimacije,
- Ø ispitivanje zavisnosti između atributa,
- Ø redukcija atributa,



- Ø izdvajanje najznačajnijih atributa,
- Ø izvođenje odlučujućih pravila,
- Ø donošenje odluka, primenom odlučujućih pravila na nove objekte.

Posmatra se jedno brodsko postrojenje koje poseduje šest kompresora. Potrebno je pomoću teorije grubih skupova odrediti koji kompresor ima dobar nivo sigurnosti rada, a koji nema. Tabela 5.1. predstavlja tabelu odlučivanja, čiji redovi predstavljaju posmatrane kompresore, a kolone (stupci) attribute. Prva četiri atributa su atributi stanja, a peti atribut je atribut odlučivanja.

Tabela 5.1. Tabela odlučivanja

kompresori	radi u jednoj smeni	ima povremen zastoj u radu	iskorišćenost kapaciteta	dobar nivo sigur. rada
S1	ne	da	srednja	da
S2	da	ne	vrlo visoka	ne
S3	da	ne	visoka	da
S4	ne	da	niska	da
S5	da	ne	visoka	ne
S6	ne	ne	visoka	da

Na osnovu vrednosti atributa iz tabele odlučivanja, posmatrani kompresori mogu se razvrstati na sledeći način: kompresori S1, S4 i S6 pripadaju skupu kompresora sa dobrim nivoom sigurnosti rada, dok kompresor S2 pripada skupu kompresora koji nemaju dobar nivo sigurnosti rada. Kompresori S3 i S5, na osnovu vrednosti atributa stanja među sobom su plauzibilni, međutim, po atributu odluke, kompresor S3 pripada skupu kompresora sa dobrim nivoom sigurnosti rada, a kompresor S5 skupu kompresora koji nemaju dobar nivo sigurnosti rada. Dakle, kompresori S3 i S5 na osnovu raspoloživog znanja ne mogu se pravilno klasifikovati.

**Donja aproksimacija (I\*)** skupa "dobar nivo sigurnosti rada kompresora" je {S1, S4, S6}, **gornja aproksimacija (I\*)** ovog skupa je {S1, S3, S4, S5, S6}, a **granični slučajevi (BN<sub>i</sub>)** su {S3, S5}.

Za skup "nije dobar nivo sigurnosti rada kompresora" **donja aproksimacija** je {S2}, **gornja aproksimacija** {S2, S3, S5}, a **granični slučajevi** su takođe {S3, S5}.

**Koeficijent tačnosti (a<sub>i</sub>)** za skup "dobar nivo sigurnosti rada kompresora" ima sledeću vrednost:

$$a_1(\text{dobar}) = \frac{|\{S_1, S_4, S_6\}|}{|\{S_1, S_3, S_4, S_5, S_6\}|} = \frac{3}{5} = 0.6$$

**Koeficijent tačnosti (α<sub>i</sub>)** za skup "nije dobar nivo sigurnosti rada kompresora" ima sledeću vrednost:

$$a_1(\text{nije dobar}) = \frac{|\{S_2\}|}{|\{S_2, S_3, S_5\}|} = \frac{1}{3} = 0.333$$

**Vrednosti funkcije grube pripadnosti (μ<sup>i</sup>)** kompresora skupu "dobar nivo sigurnosti rada kompresora" jesu sledeće:



$$m_{\text{dobar}}^i(S_1) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1\}|}{|\{S_1\}|} = 1$$

$$m_{\text{dobar}}^i(S_2) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_2\}|}{|\{S_2\}|} = 0$$

$$m_{\text{dobar}}^i(S_3) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_3, S_5\}|}{|\{S_3, S_5\}|} = \frac{1}{2}$$

$$m_{\text{dobar}}^i(S_4) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_4\}|}{|\{S_4\}|} = 1$$

$$m_{\text{dobar}}^i(S_5) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_3, S_5\}|}{|\{S_3, S_5\}|} = \frac{|\{S_3\}|}{|\{S_3, S_5\}|} = \frac{1}{2}$$

$$m_{\text{dobar}}^i(S_6) = \frac{|\{S_1, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_6\}|}{|\{S_6\}|} = 1$$

pri čemu je:

$\mu^i(S_j)$   $j=1,2,3,4,5,6$ , definisano formulom (5.1).

Na osnovu vrednosti funkcija pripadnosti, za kompresore S1, S4 i S6 može se zaključiti da pripadaju skupu "dobar nivo sigurnosti rada kompresora". Vrednost funkcije pripadnosti za kompresor S2 jednaka je nuli, što ukazuje da ovaj kompresor sigurno ne pripada skupu "dobar nivo sigurnosti rada kompresora". Vrednosti funkcija pripadnosti za kompresore S3 i S5 je 0,5, što kazuje da se ova dva kompresora ne mogu sa sigurnošću svrstati ni u jedan od navedenih skupova.

Nakon ovih izračunavanja, pristupa se redukciji skupa atributa, kojom se ispituje da li su svi navedeni atributi potrebni za razvrstavanje posmatranih objekata. Redukcija je sprovedena uz pomoć softverskog paketa. Početnih pet atributa redukovano je na sledeća tri atributa: "rad u jednoj smeni", "neiskorišćenost kapaciteta" i "dobar nivo sigurnosti rada". Ovi atributi su dovoljni za pravilno razvrstavanje posmatranih kompresora u skupove "dobar nivo sigurnosti rada kompresora" i "nije dobar nivo sigurnosti rada kompresora". Atribut "ima povremenih zastoja u radu" redukcijom se odbacuje jer njegove vrednosti ne omogućuju razlikovanje posmatranih kompresora.

Redukcijom početna tabela odlučivanja (tabela 5.1) svodi se na novu tabelu odlučivanja, prikazanu tabelom 5.2.

Tabela 5.2. Redukovana tabela odlučivanja

kompresori	radi u jednoj smeni	iskorišćenost kapaciteta	dobar nivo sigur. rada
S1	ne	srednja	da
S2	da	vrlo visoka	ne
S3	da	visoka	da
S4	ne	niska	da
S5	da	visoka	ne
S6	ne	visoka	da

Tabela odluka može se predstaviti sledećim algoritmom odlučivanja:  
 IF (rad u jednoj smeni, ne) & (iskorišćenost kapaciteta, srednja) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, da) IF (rad u jednoj smeni, da) & (iskorišćenost kapaciteta, vrlo visoka) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, ne) IF (rad u jednoj smeni, da) & (iskorišćenost kapaciteta, visoka) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, da) IF (rad u jednoj smeni, ne) & (iskorišćenost kapaciteta, niska) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, da) IF (rad u jednoj smeni, da) & (iskorišćenost kapaciteta, visoka) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, ne) IF (rad u jednoj smeni, ne) & (iskorišćenost kapaciteta, visoka) - THEN (dobar nivo sigurnosti rada, da).

Analizom algoritma odlučivanja uočava se da treće i peto pravilo imaju iste uslove, a različite odluke, jer su ta pravila odlučivanja izvedena za kompresore S3 i S5. Ova pravila se nazivaju nekonzistentnim, dok se ostala pravila nazivaju konzistentnim pravilima odlučivanja.

Vrednost **faktora verodostojnosti**  $C(S(x))$ , koji se izračunava za sva pravila odlučivanja, jednak je nuli za nekonzistentna pravila, a za konzistentna pravila njegova vrednost je jednaka jedinici. Postojanje nekonzistentnih pravila ukazuje da se, u razmatranom primeru, ne može doći do konačne odluke, nego do skupa mogućih odluka. Teorija grubih skupova, praktično, predlaže tehnike za generisanje optimalnog skupa pravila odlučivanja za određeni proces donošenja odluka, koji se naziva skup mogućih odluka.

Na posmatranom primeru primenjena je samo jedna od mogućnosti softverskog paketa, a to je redukcija. Imajući u vidu da pomenuti softverski paket nije krajnje korisnički orijentisan, već je otvoren sistem izvršnih "C" rutina, u toku su dalja istraživanja na njemu, kao nadgradnja u smislu kreiranja novih procedura za konkretne slučajeve.

# 6. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE I PREPOZNAVANJE TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI

## 6.1. Pojam i suština neuronskih mreža

Početak neuroračunarstva obično se vezuje za 1943. godinu i članak Warrena McCullocha i Waltera Pittsa "Logički račun ideja svojstvenih nervnoj aktivnosti". Taj članak je često citiran. Poznati naučnici kibernetičar Norbert Winer i matematičar John von Neumann su smatrali da bi istraživanja na polju računarstva, inspirisana radom ljudskog mozga, mogla biti izuzetno zanimljiva.

Početak pedesetih godina, najviše uticaja na dalji razvoj neuronskih mreža je imao rad Marvinina Minskya koji je u tom periodu konstruisao neuroračunar pod imenom Snark (1951). Frank Rosenblatt je zaslužan za otkriće jednoslojne neuronske mreže, zvane perceptron. Taj računar je mogao uspešno da podešava težinske koeficijente, međutim, nije postigao značajnije praktične rezultate. Tek krajem pedesetih godina (1957-1958), Frank Rosenblatt i Charles Wightman sa svojim saradnicima su uspeli da razviju računar pod nazivom Mark I, koji predstavlja prvi neuroračunar. Nešto posle Rosenblatta, Bernard Widrow je sa svojim studentima (najpoznatiji je Ted Hoff, kasnije tvorac mikroprocesora) razradio novi tip "neurona" - ADALINE [ADAPTivni LINearn Element, prenosna funkcija  $f(x) = x$ ] i odgovarajući zakon učenja.

Sredinom šezdesetih godina je pristup rešavanja problema neuronskih mreža okarakterisan kao pogrešan, nakon što Marvin Minsky i Seymour Papert u knjizi "Perceptrons" objavljuju matematički dokaz da jednoslojna neuronska mreža "Perceptron" ne može da nauči funkciju XOR, uz pretpostavku da dodavanjem više slojeva neurona taj problem neće biti prevaziđen. Tačno je da neuron nije u stanju da izvede pomenutu funkciju, ali za iole složeniju mrežu od nekoliko neurona to predstavlja veoma jednostavan zadatak. Njihov dokaz je diskreditovao istraživanja neuronskih mreža, a finansiranja su preusmerena na druge oblasti [veštačke inteligencije](#).

Između 1967. i 1982. godine pojavljuju se istraživači koji daju značajan doprinos razvoju oblasti neuronskih mreža, kao što su Teuvo Kohonen, Kunihiko Fukushima i Stephen Grossberg. Naročito se istakao Teuvo Kohonen, koji je otkrio nekoliko tipova neuronskih mreža, koje su po njemu dobile naziv. U tom periodu se pojavio i "backpropagation algoritam". U radu na tom algoritmu su se posebno istakli sledeći naučnici: Amari (1967), koji dodaje unutrašnje slojeve perceptronskoj mreži; Bryson i Ho (1969) razvijaju algoritam sličan backpropagation algoritmu; Werbos (1974) nezavisno od prethodnika, razvija backpropagation algoritam; Parker (1982) unapređuje backpropagation algoritam. Početkom osamdesetih, američka vojna agencija DARPA (Agencija za odbrambene istraživačke projekte) postala je zainteresovana za NM i finansiranja su ponovo započela. Sredinom osamdesetih godina, poznati fizičar John Hopfield dao je veliki doprinos popularizaciji neuronskih mreža, objavljujući rad u kome je napravio paralelu između neuronskih mreža i određenih fizičkih sistema. Početkom

devedesetih, Bart Kosko u knjizi "Neural Networks and Fuzzy Systems" dokazuje da neuronske mreže i fazi logika opisuju isti skup problema i samim tim otvara novu oblast, koja se naziva soft computing (meko računarstvo).

Rumel, Hinton i Williams (1986) dokazuju veliku primenljivost i potencijal backpropagation algoritma. Krajem osamdesetih i početkom devedesetih, neuronske mreže i neuroračunarstvo se uvodi kao predmet na nekoliko elitnih univerziteta u SAD, dok se danas neuronske mreže gotovo mogu sresti na svim univerzitetima. Iako su neuronske mreže imale neobičnu istoriju, one su još u ranoj fazi razvoja. Možda se sad može reći da smo na kraju početka. Danas neuronske mreže nalaze veoma široku primenu u različitim praktičnim oblastima.

Postoje dve kategorije neuronskih mreža: veštačke i biološke neuronske mreže. Predstavnik bioloških neuronskih mreža je nervni sistem živih bića. Veštačke neuronske mreže su po strukturi, funkciji i obradi informacija slične biološkim neuronskim mrežama, ali su veštačka tvorevina. Jedna od važnijih osobina neuronskih mreža je njihova sposobnost da uče na ograničenom skupu primera.

U ovoj disertaciji, kada se govori o neuronskim mrežama, misli se prvenstveno na "veštačke neuronske mreže" (engleski termin Artificial Neural Networks, skraćeno ANN), zbog toga što se uglavnom govori o modelima neuronskih mreža realizovanim na računarima. U stručnoj literaturi nije redak slučaj da se izostavlja reč "veštačke" iako se misli na njih. Biološke neuronske mreže su mnogo komplikovanije od matematičkih modela koji se koriste za veštačke neuronske mreže. Neuronske mreže predstavljaju sistem sastavljen od veoma velikog broja jednostavnih elemenata za obradu podataka. Ovakvi sistemi su sposobni za prikupljanje, memorisanje i korišćenje eksperimentalnog znanja. Ne postoji jedinstvena definicija neuronskih mreža. Međutim, većina ljudi bi neuronske mreže definisala na sledeći način:

Neuronska mreža je sistem sastavljen od više jednostavnih procesora (jedinica, neurona), svaki od njih ima lokalnu memoriju u kojoj pamti podatke koje obrađuje. Te jedinice su povezane komunikacionim kanalima (vezama). Podaci koji se ovim kanalima razmenjuju su obično numerički. Jedinice obrađuju samo svoje lokalne podatke i ulaze koje primaju preko konekcije. Ograničenja lokalnih operatora se mogu otkloniti tokom treninga.

Mnoge neuronske mreže su nastale kao modeli bioloških neuronskih mreža. Istorijski gledano, inspiracija za razvoj neuronske mreže proizilazi iz želje da se konstruiše veštački sistem sposoban za prefinjeno, možda "inteligentno", izračunavanje, na sličan način kao što to ljudski mozak rutinski izvodi. Potencijalno, neuronske mreže nam pružaju mogućnost za razumevanje rada ljudskog mozga. Veštačke neuronske mreže su kolekcija matematičkih modela koji simuliraju neke od posmatranih osobina bioloških nervnih sistema i povlače sličnosti sa prilagodljivim biološkim učenjem. Sačinjene su od velikog broja međusobno povezanih neurona (obrađujućih elemenata), koji su, slično biološkim neuronima, povezani svojim vezama koje sadrže propusne (težinske) koeficijente, po ulozi slične sinapsama.

Učenje se kod bioloških sistema obavlja putem regulisanja sinaptičkih veza koje povezuju aksone i dendrite neurona. Učenje tipičnih događaja putem primera se ostvaruje preko treninga ili otkrića, do tačnih setova podataka ulaza-izlaza koji treniraju algoritam ponavljanjem, podešavajući propusne (težinske) koeficijente veza (sinapse). Ove veze memorišu znanje neophodno za rešavanje specifičnog problema. Biološki neuron - ćelija

koja prima informacije od drugih neurona putem dendrita-obrađuje ih, a zatim šalje impuls putem aksona i sinapsi drugim neuronima u mreži. Učenje se odvija promenom jačine sinaptičkih veza. Milioni neurona u mreži mogu paralelno da obrađuju informacije. (NeuroBook2, Artificial NN).

Međutim, opšti je utisak da su neuronske mreže za sada najzrelija i najprimenljivija tehnologija u teorijskim razmatranjima problematike klasifikacije, odnosno prepoznavanja oblika, konkretno donošenja odluka u oblasti pouzdanosti.

Neuronske mreže vrlo se dobro ponašaju upravo na težim klasifikacijskim problemima, kod kojih je teško ili nemoguće koristiti druge metode, poput stabla odlučivanja ili metoda indukcije, koje "presecaju" prostor primera linearnim funkcijama (obično paralelno na ose atributa). Klasifikacija neuronskim mrežama se pokazala vrlo dobrom upravo na težim klasifikacionim problemima, kod kojih je teško ili nemoguće koristiti klasične tehnike simboličkog učenja. Neuronske mreže mogu izraziti vrlo složene granice među klasama, za razliku od klasičnih tehnika koje presecaju univerzum linearnim funkcijama, i to obično paralelno s osama univerzuma. Osim toga, neuronske mreže su dobro prilagođene klasifikaciji u uslovima šuma u podacima.

Jedan od nedostataka neuronskih mreža je relativno spor i zahtevan proces indukcije modela u poređenju sa klasičnijim tehnikama, čak do nekoliko redova veličine (J. R. Quinlan, "Comparing connectionist and symbolic learning methods", in *Computational Learning Theory and Natural Learning Systems, Vol.1*, MIT Press, Cambridge, 1994).

Neuronske mreže (Neural Networks - NN) predstavljaju novu generaciju sistema za procesuiranje informacija. Pokazuju osobinu učenja, memorisanja i generalizacije na osnovu podataka kojim se obučavaju. Koriste se pri klasifikaciji oblika, aproksimaciji funkcija, optimizaciji, vektorskoj kvantizaciji, klasterizaciji podataka. Neuronske mreže se sastoje od velikog broja gusto povezanih *procesorskih elemenata* (takozvanih čvorova, 'nodes') koji uobičajeno rade u paraleli (jednovremeno) a organizovani su po nekim regularnim arhitekturama. Neuronska mreža može modulirati ponašanje (bioloških) neurona u mozgu, to su 'veštačke' neuronske mreže (Artificial Neural Networks - ANN). Na primer, ljudski mozak se sastoji od otprilike  $10^{11}$  neurona različitih tipova.

Neuronske mreže karakterišu, pored značajnih prednosti, i određeni nedostaci kada su u pitanju problemi klasifikacije oblika pouzdanosti, problematika kojom se bavi disertacija.

Značajan nedostatak je i činjenica da klasifikacioni model reprezentovan neuronskom mrežom nije eksplicitno izražen, u obliku strukturnog opisa važnih odnosa među varijablama. Implicitan model koji skriva odnose varijabli u mrežnoj strukturi i velikom broju težinskih vrednosti nije razumljiv ni podložan verifikaciji ili interpretaciji u okviru domene izvornog klasifikacionog problema.

Jedan od nedostataka neuronskih mreža je i relativno spor i zahtevan proces "učenja" modela (optimizacije težinskih faktora), nasuprot jednostavnijim metodama (odnos prema metodama kao što je stablo odlučivanja, koja je veličine do drugog, odnosno trećeg reda). Pored toga, treba imati na umu da neuronske mreže ne nude kao konačni model podataka razumljiv odnos između važnih varijabli. Umesto toga, model, dakle neuronska mreža, jeste implicitan, tj. odnosi između varijabli skriveni su u mrežnoj strukturi i težinskim faktorima veza neuronske mreže.

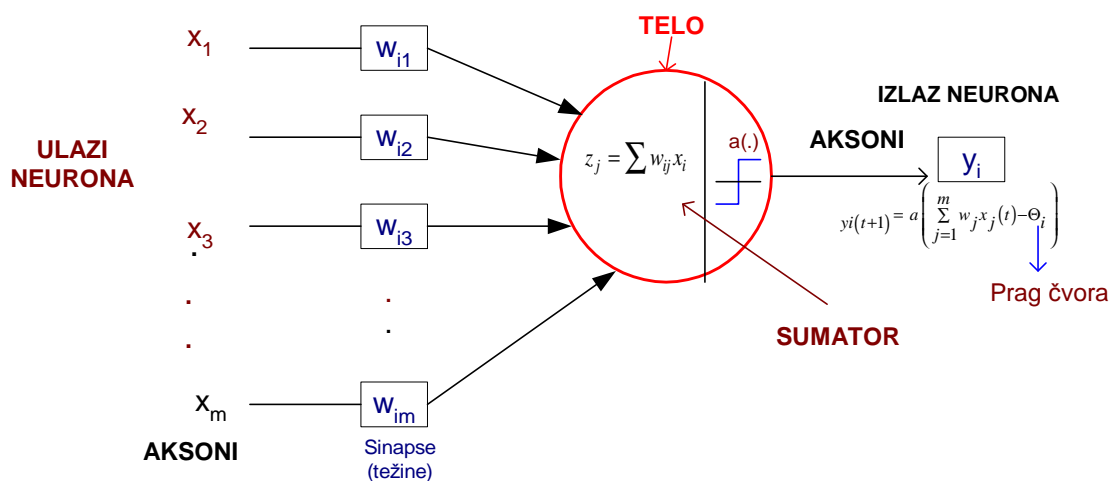
Neuronske mreže spadaju u kategoriju paralelnog asinhronog distribuiranog procesiranja. Mreža je tolerantna na oštećenje ili ispadanje iz rada relativno malog broja neurona. Takođe, mreža je tolerantna na prisustvo šuma u ulaznom signalu. Svaki memorijski element je delokalizovan – smešten u celoj mreži i ne možemo identifikovati deo u kome se on čuva. (Keinosuke Fukunaga, *Introduction to statistical pattern recognition*, Academic Press, 1990. C.T. Lin and C.S. Lee, *Neural Fuzzy Systems: A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems*, Prentice-Hall, 1996).

Rezultat primene neuronskih mreža (inteligentne analize podataka) model je kojim su izražene pravilnosti uočene u posmatranim podacima. U praksi se nebrojeno puta potvrdilo nepisano pravilo da su modeli onoliko dobri koliko i osoba koja ih interpretira. Zbog toga bi čak i sami korisnici modela trebalo da imaju osnovnu predstavu o načinu njihovog nastajanja, kako bi mogli ceniti moć, ali i ograničenja inherentna tehnologiji neuronskih mreža (inteligentne analize podataka). Odluke ne donose modeli, već ljudi. Da bi mogli kvalitetno doprineti donošenju odluka, izvedene modele treba razumeti. Navedene osobine neuronskih mreža su poslužile kao osnova za razvoj ideje o njihovoj ugradnji u brodska postrojenja, kako bi doprinele povećanju sigurnosti u donošenju odluka u prepoznavanju oblika pouzdanosti.

## 6.2. Osnovni modeli i pravila odlučivanja

Model neuronske mreže određuju tri svojstva:

- Prvo, model elemenata je za procesuiranje čvorova;
- Drugo, model je veza između čvorova i njihove strukture;
- Treće važno svojstvo koje definiše prirodu mreže je pravilo za obučavanje kojim se podešavaju težine na pojedinim vezama.



Slika 6.1. Struktura veštačkog neurona

Za veštački neuron se može reći da se dizajnira s idejom da oponaša osnovne funkcije biološkog neurona. Telo biološkog neurona (slika 6.1) zamenjuje se sumatorom, ulogu dendrita preuzimaju ulazi u sumator, izlaz sumatora je akson veštačkog neurona, a

uloga praga osetljivosti biološkog neurona preslikava se na tzv. aktivacione funkcije. Aktivacione funkcije mogu biti linearne i nelinearne. Kod linearnih funkcija, izlaz sumatora množi se sa nekim faktorom (pojačanjem) i tako se dobija izlaz neurona. Nelinearne aktivacione funkcije mogu poprimiti različite oblike, ali se najčešće koriste: funkcije praga osetljivosti, sigmoidalne, hiperbolične i harmonične funkcije.

Funkcije sinaptičke veze biološkog neurona s njegovom okolinom preslikavaju se na težinske faktore (pozitivan ili negativan broj), preko kojih se i ostvaruje veza veštačkog neurona s njegovom okolinom. Težinski faktori rade isto što i sinapse kod biološkog neurona: povezuju izlaze iz okoline neurona, odnosno izlaze drugih neurona s ulazima sumatora. Izlaz sumatora povezuje se na ulaz aktivacione funkcije, koja na svom izlazu generiše izlaz veštačkog neurona.

Aktivaciona funkcija je:

$$a(f) = \begin{cases} 1 & \text{za } f \geq 0 \\ 0 & \text{za } f < 0 \end{cases}$$

Tako funkcija od praga osetljivosti daje na izlazu neurona jedinicu, ako je izlaz sumatora veći ili jednak nekom zadanom broju (pragu osetljivosti), što odgovara ispaljivanju impulsa kod biološkog neurona. U suprotnom slučaju, izlaz neuron je nula (neuron nije aktivan).

### **Osobine neuronske mreže:**

- To je matematički model inspirisan biološkim nervnim sistemom;
- Sastoji se od velikog broja vrlo povezanih elemenata za procesuiranje;
- Znanje je sadržano u težinama, odnosno vezama između čvorova.

### **Neuronska mreža je paralelna distribuirana struktura za procesuiranje podataka, sa sledećim osobinama:**

- element za procesuiranje dinamički odgovara na ulazni stimulus, i pri tome je ovaj odgovor kompletno zavisn od lokalne informacije sadržane u njegovom okruženju;
- neuronske mreže ima osobinu da uči, pamti i generalizuje na osnovu obučavajućeg skupa;
- zajedničko ponašanje svih delova mreže predstavlja računarsku moć, ali to svojstvo ne sadrže pojedinačni usamljeni čvorovi.

### **Klase problema i metoda koje se koriste u neuronskim mrežama:**

- klasifikacija,
- konstrukcija,
- simulacija.

### **Vrste problema sa stanovišta klasifikacije oblika pouzdanosti brodskih postrojenja:**

- neizvesna znanja,
- neraspoloživa opažanja,
- neizvesna opažanja,
- subjektivna opažanja,
- nepotpuna opažanja,
- vremenski zavisna opažanja,



- višestruka rešenja.

Neuronske mreže su obično simulirane na tradicionalnim računarima. Prednost ovog pristupa je u tome što se računari mogu lako reprogramirati da promene arhitekturu ili pravilo učenja simulirane neuronske mreže. Računanje u neuronskoj mreži je uglavnom paralelno, tako da brzina obrade simulirane neuronske mreže može biti znatno uvećana korišćenjem paralelnih procesora.

Neuronske mreže i klasično programiranje mogu se posmatrati kao fundamentalno različiti, ali komplementarni prilazi obradi informacija. Neuronske mreže su zasnovane na transformacijama, dok je programiranje zasnovano na algoritmima i pravilima.

Neuronska mreža se može realizovati na dva načina: hardverski i softverski.

### Hardverska realizacija

Veštački neuroni su fizički međusobno povezani, oponašajući veze između bioloških neurona. Neuroni se realizuju kao jednostavna integrisana kola.

### Softverska realizacija

Neuronska mreža se obično simulira na tradicionalnim računarima, u kojima je veza između čvorova logička (virtualna).

Svaki od ovih načina realizacije neuronske mreže ima svoje prednosti i mane. Prednost hardverske realizacije je to što može da koristi mogućnost paralelnog procesuiranja informacija ukoliko se svakom neuronu u mreži dodeli po jedan procesor. Prednost softverske realizacije neuronska mreža na standardnom PC računaru je u tome što se lakše uspostavlja (i kasnije menjaju) veze između pojedinih neurona u mreži. U praksi se softverska realizacija koristi za testiranje, a konkretna realizacija koja se primenjuje u praksi može biti realizovana i hardverski, čime se dobija na brzini.

## 6.2.1. Elementi za procesuiranje

Funkcionisanje MP neurona se može proširiti na generalni model elementa za procesuiranje. Informacija koju procesuiraju čvor se može podeliti na ulazni i izlazni signal. Zapravo, vrlo važnu vezu između ulaznog i izlaznog signala u  $i$ -tom čvoru predstavlja integraciona funkcija  $f_i$  koja je pridružena posmatranom čvoru i govori o tome na koji način ulazni signali formiraju zajedničkog reprezentanta. Na primeru MP neurona, u pitanju je linearna funkcija ulaznih signala  $x_j$ :

$$f_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j - \Theta_i,$$

pri čemu je  $f_i$  prag  $i$ -tog čvora. Nešto složeniji oblici integracionih funkcija su sledeće funkcije:

**kvadratna funkcija oblika:**

$$f_i = \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j^2 - \Theta_i,$$

**sferična funkcija oblika:**



$$f_i = r^{-2} \sum_{j=1}^m (x_j - w_{ij})^2 - \Theta_i,$$

**polinomska funkcija oblika:**

$$f_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m w_{ijk} x_j x_k + x_j^a + x_k^a - \Theta_i.$$

Sledeća aktivnost elementa za procesuiranje jeste da se zbirni reprezent ulaznih signala  $f_i$  prenese do izlaza čvora u obliku izlaznog signala. Za to je zadužena takozvana aktivaciona funkcija ili funkcija prenosa  $a(f)$ . Neki uobičajeni oblici aktivacionih funkcija su sledeći:

**Step funkcija:**

$$a(f) = \begin{cases} 1 & ; f \geq 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases},$$

**Hard limiter:**

$$a(f) = \text{sgn}(f) = \begin{cases} 1 & ; f \geq 0 \\ -1 & ; f < 0 \end{cases},$$

pri čemu je  $f$  prag čvora.

**Funkcija rampe:**

$$a(f) = \begin{cases} 1 & ; f > 1 \\ f & ; 0 \leq f \leq 1. \\ 0 & ; f < 0 \end{cases}.$$

**Unipolarna sigmoidna funkcija:**

$$a(f) = \frac{1}{1 + \exp(-I f)}.$$

**Bipolarna sigmoidna funkcija:**

$$a(f) = \frac{2}{1 + \exp(-I f)} - 1,$$

pri čemu je  $\lambda$  parametar koji određuje strminu sigmoidnih funkcija. Za vrlo male vrednosti ovog parametra sigmoidna funkcija teži linearnoj, dok je za veliku vrednost parametara ova funkcija vrlo slična funkciji hard limita,  $I > 0$ .

Nelinearne integracione funkcije ulaznih signala omogućavaju kompleksne particije prostora obeležja, koje se nazivaju *granicama odluke* (po analogiji sa prepoznavanjem oblika, a zapravo označavaju termin da se mogu formirati krajnje nelinearne granice separacije između dve klase). Međutim, što je složenija integraciona funkcija, to mora biti složenija i interakcija između čvorova u neuronskoj mreži.

### 6.3. Višeslojna feedforward neuronska mreža

Pokazuje se da se jednoslojni perceptroni mogu koristiti za rešavanje problema u kojima su ulazni oblici linearno separabilni (za mrežu sa LTU čvorovima) ili linearno nezavisni (za mreže sa kontinualnim i diferencijabilnim čvorovima). Ova ograničenja perceptrona ne važe za višeslojne mreže sa skrivenim slojevima smeštenim između ulaznog i izlaznog sloja mreže. Posmatrajmo sledeći primer, kojim se jasno ilustruje ograničenje jednoslojnog perceptrona a koje može biti prevaziđeno višeslojnim perceptronom. Ovaj primer ilustruje kako se linearno neseperabilan problem može transformisati u linearno separabilan, a zatim rešiti višeslojnim perceptronom sa LTU čvorovima. Ovaj problem se u literaturi označava kao XOR problem. Data su četiri ulazna vektora sa odgovarajućim željenim izlazima:

$$\left( x^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; d^{(1)} = 1 \right); \left( x^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; d^{(2)} = -1 \right)$$

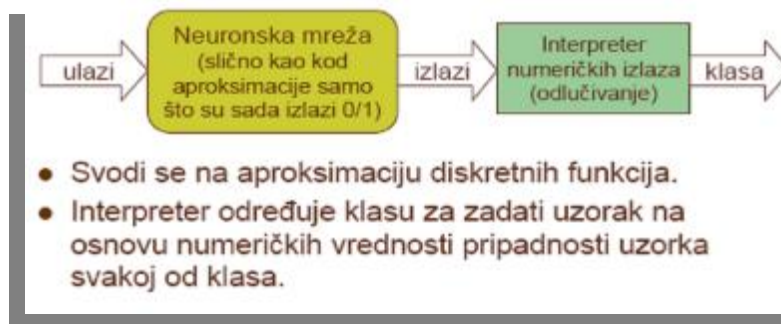
$$\left( x^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; d^{(3)} = -1 \right); \left( x^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; d^{(4)} = 1 \right)$$

gde je: "0" stanje u otkazu, "1" stanje u radu.

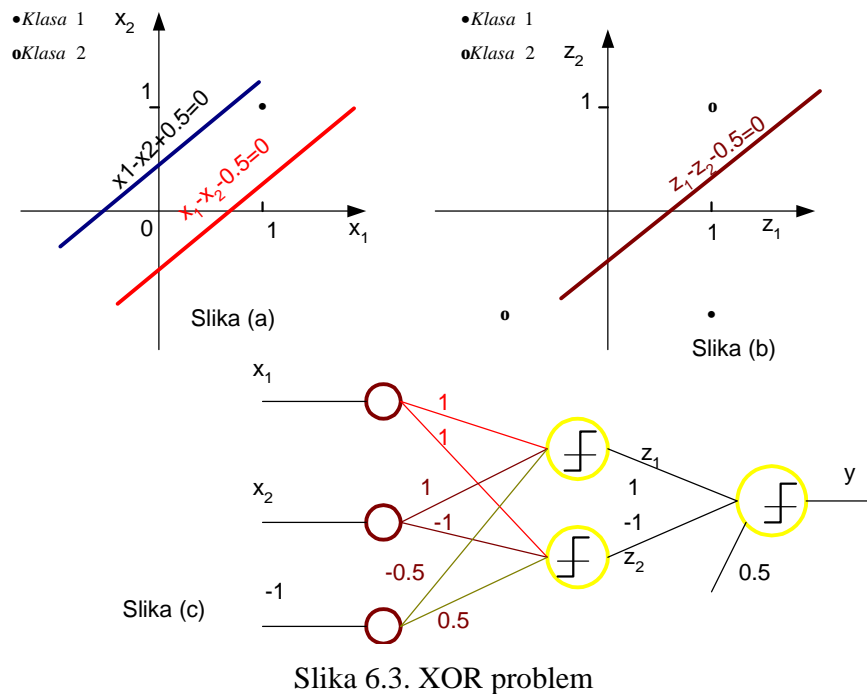
Očigledno (videti sliku 6.3 a) problem nije linearno separabilan u prostoru ulaznih vektora i potrebno je da se upotrebne dve linearne diskriminacione funkcije kako bi se ulazni vektori valjano klasifikovali.

#### Vrste neuronskih mreža kao klasifikatori za prepoznavanje oblika

- Postoje dve vrste klasifikatora koji koriste algoritme za grupisanje:
- klasifikatori koji uče pod nadzorom (engl. supervised learning)
  - klasifikatori koji uče bez nadzora (engl. unsupervised learning).



Slika 6.2. Neuronska mreža kao klasifikator za prepoznavanje oblika pouzdanosti



Ako se koriste čvorovi s aktivacionom funkcijom tipa praga (slika 6.3. a), izlazi odgovarajućih izlaznih čvorova će biti:

$$z_1 = \text{sgn}(x_1 - x_2 + 0.5) \quad i \quad z_2 = \text{sgn}(x_1 - x_2 - 0.5).$$

Neka ova dva čvora ne budu izlazni već neka čine skriveni sloj. Tada će oblici u novom  $z_1 - z_2$  prostoru dobiti sledeću formu (slika 6.3. b):

$$\left( z^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}; d^{(1)} = 1 \right); \left( z^{(2)} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix}; d^{(2)} = -1 \right);$$

$$\left( z^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}; d^{(3)} = -1 \right); \left( z^{(4)} = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}; d^{(4)} = 1 \right).$$

i očigledno da sada u novom prostoru ovi oblici postaju linearno separabilni i linearna diskriminaciona funkcija se dosta proizvoljno može izabrati, recimo u obliku

$$z_1 - z_2 - 0.5 = 0$$

a definitivni izlaz iz višeslojnog perceptrona (slika 6.3. c) postaje:

$$y = \text{sgn}(z_1 - z_2 - 0.5).$$

Ovaj primer je samo pokazao da se višeslojnim perceptronom mogu rešavati problemi koje jednoslojni perceptron ne može rešiti. Ali glavne mogućnosti neuralnih mreža s ovakvom strukturom će se primenjivati pomoću algoritma za obučavanje tih struktura koji je nazvan *back-propagation* ili **algoritam za obučavanje propagacijom greške unazad**.

# 7. SIMULACIONE METODE U PROCESU DONOŠENJA ODLUKA PREPOZNAVANJA TIPA FUNKCIJE POUZDANOSTI

## 7.1. Definisanje pojma simulacije

Sam termin simulacija (lat. *simulatio*) mogao bi se prevesti kao pretvaranje ili ponašanje kao da je stvarno tako.

Velike mogućnosti modernih računara, savremeni uskospecijalizovani simulacioni jezici, sniženje troškova po operaciji i veliki napredak u metodologiji simulacije vrlo brzo su proširili područje primene simulacije.

Reč *simulacija* u svakodnevnoj upotrebi opisuje različite aktivnosti, uključujući: složene video-igre, ispitivanje različitih uticaja na let novih modela aviona, deo eksperimenta u sociopsihološkim istraživanjima itd. Kada tu reč koriste računarski stručnjaci, organizatori, inženjeri, menadžeri ili statističari, obično pod simulacijom podrazumevaju izgradnju apstraktnih modela koji predstavljaju neke sisteme ili podsisteme realnog sveta, kao i obavljanje određenih eksperimenata nad njima. Posebno interesantan je slučaj kada se taj eksperiment obavlja na računaru.

U smislu u kome se danas koristi, reč "simulacija" vodi poreklo iz radova Fon Nojmana (Von Neuman) i Ulama s kraja četrdesetih godina prošlog veka. Oni su, rešavajući određene probleme veće složenosti, ustanovili da se rezultati ne mogu dobiti analitičkim putem, a izvođenje neposrednih eksperimenata bilo bi veoma skupo, te su pristupili korišćenju metode "Monte Karlo". Na taj način dolazili su do matematičkih rešenja determinističkih problema stohastičkom simulacijom. Tako dobijeni rezultati imali su raspodelu verovatnoće koja je zadovoljavala matematičke relacije datog determinističkog problema.

Nagli razvoj primene simulacije otpočeo je pojavom sve moćnijih računarskih sistema, vrlo brzo je izneo na površinu mnoge nedoslednosti u tumačenju ovog pojma, kao i brojna divergentna shvatanja ove relativno mlade naučne discipline. Karakteristično za današnje vreme je to da još uvek ne postoji opšteprihvaćena definicija pojma simulacije, mada se iz brojnih naučnih radova relativno novijeg datuma može zaključiti da se neke osnovne teorijske postavke jasno kristališu i bivaju opšteprihvaćene. Ovde će se navesti nekoliko tipičnih definicija pojma *simulacija*.

- **Simulacija** je imitacija skupa operacija, procesa ili ponašanja sistema koji se odvijaju u određenom periodu vremena.
- **Simulacija** opisuje značajne aspekte sistema kao seriju jednačina standardno uvršćenih u računarski program.
- **Simulacija** predstavlja pobuđivanje modela s odgovarajućim ulazima i posmatranje odgovarajućih izlaza.
- **Simulacija** je numerička tehnika za obavljanje eksperimenata koristeći određene tipove matematičkih i logičkih modela kojima se opisuje ponašanje poslovnog ili

tehničkog sistema (ili nekih njegovih komponenti) u datom vremenskom periodu, a posredstvom računara.

Kao što se može zaključiti, postoji veći broj definicija, koje su ne samo različite, već i međusobno isključive. Pojedine definicije ukazuju na različite pristupe autora, a razlike se uglavnom mogu pravdati veoma širokim opsegom primene simulacije.

Globalno posmatrano, proces simulacije se sastoji iz dve osnovne faze: **faze izgradnje modela** (modelovanje realnog sistema i njegova validacija) i **faze eksperimentisanja na modelu** s analizom dobijenih rezultata. Obe ove faze uključuju brojne aktivnosti, podjednako važne za uspešno izvršavanje simulacije. Ipak, mnogi autori prilikom definisanja pojma simulacije, mnogo veći značaj pridaju jednoj od navedenih faza, tako da neki veću važnost pripisuju fazi izgradnje modela, dok drugi stavljaju akcenat na samo izvršenje simulacionog eksperimenta. U okviru ove disertacije proces simulacije ćemo posmatrati kao skup svih aktivnosti, i to kako u fazi izgradnje modela, tako i u fazi analize dobijenih rezultata.

U nedostatku precizne i opšteprihvaćene definicije termina, *simulaciju* ćemo posmatrati kao korišćenje računarskih programa koji reprezentuju apstraktan model realnog sistema, radi proučavanja i analize realnog sistema (donošenja odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti) i njegovog ponašanja.

Simulacija danas dobija sve više pristalica i za istraživanje sistema za koje analitičko rešenje ponašanja nije moguće naći. Pri formulisanju novih modela postavljene su pretpostavke o sistemima koje treba opisati i o načinu rada u istraživanju ponašanja sistema. Od novih modela se traži da su u stanju da opišu nelinearne sisteme višeg reda, da se pomoću njih mogu istraživati ponašanja polazeći od bilo kojih početnih uslova i da je lako moguće istraživati uticaj promene unutrašnje sredine sistema na ponašanje.

#### **Simulacije koriste tehnologije iz ostalih područja nauka i tehnologija:**

- mreže-distribucija simulacija preko mreže;
- paralelno procesuiranje-raspodela poslova na više procesora;
- veštačka inteligencija (finite state machines, neural networks, expert systems, genetic algorithms...);
- računarska grafika;
- baze podataka.

**Opšta podela simulacije**, zavisno od načina na koji se varijable koje opisuju stanje sistema menjaju:

- **diskretne** (engl. discrete event simulation, DES) varijable stanja se menjaju istovremeno u određenim vremenskim trenucima;
- **kontinualne** (engl. continuous) varijable stanja se menjaju kontinualno, obično kroz funkciju u kojoj je vreme varijabla.

U praksi se većinom koriste obe vrste simulacija, ali jedna vrsta dominira.

## **7.2. Model i modelovanje**

Pod modelovanjem se podrazumeva proces oblikovanja, izrađivanja modela na temelju nekog uzorka. Rezultat tog procesa je određeni model. Model predstavlja apstraktni prikaz sistema i poseduje barem osnovna svojstva originala. Modelima se omogućava opisivanje složenih fenomena. Upotrebom modela ti se fenomeni rešavaju, a modeli tako postaju važno komunikaciono sredstvo ljudi koji se bave datim fenomenom. Jedna od najvažnijih funkcija modela je formulisanje novih ideja.

**Matematički model** za opisivanje realnog sistema koristi se kada je moguće apstraktno opisati sistem tako da se matematičkim metodama izvrši adekvatno modelovanje proučavanog realnog sistema. S njim se formalizovano opisuje funkcionisanje sistema i on izražava osnovne karakteristike zakonomernosti funkcionisanja sistema u određenom vremenskom intervalu posmatranja.

**Postoji više vrsta modela:**

- **mentalni modeli** – strukture koje ljudski mozak neprestano konstruiše i kojima nastoji da poveže niz činjenica s kojima se čovek susreće, pa se na osnovu njih određuje čovekovo delovanje i ponašanje;
- **materijalni modeli** – npr. model hemijske strukture molekula;
- **matematički modeli** – npr. sistem linearnih jednačina;
- **konceptualni modeli** – stvaraju se na osnovu predstave o strukturi i logici rada sistema ili problema koji se modeluje. Prikazuju se simbolima čije je značenje precizno definisano;
- **računarski modeli** – oni konceptualne modele prikazuju u obliku programa za računar.

Modelovanje je ponajpre veština, a ne nauka. Ono se može automatizovati. Pri samoj izradi modela treba biti vrlo detaljan i oprezan. Postoji nekoliko preporuka koje je poželjno poštovati pri izradi modela :

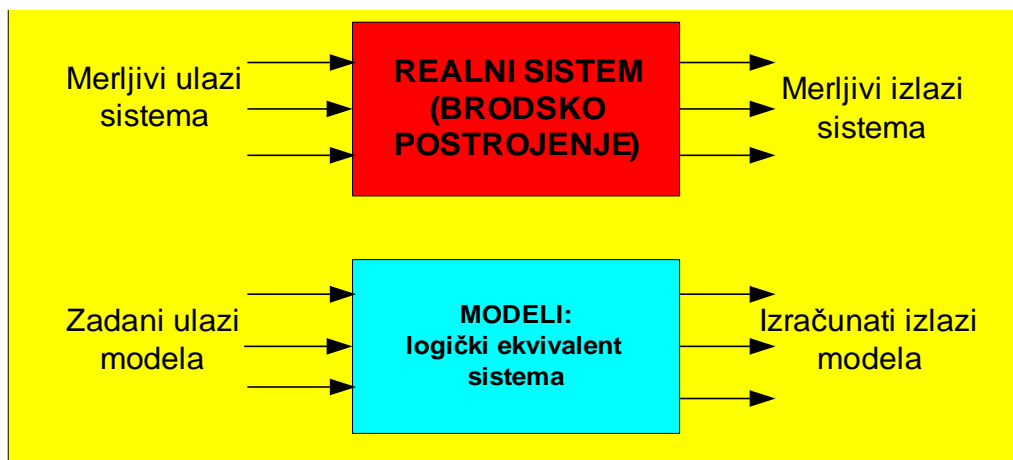
- granica sistema s okolinom mora biti odabrana tako da sistem, tj. njegov model, obuhvata samo fenomene od interesa za proučavanje;
- modeli ne smeju biti previše složeni ni detaljni, treba da sadrže samo relevantne elemente sistema;
- model ne sme ni previše pojednostaviti problem, mora sadržati sve što je relevantno;
- model se može rastaviti na više dobro definisanih i jednostavnih modula sa tačno određenom funkcijom;
- u razvoju modela preporučuje se korišćenje neke od proverenih metoda za razvoj algoritama i programa;
- potrebna je logička i kvantitativna provera ispravnosti modela.

Simulacioni modeli su modeli dinamičkih sistema. Njihovo se stanje menja tokom vremena. Oni omogućuju ispravan prikaz i efikasno izvođenje tokom pomaka vremena. Takođe, omogućuju istovremeno odvijanje aktivnosti i opisivanje procesa.

Model sistema predstavlja uprošćenu i idealizovanu (apstraktnu) sliku realnog sistema. Drugim rečima, model je opis realnog sistema sa svim karakteristikama koje su relevantne iz istraživačkog ugla posmatranja. To znači da se tokom procesa modelovanja mora izvršiti selekcija između onih elemenata i karakteristika sistema koje su značajne i koje će se obuhvatiti modelom, od drugih, irelevantnih, koje taj model neće sadržati.

Stoga se kaže da model predstavlja uprošćenu sliku sistema, te kao takav sadrži ne samo objekte realnog sistema već i određene *pretpostavke*. Koliko će model biti uprošćena slika realnog sistema zavisi, pre svega, od nivoa apstrakcije u analizi posmatranog sistema. Nivo apstrakcije u procesu modelovanje utiče na validnost modela, tj. uspešnost predstavljanja realnog sistema određenim modelom. Suviše složeni, odnosno perfektni modeli (model koji ima sposobnost da proizvede iste izlazne vrednosti za isti skup ulaznih veličina kao i realni sistem), čak i ako su mogući, gotovo po pravilu su preskupi i neadekvatni za eksperimentisanje. Stoga, opredeljujući se za nivo apstrakcije u posmatranju realnog sistema, mora se povući granica negde u sistemu, i to tako da model koji se dobije bude što vernija predstava datog sistema, ali da njegova složenost i cena ne budu ograničavajući faktori.

Takav pristup može se ilustrovati slikom 7.1:



Slika 7.1. Logički sistem – model

Do konstrukcija formalnih modela, kao na primer matematičkih modela, može se doći na tri načina:

- a) **model** je rezultat uopštavanja eksperimentalnih podataka,
- b) **model** je matematički izraz poznatih fizičkih ili drugih zakona o ponašanju sistema;
- c) **model** je rezultat originalne sinteze međusobne zavisnosti promenljivih u sistemu.

Kod složenih sistema uobičajen je kombinovani prilaz izgradnji modela, a koji će od njih biti upotrebljen zavisi od konkretnog sistema i upravljačkog zadatka. Pri tome, kod svakog prilaza postavlja se pitanje **usaglašenosti** modela i realnog sistema.

### 7.3. Simulacioni modeli

Simulacioni modeli su razvijeni i pravi smisao su dobili pojavom računara. Suština simulacije je u eksperimentisanju modelom, da bi se na osnovu toga izveli zaključci o mogućem ponašanju broskog postrojenja. Vrednost simulacionog modela proizilazi iz činjenice da on može da opiše brosko postrojenje koje se ne može opisati na drugi način, što može brzo da pruži informacije o dinamici, odnosno ponašanju broskog postrojenja koji model predstavlja. Za primenu metoda simulacija potrebno je formulisati matematički model donošenja odluka za prepoznavanje tipa funkcije pouzdanosti, zatim taj model prevesti na računarski program i pomoću računara simulirati brosko



postrojenje. Prema svojim odlikama, simulacioni modeli spadaju u kategoriju specijalizovanih modela. Model najčešće prikazuje statičko stanje broskog postrojenja, odnosno stanje u jednom momentu. Stanje broskog postrojenja se prikazuje stanjem bitnih veličina postrojenja (parametara). Pod simuliranjem se pretpostavlja praćenje stanja broskog postrojenja u vremenu. To znači da treba napraviti vremenski tok, odnosno hronologiju stanja broskog postrojenja. Takva hronologija stanja postrojenja se može napraviti na bilo koji način. Na primer u ekonomiji se često upotrebljavaju jednostavni modeli ekonomskih sistema, kojima se stanje u pojedinim momentima izračunava "ručno" na papiru ili pomoću kalkulatora, koristeći svega nekoliko osnovnih veličina. Takođe, ponekad se mogu upotrebljavati i jednostavne grafičke metode za praćenje ponašanja postrojenja u vremenu, pa se i to može smatrati simuliranjem. Očigledno je da su računari, zahvaljujući njihovoj moći i brzini obrade podataka, omogućili simuliranje na način koji je neizvediv na bilo koji drugi način. Stoga su oni dali snažan podsticaj razvoju modelovanja i simuliranja, pa su modeli koji se formulišu i rešavaju računarskim metodama posebna moderna kategorija modelovanja i simuliranja. Potrebno je naglasiti da su modelovanje i simuliranje eksperimentalna tehnika s tim što se eksperimentisanje vrši na modelu.

Osnovni koraci simulacionog procesa su sledeći (kako su ih formulisali Lou i Kelton 1982. godine:

1. definicija cilja simulacione studije;
2. identifikacija broskog postrojenja;
3. prikupljanje podataka o broskom postrojenju i njihova analiza;
4. izgradnja simulacionog modela;
5. izgradnja simulacionog programa;
6. verifikovanje simulacionog programa;
7. vrednovanje simulacionog modela;
8. planiranje simulacionih eksperimenata i njihovo izvođenje;
9. analiza rezultata eksperimenata;
10. zaključci i preporuke.

Izgradnja i korišćenje simulacionih modela po pravilu zahtevaju rad tima stručnjaka, kako onih kojima je posmatrano brosko postrojenje predmet interesa tako i informatičara. Kod složenijih projekata tim može imati na desetine stručnjaka različitih specijalnosti, dok u jednostavnijim slučajevima to mogu biti jedan ili dva stručnjaka koji istovremeno poznaju i posmatrano brosko postrojenje i metode i tehnike simulacionog modelovanja. Simulacioni model realizuje se u obliku računarskog programa koji oponaša ponašanje realnog broskog postrojenja. Taj je program obično napravljen na dovoljno opšti način, kako bi se pomoću njega mogle simulirati različite situacije koje jesu ili bi mogle nastupiti u stvarnosti. Takve situacije simuliraju se pomoću promenljivih ulaznih podataka koji su analogni uslovima (pobudi) u koje može biti dovedeno brosko postrojenje. Stoga se svako izvođenje računarskog programa može smatrati simulacionim eksperimentom koji daje rezultate analogne onima koji bi nastupili u stvarnosti u datim uslovima. Kako se rezultati odmah obrađuju i dobijaju u sredenom obliku (tabelarni i grafički prikazi, statistički obrađeni rezultati), moguća je njihova brža i lakša interpretacija nego kod rezultata dobijenih eksperimentalno na samom broskom postrojenju. Svakako, simulaciono modelovanje je metoda izbora u proučavanju brodskih postrojenja kojima se ne može ili ne sme eksperimentisati.

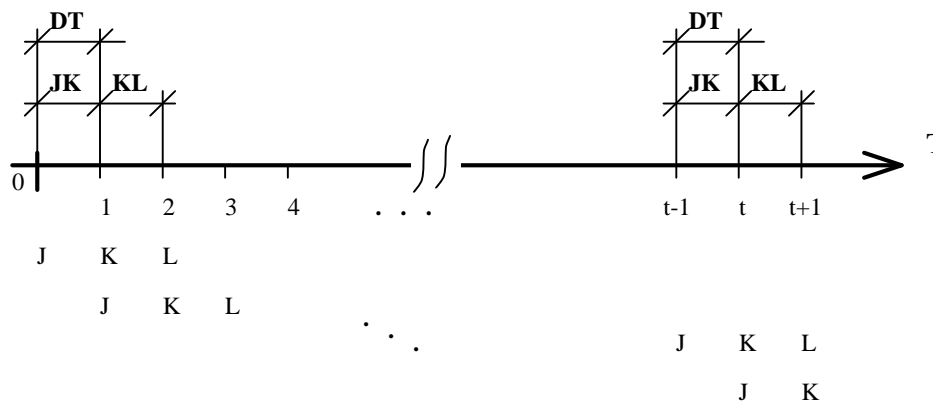


Stoga se postavlja pitanje kada i sa kojim ciljem se na taj način pristupa proučavanju brodskih postrojenja. Možemo reći da se simulacioni modeli uopšteno koriste u sledeće tri situacije (cilja):

1. ISTRAŽIVANJE – provera hipoteza o strukturi i ponašanju brodskog postrojenja;
2. PROJEKTOVANJE – projekcija ponašanja brodskog postrojenja u situacijama u kojima nema iskustva (npr. u situacijama za koje se priprema);
3. EDUKACIJA – upoznavanje ponašanja brodskog postrojenja sticanjem veštačkog (posrednog) iskustva (engl. *vicarious experience*).

### 7.3.1. Simulacioni model donošenja odluke o prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti brodskog postrojenja

Jednačine se dobijaju iz osobina strukture brodskog postrojenja i postrojenja samog po sebi. Za računanje vrednosti elemenata brodskog postrojenja za jedan i sledeći vremenski momenat, neophodno je standardizovati vremenski interval izračunavanja vrednosti. Proces “korak po korak” prikazan je na slici 7.2. Za tri moguća vremenska momenta, obeležena sa J, K i L, postoje dva jednaka vremenska intervala: JK i KL. Sva zbivanja u brodskom postrojenju moguće je iskazati pomoću te tri vremenske tačke i dva intervala između njih.



Slika 7.2. Obeležavanje vremenskih diskretnih trenutaka na vremenskoj kompjuterskoj osi u simulacionom modelu

- Ø **J**- prethodni vremenski trenutak (početno stanje, trenutak vremena pre)
- Ø **K = J+DT**-sadašnji vremenski trenutak (sada);
- Ø **L = K+DT**-sledeći vremenski trenutak (posle);
- Ø **JK**-diferencija, tj. diferencijal vremena  $DT =$  između J (pre) i K (sada);
- Ø **KL**-diferencija, tj. diferencijal vremena  $DT =$  između K (sada) i L (posle);
- Ø **DT = JK = KL**-vremenski interval između dva susedna proračuna (interakcijsko vreme računanja); određuje se u potpunom skladu sa tzv. teoremom o uzorkovanju (eng. Sampling Theorem) američkog inženjera Šanona (Shannon) i ruskog inženjera Konteljnikova, tj.  $DT \leq T/2$ ;
- Ø **T**- vremenski period najmanjeg kašnjenja prvog reda.

Interval  $DT$  moramo odabrati tako da je dvostruko kraći od najmanje vremenske konstante  $T$  eksponencijalnog kašnjenja prvog reda materijalnog ili informacionog toka.

Ako zadovoljimo ovaj kriterijum ovako vremenski diskretizovani model u potpunosti je kompatibilan sa kontinualnim modelima.

**NAPOMENA:** Simulaciona vremenska osa stalno se pomiče udesno iz koraka u korak, jer računar nema mogućnosti da pamti sve vremenske diskretne intervale, već pamti prošlost (J), sadašnjost (K) i izračunava budućnost (L). Čim izračuna L, K postaje J, L postaje K, a novi L je za DT udaljen od K udesno. Sav proces traje sve do isteka ukupnog zadanog vremena simulacije.

U principima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja postavljena je pretpostavka da je elemente postrojenja moguće razvrstati u dve grupe. U prvoj se nalaze elementi stanja postrojenja. Kod brodskih postrojenja (dinamičkih sistema) ti elementi imaju svoju vrednost bez obzira na to da li postrojenje funkcioniše ili ne. Znači, elementi stanja postrojenja u vremenskim momentima J, K i L imaju neke vrednosti. U drugoj grupi elemenata nalaze se elementi promene stanja postrojenja. Kod dinamičkih sistema ti elementi imaju svoje vrednosti samo onda kad postrojenje funkcioniše. Znači, elementi promene stanja postrojenja imaju svoje vrednosti u vremenskim intervalima JK i KL.

Za izračunavanje vrednosti u momentu K raspoloživi su podaci iz prethodnih koraka o vrednostima stanja u momentu J i vrednostima elemenata promene stanja u vremenskom intervalu JK. Pomoću tih raspoloživih podataka izračunavaju se vrednosti elemenata stanja broskog postrojenja u momentu K. Dobijene vrednosti koriste se potom da se izračunaju vrednosti elemenata promene stanja u intervalu KL. Takav redosled izračunavanja je obavezan zbog postojanja određenje zavisnosti između elemenata stanja i njihovih promena. Ta zavisnost kaže da vrednost elementa promene stanja zavisi od prethodne vrednosti uzročnog elementa stanja broskog postrojenja. Time se obezbeđuje održavanje uzročno-posledične zavisnosti elemenata. Pretpostavka pri izračunavanju novih vrednosti elemenata stanja broskog postrojenja je ta da se oni ne menjaju u intervalima JK i KL, već samo u momentima. Za vrlo male vremenske intervale ( $\Delta t = DT$ ) ova je pretpostavka održiva. Diskontinuitet na ovaj način formiran, ne utiče znatno na dobijena ponašanja.

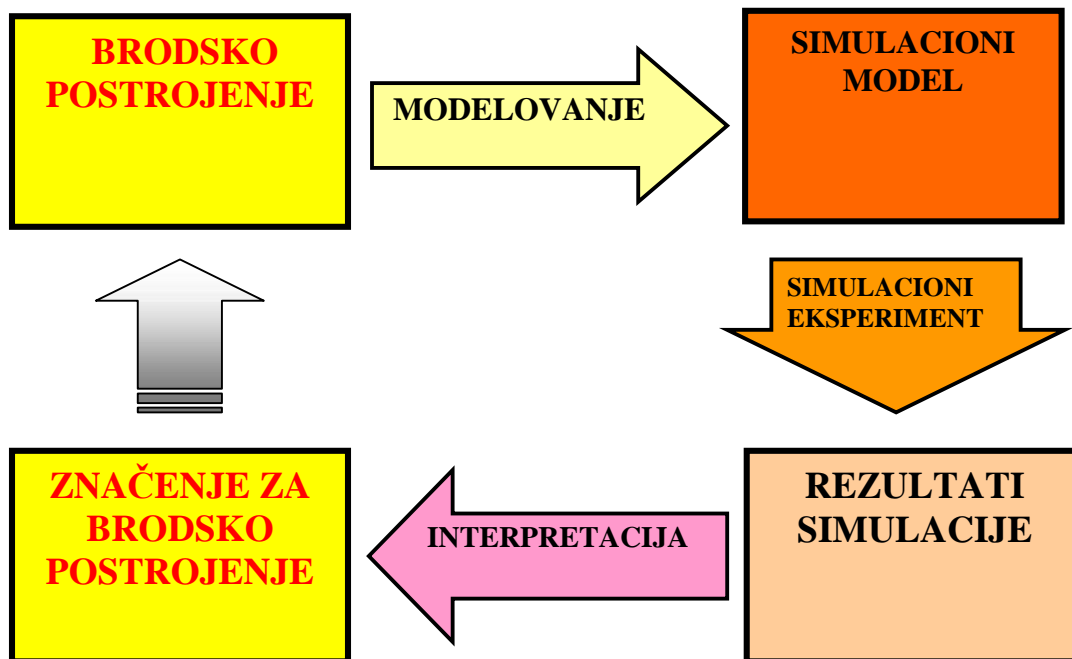
Ceo proces izračunavanja se ponavlja, ali za nov vremenski momenat L, kako je u prethodnom koraku obeleženo. U ovom narednom koraku vremenska skala J, K i L se pomera tako da se izračunavanje ne vrši za staro L, već za novo K (prikazano na slici 7.2). Postupak izračunavanja je isti kao i ranije, pošto su svi podaci raspoloživi za izračunavanje vrednosti elemenata stanja u novoj tački K i vrednosti elemenata promene stanja u novom intervalu KL.

U simulacionom modelu promenljive i konstante se prikazuju simbolima. Format standardnog simbola treba da omogući dovoljno raznovrsnih kombinacija. Da bi se zadovoljili svi zahtevi, potrebno je da oznake promenljivih veličina i konstanti u sebi sadrže grupu do šest karaktera. Osnovnu oznaku sledi oznaka vremenskog intervala ili momenta kojem prethodi tačka.

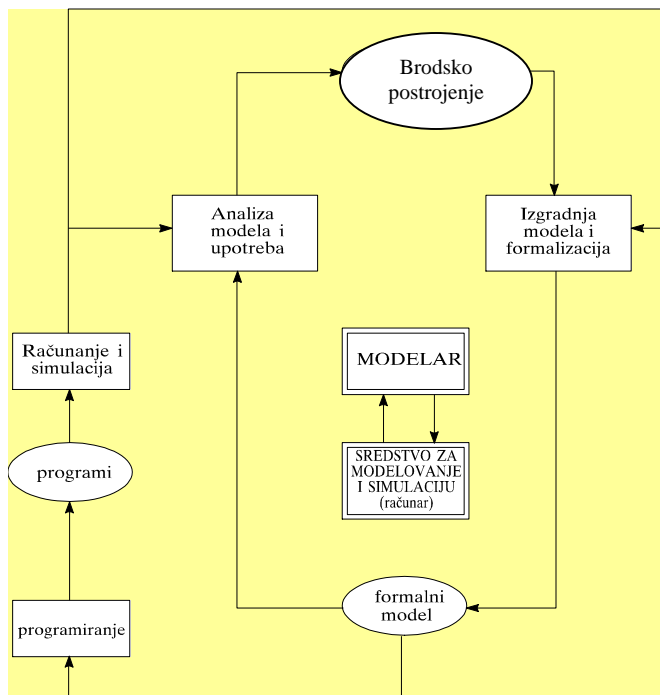
Jednačina elementa promene stanja broskog postrojenja je stav o tome kako se informacije postrojenja prevode u odluke i akcije. Ove jednačine prikazuju kako

postrojenje samo sebe kontroliše. Kod brodskog postrojenja jednačine prikazuju kako ljudska zapažanja o stanju sistema dovode do odlučivanja.

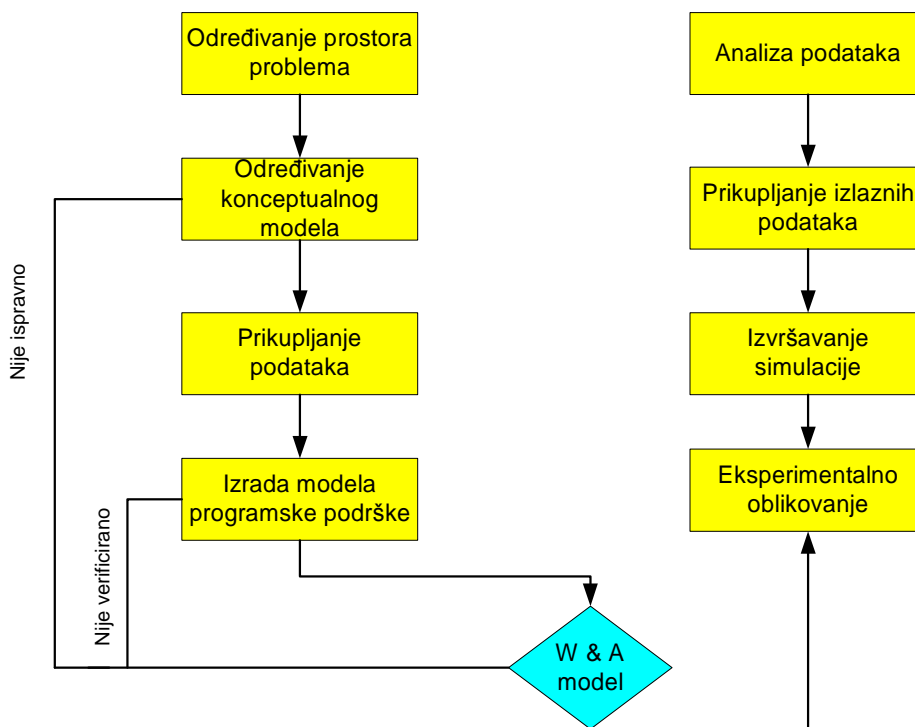
Da bi se došlo do konačnog oblika jednačine elementa promene stanja brodskog postrojenja, često je potrebno razviti pomoćne jednačine. Prisustvo takvih jednačina u modelu nije u suprotnosti s polaznim stavom da je struktura brodskog postrojenja sastavljena samo od elemenata stanja i njihove promene. Pomoćne jednačine su, zapravo, algebarski delovi jednačina koje su elementi promene stanja brodskog postrojenja.



Slika 7.3. Proces simulacije



Slika 7.4. Interakcija između modelara, računara i brodskog postrojenja



Slika 7. 5. Grafikon toka simulacije

## 7.4. Sistemska dinamika

Ponašanje sistema, naročito ponašanje kompleksnih dinamičkih društvenih i prirodnih sistema, već je gotovo 60 godina predmet istraživanja metode pod nazivom **sistemska dinamika** (engl. System Dynamics). Metoda se razvila iz potrebe boljeg razumevanja i kontrole sistema sa povratnom spregom, prvenstveno društvenih sistema, tj. boljeg razumevanja promena u sistemu i mogućnosti uticaja na faktore koji uzrokuju promene kroz vreme i dovode do uspešnosti, odnosno neuspešnosti određenog sistema. Prvi sistemi koji su proučavani pomoću systemske dinamike bili su poslovni sistemi, pa je sistemska dinamika u početku smatrana menadžerskom disciplinom. Začetnik te metode je Džej Forester (Jay Forrester), koji je kao rukovodilac različitih projekata i član menadžmenta u različitim preduzećima uočio da osnovne prepreke za napredak preduzeća ne proizlaze iz metoda i sredstava za rad, nego iz politike i odluka koje donosi menadžment na temelju informacija povratne veze. Korišćenje simulacionih modela u otkrivanju posledica ponašanja određenog sistema podstaklo je Forestera i njegove sledbenike na istraživanja i drugih dinamičkih sistema, osim poslovnih. Danas je sistemska dinamika našla primenu u različitim područjima, kao što su: ekologija, mikro i makro ekonomija, medicina, inženjerstvo, istraživanja društvenih kretanja, obrazovanje itd.

Informacije povratne veze koje dolaze iz okoline i iz samog sistema utiču na donošenje odluka i o daljem ponašanju sistema. Radi se o kružnom procesu, u kojem je odluka rezultat promene, a promena utiče na odluke koje će biti donete kasnije. Odluka kojom se rešava određeni problem na brodskim postrojenju bazira se na kriterijumima odlučivanja o stepenu pouzdanosti samog postrojenja, koji, pak, usmerava održavanje broda prema uspehu ili neuspehu.

Na osnovu iznetog može se zaključiti:

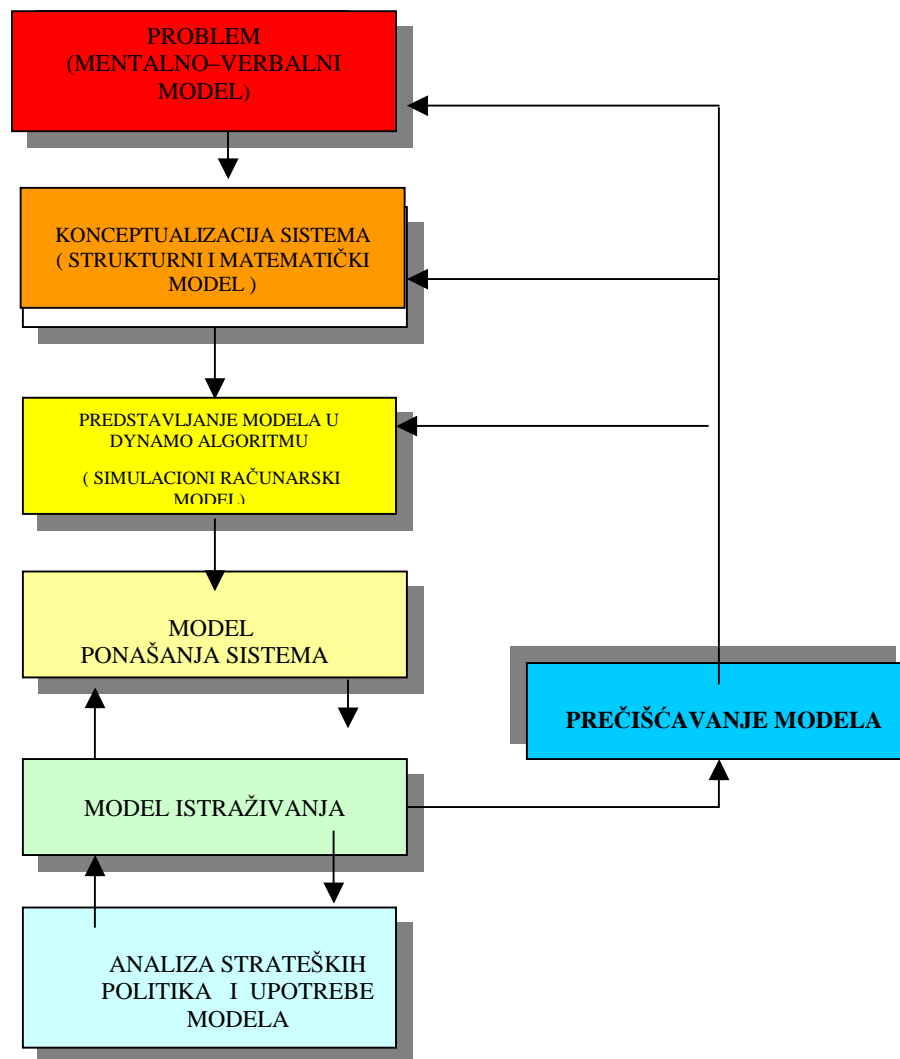
- *Sistemska dinamika ima veliku ulogu u razumevanju uticaja različitih politika na ponašanje sistema, jer omogućuje stvaranje računarskih modela koji simuliraju ponašanje sistema s obzirom na primenjenu politiku.*
- *Na osnovu logičkog simulacionog modela dinamičkog sistema moguće je postaviti određene matematičke jednačine pomoću kojih se računski i grafički prikazuju kretanje sistema u budućnosti.*

### 7.4.1. Osnovni pojmovi systemske dinamike

Sistemska dinamika je metodologija koja kombinuje teoriju, filozofiju i metode za analizu i upravljanje ponašanjem složenih sistema s povratnom spregom, kakvi su poslovni i drugi društveni sistemi. Povratna sprega pretpostavlja da neka aktivnost X rezultuje aktivnošću Y, koja, opet, utiče na X itd. Pogrešno je nezavisno i linearno posmatrati vezu između X i Y, te između Y i X, već je potrebno posmatrati ceo sistem kao kružnu povratnu spregu da bi se moglo predviđati ponašanje sistema. Svet koji nas okružuje nije linearan, već kružni. Čovek živi u okruženju, gde neko stanje vodi do donošenja odluke koja uzrokuje promene i dovodi do novog stanja, na osnovu koga on donosi nove odluke. To se grafički može prikazati kružnom povratnom spregom (feedback loop) kakva je na slici 7.7.

Sistemska dinamika kao metodologija koja se koristi za razumevanje ponašanja sistema pretpostavlja izgradnju simulacionog modela dinamičkog sistema kroz sledeće korake ( slika 7.6):

- **identifikacija problema** – određivanje tačke posmatranja sistema, određivanje granice sistema, cilja modela itd.;
- **konceptualizacija sistema** – utvrđivanje elemenata i strukture sistema, izrada dijagrama, postavljanje dinamičkih hipoteza koje objašnjavaju uzrok problema;
- **formalizacija modela** – izgradnja računarskog simulacionog modela sistema, koji prikazuje srž problema;
- **analiza ponašanja modela** – testiranje modela koji treba da preslika ponašanje realnog sistema;
- **evaluacija i validacija modela**, kao i testiranje alternativnih rešenja problema,
- **primena modela.**

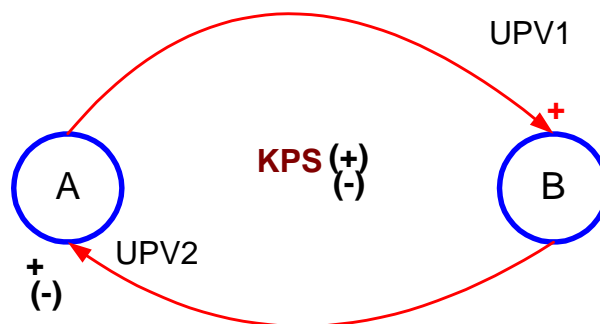


Slika 7.6. Algoritam metodologije simulacije (preuzeto: A. Munitić, Primjena elektroničkih računala, Pomorski fakultet, Split, 2004)

## 7.4.2. Metodologija systemske dinamike

Sistemska dinamika zasniva se na konceptu systemskog mišljenja (engl. *System Thinking*). Systemsko mišljenje omogućuje sagledavanje strukture sistema da bi se razumelo ponašanje sistema, ali ne podrazumeva izgradnju simulacionog modela. Modelovanje strukture sistema omogućuje systemska dinamika. Struktura sistema uključuje četiri hijerarhijske komponente:

- **Granice sistema** – granice se moraju definisati tako da uključuju samo one elemente koji prouzrokuju određeno ponašanje sistema. Teoretski, okruženje sistema je beskonačno, što se naziva šira okolina, međutim, realno je uzeti u obzir samo relevantnu okolinu, tj. onu koja znatno utiče na sistem, a važi i obrnuto. Ako ne bismo definisali jasne granice sistema, tj. njegovu relevantnu okolinu, sistem bi bio otvoren i matematički nerešiv. Zbog toga se sistem pomoću pojma relevantne okoline zatvara, što omogućuje njegovo matematičko rešenje, tj. definiše njegovo dinamičko ponašanje.
- **Kružna povratna sprega kao osnovni prikaz sistema** – ponašanje sistema određeno je strukturom elemenata u zatvorenoj petlji; povratna sprega odgovorna je za promene u strukturi tokom vremena. Najjednostavniji krug delovanja ima svega dve uzročno-posledične veze (slika 7.7).



Slika 7.7. Krug povratne veze

UPV – uzročno–posledična veza jasno pokazuje kako uzročna promenljiva A dinamički deluje na promenljivu B (UPV1), odnosno promenljiva B dinamički deluje na promenljivu A (UPV2), što se može definisati sledećim mentalno–verbalnim modelom:

Ako promenljiva A deluje na promenljivu B na način da promenljiva A raste i time izaziva rast promenljive B, kažemo da je uzročno-posledična veza  $A_B$  pozitivnog (+) dinamičkog karaktera, tj. ima istovrsni trend rasta. Ako rast promenljive A uzrokuje pad promenljive B, tada je dinamički karakter uzročno-posledične veze  $B_A$  negativan (-), što znači da je dinamika ponašanja uzročno-posledične promenljive suprotnog dinamičkog karaktera.

Redovna je pojava da unutar kruga povratne veze postoji veći broj UPV-a što može poslužiti model, ali je taj model bliži realitetu.

Na slici 7.7. predstavljen je najmanji krug povratne veze - **KPS**, te ima svega dve uzročno-posledične veze -  $A_B$  i  $B_A$ . Da bi se odredio njen globalni dinamički karakter potrebno je odrediti sledeća logička pravila:

- Ø *Ako je ukupna suma negativnih predznaka neparan broj (1,3,5,7,...), tada je ukupni dinamički karakter kruga povratne veze takođe negativan (-), što znači – samoregulišući, a to je naročito korisno za tehničko-tehnološke sisteme i procese.*
- Ø *Ako je ukupna suma negativnih predznaka paran broj (0,2,4,6,8...), tada je ukupni dinamički karakter kruga povratne veze (+), što znači – eksponencijalno rastući ili padajući, i može čak dovesti do eksplozije celog sistema, ili u protivnom implozije, što je takođe opasno za brodsko postrojenje (npr. sistem za podmazivanje brodske osovine propelera).*

**NAPOMENA:** Broj krugova povratne veze je velik (u ekonomiji ih je više od 50, dok u tehničkim sistemima nešto manje). Predznaci pozitivnog kruga povratne veze dominiraju ponašanjem ekonomskih sistema, dok kod tehničkih sistema prevladava veći broj krugova negativne povratne veze, što je suština upravljanja tehničkim sistemima.

- **Nivoi i stope** – unutar sistema postoje nivoi ili stanja (*levels*) i stope ili promene stanja (*rates*). Nivoi ili stanja predstavljaju količinu nekog elementa, npr. broj zaposlenih na brodu, nivo vode u rezervoaru itd. Stope ili promene stanja predstavljaju jedinicu promene stanja (povećanje ili smanjivanje nivoa). Jednačine stanja predstavljaju integraciju promene stanja, dok funkcija stope predstavlja matematički prvi izvod stanja, tj. u fizičkom smislu brzinu menjanja stanja promenljive. Kao grafički simbol jednačine stanja u SD koristi se pravougaonik, dok simbol za promenu stanja koristi simbol regulatora (ventila).
- **Ciljevi, posmatrano stanje, nesklad između ciljeva i uslova, željena akcija.** Cilj je stanje sistema koje se promenom želi postići, a posmatrano stanje je trenutno stanje sistema. Nesklad između ta dva stanja dovodi do *diskrepancije*, tj. odstupanja (razlikovanja) željnog stanja od stvarnog, pa regulator mora izvršiti akciju kojom će promeniti stanje i diskrepanciju smanjiti na nulu, a to su slučajevi kada su u potpunosti postignuti ciljevi.

Struktura sistema može se grafički prikazati pomoću dve vrste dijagrama:

- **dijagram kružne povratne veze** (*Casual Loop Diagram, Feedback Diagram*)
  - **dijagram stanja, odnosno toka** (*Stock/Flow Diagram*).
- Svaki dijagram ima svoje simbole.

### 7.4.3. Uzročno-posledične veze kruga povratne veze dinamičkih sistema

#### 7.4.3.1. Strukturni elementi sistema

Kompletni sistem prikazujemo preko strukturnog dijagrama (strukturni model), koji se često u inženjerstvu naziva dijagram tokova. Njegova obeležja su sledeća:

- A) prikazuje sva stanja sistema,
- B) prikazuje tokove između stanja,
- C) prikazuje funkciju upravljanja kojom se kontrolišu količine materije, energije ili informacija koje teku između stanja sistema,
- D) prikazuje informacijske kanale koji povezuju stanja sistema s upravljačkom funkcijom.

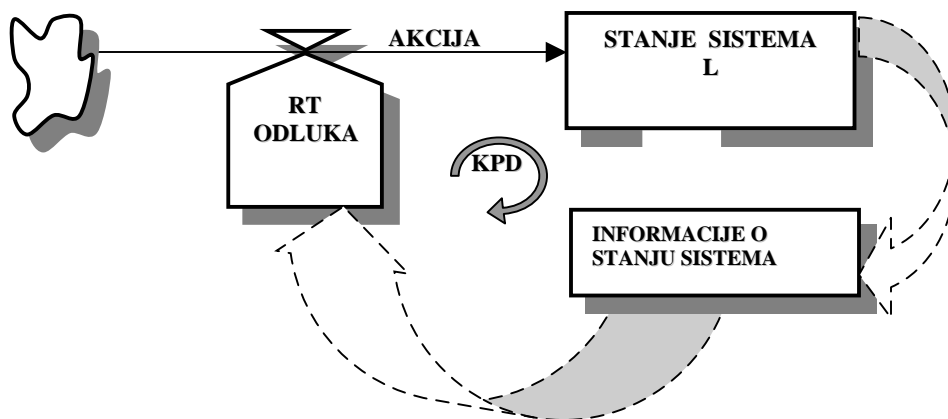


### 7.4.3.2. Osnovne jednačine dinamičkih sistema

Osnovne jednačine dinamičkih sistema su:

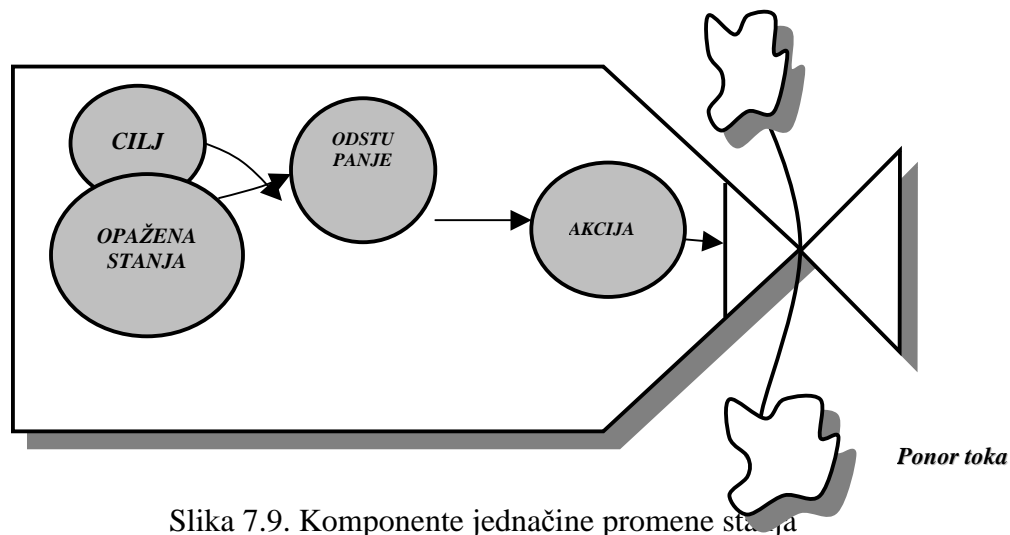
- L - jednačine stanja,
- R - jednačine promene stanja,
- A - pomoćne jednačine,
- I - inicijalne jednačine,
- C - jednačine konstanti,
- E - egzogene promenljive.

Strukturni model dijagram toka sistema dinamičkog modela u DINAMO simbolici prikazan je na slici 7.8.



Slika 7.8. Strukturni dijagram toka

**Komponente jednačine promene stanja – R** (*Rate Equations*) su: cilj, opažena stanja, diskrepancija i akcija (slika 7.9).

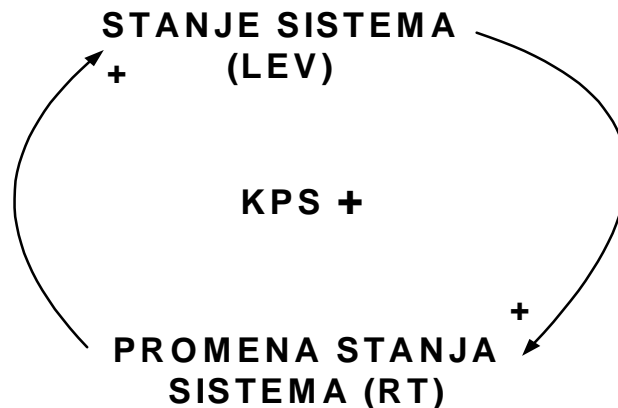


Slika 7.9. Komponente jednačine promene stanja

Svakoј akciji prethodi odstupanje. Odstupanje predstavlja razliku između željenog (očekivanog) stanja i stvarnog stanja sistema.

## Pozitivna povratna sprega

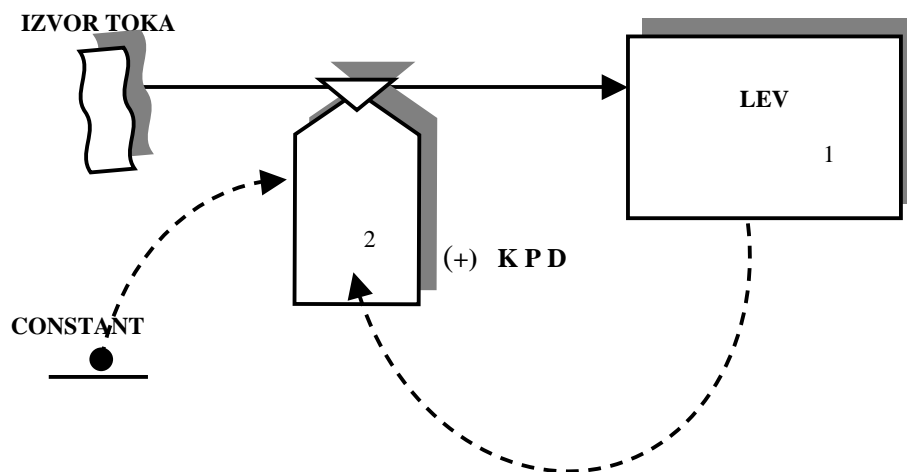
Strukturni model pozitivnog kruga delovanja ukazuje na fizičke činjenice: povećanje stanja sistema (LEV) izazvaće povećanje promene stanja sistema (RT), što označavamo predznakom (+) pokraj strelice na punoj liniji; povećanje promene sistema (RT) izazvaće povećanje stanja sistema (LEV), što je takođe označeno predznakom (+) iznad strelice pune linije. Vidljivo je da ovi elementi imaju pozitivan predznak u modelu, što znači da posmatrani sistem ima kumulativan karakter i da načelno proces ima karakter eksponencijalnog rasta (slika 7.10).



Slika 7.10. Strukturni model sistema s pozitivnim krugom povratne veze

Pozitivni KPS vode prema tzv. eksponencijalnom rastu i mogu dovesti do katastrofe sistema, ako se ne ograniče uz pomoć (-) negativnih krugova povratne veze koji vode dinamičkom smirivanju nastalih opasnih stanja.

Dijagram se toka u Dinamo simbolici može se prikazati na sledeći način: puna linija označava materijalni ili energetski tok, dok isprekidana linija označava informacijski tok (slika 7.11).



Slika 7.11. Dijagram toka pozitivnog kruga povratnog delovanja

U Dinamo jeziku isti je model moguće predstaviti narednim jednačinama:

$$\begin{array}{ll}
 1,L & \text{LEV.K} = \text{LEV.J} + (\text{DT}) * (\text{RT.JK}) \\
 1.1,N & \text{LEV} = N \\
 2,R & \text{RT.KL} = \text{LEV.K} / \text{CONSTANT} \\
 2.1,C & \text{CONSTANT} = C
 \end{array}$$

### Negativna povratna sprega

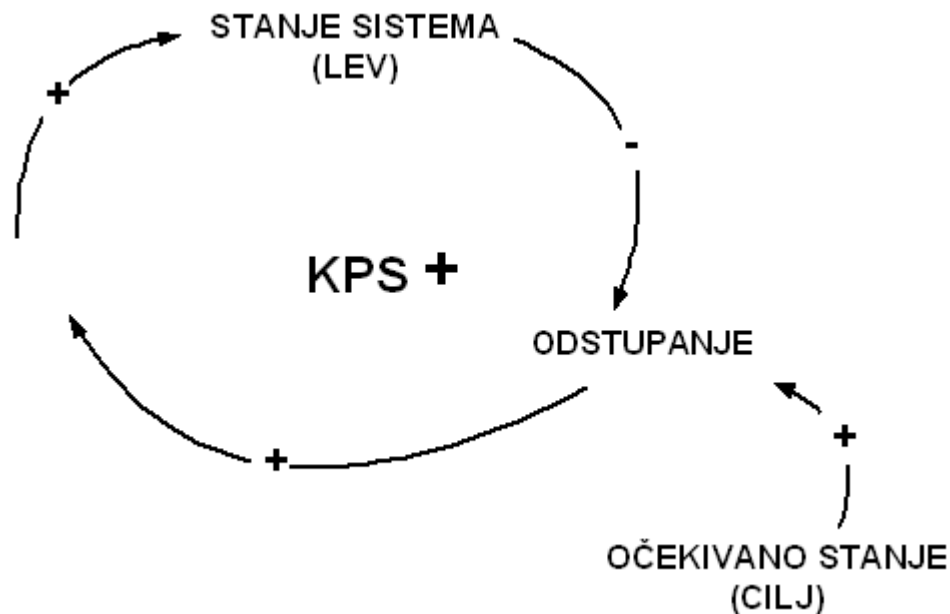
Negativni krug povratnog delovanja, čiji je strukturni model prikazan slikom 7.12, ima tri uzročno-posledične veze i za njih važe sledeća pravila: ako akcija (RT) raste, porašće i stanje sistema (LEV), što dokazuje da ta UPV ima pozitivan (+) predznak; ako raste stanje sistema u odnosu na očekivano stanje (cilj, nominalno stanje), tada će se smanjiti odstupanje, što ukazuje na negativnu (-) povratnu spregu. Odstupanje je negativno ili pozitivno u zavisnosti od stvarnog stanja sistema od ciljnog stanja.

S obzirom na krug povratnog delovanja uopšteno važi pravilo (slika 7.13):

Ako element A svojim rastom izaziva rast elementa B, tada uzročno-posledična sprega ima pozitivan predznak (+);

Ako element A svojim rastom izaziva smanjenje elementa B, tada uzročno-posledična sprega ima negativan predznak (-);

Ako u krugu povratnog delovanja sve uzročno-posledične veze imaju pozitivan predznak, tada povratna sprega ima globalni pozitivan predznak (+);

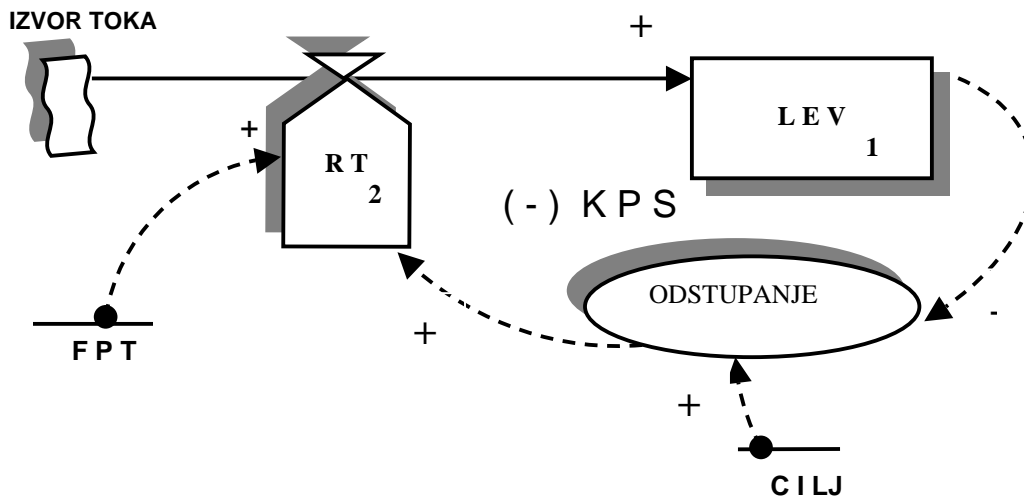


Slika 7.12. Strukturni model sistema s negativnom povratnom spregom

Ako u krugu povratnog delovanja postoje i pozitivne i negativne uzročno-posledične veze, tada globalni predznak kruga povratnog delovanja određuje suma negativnih predznaka:

- ako je paran broj negativnih predznaka, tada je globalni predznak povratne veze pozitivan (+),

- ako je neparan broj negativnih uzročno-posledičnih veza, tada je globalni predznak povratne veze negativan (-).



Slika 7.13. Dijagram toka sistema s negativnim krugom povratne veze

Sistemi s negativnom povratnom spregom nastoje ostvariti eksterno postavljene ciljeve, to jest očekivana stanja. Za razliku od njih, sistemi s pozitivnom povratnom spregom izazivaju eksponencijalni rast ili pad procesa.

U Dinamo jeziku to možemo prikazati sledećim jednačinama:

1,L	$LEV.K = LEV.J + (DT) * (RT.JK)$
1.1,N	$LEV = N$
2,R	$RT.KL = FTP * ODSUPANJA.K$
2.1,C	$FTP = C$
3,A	$ODSUPANJA.K = CILJ - LEV.K$
3.1,C	$CILJ = C$

LEV – stvarno stanje sistema (jedinica),

RT – PROMENA stanja sistema (jedinica / vreme),

FTP – deo kroz vreme (deo / vreme),

ODSUPANJA – razlika između cilja i stvarnog stanja (jedinica),

CILJ – očekivana (željena) vrednost (jedinica).

Sve te činjenice bile su neophodne da ostvare osnovu za razradu našeg računarskog modela. To su tek osnovne postavke za shvatanje funkcionisanja sistema dinamičkog modelovanja. Za sada je to dovoljno, ali ćemo tek u kasnijoj razradi ući dublje u srž problema, kako bismo na što kvalitetniji način modelovali sistem i omogućili njegov rad.

#### 7.4.4. Modeli sistemske dinamike

Kada ljudi razmišljaju o različitim pojavama realnog sveta, npr. porodici, gradu, rastu ili padu populacije i slično, oni formiraju mentalne modele o tim pojavama. Sistemska dinamika omogućuje formalizaciju mentalnih, verbalnih, strukturnih, matematičkih i računarskih sistema dinamičkih simulacionih modela (profesor J. W. Forrester-MIT - System Dynamics Society – Industrial Dynamics). Simulacionim

modelom moguće je simulirati ponašanje vrlo složenog dinamičkog sistema. Sistemska dinamika razvija i koristi kvalitativne i kvantitativne modele. Pod kvalitativnim modelima podrazumevamo:

1. mentalni - verbalni model,
2. strukturni model,
3. model strukturnih dijagrama toka.

Kvantitativni sistemsko-dinamički modeli su:

1. MATEMATIČKI MODEL – matematički formulišu jednačine stanja, tj. skup nelinearnih diferencijalnih jednačina prvog reda, koje u potpuno determinišu funkcionisanje posmatranog sistema.
2. RAČUNARSKO-SIMULACIONI MODEL – upotrebom sistem-dinamičkih programskih jezika (DYNAMO, PDP+, PDP4, POWERSIM, VENSIM, STELLA i dr.) transformišemo klasični matematički oblik stanja u diskretni, tj. diferencijalni oblik u kojem je DT određen pomenutom teoremom uzorkovanja;
3. MODEL VALIDNOSTI – pre implementacije modela potrebno je izvršiti niz testova validnosti računarsko-simulacijskog modela.

**Mentalni model** je mreža različitih činjenica i koncepata koji sadrže ljudsko razumevanje društvenih i fizičkih fenomena. On se stvara za vreme interakcije čoveka sa određenim fenomenom, tj. sistemom koji se posmatra. Mentalni model je u stvari, mentalna percepcija nekog sistema, veza u sistemu i prema sistemima, kao i ponašanje koje struktura sistema proizvodi. Mentalni model se oblikuje na osnovu prethodnog znanja (sećanja, imaginacije, maglovite pretpostavke), iskustva čoveka sa sličnim sistemima i na bazi čovekovih sposobnosti obrade podataka. On je fleksibilan, bogat detaljima i često vrlo kompleksan. Mentalni modeli koriste se u svakodnevnom životu, prilikom donošenja različitih odluka, u procesu učenja, tokom kojeg se menjaju, ispravljaju, poboljšavaju ili odbacuju. No, ljudski um često ne može stvoriti mentalni model kompleksnog sistema u celini, već samo jednog njegovog dela. Zato su mentalni modeli nepotpuni, neprecizni, nedovoljno tačni, nestabilni, ali i neophodni, jer bez ideja nema napretka u modelovanju. Zbog nepouzdanosti mentalnog modela razumevanje i predviđanje ponašanja nekog sistema ne mora biti ispravno. Rešenje takvog problema može se pronaći u primeni sistemske dinamike. Prevođenjem mentalnog modela u računarski simulacioni model moguće je lakše otkriti, naučiti i razumeti ponašanje koje proizlazi iz strukture određenog sistema.

#### **7.4.4.1. Računarski simulacioni modeli**

Osnovna odlika sistemske dinamike je izgradnja računarskih simulacionih modela koji preslikavaju mentalni model strukture nekog sistema. Simulacioni model imitira ponašanje sistema na osnovu unapred zadatih varijabli sistema. Promenom varijabli sistema moguće je menjati strukturu sistema i analizirati ponašanje sistema kroz vreme. Ovakve simulacije omogućuju modelovanje i razumevanje sistema koje je inače teško ili nemoguće pratiti u realnom svetu (npr. promena ekosistema u dužem vremenskom periodu ili udaljenom geografskom području), a isto tako utiče na proces učenja, koji olakšava, i proces odlučivanja, koji podržava.

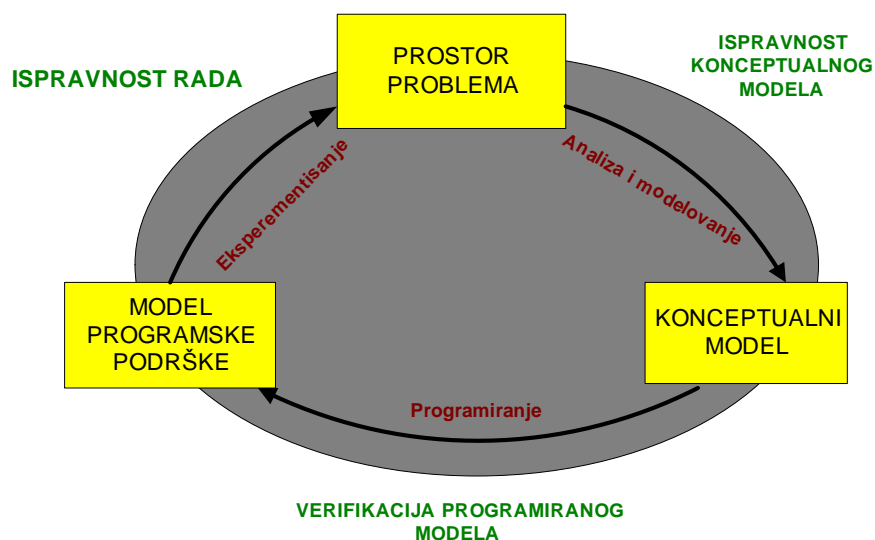
**• Dobar simulacioni model sistemske dinamike mora pokazati kako i zašto se dinamički sistem ponaša na određeni način u određeno vreme. On je efikasan ako poboljšava mentalni model realnog sistema i olakšava povezivanje različitih vrsta.**

### Proces razvoja simulacije podeljen je u tri faze:

- prostor problema,
- konceptualni model,
- model programske podrške.

### Validacijom modela se može ustanoviti:

- da li konceptualni model dobro pokriva prostor problema,
- da li je ponašanje modela programske podrške konzistentno sa stvarnim svetom (kroz eksperimentisanje i poređenje sa stvarnim podacima).



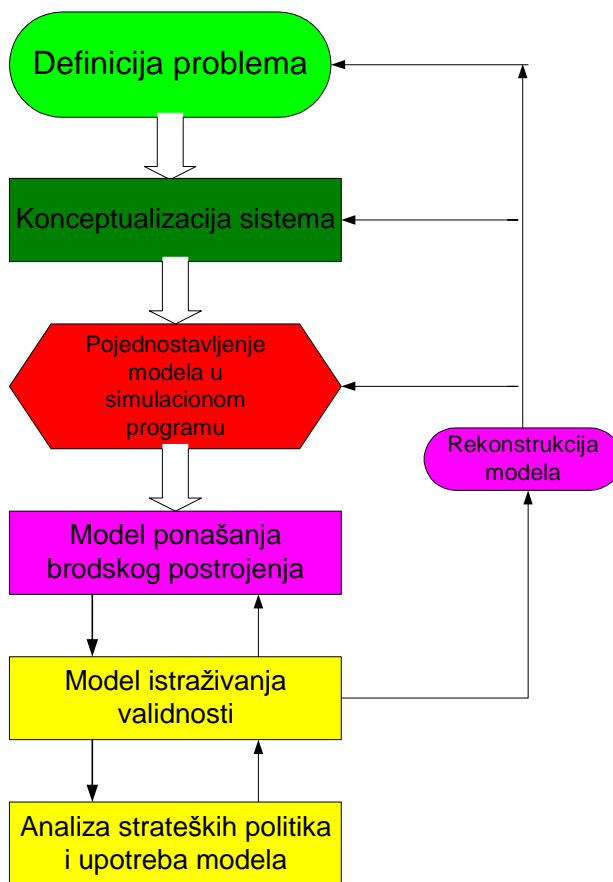
Slika 7.14. Simulacioni proces

### 7.4.5. Modelovanje dinamike sistema primenom metodologije sistemske dinamike

Sistemska dinamika je jedna od sistemskih metodologija istraživanja, modelovanje i optimizovanje složenih dinamičkih sistema. Ona se u svom metodološkom pristupu temelji na nekoliko faza, koje se mogu prikazati dijagramom (Slika 7.15).

U prvoj fazi-**definicija problema**-prepoznaju se i definišu sistem i granice unutar kojih se posmatra, što se opisuje mentalno-verbalnim modelom. Prilikom opisivanja mora se paziti na pravilno uočavanje vremenski promenljivih veličina, kao i njihovih uzročno-posledičnih delovanja.

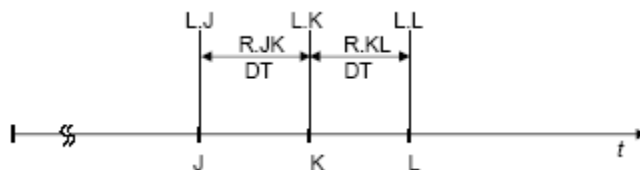
U drugoj fazi-**konceptualizacija broskog postrojenja**-na osnovu verbalnog modela gradi se strukturni model i dijagram toka. Bitno je uočavanje i ucrtavanje najvažnijih materijalnih i informacionih tokova koji dovode do promene stanja broskog postrojenja.



Slika 7.15. Metodološki model istraživanja dinamike sistema

Dinamika posmatranog brodskog postrojenja, izražena nekim veličinama, posmatra se u određenim vremenskim intervalima, tj. osnova za posmatranje promene stanja brodskog postrojenja su vremenski intervali u kojima se menja njegovo stanje.

U sistemskoj dinamici *vremenska osa* se označava na način prikazan na slici 7.16.



Slika 7.16. Vremenska osa

Koristeći saznanja o vremenskoj osi sa slike 7.16 osnovnu diferencijalnu jednačinu prvog reda za posmatranje stanja brodskog postrojenja pomoću Dinamo simulacionog jezika moguće je prikazati formulom (7.1):

$$SS.K = SS.J + (DT)*(UPS.JK-IPS.JK) \quad (7.1)$$

U tabeli 7.1. prikazano je značenje simbola koji označavaju komponente na slici 7.16.

Tabela 7.1. Značenje simbola na vremenskoj osi

<i>Simbol</i>	<i>Značenje</i>
<b>J</b>	Definiše vremenski trenutak u kome je izvršeno poslednje računanje vremenski zavisnih veličina ( stanja ).
<b>K</b>	Definiše vremenski trenutak u kojem se vrši tekuće računanje vremenski zavisnih veličina.
<b>L</b>	Definiše naredni vremenski trenutak u kojem će se izvršiti sledeće proračunavanje vremenski zavisnih veličina ( stanja ).
<b>DT(<math>\Delta t</math>)</b>	Vremenski interval između dva susedna proračuna.

### 7.4.6. Jednačine sistemske dinamike

U sistemskoj dinamici postoji pet osnovnih tipova jednačina koje se koriste za modeliranje dinamike sistema:

- 1) **L - Jednačina stanja nivoa sistema** (Level funkcija) predstavlja akumulaciju (integraciju) u kojoj se akumuliraju (integrišu) sve promene stanja tokova koje ulaze u akumulaciju sistema i izlaze iz njega. Polazeći od diferencijalne jednačine (7.1) u daljem tekstu biće izvedena diferencijalna jednačina stanja sistema. Prebacivanjem u jednačini (7.1)  $SS.J$  na levu stranu jednačine, pa podelom cele jednačine sa  $DT$  dobijamo:

$$\frac{SS.K - SS.J}{DT} = UPS.JK - IPS.JK \quad (7.2)$$

Iz formule (7.2) moguće je primetiti da je ukupna promena stanja u posmatranom intervalu  $DT$  jednaka ulaznoj promeni stanja, minus izlazna promena stanja ostvarena u intervalu  $DT$ . Kada se dopusti da se  $DT$  smanji tako da teži nuli, dobija se diferencijalna jednačina koju je moguće prikazati formulom (7.3).

$$\lim_{DT \rightarrow 0} \frac{SS.K - SS.J}{DT} = \frac{d(SS)}{dt} = UPS(t) - IPS(t) \quad (7.3)$$

Integrisanjem jednačine (7.3) i uvrštavajući granice integrisanja, ukupno stanje kontinualnog sistema moguće je opisati formulom:

$$SS = SS_0 + \int_0^t (UPS - IPS) dt \quad (7.4)$$

Značenje svakog od simbola u formuli (7.4) prikazano je u tabeli 7.2.



Tabela 7.2 . Značenje simbola u formuli (7.4)

Simbol	Značenje
$SS$	Iznos stanja u bilo kom vremenskom trenutku $t$ (jedinica mere)
$SS_0$	Početno stanje u trenutku $t=0$ (jedinica)
$\int_0^t$	Matematički operator koji označava integralenje ili akumulaciju u periodu vremena od 0 do $t$
$UPS$	Ulazni tok promene stanja
$IPS$	Izlazni tok promene stanja
$dt$	Diferencijalni operator koji predstavlja intefizimalni (beskonačno mali) interval vremena kojim se množe promene stanja sistema

Rečima opisana formula (7.4) glasi:

Ukupno stanje sistema ( $SS$ ) jednako je prošlom stanju sistema ( $SS_0$ ) promenjeno za razliku ulazne promene stanja toka ( $UPS$ ) i izlazne promene stanja toka ( $IPS$ ) u beskonačno malom vremenskom periodu ( $dt$ ).

Grafički simbol jednačine stanja koji se koristi u dijagramu toka prikazan je na slici 7.17.



Slika 7.17. Grafički simbol jednačine stanja (integral, suma ili akumulacija)

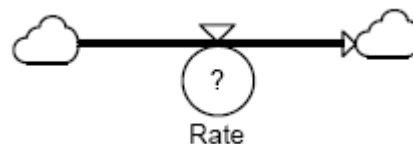
- 2) **R - Jednačina promene stanja nivoa sistema** (Rate funkcija) predstavlja ulazno - izlazne stope relativne promene posmatranog nivoa. Ulaz u element promene stanja sistema su tokovi koji dolaze od elemenata stanja ili konstanti, što je moguće prikazati formulom (7.5):

$$PS.KL = f(\text{stanje, konstante}) \quad (7.5)$$

Kao i kod jednačine stanja, smanjenjem intervala  $DT$  može se zaključiti da ona u fizičkom smislu predstavlja brzinu promene stanja, a prema formuli (7.3) u matematičkom smislu to je prvi izvod (7.6):

$$R(t) = d(\text{stanje sistema}) / dt \quad (7.6)$$

Grafički simbol te funkcije prikazan je na slici 7.18.



Slika 7.18. Grafički simbol jednačine promene stanja (Rate funkcija)

- 3) **A - Pomoćne jednačine** (Auxiliary funkcija) jesu jednačine koje se upotrebljavaju radi pojednostavljenja jednačina promene stanja. Grafički simbol te funkcije prikazan je na slici 7.19.



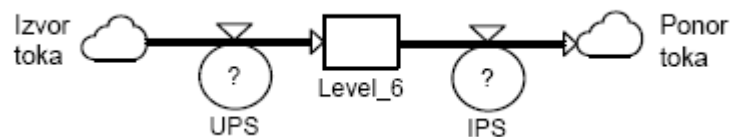
Slika 7.19. Grafički simbol pomoćne funkcije (Auxiliary funkcije)

4) **C-K - Jednačine konstanti** (Constants) jesu jednačine pomoću kojih se definišu konstantne vrednosti koje nisu u funkciji vremena. Grafički simbol te funkcije prikazan je na slici 7.20.



Slika 7.20. Grafički simbol konstantne funkcije

5) **N - I-Jednačine početnih vrednosti** koriste se pri definisanju početnih vrednosti, potrebnih za proračun simulacionih modela. Grafički simbol zavisi od načina zadavanja početne vrednosti (npr. da li su početne vrednosti date funkcijom tabele ili konstantom). Prema prethodnoj simbolici jednačina stanja posmatranog nivoa sistema, koja odgovara formuli (7.2), u dijagramu toka bila bi prikazana kao na slici 7.21.



Slika 7.21. Dijagram toka jednačine stanja posmatranog nivoa sistema

U Dinamo jeziku, treća faza predstavlja **računarsko prezentovanje modela (kod)**. Kod objektno orijentisanih programa kao što je Powersim, programski kod se generiše putem dijagrama toka, tako da ne postoji stroga granica između druge i treće faze. Kroz fazu **modelovanje ponašanja sistema**, računarska simulacija se upotrebljava za determinisanje funkcionalne i vremenske zavisnosti. Sledeću fazu, **istraživanja validnosti**, karakterišu mnogobrojni testovi radi utvrđivanja kvaliteta i validnosti modela. Poslednja faza, **analiza strateških politika i upotreba modela**, služi za mnogobrojna testiranja alternativnih politika koje bi se mogle ugraditi u model.

#### 7.4.7. Programski paketi sistemske dinamike

**DINAMO (DYNAMO)** osnovni je simulacioni jezik koji se koristi prilikom primene metodologije sistemske dinamike. Namenjen je korisnicima koji su više orijentisani rešavanju problemskih zadataka. Prilikom integracije (maksimalno hiljadu jednačina), zavisno od željene tačnosti, koriste se Eulerova ili Range-Kuta integraciona metoda. Dinamo simulacioni jezik je nastao iz jezika Simple, koji je razvijen za računar IBM 704 1958. godine. Prva prezentacija Dinamo jezika napravljena je 1959. godine. Autori su Phillis Fox i Alexander L. Plugh. Tokom 1962. godine Jay W. Forrester, koga smatraju tvorcem sistemske dinamike, usavršio je Dinamo pojednostavivši unos inicijalnih

podataka u program. Preko usavršenih verzija Dinamo I i II, pa Fortranske verzije, 1976. godine razvijena je posebna verzija za IBM i za prenosne računare. Današnja verzija Dinamo-a razvijena je za OS Windows u obliku programskog paketa PROFESIONAL DYNAMO.

## **PROWERSIM**

PROWERSIM (Wentana Systems, Harvard) jeste OS WINDOWS programski paket za vizuelno modeliranje, koji, kao i ostali simulacioni paketi, omogućuje izgradnju, simulaciju, dokumentovanje, analizu i optimizaciju dinamičkih sistema. Za razliku od DYNAMO-a, ovaj programski paket prilikom definisanja jednačina zahteva i definisanje mernih jedinica, koje kasnije mogu poslužiti za ispitivanje validnosti modela. Grafički prikaz scenarija, kao i njihovi uporedni testovi, veoma su jednostavni za rukovanje. Pored navedenih mogućnosti, PROWERSIM pruža i mnoge druge, kao što su: prikazivanje scenarija, izrada dokumentacije, prikaz uzročno-posledičnih stabala svake varijable u obliku strukturnog dijagrama i sl.

U sledećoj tablici prikazat ćemo uporedno jednačine u DYNAMO i PROWERSIM jezicima. Tablica nam služi za njihovu konverziju pri pretvaranju jednog modela u drugi. No, potrebno je naglasiti da to nisu sve razlike, već za detaljnu analizu treba definisati još poneke različitosti.

## 7.5. Eksploataciona istraživanja – simulacija delova brodskog postrojenja

U postupku projektovanja eksploatacionih istraživanja pošli smo od ideje da validnost modela simulacije možemo posmatrati tako što ćemo proučavanje, ponašanje konkretnih motora (M 503 A-2) pratiti tokom istraživačkog perioda i dobijene rezultata porediti sa simulacijom istih motora. Istraživački postupak smo zasnovali na metodi paralelnih grupa. Eksperimentalna grupa je simulacioni postupak, a kontrolnu grupu su činili podaci koji su tokom eksperimenta vođeni o ponašanju motora u eksploataciji. To nam je omogućilo da metodom simulacije prognoziramo funkcionisanje motora u mnogo dužem vremenskom periodu rada. Tako smo dobili podloge za donošenje odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti brodskog motora u različitim vremenskim periodima eksploatacije.

Tabela 7.3. Prikaz Makro funkcije u DYNAMO i POWERSIM simulacionom jeziku

<b>DYNAMO</b>	<b>POWERSIM</b>
(A)(B)	(A)*(B)
A**B	A^B
CLIP(P,Q,R,S)	IF(R>=S,P,Q)
DELAY1(ln, Del)	DELAYMTR(ln, Del, 1, 0)
DELAY3(ln, Del)	DELAYMTR(ln, Del, 3, 0)
DELAYP(ln, DelM, PPL)	DELAYMTR(ln, Del, 3, 0)
DLINF3(ln, Del)	DELAYINF(ln, Del, 0)
DT	TIMESTEP
FIFGE(P,Q,R,S)	IF(R>=S,P,Q)
LOGN(A)	LN(A)
NOISE( )	RANDOM(-0.5, +0.5 )
NORMRN(Mean, StdV)	NORMAL(Mean, StdV)
PULSE(H,W,F,I)	IF(TIMECYCLE(F,I,V,W),H,0)
SMOOTH(ln, Del)	DELAYINF(ln, Del, 1, ln)
SAMPLE(X, Interval, X <sub>0</sub> )	DELAYINF(ln, Del, 1,X <sub>0</sub> )
SWITCH(P,Q,R)	IF(R=0, P, Q)
TABHL(Y, X, XL, XH, Dx)	GRAPH(X, XL, Dx, Y)
TABLE(Y, X, XL, XH, Dx)	GRAPH(X, XL, Dx, Y)
TABPL(Y, X, XL, XH, Dx)	GRAPHCURVE(X, XL, Dx, Y)
TABXT(Y, X, XL, XH, Dx)	GRAPHLINAS(X, XL, Dx, Y)

DT – osnovni simulacioni korak, tj. vremenski period računanja iteracija DT. Moramo voditi računa da  $DT < T/2$ . Shenonn-Konterljikov: Sampling teorema ili teorema o uzorkovanju kontinualnih modela u diskretni model. T je vremenski period najmanjeg prosečnog vremena kašnjenja prvog reda.

a) **CLIP(.)**-funkcija limitiranja. Opšti oblik je:

$$y = \text{CLIP}(P, Q, R, S)$$

pri čemu je:

$$\text{CLIP}(P, Q, R, S) = \begin{cases} P & \text{za } R \geq S \\ Q & \text{za } R < S \end{cases}$$

b) **DELAY1(.)**-eksponencijalno kašnjenje prvog reda materijalnog toka. Opšti oblik je:

$$y = \text{DELAY1}(In, Del)$$

pri čemu je:

In – ulazna promena stanja (jed./vreme)

Del – vreme kašnjenja promena stanje (vremenska jedinica)

c) **DELAY3(.)**-eksponencijalno kašnjenje trećeg reda materijalnog toka, odnosno kaskada triju eksponencijalnih kašnjenja prvog reda. Opšti oblik je:

$$y = \text{DELAY3}(In, Del)$$

pri čemu je:

In – ulazna promena stanja (jed./vreme)

Del – vreme kašnjenja promena stanje (vremenska jedinica)

d) **DLINF1(.)**-eksponencijalno kašnjenje prvog reda informacionog toka. Opšti oblik je:

$$y = \text{DLINF1}(In, Del)$$

pri čemu je:

In – stanje ili pomoćna jednačina čiji iznos kasni

Del – vreme prepoznavanja iznosa In (jedinica vremena)

e) **DLINF3(.)**-eksponencijalno kašnjenje trećeg reda informacionog toka, odnosno kaskada triju eksponencijalnih kašnjenja prvog reda. Opšti oblik je:

$$y = \text{DLINF3}(In, Del)$$

pri čemu je:

In – stanje ili pomoćna vrednost koja kasni

Del – vreme kašnjenja (prepoznavanja) In (vremenske jedinice)

f) **LOGN(A)** znači  $\ln A$  (prirodni logoritam),  $A > 0$ .

g) **NOISE()** funkcija generiše slučajni niz brojeva jednoliko raspodeljenih između  $-0,5$  i  $+0,5$ .

h) **NORMRN(.)**-funkcija koja generiše slučajni niz brojeva normalno raspodeljen sa zadatim prosekom i standardnom devijacijom. Opšti oblik je:

$$y = \text{NORMRN}(\text{Mean}, \text{StdV})$$

pri čemu je:

Mean – sredina

StdV – standardna devijacija

j) **PULSE(.)** funkcija proizvodi niz jednakih pulsnih oblika. Opšti oblik je:

$y = \text{PULSE}(H,F,I)$

pri čemu je:

H- visina pulsa

F- vreme prvoga pulsa

I- interval između dva susedna pulsa

k) **SMOOTH(.)** funkcija predstavlja eksponencijalno izgladivanje pokretnog proseka informacionog toka prvog reda. Opšti oblik je:

$y = \text{SMOOTH}(\ln, \text{Del})$

pri čemu je:

ln – promena stanja koja se uprosečuje (jedinica/vreme)

Del – vreme uprosečivanja

l) **SAMPLE(.)** funkcija vrši sampliranje (uzorkovanje) zadate promenljive. Opšti oblik je:

$y = \text{SAMPLE}(X, \text{Interval}, X_0)$

pri čemu je:

X – promenljiva koja će biti samplirana

Interval – interval sampliranja

$X_0$  – početni iznos uzorka

m) **SWITCH(.)**-prekidačka funkcija. Opšti oblik je:

$y = \text{SWITCH}(P,Q,R)$

pri čemu je:

$$\text{SWITCH}(P,Q,R) = \begin{cases} P & \text{ako je } R=0 \\ Q & \text{ako je } R \neq 0 \end{cases}$$

n) **TABLE(.)** funkcije predstavljaju linearnu interpolaciju između zadatih tačaka tablice.

Uopšteno se označava:

$y = \text{TABLE}(\text{TNAME}, PK, N1, N2, N3)$

TNAME=E1/E2/...../EM

pri čemu je:

TNAME - ime tablice

P - ulazna promenljiva za koju će se interpolirati, zadata vrednost

N1 – prva vrednost ulazne promenljive

N2 – poslednja vrednost ulazne promenljive

N3 – interval između dve susedne tablične vrednosti

E1 – brojčani iznos tablice za  $P=N1$

E2 – numerička vrednost tablice za  $P=N1+N3$

EM – zadnji tablični ulaz za iznos  $P=N2$

P je zavisna promenljiva upotrebljena za ulaz u tablicu i ona je stanje ili pomoćna vrednost stanja.

o) **STEP (.)** funkcija generiše skok visine H u određenom vremenskom trenutku St. Opšti oblik je:

$y = \text{STEP}(H, St)$

pri čemu je:

$$\text{STEP}(H,St)=\begin{cases} 0 & \text{za } t < St \\ H & \text{za } t \geq St \end{cases}$$

p) **MAX(.)**-funkcija maksimiranja. Opšti oblik je:

$$y = \text{MAX}(P,Q)$$

pri čemu je:

$$\text{MAX}(P,Q)=\begin{cases} P & \text{za } P \geq Q \\ Q & \text{za } P < Q \end{cases}$$

r) **MIN(.)**-funkcija minimiziranja. Opšti oblik je:

$$y = \text{MIN}(P,Q)$$

pri čemu je:

$$\text{MIN}(P,Q)=\begin{cases} P & \text{za } P < Q \\ Q & \text{za } P \geq Q \end{cases}$$

$y = \text{TABLE}(YT, X.K, XL, XH, Dx)$ -limitirana vrednost minimuma i maksimuma tabelarne funkcije; ako je veća od maksimuma u tabeli ili manja od minimuma u tabeli, ova tabelarna funkcija blokira rad programa (**out of range**).

$y = \text{TABHL}(Y, X, XL, XH, Dx)$ -ova tabelarna funkcija dozvoljava vrednosti amplitude koje prolaze područje tabele (**out of range**), tada su ograničeni i fiksni minimum i maksimum (minimalna vrednost ide kao da je stalni minimum a maksimalna kao da je stalno maksimalna). Ova funkcija se preporučuje, jer ne blokira program.

$y = \text{TABXT}(Y, X, XL, XH, Dx)$ -tangens ugla minimalne i maksimalne vrednosti izvan padajuće tabele je isti.

Da li će bilo koji brod izvršavati funkcije koje su mu namenjene, zavisi od pouzdanosti funkcionisanja brodskih postrojenja. To znači da se i kod projektovanja broda mora voditi računa o pouzdanosti svake komponente, odnosno pouzdanosti svakog sistema i podsistema ugrađenog u brod. Pouzdanost brodskih postrojenja potrebno je razmatrati za sve načine delovanja na svim opasnim mestima osnovnih sklopova gde mogu nastati oštećenja, a ta mesta se utvrđuju na osnovu konstrukcija ili inženjerskog iskustva. Nastajanje pojedinih načina oštećenja se ustanovljava na osnovu kriterijuma oštećenja. Na primer, pouzdanost nekog dela brodskog dizel motora (kao sistema) zavisi od niza faktora, kao što su:

1. složenost tog dela,
2. način izrade i njegov kvalitet,
3. značaj tog dela u okviru dizel motora.

Radi toga je neophodno razmotriti sve faktore koji utiču na pouzdanost. Složenost podsistema ima veliki uticaj na mogućnost postizanja zahtevane pouzdanosti. Što je složeniji podsistem (delovi sistema), veći je broj sastavnih delova, pa je teže i skuplje postići visoku pouzdanost. Postavljanje visoke pouzdanosti složenih podsistema utiče na nesrazmerno povećanje troškova ulaganja u odnosu na efekat koji se postiže povećanjem zahteva pouzdanosti jednostavnijih podsistema.

Uslovi pod kojima će se koristiti sistem imaju uticaja na mogućnost postizanja zahtevane pouzdanosti. Sistem koji se koristi pod teškim uslovima okoline sigurno će u izradi koštati više od sličnog sistema iste pouzdanosti koji će se koristiti u blažim uslovima.



### 7.5.1. Opis pogonskog broskog dizel motora M 503 A-2



Slika 7.22. Brodski dizel motor M 503 A-2

Brodski dizel - motor M 503 A-2 je brzohodni, višecilindrični, zvezdasti, četvorotaktni motor sa vodenim hlađenjem i natpritiskom sa turbokompresorom. Za pogon koristi teško gorivo.

Motor se isporučuje u dve varijante desnokretni i levokretni, u zavisnosti od smera okretanja izlazne osovine prirubnice. Osnovna razlika levokretnog od desnokretnog motora je u reduktoru. U reduktoru levokretnog motora je jedan umetnuti međuzupčanik radi dobijanja suprotnog smera okretanja izlazne osovine.

Smer okretanja motora određuje se gledajući sa strane izlazne osovine prirubnice. Kod desnokretnog motora izlazna osovina se okreće u smeru kazaljke na satu, a u levokretnog u suprotnom smeru okretanja kazaljke na časovniku.

Levokretni motor se razlikuje od desnokretnog i po položaju pumpe morske vode, položaju boca sa vazduhom pod pritiskom koji služe za upravljanje preketom prirubnicom i sistemom oduška. Pumpa morske vode, gledano sa strane preketne prirubnice, na levokretnom motoru smeštena je na desnoj strani, kao što su i boce za upravljanje spojnicom. Sistem za produvanje smešten je na suprotnoj strani.



Kod desnokretnog motora ovi sklopovi su smešteni kao u ogledalu u odnosu na njihov položaj kod levokretnog motora.

Motor ima 42 cilindra u sedam blokova smeštenih zvezdasto. U svakom bloku je po osam cilindra. Ugao između blokova motora je  $51^{\circ}25'43''$ . Jedan blok - gornji - postavljen je vertikalno. Cilindarski blok sa cilindarskom glavom odliven je od aluminijum legure. U blok se utiskuju čelične cilindarske košuljice, koje se u donjem delu bloka zaptivaju gumenim prstenovima. Cilindarski blokovi pričvršćeni su za kućište motora vijcima koji su zavijani u sekcije kućišta. Kućište motora se sastoji od devet čeličnih sekcija. Sekcije su međusobno spojene vijcima. Radilica ima šest rukavaca. Rukavci su međusobno povezani ramenima, koji su istovremeno i oslonci radilice. Radilica motora je u kućištu motora, postavljena na devet valjkastih ležajeva. Jedan ležaj ograničava pomicanje osovina u aksijalnom smeru. Sklop klipnjača svake sedmocilindrične zvezde sastoji se od glavne i šest priključnih. Priključne klipnjače spojene su s glavnom pomoću osovinica utisnutih u okca glavne klipnjače. Klipovi su iskovan od aluminijumske legure. Svaki klip glavne klipnjače ima dva čelična kompresijska prstena i dva uljna prstena od livenog gvožđa. Klip priključne klipnjače ima dodatni čelični uljni prsten. Osovinice klipa su slobodno uložene. U cilindarskoj glavi, za svaki cilindar, smeštena su po dva usisna i dva izduvna ventila. Ventili dobijaju pogon od razvodne osovine preko klackalica smeštenih u gornjem delu kućišta blok-pumpi. Razvodnu osovinu pogoni radilica motora i to preko zupčastog prenosa i međusosvine. Izduvni gasovi iz svakog bloka skupljaju se u izduvnom kolektoru, a odatle preko izduvnog ventila u gasnu turbinu. Izduvni kolektor se hladi vodom. Turbokompresor je smešten na prednjem delu motora u produžetku njegove ose simetrije. Namena mu je povećanje zapreminske snage motora, iskorišćavajući za pokretanje energiju izduvnih gasova. Turbokompresor se sastoji od jednostepenog centrifugalnog kompresora i jednostepene aksijalne gasne turbine, smeštenih na zajedničkoj osovini. Rotor turbokompresora je preko dvostepenog zupčanog prenosa i hidraulične spojke vezan sa radilicom motora. Smerovi okretanja radilice motora i rotora turbokompresora su isti.

Kompresor neposredno usisava vazduh iz motornog prostora kroz četiri usisna ventila na kojima su na cevima uvodnika postavljeni prigušivači buke. Posle izlaska iz turbokompresora, sabijeni vazduh se hladi morskom vodom u rashladniku, a zatim vodi cevovodima na ulazne otvore blokova dizelmotora.

Na prednjem delu kućišta motora pričvršćen je prenosnik u kojem je zupčanički prenos za pogon razvodnih osovine, mehanizam za promenu ugla ubrizgavanja goriva i kolektor rashladne vode motora.

Dve pumpe centrifugalnog tipa za slatku vodu su na kućištu turbokompresora. Pumpe ubacuju vodu u kolektor prenosnika, odatle se ona razvodi ka svakom cilindarskom bloku. Uzduž donjeg dela bloka je kolektor vode iz kojeg rashladna voda ulazi u svaki cilindar. Iz blokova voda odlazi u rashladne prostore kolektora izduvnih gasova, zatim kroz rashladne prostore izduvnih kolena i kućišta turbine ide u rashladni prostor sabirnika gasova. Iz sabirnika gasova rashladna voda se odvodi u brodski rashladnik, u kome se hladi morskom vodom.

Sistem goriva dizelmotora sastoji se od odvojeno smeštenog grubog mrežastog prečistača, pumpe goriva, finog mrežastog dvostrukog prečistača, pumpi visokog pritiska i ubrizgača. Pumpe visokog pritiska za ubrizgavanje izrađene su kao jednoklipne pumpe-sekcije. Pumpe se pričvršćuju na kućište blok-pumpi, zajedničko za svih osam cilindara svakog bloka. Ubrizgači su zatvorenog tipa. Ugrađeni su u glavu cilindra koso u odnosu na osu cilindra. Pumpama za ubrizgavanje se upravlja regulatorom preko poluga i centralnim mehanizmom u prenosniku. Sverežimski regulator broja okretaja motora je na kućištu pogona agregata. Dizelmotor ima prekretnu spojku koja omogućuje prenošenje okretaja sa radilice motora na osovinski vod preko reduktora na propeler, bez promene smera okretanja - hod napred; isključenje osovinskog voda od motora - prazan hod; prenos obrtaja sa radilice motora preko reduktora na osovinski vod sa promenjenim smerom okretanja - hod krmom. Pri tome smer okretanja radilice motora ostaje nepromenjen.

Mehanizam prekretno prirubnice je u livenom aluminijumskom kućištu, koje je pričvršćeno u zadnji deo kućišta motora. Okretanje sa radilice motora na osovini prirubnice za hod napred se ukopčava i prenosi kandžastom spojkom, uz prethodnu sinhronizaciju okretanja osovine prirubnice i radilice motora pomoću konične tarajuće spojke.

Za hod krmom okretanje se prenosi preko planetarnog sistema koničnih zupčanika. Jednostepeni reduktor, koji prenosi okretanje sa ulazne osovine prirubnice na izlaznu osovini reduktora, pričvršćen je na kućište prirubnice. Reduktor ima odlivene ležaje, koji na sebe preuzimaju aksijalnu silu propelera. Motor se pričvršćuje na postolje u brodu preko četiri stope. Dve krmene su glavni oslonci, a smeštene su na kućištu prekretno prirubnice. Izvedene su u obliku rukavca s gumenim amortizerima. Druge dve stope, pramčane, služe za oslanjanje i izrađuju se u dve varijante: sa amortizerima i bez njih. Pramčane stope su međusobno spojene polužnim mehanizmom. Polužni mehanizam pramčanih stopa ima gumeni amortizer i pričvršćen je na dva donja bloka motora sa strane turbokompresora. Sistem za podmazivanje dizelmotora sastoji se od: potrošnog rezervoara ulja, pumpe visokog pritiska, prečistača ulja i glavne uljne magistrale motora. Ulje se iz motora odvodi u slivni kolektor kućišta prekretno prirubnice. Odatle se crpi usisnom pumpom i kroz posebni filter i rashladnik prebacuje u potrošni rezervoar.

### **7.5.2. Model dizel motora M 503 A-2**

U ovom delu disertacije izložićemo model jednačina stanja dizel motora M 503 A-2, kao i simulacijske modele za sve podsisteme, te i simulacioni model motora u celosti.

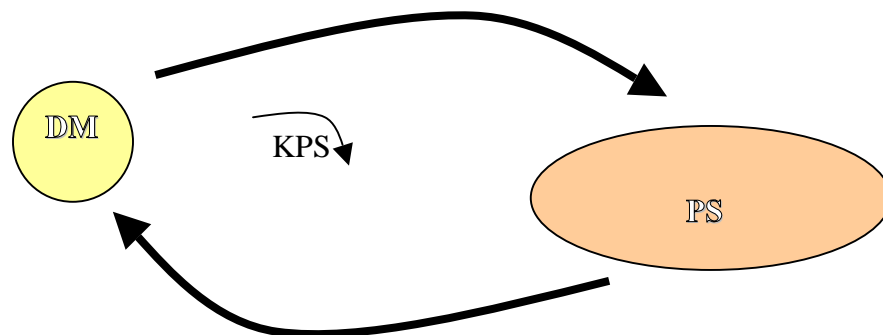
Jednačine stanja dinamičkog sistema predstavljaju skup nelinearnih i linearnih jednačina koje determinišu dinamičko ponašanje svih varijabli, odnosno celine dinamičkog sistema. Ponašanje dizel motora M 503 A-2 u dinamičkim režimima rada opisano je sistemom nelinearnih diferencijalnih jednačina. Metodologija za istraživanje ponašanja dizel motora M 503 A-2, te za predviđanje tipa funkcije pouzdanosti, temelji se na informacijama u razvojnim fazama sistema i posmatranja sistema u

eksploatacijskim uslovima. Kod predviđanja pouzdanosti broskog dizel motora potrebno je:

1. definisati motor kao sistem;
2. definisati otkaze;
3. definisati operativne uslove, kao i uslove održavanja;
4. konstruisati blok-dijagrame pouzdanosti;
5. postaviti algoritme za izračunavanje pouzdanosti;
6. utvrditi intenzitete otkaza za pojedine delove motora;
7. modifikovati indekse otkaza za pojedine delove motora;
8. izračunati pouzdanost motora.

Pri definisanju motora kao sistema potrebno je odrediti njegove celine i njihovu međusobnu povezanost. Takve celine predstavljaju podsisteme motora. Dizel motor M 503 A-2 (**DM**) kao složeni sistem karakteriše kompleksnost, što znači da komunicira sa svojim podsistemima (**PS**), pripadajućim elementima, i drugim sistemima potrebnim za njegov ispravan rad. Dizel motor uslovno zatvaramo prema slici 7.23.

Složenost dizel motora ćemo predstaviti kao interkomunikacijsku vezu sa svojom podsistemima (slika 7.23). Gornja puna usmerena linija i donja usmerena linija ukazuju na uslovnu zatvorenost što znači da možemo razmatrati uticaj dizel motora na sisteme i obrnuto. Te usmerene pune linije predstavljaju kanale kojima protiče barem jedan materijalni i/ili informacioni tok, a može ih biti i više.



Slika 7.23. Zatvoreni sistem DM i PS

Dizel motor koristi devet podsistema koji su međusobno interkomunikaciono povezani sa motorom:

1. Turbina;
2. Turbokompresor;
3. Spojnica;
4. Blok-cilindri;
5. Klipovi;
6. Glavna klipnjača;
7. Klizni ležaj;
8. Osovina klipa;
9. Izduvni ventili.

Svaki od tih podsistema u svom opsegu sadrži sektore i podsektore.

Pod otkazom se podrazumeva nastajanje uslova koji motor čine nesposobnim za rad prema propisanim parametrima. Mogu se podeliti na otkaze koji uzrokuju nemogućnost korišćenja motora, koji umanjuju snagu motora i na one koji ne umanjuju snagu motora, ali mogu biti uzrok nemogućnosti korišćenja motora.

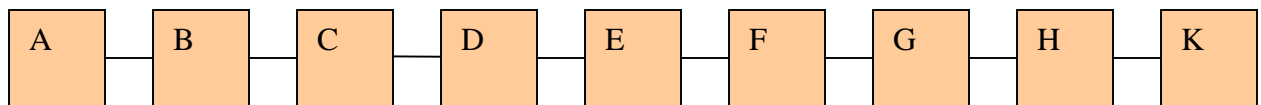
Operativni uslovi određuju uslove rada motora. Uslovi održavanja koji utiču na pouzdanost motora moraju biti poznati pre predviđanja pouzdanosti. Pod tim se podrazumeva:

- Ø vreme zamene delova s poznatim ili procenjenim vekom trajanja;
- Ø sprovođenje periodičnog održavanja;
- Ø specifikacija delova koji se mogu zameniti ili popraviti u toku rada motora.

Blok-dijagram pouzdanosti predstavlja slikoviti prikaz funkcionalne povezanosti sistema ili blokova unutar sistema. Pogodno ih je prikazati redosledom obavljanja njihove funkcije.

Algoritam za izračunavanje pouzdanosti predstavlja matematički odnos između pouzdanosti sistema i pouzdanosti delova sistema prikazanih u blok-dijagramu (slika 7.24).

U procesu predviđanja pouzdanosti potrebno je utvrditi intenzitet otkaza delova sistema. Dobija se na osnovu podataka kojima raspolaže proizvođač, iskustva pri eksploataciji sličnih sistema, statističkih pokazatelja i podataka iz literature. Kod ovog sistema polazi se od pretpostavke konstantnog intenziteta otkaza. Potrebno je na osnovu raspoloživih podataka iz tehničke dokumentacije proizvođača motora i dnevnika mašina izvršiti predviđanje pouzdanosti. Takođe, treba utvrditi da li zadovoljava predviđena pouzdanost unapred postavljenim zahtevima i na osnovu dobijenih rezultata zaključiti da li je potrebno preduzimati određene mere za povećanje pouzdanosti.



A – turbina	D – blok cilindri	G – klizni ležaj
B – turbokompresor	E – klipovi	H – osovina klipa
C – spojka (prirubnica)	F – glavna klipnjača	K – izduvni ventil

Slika 7.24. Blok-dijagram pouzdanosti broskog motora M 503 A-2

Pouzdanost motora dobija se uvrštavanjem vrednosti intenziteta otkaza delova sistema u algoritam za izračunavanje pouzdanosti u definisanom vremenskom intervalu.

### 7.5.3. Algoritmi za razmatranje intenziteta otkaza (uz pretpostavke da je intenzitet otkaza konstantan)

Intenzitet otkaza za većinu delova motora je konstantan, tj. ne zavisi od vremena. Delovi motora čiji intenzitet otkaza zavisi od vremena imaju veoma male vremenske periode otkaza u poređenju sa vremenom rada tih delova. Ako se pretpostavi da su svi intenziteti otkaza konstantni, dobijaju se neznatne pogreške.

Ako intenziteti otkaza delova nisu u funkciji vremena, onda se pouzdanost motora sastavljenog od takvih delova može izračunati prema eksponencijalnoj distribuciji pomoću jednačine (7.7):

$$R_m = e^{-I \times t} \quad (7.7)$$

pri čemu je:

$R_m$  - pouzdanost motora,

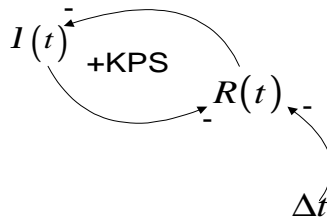
$I$  - intenzitet otkaza motora,

$t$  - zahtevano vreme pouzdanog rada motora.

Ako su intenziteti otkaza delova motora u funkciji vremena, onda se pouzdanost motora može izračunati prema eksponencijalnoj distribuciji pomoću jednačine (7.8):

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (7.8)$$

Strukturni model pouzdanosti motora prikazan je na slici 7.25:



Slika 7.25. Strukturni model pouzdanosti motora

Mentalno-verbalni model pouzdanosti motora može se definisati na sledeći način:

- Ako vremenski interval  $\Delta t$  raste, pouzdanost motora će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-).

- Ako intenzitet otkaza  $I_m$  raste, pouzdanost motora  $R(t)$  će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-).

- Ako pouzdanost motora  $R(t)$  raste, intenzitet otkaza  $I_m$  će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Ukupan predznak kruga povratne sprege ima pozitivan (+) karakter.

Za slučaj serijske veze elemenata sistema,  $I_m$  iznosi:

$$I_m = \sum_{i=1}^n I_i \quad (7.9)$$

pri čemu je:  $\lambda_i$  intenzitet otkaza  $i$ -tog dela motora.

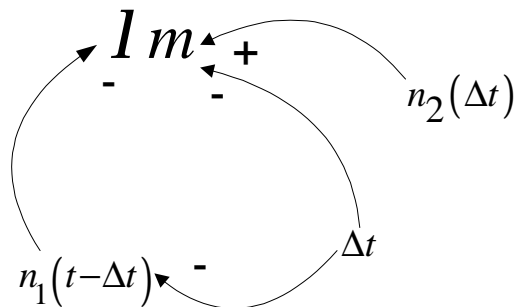
Funkcija intenziteta otkaza  $I_m$  jednaka je srazmeri između broja otkaza u vremenskom intervalu  $\Delta t$  i ispravnog broja elemenata u sistemu na početku tog intervala, tj.:

$$I_m = \frac{n_2(\Delta t)}{[n_1(t - \Delta t)]\Delta t} \quad (7.10)$$

pri čemu je:

1.  $I_m$  - funkcija intenziteta otkaza;
2.  $n_2(\Delta t)$  - broj otkaza u vremenskom intervalu  $\Delta t$  ;
3.  $n_1(t - \Delta t)$  - ispravan broj elemenata na kraju intervala  $\Delta t$  , odnosno do trenutka  $(t - \Delta t)$ .

Strukturni model funkcije intenziteta otkaza ( $I_m$ ) prikazan je na sledećoj slici.



Slika 7.26. Strukturni model funkcije intenziteta otkaza

Mentalno–verbalni model funkcije intenziteta otkaza možemo definisati:

- Ako raste broj otkaza ( $n_2(\Delta t)$ ) u vremenskom intervalu  $\Delta t$ , tada će porasti i intenzitet otkaza ( $\lambda_m$ ), te će predznak uzročno-posledične veze biti pozitivan (+).
- Ako vremenski interval  $\Delta t$  raste, ispravan broj elemenata na kraju vremenskog intervala, tj.  $n_1(t-\Delta t)$  će se smanjivati, te je predznak uzročno-posledične veze negativan (-).
- Ako  $n_1(t-\Delta t)$  raste, onda je predznak uzročno-posledične veze negativan (-).

U ovakvom slučaju, srednje vreme između otkaza motora  $M_m$  može se izračunati pomoću izraza:

$$M_m = \frac{1}{I_m} [h] \quad (7.11)$$

### 7.5.4. Određivanje granice poverenja za slučaj eksponencijalne distribucije pomoću $c^2$ distribucije

Često se događa da pojedini delovi motora nemaju podatke o bilo kakvom otkazu, a poznato je koliko su vremena ti delovi bili u funkciji. Ako se pretpostavi da se na dati deo motora može primeniti eksponencijalna distribucija, moguće je odrediti gornju granicu poverenja za intenzitet otkaza, i to za slučaj kada nije bilo otkaza i za slučaj jednog ili većeg broja otkaza.

Donja granica poverenja za srednje vreme između otkaza  $\Theta$ , za interval poverenja  $(t - \Delta t)$ , određena je izrazom:

$$\Theta \geq \frac{2t_r}{c^2_{a, 2r+2}} \quad (7.12)$$

pri čemu je:

$t_r$  - ukupno vreme rada motora,

$r$  - broj motora koji su otkazali,

$c^2_{a, 2r+2}$  - vrednost verovatnoće koja pripada  $c^2$  distribuciji.

(Vujanović, N.: *Teorija pouzdanost tehničkih sistema, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1990, str. 120*)

U vremenskom intervalu do prvog remonta, tj. do 600 časova, posmatralo se ukupno 69 motora, od kojih su samo četiri bila u otkazu. Prema podacima iz dnevnika mašina ukupno vreme rada motora iznosilo je 28.909,8 časova. U tom vremenu bilo je 81726 ispravnih elemenata.

Za interval poverenja  $(1 - a) = 0,75$  uz  $k = r - 2 = 4 - 2 = 2$ , dobija se donja granica poverenja.

$$\Theta \geq \frac{2t_r}{c^2_{0,25;2}} = \frac{2 \times 28909,8}{2,8135} = 21156,04$$

$$\Theta \geq 21156,04 \text{ [h]}$$

Vrednost  $\chi^2_{0,25;2}$  dobija se iz priloga 1.

Gornja vrednost intenziteta otkaza za ispravne elemente u intervalu poverenja  $(1 - a) = 0,75$  iznosi:

$$I = \frac{1}{\Theta} = \frac{1}{20550,773} = 4,8659 \times 10^{-5} \text{ [otkaza/h]}$$

Dobijena vrednost treba da se podeli s brojem ispravnih delova, pa se dobija gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadatom intervalu poverenja:

$$I_{EL} = \frac{4,8659 \times 10^{-5}}{81726} = 5,9540378 \times 10^{-10} \text{ [otkaza/h]}$$



### 7.5.5. Mentalno verbalni model

Porast intenziteta otkaza bilo kojeg podsistema motora (IK) uzrokuje povećanje ukupnog intenziteta otkaza posmatranog podsistema motora (IKU), što znači pozitivnu (+) uzročno-posledičnu vezu. Porast ukupnog intenziteta otkaza podsistema motora (IKU) implicira pad pouzdanosti posmatranog podsistema motora (PM), što znači negativnu (-) uzročno-posledičnu vezu. Porast intenziteta otkaza pojedinog elementa podsistema motora uzrokuje porast intenziteta otkaza podsistema (IK), što znači pozitivnu (+) uzročno-posledičnu vezu. Veći broj otkaza pojedinog elementa (BK) podsistema motora prouzrokuje porast intenziteta otkaza tog podsistema, što kod svih elemenata koji su imali otkaz implicira pozitivnu (+) uzročno-posledičnu vezu. Povećanje vremena u kojem nije bilo otkaza (VNK) kao i broj ispravnih elemenata (BIE) podsistema smanjuje intenzitet otkaza posmatranog elementa (IK) i generiše negativnu (-) povratnu vezu. Rast intenziteta otkaza podsistema motora uzrokuje smanjenje očekivanog vremena bezotkaznog rada (MT), što implicira negativnu (-) uzročno-posledičnu vezu, dok rast pouzdanosti podsistema (PM) motora prouzrokuje smanjenje intenziteta otkaza podsistema motora (IK), što znači negativnu (-) uzročno-posledičnu vezu.

Porast gornje vrednosti intenziteta otkaza za ispravne elemente (GVIEK) uzrokuje porast gornje vrednosti intenziteta otkaza svakog pojedinog elementa posmatranog podsistema kao i motora u celini (GVIKEL), što znači pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Porast gornje vrednosti intenziteta otkaza svakog pojedinog elementa implicira i porast ukupnog intenziteta otkaza posmatranog podsistema motora (IKU), što znači pozitivnu (+) uzročno-posledičnu vezu.

Mentalno-verbalni model jednak je za sve podsisteme motora sa pripadajućim elementima, kao i za motor u celini.

Ukupan predznak pojedinih podsistema i motora kao sistema posledica je odnosa ukupnog intenziteta otkaza i pouzdanosti, što generiše pozitivni predznak u modelu i ukazuje na to da sistem ima kumulativni karakter i da u principu model ima karakter eksponencijalnog rasta.

Mentalno-verbalni model pretvorićemo u dijagrame toka i strukturne dijagrame svih podsistema kao i motora u celini, što će olakšati dalje proučavanje zadatog problema.

Da bismo mogli pratiti dalju razradu simulacionih modela podsistema dizel motora, kao i motora u celini, prikazaćemo nazive izračunatih varijabli kao skraćenice:

Zajednički parametri motora su:

- IKMU** - UKUPNI INTENZITET OTKAZA MOTORA
- SBSIK** - SREDNJI BROJ ČASOVA IZMEĐU OTKAZA
- UPPM** - UKUPNA PREDVIĐENA POUZDANOST MOTORA
- GVIKEL** - GORNJA VREDNOST INTENZITETA OTKAZA ZA SVAKI  
POJEDINI ELEMENT U ZADATOM INTERVALU
- GVIKIE** - GORNJA VREDNOST INTENZITETA OTKAZA ZA  
ISPRAVNE ELEMENTE U INTERVALU POVERENJA (0,75)
- DGP** - DONJA GRANICA POVERENJA
- BIDM** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA MOTORA U ZADATOM INTERVALU
- T** - ZADATI VREMENSKI INTERVAL



## 7.5.6. Sistem-dinamički modeli podsistema dizel motora M 503 A-2

### 7.5.6.1. Podsistem turbine

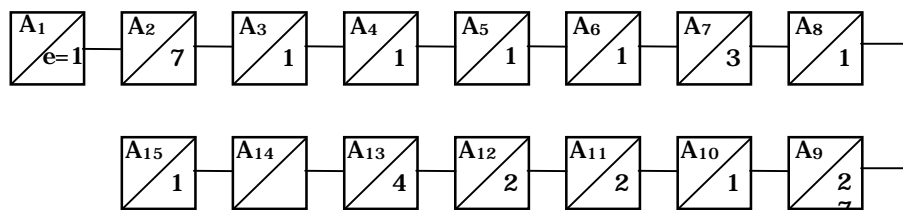


Slika 7.27. Brodska turbina

#### *Mentalno-verbalni model*

Turbina koristi energiju izduvnih gasova motora. Ta energija se pretvara u turbini u mehanički rad na osovini i troši se na okretanje radnog kola kompresora.

Turbina je aksijalna, jednostepena, reakcijska. Izduvni gasovi motora ulaze u kućište turbine kroz sedam kanala i dovode se cevima na sapnice. U cevi se skreće struja gasova od radijalnog u aksijalni smer. U rešetki lopatica statora vraća se smer strujanja gasova - od aksijalnog u smer okretanja radnog kola, smanjuje se pritisak gasova i povećava brzina strujanja. Zatim gasovi ulaze između lopatica turbine, gde se ponovo menja pravac strujanja gasa i njegovo dalje ekspaniranje. Promena pravca strujanja gasa između lopatica rotora je u smeru suprotnom od smera strujanja gasa u statoru. Pri okretanju rotora sila reakcije, koja deluje na lopatice, vrši rad. Iz rotora turbine gasovi izlaze u približno aksijalnom pravcu, ulaze u kružni prostor - difuzor, koji čine sabirnik gasova i unutrašnji plašt. U difuzoru se brzina gasova smanjuje, pritisak raste; zbog toga se delimično koristi kinetička energija gasova iza radnog kola turbine i povećava koeficijent korisnog delovanja snage. Zatim se u prostoru kolektora gasova okreće smer proticanja gasova - od aksijalnog u radijalni. Za bolje proticanje gasova, smanjenje gubitaka, u sabirniku gasova postavljeni su razdeljivači struje gasova i izrađeni u obliku posebnih valjaka. Turbina se sastoji od 15 osnovnih delova, koji su shematski prikazani na slici 7.28. Svaki osnovni deo može biti sastavljen iz više elemenata.



$e$  - broj elemenata sklopa

$A_1$  - zaštitni poklopac

$A_2$  - prirubnica

$A_3$  - kućište

$A_4$  - spojke

$A_5$  - cevne prirubnice

$A_6$  - rotor

$A_7$  - vijci

$A_8$  - zupčanik

$A_9$  - matice

$A_{10}$  - prsten ležaja

$A_{11}$  - lavirintna zaptivka

$A_{12}$  - zaptivka (brtva)

$A_{13}$  - sigurnosne podloge

$A_{14}$  - tuljak

$A_{15}$  - valjkasti ležaj

Slika 7.28. Blok-dijagram turbine

Otkazi podsistema turbine dogodili su se na osnovnom delu  $A_{10}$  nakon 180 časova rada, na delu  $A_{12}$  nakon 237 časova rada i na delu  $A_{15}$  nakon 490,3 časova rada. Podsistem turbine sastoji se iz 54 elemenata, a za 69 dizel motora to iznosi 3 726 elemenata.

Funkcija intenziteta otkaza  $I_m$  za delove:  $A_{10}$ ,  $A_{12}$  i  $A_{15}$  je:

$$I_{A_{10}} = \frac{1}{3725 \times 180} = 1,491 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{A_{12}} = \frac{1}{3725 \times 237} = 1,132 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{A_{15}} = \frac{1}{3725 \times 490,3} = 0,547 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Intenzitet otkaza podsistema turbine iznosi:

$$I_A = I_{A_{10}} + I_{A_{12}} + I_{A_{15}} = 3,175 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema turbine iznosi:

$$I_{AUK} = I_A + n_A \times I_{EL} = 3,17005 \times 10^{-6} + 3723 \times 5,95403810^{-10}$$

$$I_{AUK} = 5,3548 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

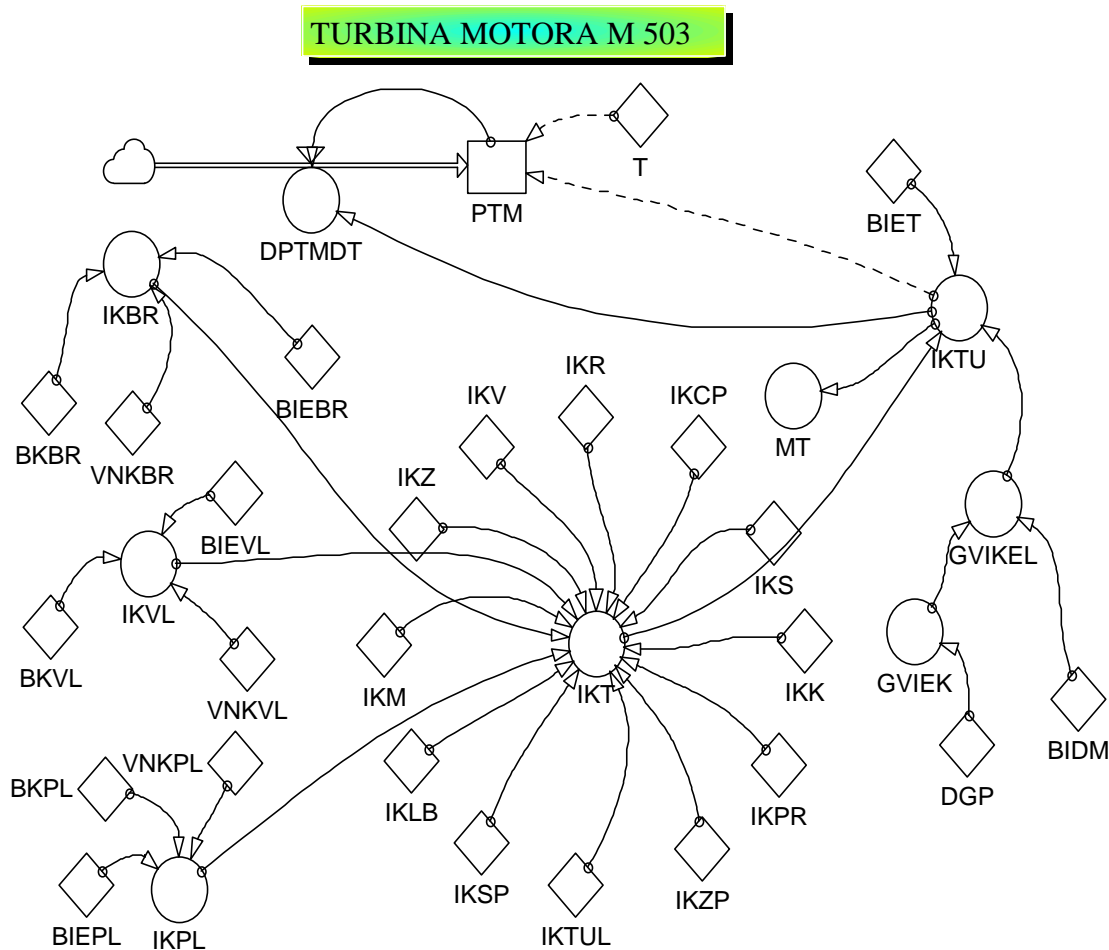
Prikaz svih parametara u modelu podsistema turbine motora:

<b>DPTMDT</b>	- PROMENA POUZDANOSTI TURBINE MOTORA
<b>PTM</b>	- POUZDANOST TURBINE
<b>BIET</b>	- BROJ ISPRAVNIH DELOVA TURBINE U ZADATOM INTERVALU
<b>IKPL</b>	- INTENZITET OTKAZA PRSTENA LEŽAJA TURBINE
<b>BKPL</b>	- UKUPAN BROJ OTKAZA PRSTENA LEŽAJA
<b>BIEPL</b>	- BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENA LEŽAJA
<b>VNKPL</b>	- VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENA LEŽAJA
<b>IKBR</b>	- INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE TURBINE
<b>BKBR</b>	- UKUPAN BROJ OTKAZA ZAPTIVKE
<b>BIEBR</b>	- BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA ZAPTIVKE
<b>VNKBR</b>	- VREME NASTANKA OTKAZA ZAPTIVKE
<b>IKVL</b>	- INTENZITET OTKAZA VALJKASTOG LEŽAJA TURBINE
<b>BKVL</b>	- UKUPAN BROJ OTKAZA VALJKASTOG LEŽAJA
<b>BIEVL</b>	- BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA VALJKASTOG LEŽAJA
<b>VNKVL</b>	- VREME NASTANKA OTKAZA VALJKASTOG LEŽAJA
<b>IKT</b>	- INTENZITET OTKAZA TURBINE
<b>IKZP</b>	- INTENZITET OTKAZA ZAŠTITNOG POKLOPCA TURBINE
<b>IKPR</b>	- INTENZITET OTKAZA PRIRUBNICE TURBINE
<b>IKK</b>	- INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA TURBINE
<b>IKST</b>	- INTENZITET OTKAZA SPOJKE TURBINE
<b>IKCP</b>	- INTENZITET OTKAZA CEVNE PRIRUBNICE TURBINE
<b>IKR</b>	- INTENZITET OTKAZA ROTORA TURBINE
<b>IKV</b>	- INTENZITET OTKAZA VIJKA TURBINE
<b>IKZ</b>	- INTENZITET OTKAZA ZUPČANIK TURBINE
<b>IKM</b>	- INTENZITET OTKAZA MATICE TURBINE
<b>IKLB</b>	- INTENZITET OTKAZA LAVIRINTNE ZAPTIVKE TURBINE
<b>IKSP</b>	- INTENZITET OTKAZA SIGURNOSNE PODLOGE TURBINE
<b>IKTUL</b>	- INTENZITET OTKAZA TULJKA TURBINE

Na osnovu verbalnog modela i navedenih skraćenica delova podsklopa turbine možemo dati strukturni model (slika 7.29), kao i dijagram toka podsistema (slika 7.30) u POWERSIM simbolici:



za ostala dva dela. Ako ukupan intenzitet otkaza (IKTU) pada, srednje vreme između otkaza turbine raste (MT).



Slika 7.30. Dijagram toka podsistema turbine u POWERSIM-simbolici

Matematički model podsistema turbine motora u DYNAMO jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti turbine (PTM), jednačina ukupnog intenziteta turbine (IKTU) donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova motora (BIDM), broj ispravnih delova turbine (BIET) i zadati vremenski interval (T).

\*\*\*\*\*

R DPTMDT.KL=-(IKTU.K)\*PTM.K

L PTM.K=PTM.J+DT\*DPTMDT.JK

N PTM=1/EXP(IKTU\*T)

A IKTU.K=IKT+BIET\*GVIKEL

A GVIKEL.K=GVIKIE/BIDM

K GVIKIE=1/DGP

C DGP=20550.773

C BIDM=81726

C BIET=3723

C T=600

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta prstena ležaja ( $A_{10}$ ), ukupan broj otkaza (BKPL), broj ispravnih delova (BIEPL) i vreme nastanka otkaza (V NKLP).

\*\*\*\*\*

A  $IKPL.K=BKPL/(BIEPL*V NKLP)$

C BKPL=1

C BIEPL=3725

C V NKLP=180

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta brtve ( $A_{12}$ ), ukupan broj otkaza (BKBR), broj ispravnih delova (BIEBR) i vreme nastanka otkaza (V NKBR).

\*\*\*\*\*

A  $IKBR.K=BKBR/(BIEBR*V NKBR)$

C BKBR=1

C BIEBR=3725

C V NKBR=237

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta valjkastog ležaja ( $A_{15}$ ), ukupan broj otkaza (BKVL), broj ispravnih delova (BIEVL) i vreme nastanka otkaza (V NKVL).

\*\*\*\*\*

A  $IKVL.K=BKVL/(BIEVL*V NKVL)$

C BKVL=1

C BIEVL=3725

C V NKVL=490.3

\* \*\*\*\*

Ostali delovi podsistema nisu imali otkaze, pa je njihov intenzitet otkaza jednak nuli.

\*\*\*\*\*

A  $IKT.K=IKPL+IKBR+IKVL+IKZP+IKPR+IKK+IKS+IKCP+IKR+IKV+IKZ+IKM+IKLB+IKSP+IKTUL$

C IKZP=0

C IKPR=0

C IKK=0

C IKS=0

C IKCP=0

C IKR=0

C IKV=0

C IKZ=0

C IKM=0

C IKLB=0

C IKSP=0

C IKTUL=0

\* \*\*\*\*

SAVE DPTMDT,PTM,IKTU,BKPL,BIEPL,IKPL,BKPL,BIEPL,V NKLP,V NKBR,^

IKBR,IKVL,GVIKEL,GVIKIE,IKT  
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2

\* \*\*\*\*

### 7.5.6.2. *Podsistem turbokompresora*

#### *Mentalno-verbalni model*

Agregat za pretpritisak vazduha služi za povećanje zapreminske snage motora sa povećanom količinom vazduha. On za svoj rad koristi energiju izduvnih gasova motora.

Agregat pretpritisaka je u prednjem delu motora i pričvršćuje se za prirubnicu prenosnika. Agregat pretpritisaka je, u stvari, turbokompresor koji se sastoji od jednostepenog centrifugalnog kompresora, jednostepene aksijalne gasne turbine i pogona koji ostvaruje mehaničku vezu između osovine turbokompresora i radilice motora. Postojanje mehaničke veze između osovine turbokompresora i radilice motora obezbeđuje pretpritisak u cilindrima motora na svim režimima rada. Pogon se sastoji od dvostepenog zupčanog prenosa sa čeonim zupčanicima i tri hidrauličke spojke, koje su stalno napunjene. Hidraulične spojke obezbeđuju elastičnu vezu između osovine motora i turbokompresora, što znatno smanjuje opterećenje pogonskog dela u momentu uključivanja, kao i naglih promena broja okretaja i snage motora. Osim toga, hidraulične spojke su vrlo efikasni prigušivači torzionih oscilacija.

Pogonski uređaj obezbeđuje dvostrani prenos snage: sa radilice motora na osovinu turbokompresora i obratno, sa osovine turbokompresora na radilicu motora. Pri radu motora na maksimalnom broju okretaja klizanje hidrauličnih spojki je neznatno, te pogon (mehanički) radi u praznom hodu.

Kompresor služi za kompresiju (sabijanje) vazduha i njegovo dovođenje u motor. U njemu se mehanička energija dobijena od gasne turbine pretvara u potencijalnu energiju sabijenog vazduha.

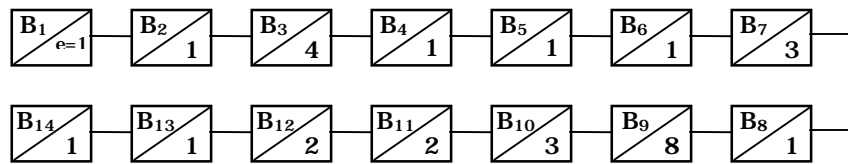
Kompresor je centrifugalnog tipa, jednostepen, ne hladi se i ima dovod sa jedne strane. Kompresor usisava vazduh kroz četiri uvodnika vazduha, koji su raspoređeni u ravni paralelnoj na osu dizel motora.

Sklop rotora kompresora sastoji se od sledećih delova:

1. pomoćnog aparata sa 23 konusne lopatice, koje obezbeđuju ulazak vazduha u rotor bez udara;
2. rotora zatvorenog tipa sa 23 radijalne lopatice;
3. čaure rotora, koja spaja rotor i pomoćni aparat, a služi za nasađivanje rotora na osovinu turbokompresora.

Pomoćni aparat i rotor su od aluminijumske legure.

Turbokompresor je podsistem koji se sastoji od 14 osnovnih delova, koji su shematski prikazani na slici 7.31. Svaki osnovni deo u principu može biti sastavljen iz više elemenata.



$e$  - broj elemenata sklopa

$B_1$  - kućište

$B_2$  - poklopac

$B_3$  - zupčanici

$B_4$  - osovina

$B_5$  - hidraulična spojka

$B_6$  - cevi za ulje

$B_7$  - podloška za regulisanje

$B_8$  - konusni zupčanik

$B_9$  - navrtke

$B_{10}$  - prstenasti osigurač

$B_{11}$  - podložne pločice

$B_{12}$  - zaptivke

$B_{13}$  - rotor

$B_{14}$  - pomoćni aparat

Slika 7.31. Blok-dijagram turbokompresora

Otkazi podsistema turbokompresora dogodili su se na osnovnim delovima  $B_4$  posle 150,3 časova i posle 327,05 puta rada, na delu  $B_6$  nakon 285,08 časova rada, na delu  $B_{12}$  nakon 495 časova rada i na delu  $B_{14}$  posle 558,15 časova, 577 i posle 580 časova rada.

Ukupno je bilo sedam otkaza na 30 elemenata turbokompresora, odnosno za 69 dizel motora ukupni broj elemenata iznosi 2 070.

Funkcija intenziteta otkaza  $I_m$  za delove  $B_4$ ,  $B_6$ ,  $B_{12}$  i  $B_{14}$  je:

$$I_{B_4} = \frac{2}{2068 \times \frac{150,3 + 327,05}{2}} = 4,05203 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{B_6} = \frac{1}{2069 \times 285} = 1,69588 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{B_{12}} = \frac{1}{2069 \times 495} = 0,97641 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{B_{14}} = \frac{3}{2067 \times \frac{558,15 + 577,00 + 580}{3}} = 2,53863 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Intenzitet otkaza podsistema turbokompresora iznosi:

$$I_B = I_{B_4} + I_{B_6} + I_{B_{12}} + I_{B_{14}} = 9,26295 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema turbokompresora iznosi:

$$I_{BUK} = I_B + n_B \times I_{EL} = 9,2695 \times 10^{-6} + 2063 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{BUK} = 10,4735 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}].$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema turbokompresora motora:



**DPTKMDT** - PROMENA POUZDANOSTI TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**PTKM** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKTKU** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**BIETK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKOTK** - INTENZITET OTKAZA OSOVINE TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**BKOTK** - BROJ OTKAZA OSOVINE TURBOKOMPRESORA  
**BIEOTK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA  
**VNKOTK** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINE TURBOKOMPRESORA  
**VNKOTK1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA OSOVINE TURBOKOMPRESORA  
**VNKOTK2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA OSOVINE  
TURBOKOMPRESORA  
**IKCUTK** - INTENZITET OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**BK CUTK** - BROJ OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA  
**BIECUTK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA  
**VNKCUTK** - VREME NASTANKA OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA  
**IKBRTK** - INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**BKBRTK** - BROJ OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA  
**BIEBRTK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA  
**VNKBRTK** - VREME NASTANKA OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA  
**IKPATK** - INTENZITET OTKAZA POMOĆNOG APARATA TURBOKOMPRESORA  
**BK PATK** - BROJ OTKAZA POMOĆNOG APARATA TURBOKOMPRESORA  
**BIEPATK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POMOĆNOG APARATA  
TURBOKOMPRESORA  
**VNKATK** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA POMOĆNOG APARATA  
**VNKATK1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA POMOĆNOG APARATA  
**VNKATK2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA POMOĆNOG APARATA  
**VNKATK3** - VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA POMOĆNOG APARATA  
**IKTK** - INTENZITET OTKAZA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKKTK** - INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKPTK** - INTENZITET OTKAZA POKLOPCA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKZTK** - INTENZITET OTKAZA ZUPČANIK A TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKHSTK** - INTENZITET OTKAZA HIDRAULIČKE SPOJKE TURBOKOMPRESORA  
**IKRPTK** - INTENZITET OTKAZA PODLOŠKE ZA REGULACIJU  
TURBOKOMPRESORA  
**IKKZTK** - INTENZITET OTKAZA KONIČNOG ZUPČANIK A TURBOKOMPRESORA  
**IKMTK** - INTENZITET OTKAZA MATICE TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**IKPOTK** - INTENZITET OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA  
TURBOKOMPRESORA  
**IKPPTK** - INTENZITET OTKAZA PODLOŽNE PLOČICE TURBOKOMPRESORA  
**IKRTK** - INTENZITET OTKAZA ROTORA TURBOKOMPRESORA MOTORA

Na osnovu verbalnog modela i navedenih skraćenica za delove podsistema turbokompresora možemo prikazati strukturni model (slika 7.32), kao i dijagram toka podsistema (slika 7.33) u POWERSIM - simbolici:





C DGP=20550.773

C BIDM=81726

C BIETK=2063

C T=600

\*\*\*\*\*  
 Jednačina intenziteta osovinice ( $B_4$ ), ukupan broj otkaza (BKOTK), broj ispravnih delova (BIEOTK), ukupno vreme nastanka otkaza (VNKOTK) i vreme nastanka prvog odnosno drugog otkaza (VNKOTK).  
 \*\*\*\*\*

A IKOTK.K=BKOTK/(BIEOTK\*VNKOTK)

C BKOTK=2

C BIEOTK=2068

A VNKOTK.K=(VNKOTK1+VNKOTK2)/2

C VNKOTK1=150.3

C VNKOTK2=327.05

\*\*\*\*\*  
 Jednačina intenziteta cevi za ulje ( $B_6$ ), ukupan broj otkaza (BKCUTK), broj ispravnih delova (BIECUTK) i vreme nastanka otkaza (VNKCUTK).  
 \*\*\*\*\*

A IKCUTK.K=BKCUTK/(BIECUTK\*VNKCUTK)

C BKCUTK=1

C BIECUTK=2069

C VNKCUTK=285

\* \*\*\*\*\*  
 Jednačina intenziteta zaptivke ( $B_{12}$ ), ukupan broj otkaza (BKBRTK), broj ispravnih delova (BIEBRTK) i vreme nastanka otkaza (VKNBRTK).  
 \*\*\*\*\*

A IKBRTK.K=BKBRTK/(BIEBRTK\*VKNBRTK)

C BKBRTK=1

C BIEBRTK=2069

C VKNBRTK=495

\*\*\*\*\*  
 Jednačina intenziteta pomoćnih aparata ( $B_{14}$ ), ukupan broj otkaza (BKPATK), broj ispravnih elemenata (BIEPATK) i vreme nastanka prvog, drugog i trećeg otkaza (VNKATK).  
 \*\*\*\*\*

A IKPATK.K=BKPATK/(BIEPATK\*VNKATK)

C BKPATK=3

C BIEPATK=2067

A VNKATK.K=(V NKATK1+V NKATK2+V NKATK3)/3

C VNKATK1=558.15

C VNKATK2=577

C VNKATK3=580

\* \*\*\*\*

Ostali delovi podsistema nisu imali otkaze, pa je njihov intenzitet otkaza jednak nuli.

\*\*\*\*\*

A IKTK.K=IKOTK+IKCUTK+IKBRTK+IKPATK+IKKTK+IKPTK+IKZTK+ ^

IKHSTK+IKRPTK+IKKZTK+IKMTK+IKPOTK+IKPPTK+IKRTK

C IKKTK=0

C IKPTK=0

C IKZTK=0

C IKHSTK=0

C IKRPTK=0

C IKKZTK=0

C IKMTK=0

C IKPOTK=0

C IKPPTK=0

C IKRTK=0

\* \*\*\*\*

SAVE DPTKMDT,PTKM,IKTKU,IKTK

SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2

\* \*\*\*\*

### 7.5.6.3. Podsystem spojnice



Slika 7.34. Kućište spojnice

#### *Mentalno-verbalni model*

Prekretna spojka je spojni deo između radilice motora i reduktora i služi za:

1. hod napred - prenos okretaja sa radilice motora na reduktor bez promene smera okretanja (prenosni odnos 1:1);
2. hod krmom - prenos okretaja sa radilice motora na reduktor sa promenom smera okretaja (prenosni odnos 1:0,8);
3. prazan hod - iskopčavanje (odvajanje) reduktora, a samim tim i propellerske osovine od radilice motora.

Prekretan spojka je smeštena u posebnom kućištu i predstavlja samostalno zamenjivi sklop.

U kućištu spojke su ugrađeni: sinhronizator, planetarni reduktor i pogon agregata. Na dnu kućišta pričvršćena je dvosekcijska uljna pumpa. Na jednom bočnom zidu kućišta pričvršćene su boce za vazduh i pumpa morske vode. Položaj ugradnje boca i pumpe zavisi od modela motora (desno - kretni ili levokretni). Na suprotnom bočnom zidu je odušna cev.

Na gornjem delu kućišta spojke pričvršćuje se suport uređaja za upravljanje i odušnik.

Prekretanje spojke u položaje hod napred, prazan hod i hod krmom postiže se komprimovanim vazduhom kada motor radi i ne radi.

Motorom i spojkom se upravlja s upravljačkog mesta na prekretnoj spojci, s mogućnošću priključivanja daljinskog upravljanja.

Kućište spojke je od aluminijumske legure a služi za smeštaj svih delova spojke. Istovremeno, kućište se koristi za pričvršćenje motora za brodski temelj i preuzimanje porivne sile propelera i reakcijskog okretnog momenta.

Osovina prekretno spojke prenosi okretni momenat sa radilice motora na reduktor pri hodu napred i hodu krmom. Osovina je iskovana od legure čelika. Na osovini je sinhronizator za hod napred i planetarni reduktor za hod krmom.

Spojka u podsistemu motora sastoji se iz 33 osnovna dela, a svaki osnovni deo može biti sastavljen iz više elemenata, što je prikazano na slici 7.35.

Otkazi podsistema spojke motora dogodili su se na osnovnim delovima:  $C_{18}$  posle 304,4 časova, 302 pa posle 250 časova rada; na delu  $C_{20}$  nakon 202 i 220 časa rada; na delu  $C_{23}$  posle 89,5 časova rada; na delu  $C_{24}$  nakon 102 i 120,5 časova rada; na delu  $C_{25}$  nakon 330 časova, 430,3 časa i posle 495 časova rada; na delu  $C_{26}$  nakon 223 časa rada i na delu  $C_{27}$  nakon 228 časova rada.

Ukupno je bilo 13 otkaza na 127 osnovnih delova spojke, za 69 dizel motora ukupni broj elemenata iznosi 8 763.

Funkcija intenziteta otkaza  $I_m$  za delove  $C_{18}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{25}$ ,  $C_{26}$  i  $C_{27}$  je:

$$I_{C_{18}} = \frac{3}{8760 \times \frac{304,4 + 320 + 250}{3}} = 1,17497 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{C_{20}} = \frac{2}{8761 \times \frac{202 + 220}{2}} = 1,081192 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

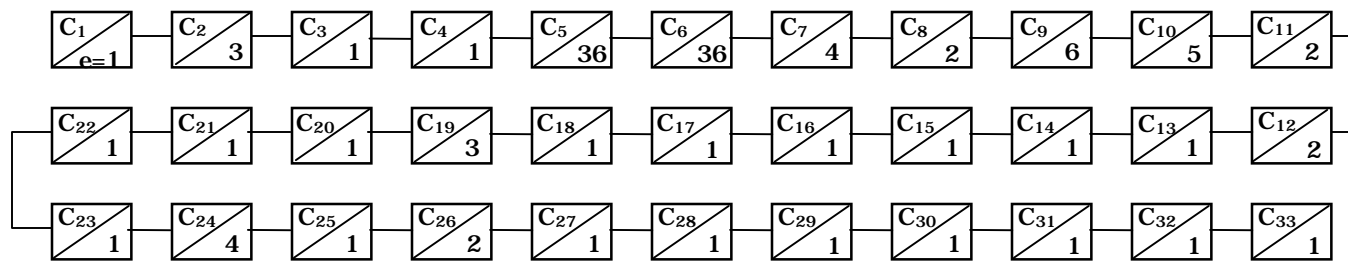
$$I_{C_{23}} = \frac{1}{8762 \times 89,5} = 1,2752 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{C_{24}} = \frac{2}{8761 \times \frac{102 + 120,5}{2}} = 2,05199 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{C_{25}} = \frac{3}{8760 \times \frac{330 + 430,3 + 495}{3}} = 0,81844 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{C_{26}} = \frac{1}{8762 \times 223} = 0,51179 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{C_{27}} = \frac{1}{8762 \times 228} = 0,50057 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$



$e$  - broj elemenata sklopa

$C_1$  - obujmica

$C_2$  - teleskopske cevi

$C_3$  - graničnik

$C_4$  - sisaljka ulja

$C_5$  - matica

$C_6$  - vijak

$C_7$  - zapitvka

$C_8$  - prirubnica

$C_9$  - ležaj

$C_{10}$  - zupčanik

$C_{11}$  - rasprskač

$C_{12}$  - čep

$C_{13}$  - podloška

$C_{14}$  - nosač

$C_{15}$  - tuljak

$C_{16}$  - pločica

$C_{17}$  - opruga

$C_{18}$  - konus sinhroni.

$C_{19}$  - osovina prekretno spojke

$C_{20}$  - rad. - aks. ležaj

sinhronizatora

$C_{21}$  - kućište reduktora

$C_{22}$  - nosač ležaja

$C_{23}$  - kandžasta spojka

$C_{24}$  - poluga za uključivanje

$C_{25}$  - radijalno-aksijalni ležaj reduktora

$C_{26}$  - kućište spojke

$C_{27}$  - polužje mehanizma za plovidbu krmom

$C_{28}$  - osovinica reduktora

$C_{29}$  - redukcioni ventil

$C_{30}$  - boca za vazduh

$C_{31}$  - sisaljka za morsku vodu

$C_{32}$  - prstenasta zaptivka

$C_{33}$  - poklopac

Slika 7.35. Blok dijagram spojnice

Intenzitet otkaza podsistema spojke iznosi:

$$I_C = I_{18} + I_{20} + I_{23} + I_{24} + I_{25} + I_{26} + I_{27} = 7,41488 \times 10^{-6} \text{ [otkaza/h]}$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema spojke iznosi:

$$I_{CUK} = I_C + n_C \times I_{EL} = 7,41488 \times 10^{-6} + 8750 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{CUK} = 12,5496 \times 10^{-6} \text{ [otkaza/h]}$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema spojnice motora:

**DPSMDT** - PROMENA POUZDANOSTI SPOJKE MOTORA

**PSM** - POUZDANOST SPOJKE MOTORA

**IKSU** - UKUPNI INTENZITET OTKAZA SPOJKE MOTORA

**BIES** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA SPOJKE MOTORA

**IKKS** - INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE MOTORA

**BKKS** - BROJ OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE

**BIEKS** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KUĆIŠTA SPOJKE

**VNKKS** - VREME NASTANKA OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE

**IKPMS** - INTENZITET OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE MOTORA



- BKPMS** - BROJ OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE
- BIEPMS** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE
- VNKPMS** - VREME NASTANKA OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE
- IKPSS** - INTENZITET OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE MOTORA
- BKPSS** - BROJ OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE
- BIEKSS** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KANDŽASTE SPOJKE
- VNKKSS** - VREME NASTANKA OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE
- IKRALS** - INTENZITET OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- BKRALS** - BROJ OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- BIERALS** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- VNKRALS** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- VNKRAL1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- VNKRAL2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE
- IKPUS** - INTENZITET OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- BKPUS** - BROJ OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- BIEPUS** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- VNKPUS** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- VNKPUS1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- VNKPUS2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE
- IKKSS** - INTENZITET OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- BKKSS** - BROJ OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- BIEKSK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- VNKKSK** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- VNKKSS1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- VNKKSS2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- VNKKSS3** - VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE
- IKRALR** - INTENZITET OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE
- BKRALR** - BROJ OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE
- BIERALR** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE
- VNKRALR** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE
- VNKL1R** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**VNKLR2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**VNKLR3** - VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**IKS** - INTENZITET OTKAZA SPOJKE

**IKOS** - INTENZITET OTKAZA OBUJMICE SPOJKE

**IKTCS** - INTENZITET OTKAZA TELESKOPSKE CEVI SPOJKE

**IKGS** - INTENZITET OTKAZA GRANIČNIKA SPOJKE

**IKSUS** - INTENZITET OTKAZA PUMPE ULJA SPOJKE

**IKMS** - INTENZITET OTKAZA MATICE SPOJKE

**IKVS** - INTENZITET OTKAZA VIJKA SPOJKE

**IKBS** - INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE SPOJKE

**IKPS** - INTENZITET OTKAZA PRIRUBNICE SPOJKE

**IKLS** - INTENZITET OTKAZA LEŽAJA SPOJKE

**IKZS** - INTENZITET OTKAZA ZUPČANIKA SPOJKE

**IKRS** - INTENZITET OTKAZA RASPRSKIVAČA SPOJKE

**IKČS** - INTENZITET OTKAZA ČEPA SPOJKE

**IKPOS** - INTENZITET OTKAZA PODLOŠKE SPOJKE

**IKNS** - INTENZITET OTKAZA NOSAČA SPOJKE

**IKTS** - INTENZITET OTKAZA TULJKA SPOJKE

**IKPLS** - INTENZITET OTKAZA PLOČICE SPOJKE

**IKOPS** - INTENZITET OTKAZA OPRUGE SPOJKE

**IKOPRS** - INTENZITET OTKAZA OSOVINE PREKRETNE SPOJKE

**IKKRS** - INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA REDUKTORA SPOJKE

**IKNLS** - INTENZITET OTKAZA NOSAČA LEŽAJA SPOJKE

**IKORS** - INTENZITET OTKAZA OSOVINICE REDUKTORA SPOJKE

**IKRVS** - INTENZITET OTKAZA REDUKCIJSKOG VENTILA SPOJKE

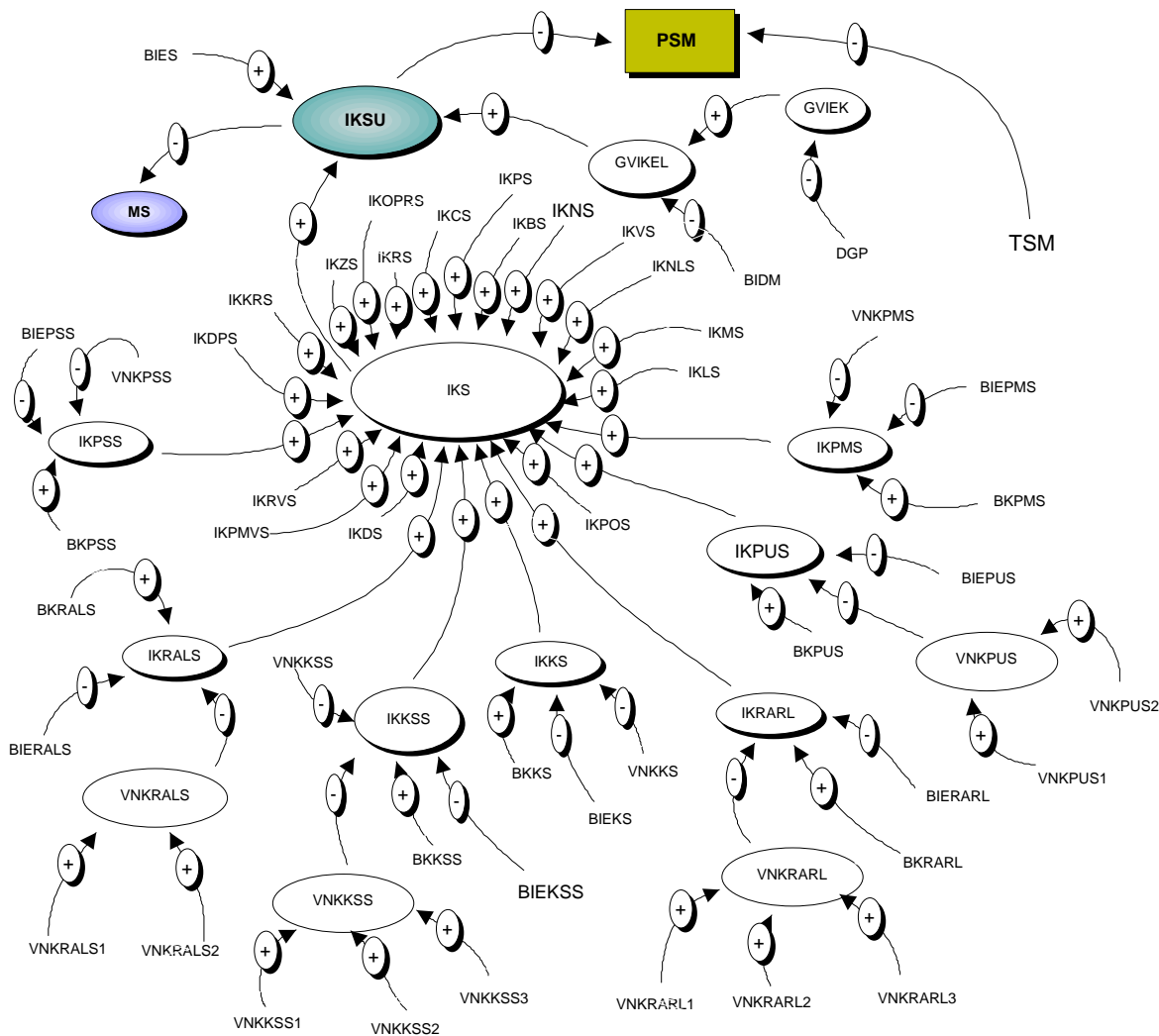
**IKBZS** - INTENZITET OTKAZA BOCE ZA VAZDUH SPOJKE

**IKPMVS** - INTENZITET OTKAZA PUMPE MORSKE VODE SPOJKE

**IKPBS** - INTENZITET OTKAZA PRSTENASTE ZAPTIVKE SPOJKE

**IKPOKS** - INTENZITET OTKAZA POKLOPCA SPOJKE

Na osnovu verbalnog modela i navedenih skraćenica delova podsistema spojke možemo dati strukturni model (slika 7.36), kao i dijagram toka podsistema (slika 7.37) u POWERSIM simbolici.



Slika 7.36. Strukturni model podsistema spojke

Iz strukturalnog modela podsistema spojke vidimo da pouzdanost spojke (PSM) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza delova spojke (IKSU). Ako ukupni intenzitet otkaza delova spojke (IKSU) raste, pouzdanost spojke (PSM) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadanom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (GVIKEL) prema ukupnom intenzitetu otkaza podsistema motora (IKTK). Ukupan intenzitet otkaza spojke (IKSU) zavisi od intenziteta otkaza pojedinih delova spojke. Iz strukturalnog modela vidimo da intenzitet otkaza spojke (IKSU) ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu s ostalim intenzitetima otkaza delova spojke.

Intenzitet otkaza spojke (IKSU) zbir je intenziteta pojedinih elemenata spojke i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Iz modela vidimo da su na šest delova spojke u otkazu ( $C_{18}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{24}$ ,  $C_{25}$  i  $C_{26}$ ). Dat je opis simulacije poluge za uključivanje spojke: intenzitet otkaza poluge za uključivanje spojke (IKPUS) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (BKPUS - ukupan broj otkaza osovinice turbokompresora motora) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEPUS - broj



C T= 600

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza kućišta spojke ( $C_{26}$ ), ukupan broj otkaza (BKKS), ukupan broj ispravnih delova (BIEKS) i vreme nastanka otkaza (VNKKS).

\* \*\*\*\*

A IKKS .K=BKKS/(BIEKS\*VNKKS)

C BKKS=1

C BIEKS=8762

C VNKKS=223

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza polužja mehanizma za plovidbu krmom spojke ( $C_{27}$ ), ukupan broj otkaza (BKPMS), broj ispravnih delova (BIEPMS) i vreme nastanka otkaza (VNKPMS).

\* \*\*\*\*

A IKPMS.K=BKPMS/(BIEPMS\*VNKPMS)

C BKPMS=1

C BIEPMS=8762

C VNKPMS=228

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza kandžaste spojke motora ( $C_{23}$ ), ukupan broj otkaza (BKPSS), ukupan broj ispravnih delova (BIEKSS) i vreme nastanka otkaza (VNKKSS).

\* \*\*\*\*

A IKPSS.K=BKPSS/(BIEKSS\*VNKPSS)

C BKPSS=1

C BIEKSS=8762

C VNKKSS=89,5

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza radijalno aksijalnog ležaja spojke ( $C_{20}$ ), ukupan broj otkaza (BKRALS), ukupan broj ispravnih delova (BIERALS) i vreme nastanka prvog i drugog otkaza (VNKRALS1, VNKRALS2).

\* \*\*\*\*

A IKRALS.K=BKRALS/(BIERALS\*VNKRALS)

C BKRALS=2

C BIERALS=8761

A VNKRALS.K=(VNKRALS1+VNKRALS2)/2

C VNKRALS1=202

C VNKRALS2=220

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza poluge za uključivanje spojke ( $C_{24}$ ), ukupan broj otkaza (BKPUS), ukupan broj ispravnih delova (BIEPUS) i vreme nastanka prvog i drugog otkaza (VNKPUS1, VNKPUS2).

\* \*\*\*\*

A IKPUS.K=BKPUS/(BIEPUS\*VNKPUS)

C BKPUS=2

C BIEPUS=8761

A VNKPUS.K=(VNKPUS1+VNKPUS2)/2

C VNKPUS1=102

C VNKPUS2=102,5

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza konusnog sinhronizatora spojke ( $C_{18}$ ), ukupan broj otkaza (BKKSS), ukupan broj ispravnih elemenata (BIEKSS) i vreme nastanka prvog, drugog i trećeg otkaza (VNKKSS1, VNKKSS2 i VNKKSS3).

\* \*\*\*\*

$$A \text{ IKSS.K} = \text{BKKSS} / (\text{BIEKSS} * \text{VNKKSS})$$

$$C \text{ BKKSS} = 3$$

$$C \text{ BIEKSS} = 8760$$

$$A \text{ VNKKSS.K} = (\text{VNKKSS1} + \text{VNKKSS2} + \text{VNKKSS3}) / 3$$

$$C \text{ VNKKSS1} = 304,4$$

$$C \text{ VNKKSS2} = 320$$

$$C \text{ VNKKSS3} = 250$$

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza radijalno aksijalnog ležaja reduktora spojke ( $C_{25}$ ), ukupan broj otkaza (BKRALR), ukupan broj ispravnih delova (BIERALR) i vreme nastanka prvog, drugog i trećeg otkaza (VNKRALR1, VNKRALR2 i VNKRALR3).

\* \*\*\*\*

$$A \text{ IKRALR.K} = \text{BKRALR} / (\text{BIERALR} * \text{VNKRALR})$$

$$C \text{ BKRALR} = 3$$

$$C \text{ BIERALR} = 8760$$

$$A \text{ VNKRALR.K} = (\text{VNKRALR1} + \text{VNKRALR2} + \text{VNKRALR3}) / 3$$

$$C \text{ VNKRALR1} = 330$$

$$C \text{ VNKRALR2} = 430,3$$

$$C \text{ VNKRALR3} = 495$$

\* \*\*\*\*

Ostali delovi podsistema nisu imali otkaze, pa je njihov intenzitet otkaza jednak nuli.

\* \*\*\*\*

$$A \text{ IKS.K} = \text{IKKS} + \text{IKPMS} + \text{IKPSS} + \text{IKRALS} + \text{IKPUS} + \text{IKKSS} + \text{IKRALR} +$$

$$\text{IKOS} + \text{IKTCS} + \text{IKGS} + \text{IKSUS} + \text{IKMS} + \text{IKVS} + \text{IKBS} + \text{IKPS} + \text{IKLS} + ^\wedge$$

$$\text{IKZS} + \text{IKRS} + \text{IKČS} + \text{IKPOS} + \text{IKNS} + \text{IKTS} + \text{IKPLS} + \text{IKOPS} + \text{IKOPRS} + ^\wedge$$

$$\text{IKKRS} + \text{IKNLS} + \text{IKORS} + \text{IKRVS} + \text{IKPMVS} + \text{IKPBS} + \text{IKPS} + \text{IKBZS}$$

$$C \text{ IKOS} = 0$$

$$C \text{ IKTCS} = 0$$

$$C \text{ IKGS} = 0$$

$$C \text{ IKSUS} = 0$$

$$C \text{ IKMS} = 0$$

$$C \text{ IKVS} = 0$$

$$C \text{ IKBS} = 0$$

$$C \text{ IKPS} = 0$$

$$C \text{ IKLS} = 0$$

$$C \text{ IKZS} = 0$$

$$C \text{ IKRS} = 0$$

$$C \text{ IKČS} = 0$$

$$C \text{ IKPOS} = 0$$

$$C \text{ IKNS} = 0$$

$$C \text{ IKTS} = 0$$

$$C \text{ IKPLS} = 0$$

$$C \text{ IKOPS} = 0$$

$$C \text{ IKOPRS} = 0$$

```

C IKKRS=0
C IKNLS=0
C IKORS=0
C IKRVS=0
C IKBZS=0
C IKPMVS=0
C IKPBS=0
C IKPS=0
* ****
SAVE DPSMDT,PSM,IKSU,IKS
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2
* ****

```

#### 7.5.6.4. Podsystem blok cilindra

##### *Mentalno verbalni model*

Blok je čvrsta četvrtasta konstrukcija izlivena od aluminijumske legure. U njemu ima osam provrta. Svaki provrt ima dva dosedna pojasa, gornji i donji. U te provrte utiskuju se čelične košuljice.

Između spoljnih površina cilindarskih košuljica i unutrašnjih površina zidova bloka stvaraju se prostori kroz koje teče voda za hlađenje bloka. Ti su prostori međusobno povezani otvorima smeštenim u gornjem delu pregrade izlivena između cilindara.

Unutrašnja površina zida svakog cilindra, na dužini 15 mm iznad dozirajućeg otvora, obložena je ekranom od čeličnog lima radi zaštite zidova blokova od kavitacije. Ekran se pričvršćuje za plašt košuljice stezaljkama. Radi sprečavanja prodiranja vode, između ekrana i zida bloka postavljen je tanak sloj gume.

Gornji dosedni pojas cilindarskog bloka ima na vrhu osloni kanal, u koji se prilikom utiskivanja utiskuje oštri vrh košuljice cilindra. Blok ima 18 šupljina, koje nisu spojene sa šupljinama kroz koje teče voda, a služe za prolaz svornih vijaka za pričvršćenje bloka. Gornji deo glave bloka je u obliku korita i u njemu su elementi sistema za odvođenje gasova.

U glavu bloka za svaki cilindar ugrađuju se: ubrizgač, dva usisna i dva izduvna ventila s oprugama i osiguračima. Ubrizgač se postavlja u koso izvedeni otvor i pričvršćuje se sa dva svornja. Gorivo koje procuri iz ubrizgača kroz posebne otvore prolazi u prostor usisnih kanala. Svaki cilindar ima po dva usisna i dva izduvna ventila smeštena pod uglom od 4° u odnosu na osu cilindra. U dnu cilindra, koje je kupasto, predviđena su četiri konusna otvora, u koja su utisnuta i uvaljana bronzana sedišta usisnih i izduvnih ventila.

Svaki dizel motor ima sedam blok-cilindara, odnosno za 69 motora ukupno se posmatralo 483 blok-cilindara. U vremenskom periodu od 600 časova dogodilo se sedam otkaza i to posle 124, 220, 322, 350, 380, 395 i 571 časa rada.

Intenzitet otkaza bloka cilindra iznosi:

$$I_{BC} = \frac{7}{476 \times \frac{124 + 220 + 322 + 350 + 380 + 395 + 571}{7}} = 43,5822 \times 10^{-6} \text{ [otkaza/h]}$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema blok cilindra iznosi:

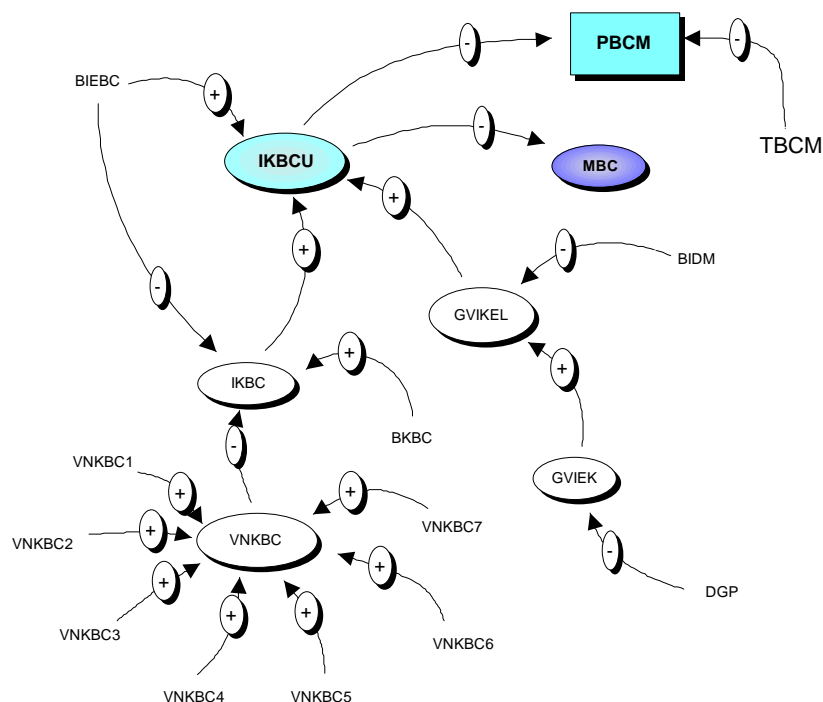
$$I_{DUK} = I_D + n_D \times I_{EL} = 43,5822 \times 10^{-6} + 476 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{DUK} = 43,86153 \times 10^{-6} \text{ [otkaza/h]}$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema blok-cilindra motora:

- DPBCMDT-** PROMENA OTKAZA BLOK-CILINDRA U TOKU TRAJANJA MOTORA
- PBCM -** POUZDANOST BLOK-CILINDRA MOTORA
- IKBCU -** UKUPAN INTENZITET OTKAZA BLOK-CILINDRA MOTORA
- BIIBC -** BROJ ISPRAVNIH DELOVA BLOK-CILINDRA U ZADATOM INTERVALU
- IKBC -** INTENZITET OTKAZA BLOK-CILINDRA
- BKBC -** BROJ OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC -** UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC1 -** VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC2 -** VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC3 -** VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC4 -** VREME NASTANKA ČETVRTOG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC5 -** VREME NASTANKA PETOG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC6 -** VREME NASTANKA ŠESTOG OTKAZA BLOK-CILINDRA
- VNKBC7 -** VREME NASTANKA SEDMOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

Na osnovu verbalnog modela i navedenih skraćenica podsklopova blok-cilindra možemo dati strukturni model (slika 7.38), kao i dijagram toka podsistema (slika 7.39) u POWERSIM - simbolici.



Slika 7.38. Strukturni model podsistema blok cilindra

Iz strukturnog modela podsistema blok-cilindra motora vidimo da pouzdanost blok-cilindra (PBCM) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza blok-cilindra (IKBCU). Ako

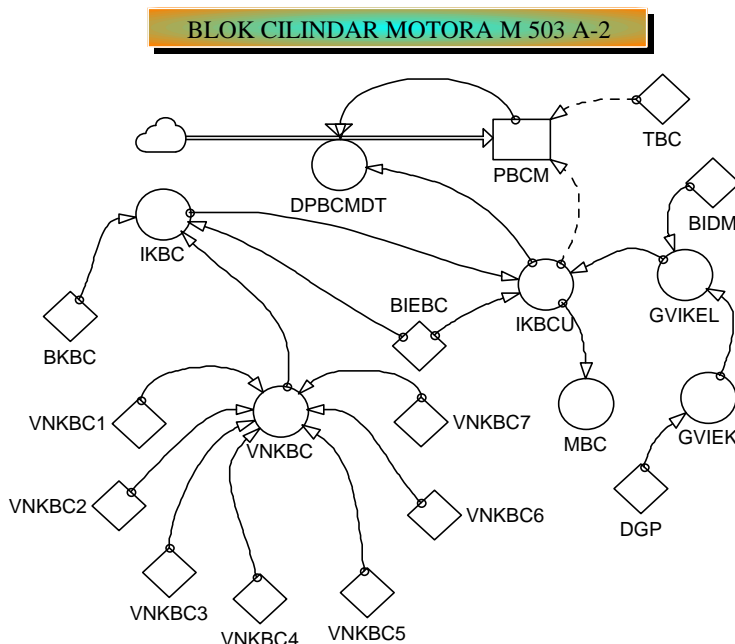


ukupni intenzitet otkaza blok-cilindra (IKBCU) raste, pouzdanost blok-cilindra (PBCM) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadanom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (GVIKEL) prema ukupnom intenzitetu otkaza blok-cilindra motora (IKBCU). Ako ukupni intenzitet otkaza (IKBCU) pada tada srednje vreme između otkaza blok-cilindra raste (MBC).

Ukupan intenzitet otkaza blok-cilindra (IKBCU) zavisi od intenziteta otkaza pojedinih delova blok-cilindra motora. Iz strukturnog modela vidimo da intenzitet otkaza blok-cilindra (IKBCU) ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu s ostalim intenzitetima otkaza blokovima cilindra motora (IKBC).

Ukupan intenzitet otkaza blok-cilindra (IKBCU) jeste zbir intenziteta pojedinog blok-cilindra motora i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+).

Iz modela vidimo da se na jednom blok-cilindru dogodilo sedam otkaza u različito vreme, odnosno ukupno vreme nastanka otkaza blok-cilindra (VNKBC) jeste zbir pojedinih vremena nastanka otkaza (VNKBC1,... VNKBC7). Ukupno vreme nastanka otkaza blok-cilindra (VNKBC) i broj ispravnih delova blok-cilindra motora (BIEBC) imaju negativnu uzročno-posledičnu vezu prema intenzitetu otkaza blok-cilindra motora (IKBC). Broj kvarova blok-cilindra (BKBC) ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu prema intenzitetu otkaza blok-cilindra motora (IKBC).



Slika 7.39. Dijagram toka podsistema blok cilindra u POWERSIM - simboli

Matematički model podsistema blok cilindra motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*  
 Jednačina pouzdanosti blok cilindra motora (PBCM), ukupan intenzitet otkaza blok-cilindra motora (IKBCU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova blok-cilindra motora (BIEBC), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM) i zadani vremenski interval (T).  
 .....

K GVIKIE=1/DGP

C DGP=20550.773

C BIDM=81726

C BIEBC=476

C T=600

\* \*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza podsistema blok-cilindra, ukupan broj otkaza blok-cilindra (BKBC), ukupan broj ispravnih delova bloka cilindra (BIEBC) i vreme nastanka otkaza prvog, drugog, trećeg, četvrtog, petog, šestog i sedmog otkaza (V NKBC1, V NKBC2, V NKBC3, V NKBC4, V NKBC5, V NKBC6 i V NKBC7).

\*\*\*\*\*

A IKBC.K=BKBC/(BIEBC\*V NKBC)

C BKBC=7

A V NKBC.K=(V NKBC1+V NKBC2+V NKBC3+V NKBC4+  
V NKBC5+V NKBC6+V NKBC7)/7

C V NKBC1=124

C V NKBC2=220

C V NKBC3=322

C V NKBC4=350

C V NKBC5=380

C V NKBC6=395

C V NKBC7=571

\* \*\*\*\*

SAVE DPBCMDT,PBCM,IKBC,IKBCU

SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2

\*\*\*\*\*

### 7.5 6.5. Podsistem klipa



Slika 7.40. Klip sa osovinicom

*Mentalno verbalni model*

Klip je monolitan - od jednog komada, iskovan od aluminijumske legure. Dno klipa, koje čini deo komore za sagorevanje, ima specijalan oblik i omogućava stvaranje najefektivnije smese i sagorevanje goriva. Unutrašnja strana dna je sferična (bez rebra) površina koja prelazi u konus, što uz očuvanje dovoljne čvrstoće dna obezbeđuje smanjenje stvaranja nanosa gareži i dobar prelaz toplote na ulje. Ulje dolazi prskanjem iz sapnica postavljenih na rukavcima radilice motora. Horizontalna površina glave klipa obrađena je glodanjem na četiri mesta radi stvaranja potrebnog zazora između klipa i usisnih i izduvnih ventila kada se klip nalazi u gornjoj mrtvoj tački. Za postizanje potrebnog zazora u toku rada motora između cilindarske košuljice i klipa, telo klipa je cilindrično, a glava konusna, uzimajući u obzir temperaturno polje klipa.

Klip priključne klipnjače razlikuje se od klipa glavne klipnjače većim promerom tela. U srednjem delu klipa su pojačanja s provrtima za osovinicu klipa. Unutrašnje površine ojačanja zakošene su pod uglom od  $8^\circ$ . To povećava oslonu površinu osovine klipa i iz toga sledi smanjenje njegovog progiba i sniženje specifičnog pritiska na ojačanu površinu klipa. Da bi se omogućio ravnomerni pritisak na radnu površinu ojačanja pri progibu osovine, radna površina je u predelu čeonih strana niža za 0,03mm. U srednjem delu ojačanja izbušeni su otvori za podmazivanje osovinice klipa. Na glavi klipa obrađena su četiri utora za klipne prstene: dva gornja - trapeznog preseka, a dva donja - pravougaonog preseka. U donjem utoru i oko njega probušene su rupice za odvod ulja skinutog uljnim prstenima sa cilindarske košuljice.

*Klipni prsteni*

Na klipovima glavnih klipnjača stavlja se četiri klipna prstena, od kojih su dva gornja - kompresijska, i dva donja - za skidanje ulja. Na klipovima priključnih klipnjača dodatno se stavlja prsten za skidanje ulja. Kompresioni prsteni i prsteni za skidanje izrađuju se od konstrukcijskog mangan čelika, a prsten za skidanje ulja od specijalnog livenog gvožđa, radi smanjenja stvaranja gara i mogućeg uticaja na rad. Kompresijski prsteni su trapezastog preseka. Osovinica klipa izrađena je od legiranog čelika, šuplja je i slobodno položena. Klip u podsistemu motora sastavljen iz četiri osnovna dela (slika 7.41), a svaki deo sastavljen je iz određenog broja elemenata.



$e$  – broj elemenata sklopa

$E_1$  - osovinica klipa

$E_2$  - čep

$E_3$  - prsten

$E_4$  - telo klipa

Slika 7.41. Blok-dijagram klipa

Ukupan broj posmatranih elemenata podsistema za jedan motor iznosi 336, odnosno za 69 motora posmatralo se 23 184 elementa podsistema klipa.

Otkazi su se dogodili na delu  $E_1$  posle 450,3 časova i na delu  $E_3$  posle 461 i 495 časova rada motora.

Intenzitet otkaza za delove  $E_1$  i  $E_3$  je:

$$I_{E1} = \frac{1}{23183 \times 450,3} = 0,09579 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{E3} = \frac{2}{23182 \times \frac{461 + 495}{2}} = 0,18049 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Intenzitet otkaza podsistema klipa iznosi:

$$I_E = I_{E1} + I_{E3} = 0,27628 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema klipa iznosi:

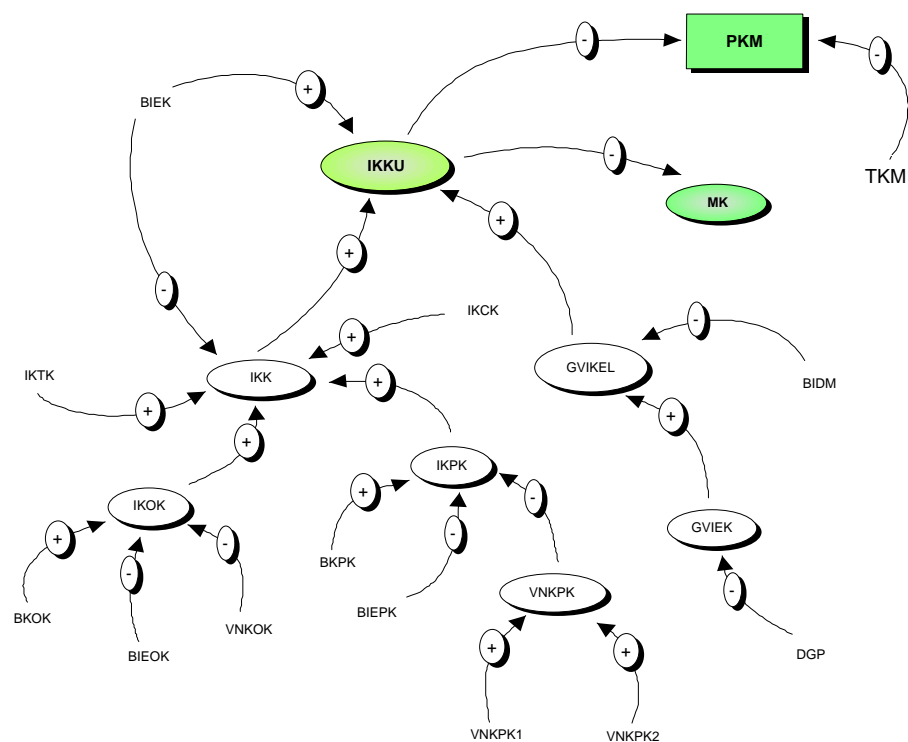
$$I_{EUK} = I_E + n_E \times I_{EL} = 0,27628 \times 10^{-6} + 23181 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{EUK} = 13,87952 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema klipa motora:

- DPKMDT** - PROMENA OTKAZA KLIPA U TOKU TRAJANJA MOTORA
- PKM** - POUZDANOST KLIPA MOTORA
- IKKU** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA KLIPA MOTORA
- BIEK** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIPOVA U ZADANOM INTERVALU
- IKOK** - INTENZITET OTKAZA OSOVINE KLIPA
- BKOK** - BROJ OTKAZA OSOVINE KLIPA
- BIEOK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA OSOVINE KLIPA
- VNKOK** - VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINE KLIPA
- IKPK** - INTENZITET OTKAZA PRSTENA KLIPA
- BKPK** - BROJ OTKAZA PRSTENA KLIPA
- BIEPK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENA KLIPA
- VNKPK** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENA KLIPA
- VNKPK1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA PRSTENA KLIPA
- VNKPK2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA PRSTENA KLIPA
- IKKM** - INTENZITET OTKAZA KLIPA
- IKCK** - INTENZITET OTKAZA ČEPA KLIPA
- IKTKM** - INTENZITET OTKAZA TELA KLIPA

Na osnovu verbalnog modela podsistema klipa možemo dati strukturni model, kao na slici 7.42, i dijagram toka podsistema (slika 7.43) u POWERSIM - simbolici.



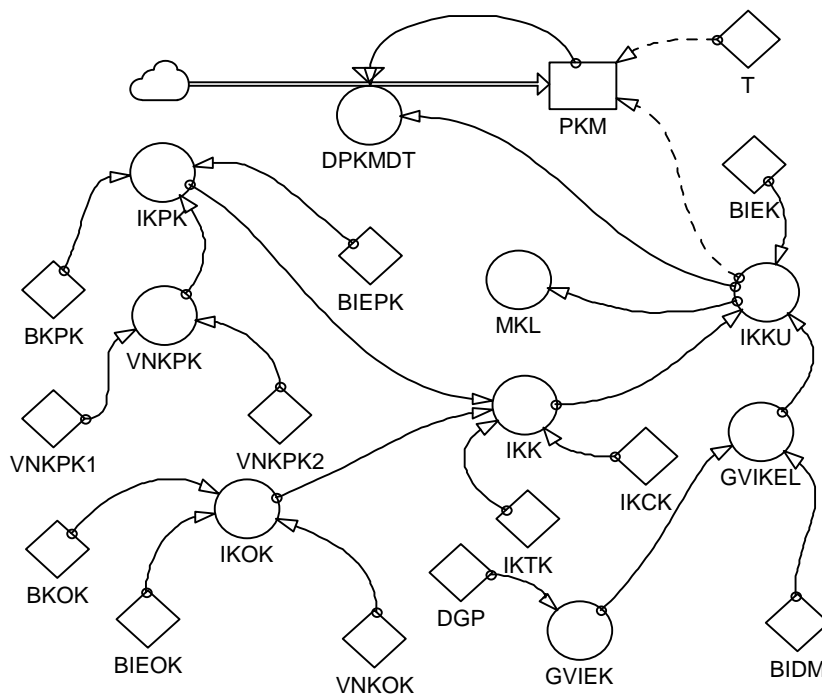
Slika 7.42. Strukturni model podsistema klipa

Iz strukturalnog modela podsistema klipa vidima da pouzdanost klipa motora (PKM) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza delova klipa motora (IKKU). Ako ukupan intenzitet otkaza delova klipa motora (IKKU) raste, pouzdanost klipa motora (PKM) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadatom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (GVIKEL) prema ukupnom intenzitetu otkaza podsistema klipa motora (IKKU). Ako ukupan intenzitet otkaza (IKKU) pada, tada srednje vreme između otkaza klipa raste (MK).

Ukupan intenzitet otkaza klipa motora (IKKU) zavisi od intenziteta otkaza pojedinih delova klipa motora. Iz strukturalnog modela uočavamo da intenzitet otkaza klipa motora (IKKU) ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu s ostalim intenzitetima otkaza delova klipa motora.

Intenzitet otkaza klipa motora (IKKU) jeste zbir intenziteta pojedinih delova klipa motora i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Iz modela vidimo da su dva dela klipa motora u otkazu ( $E_1$  i  $E_3$ ). Dat je opis simulacije prstena klipa motora: intenzitet otkaza prstena klipa motora (IKPK) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (BKPK - ukupan broj otkaza prstena klipa) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEPK - broj ispravnih elemenata prstena klipa motora i VNKPK - ukupno vreme nastanka otkaza klipa motora; VNKPK je zbir VNKPK1 - vreme nastanka prvog otkaza i VNKPK2 - vreme nastanka drugog otkaza). Ista je analiza i za osovinu klipa.

### POUZDANOST KLIPA MOTORA M 503 A-2



Slika 7.43. Dijagram toka podsistema klipa u POWERSIM - simboli

Matematički model podsistema klipa motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti klipa motora (PKM), ukupan intenzitet otkaza klipa motora (IKKU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova klipa motora (BIEK), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM), zadani vremenski interval (T), broj otkaza osovine klipa (BKOK), broj ispravnih elemenata osovine klipa (BIEOK), vreme nastanka otkaza osovine klipa (VNKOK).

\*\*\*\*\*

```

R DPKMDT.KL=- (IKKU.K)*PM.K
L PKM.K=PM.J+DT*DPKMDT.JK
N PM=1/EXP(IKKU*T)
A IKKU.K=IKK+BIEK*GVIKEL
A GVIKEL.K=GVIEK/BIDM
K GVIEK=1/DGP
C DGP=20550.773
C BIDM=81726
C BIEK=23181
C T=600
A IKOK.K=BKOK/(BIEOK*VNKOK)
C BKOK=1
C BIEOK=23183
C VNKOK=450,3

```

```

* ****
Jednačina intenziteta otkaza prstena klipa (IKPK), ukupan broj otkaza prstena klipa
(BKPK), ukupan broj ispravnih delova prstena klipa (BIEPK), vreme nastanka prvog
i drugog otkaza (VNKPK1, VNKPK2). Intenzitet otkaza čepa klipa (IKCK) i tela
klipa (IKTKM) jednaki su nuli.
* ****
A IKPK.K=BKPK/(BIEPK*VNKPK)
C BKPK=2
C BIEPK=23182
A VNKPK.K=(VNKPK1+VNKPK2)/2
C VNKPK1=461
C VNKPK2=495
A IKK.K=IKOK+IKPK+IKCK+IKTK
C IKCK=0
C IKTK=0
* ****
SAVE DPKMDT,PM,IKK,BKOK,BIEOK,IKOK,BKPK,BIEPK,VNKOK,VNKPK^
      IKPK,VNKPK1,VNKPK2,IKKU,GVIKEL,GVIEK
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2
* ****

```

#### 7.5.6.6. Podsystem glavne klipnjače



Slika 7.44. Klipnjača i leteći ležaji

#### *Mentalno verbalni model*

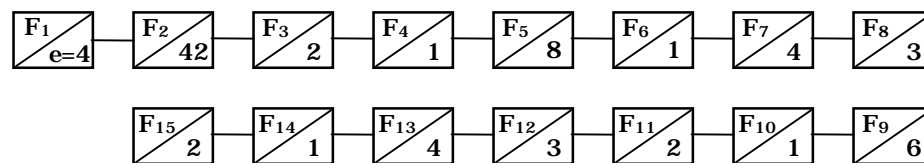
Glavna klipnjača je iskovana od legure čelika, preseka dvostruko T, rastavljiva. U gornju glavu klipnjače upresovana je bronzana čaura. Donja glava služi kao ležište, ima šest okaca (uški) u koje su upresovane osovine za spajanje priključnih klipnjača sa glavom. Gornja glava glavne klipnjače podmazuje se rasprskanim uljem koje dolazi na tarnu površinu čaure kroz četiri otvora na gornjoj strani



glave. U dva otvora upresovani su i uvaljani mesingani zadržaci, koji sprečavaju okretanje čaure. Na zadržacima postoje otvori radi prolaza ulja na unutrašnju površinu čaure. Radi poboljšanja rada, unutrašnja površina čaure pokrivena je tankim slojem olova. Poklopac glavne klipnjače spaja se s donjom glavom preko spoja sa ispustima i centrira sa četiri zatika. Radi sprečavanja "zakovičenja", na površinama spoja između poklopca i tela klipnjače postavljaju se čelični, nitrirani podmetači (umeci). Za osiguranje naleganja, na četiri površine spoja s ispustima donje glave klipnjače i poklopca postavljena su još dva čelična pobakrena umetka. Oni pridržavaju čašice ležaja glavne klipnjače da ne ispadnu.

Glavna klipnjača je podsistem koji se sastoji od 15 osnovnih delova (slika 7.45) Svaki osnovni deo može biti sastavljen iz više elemenata.

Svaki motor ima šest glavnih klipnjača, a svaka klipnjača 84 elementa. Za 69 posmatranih motora u podsistemu glavnih klipnjača posmatra se 34776 elementa.



*e* - broj elemenata

$F_1$  - tuljak

$F_2$  - protivteg

$F_3$  - cevni spojevi

$F_4$  - čep

$F_5$  - zatik

$F_6$  - bubanj

$F_7$  - tuljak protivtega

$F_8$  - sigurnosne podloge

$F_9$  - matice protivutega

$F_{10}$  - podloška za osiguranje

$F_{11}$  - prstenasti osigurač

$F_{12}$  - valjkasti osigurač

$F_{13}$  - vijci protivtega

$F_{14}$  - prsten za regulaciju

$F_{15}$  - gornji i donji ležaj

Slika 7.45. Blok dijagram klipa

Otkazi su se pojavili na osnovnom delu  $F_{11}$  posle 236 časova i na delu  $F_{15}$  posle 380,3 I 490 časova rada.

Funkcija intenziteta otkaza  $I_m$  za delove:  $F_{11}$ ,  $F_{15}$  je:

$$I_{F_{11}} = \frac{1}{34775 \times 236} = 0,12185 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

$$I_{F_{12}} = \frac{2}{34774 \times \frac{380,3 + 490}{2}} = 0,13217 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Intenzitet otkaza podsistema glavne klipnjače iznosi:

$$I_F = I_{F_{11}} + I_{F_{12}} = 0,25402 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema glavne klipnjače iznosi:



$$I_{FUK} = I_F + n_F \times I_{EL} = 0,25402 \times 10^{-6} + 34773 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

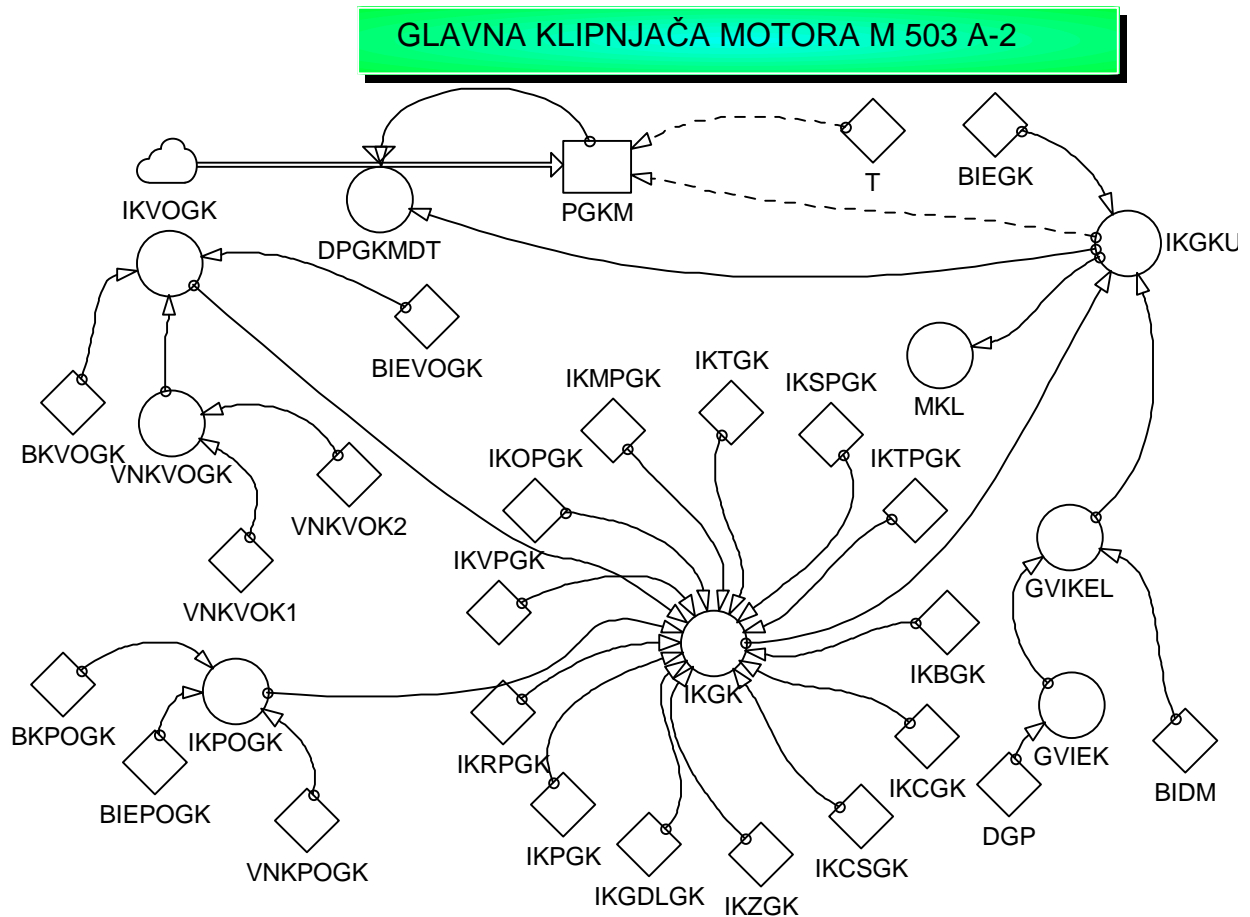
$$I_{FUK} = 20,65975 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema glavne klipnjače motora:

- DPGKMDT** - PROMENA POUZDANOSTI GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- PGKM** - POUZDANOST GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKGKU** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- BIEGK** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA GLAVNE KLIPNJAČE U ZADATOM INTERVALU
- IKVOGK** - INTENZITET OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- BKVOGK** - BROJ OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- BIEVOGK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- VNKVOGK** - UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- VNKVOK1** - VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- VNKVOK2** - VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- IKPOGK** - INTENZITET OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- BKPOGK** - BROJ OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- BIEPOGK** - BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- VNKPOGK** - VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE
- IKGK** - INTENZITET OTKAZA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKTGK** - INTENZITET OTKAZA TULJKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKPGK** - INTENZITET OTKAZA PROTIVTEGA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKCSGK** - INTENZITET OTKAZA CEV. SP. GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKGDLGK** - INTENZITET OTKAZA GORNJEG I DONJEG LEŽAJA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKČGK** - INTENZITET OTKAZA ČEPA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKZGK** - INTENZITET OTKAZA ZATIKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKBGK** - INTENZITET OTKAZA BUBNJA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKTPGK** - INTENZITET OTKAZA TULJKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKSPGK** - INTENZITET OTKAZA SIGURNOSNE PODLOŠKE GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKMPGK** - INTENZITET OTKAZA MATICE PROTIVTEGA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKOPGK** - INTENZITET OTKAZA PODLOŠKE OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKVPGK** - INTENZITET OTKAZA VIJKA PRSTENA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA
- IKRPGK** - INTENZITET OTKAZA REGULATORA PRSTENA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA



Intenzitet otkaza glavne klipnjače (IKGKU) zbir je intenziteta pojedinih elemenata glavne klipnjače i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Iz modela vidimo da su dva dela glavne klipnjače su u otkazu ( $F_{11}$  i  $F_{15}$ ). Dat je opis simulacije prstenastog osigurača: intenzitet otkaza prstenastog osigurača (IKPOGK) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (BKPOGK - ukupan broj otkaza prstenastog osigurača) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEPOGK - broj ispravnih elemenata prstenastog osigurača i VNKPOGK - vreme nastanka otkaza prstenastog osigurača). Ako ukupan intenzitet otkaza (IKGKU) pada, tada srednje vreme između otkaza glavne klipnjače raste (MGK).



Slika 7.47. Dijagram toka podsistema glavne klipnjače u POWERSIM - simboli

Matematički model podsistema blok cilindra motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti glavne klipnjače motora (PGKM), ukupan intenzitet otkaza glavne klipnjače motora (IKGKU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova glavne klipnjače motora (BIEGK), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM), zadani vremenski interval (T).

\*\*\*\*\*

$R \text{ DPGKMDT.KL} = -(\text{IKGKU.K}) * \text{PGKM.K}$   
 $L \text{ PGKM.K} = \text{PGKM.J} + \text{DT} * \text{DPGKMDT.JK}$   
 $N \text{ PGKM} = 1 / \text{EXP}(\text{IKGKU} * T)$   
 $A \text{ IKGKU.K} = \text{IKGK} + \text{BIEGK} * \text{GVIKEL}$   
 $A \text{ GVIKEL.K} = \text{GVIKIE} / \text{BIDM}$   
 $K \text{ GVIKIE} = 1 / \text{DGP}$   
 $C \text{ DGP} = 20550.773$   
 $C \text{ BIDM} = 81726$   
 $C \text{ BIEGK} = 34773$   
 $C \text{ T} = 600$

\*\*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza valjkastog osigurača glavne klipnjače (IKVOGK), ukupan broj otkaza valjkastog osigurača glavne klipnjače (BKVOGK), ukupan broj ispravnih delova valjkastog osigurača glavne klipnjače (BIEOGK), vreme nastanka prvog i drugog otkaza (VNKVOK1, VNKVOK2).

\*\*\*\*\*

$A \text{ IKVOGK.K} = \text{BKVOGK} / (\text{BIEVOGK} * \text{VNKVOKK})$   
 $C \text{ BKVOGK} = 2$   
 $C \text{ BIEVOGK} = 34774$   
 $A \text{ VNKVOKK} = (\text{VNKVOK1} + \text{VNKVOK2}) / 2$   
 $C \text{ VNKVOK1} = 380.3$   
 $C \text{ VNKVOK2} = 490$

\*\*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza prstenastog osigurača glavne klipnjače (IKPOGK), ukupan broj otkaza prstenastog osigurača glavne klipnjače (BKPOGK), ukupan broj ispravnih delova valjkastog osigurača glavne klipnjače (BIEPOGK), vreme nastanka prvog otkaza (VNKPOGK1).

\*\*\*\*\*

$A \text{ IKPOGK.K} = \text{BKPOGK} / (\text{BIEPOGK} * \text{VNKPOGK})$   
 $C \text{ BKPOGK} = 1$   
 $C \text{ BIEPOGK} = 34775$   
 $C \text{ VNKPOGK} = 236$

\*\*\*\*\*

Ostali delovi podsistema nisu imali otkaze, pa je njihov intenzitet otkaza jednak nuli.

\*\*\*\*\*

$A \text{ IKGK.K} = \text{IKVOGK} + \text{IKPOGK} + \text{IKTGGK} + \text{IKPGK} + \text{IKCSGK} + \text{IKGDLGK} + \text{IKČGK} + \text{IKZGK} + \text{IKBGK} + \text{IKTPGK} + \text{IKSPGK} + \text{IKMPGK} + \text{IKOPGK} + \text{IKVPGK} + \text{IKRPGK}$   
 $C \text{ IKTGGK} = 0$   
 $C \text{ IKPGK} = 0$   
 $C \text{ IKCSGK} = 0$   
 $C \text{ IKGDLGK} = 0$   
 $C \text{ IKČGK} = 0$   
 $C \text{ IKZGK} = 0$   
 $C \text{ IKBGK} = 0$   
 $C \text{ IKTPGK} = 0$   
 $C \text{ IKSPGK} = 0$

```

C IKMPGK=0
C IKOPGK=0
C IKVPGK=0
C IKRPGK=0
* *****
SAVE DPGKMDT,PGKM,IKGKU,IKGK,IKVOGK,IKPOGK
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2
* *****

```

### 7.5.6.7. Podsystem kliznih ležišta

#### *Mentalno verbalni model*

Svaki motor ima sedam temeljnih kliznih ležaja, pa za 69 motora u podsystemu kliznih ležajeva ima 483 ležaja.

U vremenskom periodu od 600 časova rada motora dogodio se samo jedan otkaz, nakon 590 časova, i to zbog puknuća ležaja od zamora materijala.

Intenzitet otkaza  $I_m$  podsystema kliznih ležaja iznosi:

$$I_{KL} = \frac{1}{482 \times 590} = 3051642 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza /h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsystema kliznih ležaja iznosi:

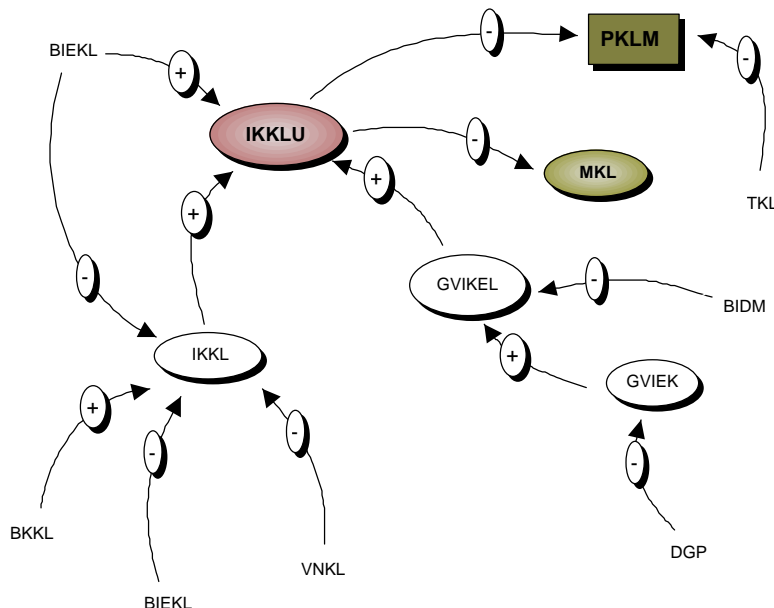
$$I_{GUK} = I_G + n_G \times I_{EL} = 3,51642 \times 10^{-6} + 428 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{GUK} = 3,79927 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Prikaz svih parametara u modelu podsystema kliznog ležaja motora:

**DPKLMDT** - PROMENA OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA U TOKU TRAJANJA MOTORA  
**PKLM** - POUZDANOST KLIZNOG LEŽAJA MOTORA  
**IKKLU** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA MOTORA  
**BIEKL** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIZNOG LEŽAJA U ZADANOM INTERVALU  
**IKKL** - INTENZITET OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA  
**BKKL** - BROJ OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA  
**BIDKL** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIZNOG LEŽAJA  
**VNKKL** - VREME NASTANKA OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA

Na osnovu verbalnog modela podsklopa kliznog ležaja možemo izraditi strukturni model (slika 7.48) te dijagram toka podsystema (slika 7.49) u POWERSIM simbolici.

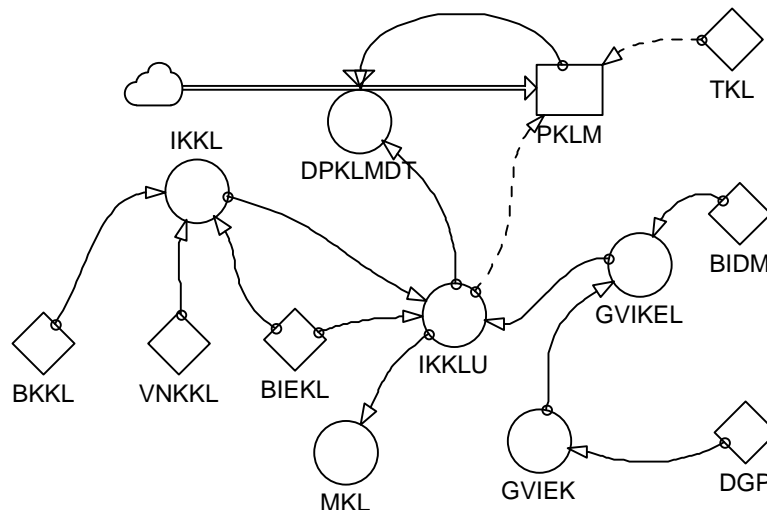


Slika 7.48. Strukturalni model podsistema kliznog ležišta

Iz strukturalnog modela podsistema kliznih ležišta vidimo da pouzdanost kliznih ležajeva (PKLM) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza njihovih delova (IKKLU). Ako ukupan intenzitet otkaza delova kliznih ležaja (IKKLU) raste, pouzdanost kliznih ležišta (PKLM) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadanom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (GVIKEL) prema ukupnom intenzitetu otkaza podsistema kliznih ležišta (IKKLU).

Intenzitet otkaza kliznih ležaja (IKKLU) je zbir intenziteta pojedinih delova kliznih ležišta (IKKL) i svi oni imaju pozitivnu uzročno-vezu (+). Dat je opis simulacije jednog kliznog ležišta: intenzitet otkaza kliznog ležaja (IKKL) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (BKKL - ukupan broj otkaza prstenastog osigurača) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEKL - broj ispravnih elemenata prstenastog osigurača i VNKL - vreme nastanka otkaza kliznog ležišta). Ako ukupan intenzitet otkaza (IKKLU) opada, tada srednje vreme između otkaza glavne klipnjače raste (MKL).

### KLIZNI LEŽAJ MOTORA M 503 A-2



Slika 7.49. Dijagram toka podsistema kliznog ležaja u POWERSIM - simboli

Matematički model podsistema kliznog ležaja motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti kliznog ležaja motora (PKLM), ukupan intenzitet otkaza kliznog ležaja motora (IKKLU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova kliznog ležaja motora (BIEKL), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM), zadani vremenski interval (T).

\*\*\*\*\*

```

R DPKLMDT.KL=-(IKKLU.K)*PKLM.K
L PKLM.K=PKLM.J+DT*DPKLMDT.JK
N PKLM=1/EXP(IKKLU*T)
A IKKLU.K=IKKL+BIEKL*GVIKEL
A GVIKEL.K=GVIEK/BIDM
K GVIEK=1/DGP
C DGP=20550.773
C BIDM=81726
C BIEKL=428
C T=600

```

\* \*\*\*\*\*

Jednačina intenziteta otkaza kliznog ležaja (IKKL), ukupan broj otkaza kliznog ležaja (BKKL), ukupan broj ispravnih delova kliznog ležaja (BIDKL), vreme nastanka otkaza (VNKKL).

\*\*\*\*\*

```

A IKKL.K=BKKL/(BIDKL*VNKKL)
C BKKL=1
C BIDKL=482
C VNKKL=590

```

SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2  
 \* \*\*\*\*

### 7.5.6.8. Podsystem osovinnice priključnog klipa



Slika 7.50. Osovinica priključnog klipa

#### *Mentalno-verbalni model*

Osovinica za spajanje klipa sa klipnjačama predstavlja podsystem. Motor se sastoji od sedam blok-cilindara, a u svakom bloku je šest klipova, pa se podsystem sastoji od 36 elemenata. Za 69 motora posmatrano je 2484 elemenata. U sedmocilindričnoj zvezdi nalazi jedna glavna klipnjača s klipom i šest priključnih klipnjača s klipom.

U vremenu posmatranja dogodio se otkaz nakon 585 časova rada motora, pa je intenzitet otkaza:

$$I_H = \frac{1}{2483 \times 585} = 0,68844 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsystema osovinica klipova iznosi :

$$I_{HUK} = I_H + n_H \times I_{EL} = 0,68844 \times 10^{-6} + 2483 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

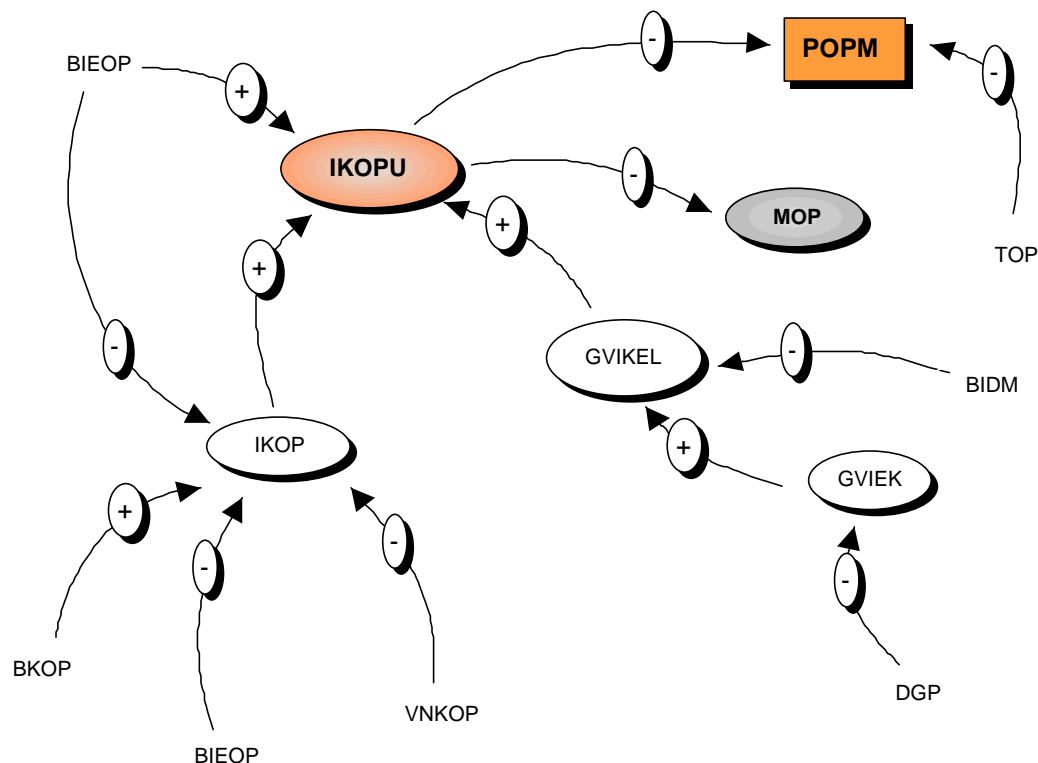
$$I_{HUK} = 2,14553 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Prikaz svih parametara u modelu podsystema osovinice priključnog klipa motora:



- DPOPMDT** - PROMENA OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA U TOKU TRAJANJA MOTORA  
**POP** - POUZDANOST OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA  
**IKOPU** - UKUPNI INTENZITET OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA  
**BIEOP** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA U ZADATOM INTERVALU  
**IKOP** - INTENZITET OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA  
**BKOP** - BROJ OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA  
**VNKOP** - VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA

Na osnovu verbalnog modela podsklopa kliznog ležaja možemo izraditi strukturni model (slika 7.51) kao i dijagram toka podsistema (slika 7.52) u POWERSIM - simbolici.



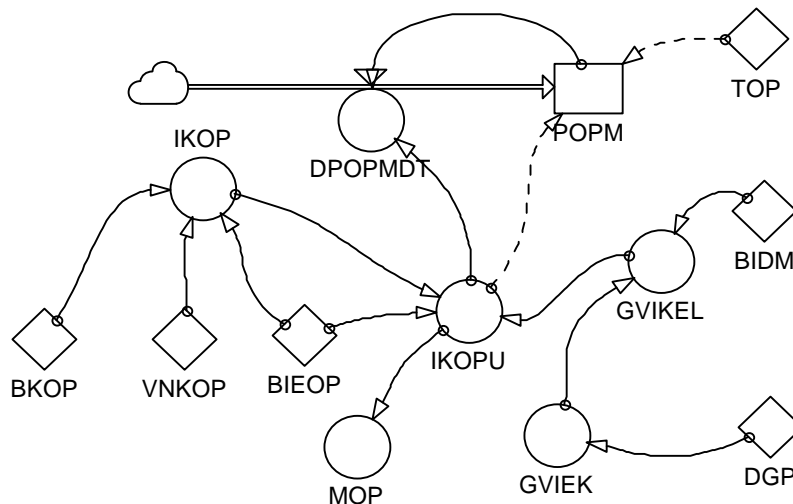
Slika 7.51. Strukturni model podsistema osovinice priključnog klipa

Iz strukturnog modela podsistema priključnog klipa vidima da pouzdanost priključnog klipa (**POP**) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza delova priključnog klipa (**IKOPU**). Ako ukupan intenzitet otkaza delova priključnog klipa (**IKOPU**) raste, pouzdanost priključnog klipa (**POP**) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadanom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (**GVIKEL**) prema ukupnom intenzitetu otkaza podsistema priključnog klipa (**IKOPU**).

Intenzitet otkaza priključnog klipa (**IKOPU**) zbir je intenziteta pojedinih delova priključnog klipa (**IKOP**) i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Dat je opis simulacije jednog priključnog klipa: intenzitet otkaza priključnog klipa (**IKOP**) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (**BKOP** - ukupan broj otkaza prstenastog

osigurača) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEOP - broj ispravnih elemenata prstenastog osigurača i VNKOP - vreme nastanka otkaza kliznog ležišta. Ako ukupan intenzitet otkaza (IKOPU) pada, tada srednje vreme između otkaza osovinice priključnog klipa raste (MOP).

### OSOVINICA PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA M 503 A-2



Slika 7.52. Dijagram toka podsistema osovinice priključnog klipa u POWERSIM simbolici

Matematički model podsistema osovinice priključnog klipa motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti osovinice priključnog klipa motora (POPM), ukupan intenzitet otkaza osovinice priključnog klipa motora (IKOPU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova osovinice priključnog klipa motora (BIEOP), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM), zadani vremenski interval (T).

\*\*\*\*\*

$$R \text{ DPOPMDT.KL} = -(\text{IKOPU.K}) * \text{POPM.K}$$

$$L \text{ POPM.K} = \text{POPM.J} + \text{DT} * \text{DPOPMDT.JK}$$

$$N \text{ POPM} = 1 / \text{EXP}(\text{IKOPU} * \text{T})$$

$$A \text{ IKOPU.K} = \text{IKOP} + \text{BIEOP} * \text{GVIKEL}$$

$$A \text{ GVIKEL.K} = \text{GVIKIE} / \text{BIDM}$$

$$K \text{ GVIKIE} = 1 / \text{DGP}$$

$$C \text{ DGP} = 20550,773$$

$$C \text{ BIDM} = 81726$$

$$C \text{ BIEOP} = 2483$$

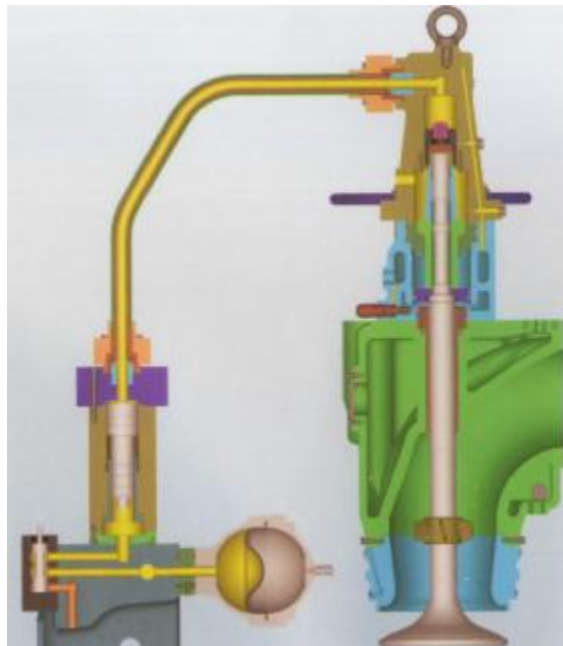
$$C \text{ T} = 600$$

```

* ****
Jednačina intenziteta otkaza osovinice priključnog klipa (IKOP), ukupan broj otkaza
osovinice priključnog klipa (BKOP), ukupan broj ispravnih delova osovinice priključnog
klipa (BIEOP), vreme nastanka otkaza (VNKOP).
* ****
A IKOP.K=BKOP/(BIEOP*VNKOP)
C BKOP=1
C VNKOP=590
* ****
SAVE DPOPMDT,POPM,IKOP,IKOPU
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2
* ****

```

### 7.5.6.9. Podsystem izduvnog ventila



Slika 7.53. Izduvni ventil

#### *Mentalno-verbalni model*

Usisni i izduvni ventili izrađeni su od vatrootpornog čelika. Pečurke ventila imaju ravnu površinu i dosedni obrub, na koji je nanet sloj hromnikla radi povećanja otpornosti od trošenja pri povišenim temperaturama. Vretena ventila su šuplja i zatvaraju se na strani pečurke čepom zavarenim na telo ventila. Vreteno svakog ventila je na gornjem delu stanjeno radi ulaganja dvodelnog osigurača, a na vrhu vretena zavarena je pločica od tvrdog legiranog čelika. Izduvni ventil se razlikuje od usisnog smanjenim promerom pečurke. Tanjiri, osigurači i opruge jednaki su za sve usisne i izduvni ventile.

Svaki cilindar ima dva izduvna ventila, pa motor ima ukupno 84 izduvna ventila, odnosno podsistem izduvnih ventila za 69 motora ima 5 796 ventila. U vremenu posmatranja dogodio se samo jedan otkaz, nakon 580 časova rada motora, jer je došlo do blokiranja loze ventila u radilici, zbog nakupljanja gareži.

Intenzitet otkaza za izduvne ventile iznosi:

$$I_K = \frac{1}{5795 \times 580} = 0,29752 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Ukupan intenzitet otkaza podsistema izduvnih ventila iznosi:

$$I_{KUK} = I_K + n_K \times I_{EL} = 0,29752 \times 10^{-6} + 5795 \times 5,9540378 \times 10^{-10}$$

$$I_{KUK} = 3,69818 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Prikaz svih parametara u modelu podsistema izduvnih ventila motora:

**DPIVMDT** - PROMENA OTKAZA IZDUVNOG VENTILA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**PIVM** - POUZDANOST IZDUVNOG VENTILA MOTORA

**IKIVU** - UKUPAN INTENZITET OTKAZA IZDUVNOG VENTILA MOTORA

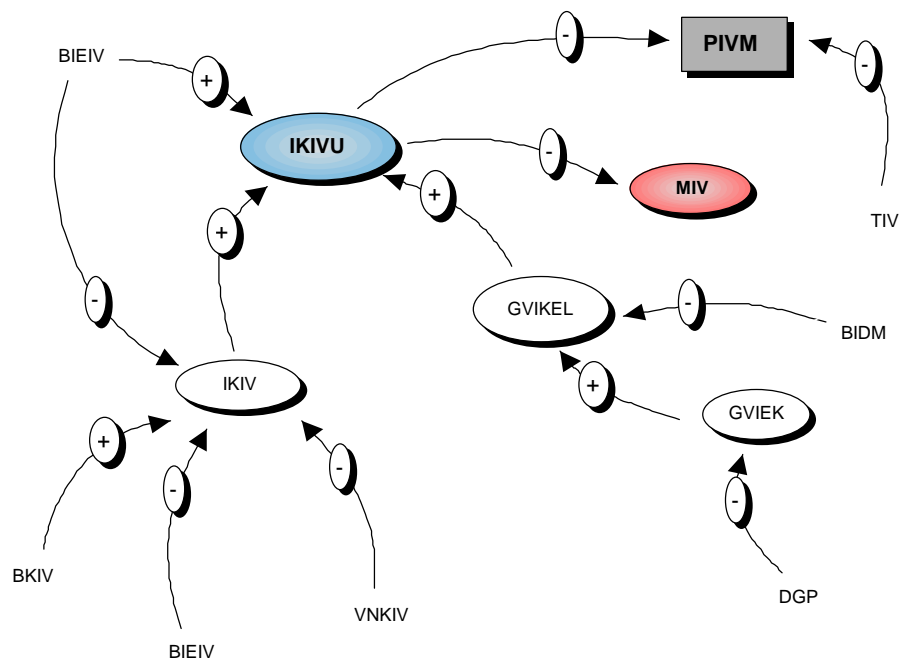
**BIEIV** - BROJ ISPRAVNIH DELOVA IZDUVNOG VENTILA U ZADATOM INTERVALU

**IKIV** - INTENZITET OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

**BKIV** - BROJ OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

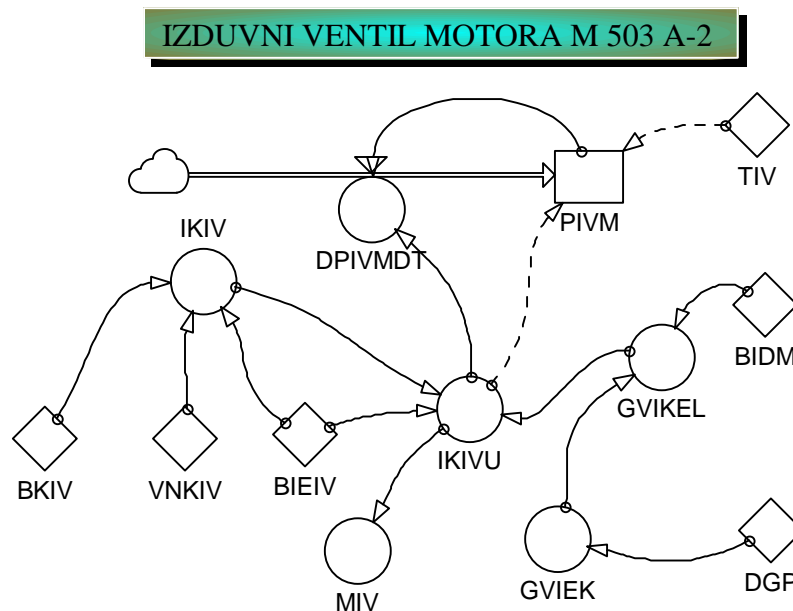
**VNKIV** - VREME NASTANKA OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

Na osnovu verbalnog modela podsistema klipa možemo dati strukturni model (slika 7.54) i dijagram toka (slika 7.55) podsistema u POWERSIM - simbolici:



Slika 7.54. Strukturni model podsistema izduvnog ventila

Iz strukturnog modela za podsistem izduvnog ventila, vidimo da pouzdanost izduvnog ventila (PIVM) zavisi od ukupnog intenziteta otkaza delova izduvnog ventila (IKIVU). Ako ukupan intenzitet otkaza delova izduvnog ventila (IKIVU) raste, pouzdanost izduvnog ventila (PIVM) će se smanjivati, odnosno predznak uzročno-posledične veze je negativan (-). Gornja vrednost intenziteta otkaza za svaki pojedini element u zadanom intervalu ima pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (GVIKEL) prema ukupnom intenzitetu otkaza podsistema izduvnog ventila (IKIVU). Intenzitet otkaza izduvnog ventila (IKIVU) jeste zbir intenziteta pojedinih delova ventila (IKIV) i svi oni imaju pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (+). Dat je opis simulacije jednog ventila: intenzitet otkaza jednog ventila (IKIV) ima jednu pozitivnu uzročno-posledičnu vezu (BKIV - ukupan broj otkaza ventila) i dve negativne uzročno-posledične veze (BIEIV - broj ispravnih elemenata ventila i VNKIV - vreme nastanka otkaza ventila). Ako ukupan intenzitet otkaza (IKIVU) opada, tada srednje vreme između otkaza izduvnog ventila raste (MIV).



Slika 7.55. Dijagram toka podsistema izduvnog ventila u POWERSIM - simboli

Matematički model podsistema izduvnog ventila motora u DYNAMO - jeziku:

\*\*\*\*\*

Jednačina pouzdanosti izduvnog ventila motora (PIVM), ukupan intenzitet otkaza izduvnog ventila motora (IKIVU), donja granica poverenja (DGP), broj ispravnih delova izduvnog ventila motora (BIEIV), ukupan broj ispravnih delova motora (BIDM), zadati vremenski interval (T).

\*\*\*\*\*

```
R DPIVMDT.KL=-(IKIVU.K)*PIVM.K
L PIVM.K=PIVM.J+DT*DPIVMDT.JK
N PIVM=1/EXP(IKIVU*T)
A IKIVU.K=IKIV+BIEIV*GVIEKEL
A GVIKEL.K=GVIEK/BIDM
```

```

K GVIKIE=1/DGP
C DGP=20550.773
C BIDM=81726
C BIEIV=5795
C T=600
* ****
Jednačina intenziteta otkaza izduvnog ventila motora (IKIV), ukupan broj otkaza
izduvnog ventila motora (BKIV), ukupan broj ispravnih delova izduvnog ventila motora
(BIEIV), vreme nastanka otkaza (VNKIV).
* ****
A IKIV.K=BKIV/(BIEIV*VNKIV)
C BKIV=1
C VNKIV=580
* ****
SAVE DPIVMDT,PIVM,IKIV,IKIVU
SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2
* ****

```

### 7.5.7. Određivanje predviđene pouzdanosti dizel motora M 503 A-2 kao sistema

Potrebno je na osnovu raspoloživih podataka iz tehničke dokumentacije proizvođača motora i dnevnika mašina izvršiti izradu simulacijskog modela predviđene pouzdanosti. Pravilnikom je određeno vođenje dnevnika za sve radove i svako uputstvo u vezi s radom motora. Svi nastali otkazi na motoru vode se u dnevniku i posebno u Knjizi otkaza. Ovi podaci se koriste prilikom izrade remontnog izveštaja. Takođe, treba utvrditi da li zadovoljava predviđena pouzdanost unapred postavljenim zahtevima, a na osnovu dobijenih rezultata donosi se **odluka** da li je potrebno preduzimati određene mere za povećanje pouzdanosti.

Osnovni zahtev koji se postavlja za pouzdanost motora odnosi se na broj časova rada motora. Motor zadovoljava zahtevima koji se postavljaju za brodove specijalne namene, a karakteristična su dva režima i to u plovidbi i za vreme boravka u luci.

Zahteva se da motor radi 600 časova do glavnog popravka s pouzdanošću 0,75.

Broj motora za koje se predviđa pouzdanost iznosi 69.

Uslovi održavanja propisuju da se održavanje vrši na tri nivoa, i to:

1. korektivno održavanje kojim se otklanja nastali otkaz;
2. periodično održavanje koje se sastoji od pregleda, servisa i remonta;
3. preventivna zamena delova, kada se zamenjuju delovi koji imaju rastući intenzitet otkaza, a otkazi su uzrok većim zastojećima i troškovima.

Koristeći dobijene vrednosti za intenzitete otkaza podsistema motora i vrednosti intenziteta otkaza za svaki pojedini element motora, može se izračunati predviđena pouzdanost motora.

Predviđanje vrednosti intenziteta otkaza za delove motora iznosi:

$$I_M = (5,3548 + 10,4735 + 12,5496 + 43,86153 + 13,87952 + 20,65975 + 3,79927 + 2,14553 + 3,69818) \times 10^{-6}$$

$$I_M = 116,42168 \times 10^{-6} \quad [\text{otkaza/h}]$$

Srednji broj časova između otkaza motora iznosi:

$$M_M = \frac{1}{I_M} = 8589,46 \quad [h]$$

Ukupna predviđena pouzdanost dizel motora iznosi:

$$R_M = e^{-I_M \times t} = e^{-0,069759t}$$

$$R_M = 0,9326$$

Može se zaključiti da je dobijena predviđena pouzdanost povoljnija od zahtevane pouzdanosti, koja iznosi 0,75.

Nakon mentalno-verbalnog modela motora kao celine kao i definisanih podsklopova motora, možemo dati i matematički model u DYNAMO simulacionom jeziku:

```

R DPTMDT.KL=-(IKTU.K)*PTM.K * PROMENA POUZDANOSTI TURBINE MOTORA
L PTM.K=PTM.J+DT*DPTMDT.JK * POUZDANOST TURBINE
N PTM=1/EXP(IKTU*T)
A IKTU.K=IKT+BIET*GVIKEL * UKUPAN INTEZITET OTKAZA TURBINE
A GVIKEL.K=GVIKIE/BIDM * GORNJA VREDNOST INTEZITETA OTKAZA
ZA SVAKI POJEDINI ELEMENT U ZADANOM INTERVALU
K GVIKIE=1/DGP * GORNJA VREDNOST INTEZITETA OTKAZA
ZA ISPRAVNE ELEMENTE U INTRVALU POVERENJA ( 0,75 )
C DGP=20550.773 * DONJA GRANICA POVERENJA
C BIDM=81726 * BROJ ISPRAVNIH DELOVA MOTORA U
ZADANOM INTERVALU
C BIET=3723 * BROJ ISPRAVNIH DELOVA TURBINE U
ZADANOM INTERVALU
C T=600 * ZADATI VREMENSKI INTERVAL
* *****
A IKPL.K=BKPL/(BIEPL*VNKPL) * INTENZITET OTKAZA PRSTENA LEŽAJA
TURBINE
C BKPL=1 * UKUPAN BROJ OTKAZA PRSTENA LEŽAJA
C BIEPL=3725 * BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENA
LEŽAJA
C VNKPL=180 * VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENA
LEŽAJA

```

\* \*\*\*\*\*

**A IKBR.K=BKBR/(BIEBR\*VNKBR)** \* INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE TURBINE  
**C BKBR=1** \* UKUPAN BROJ OTKAZA ZAPTIVKE  
**C BIEBR=3725** \* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA ZAPTIVKE  
**C VNKBR=237** \* VREME NASTANKA OTKAZA ZAPTIVKE  
 \* \*\*\*\*\*

**A IKVL.K=BKVL/(BIEVL\*VNKVL)** \* INTENZITET OTKAZA VALJKASTOG  
 LEŽAJA TURBINE  
**C BKVL=1** \* UKUPAN BROJ OTKAZA VALJKASTOG  
 LEŽAJA  
**C BIEVL=3725** \* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA  
 VALJKASTOG LEŽAJA  
**C VNKVL=490.3** \* VREME NASTANKA OTKAZA  
 VALJKASTOG LEŽAJA  
 \* \*\*\*\*\*

**A**  
**IKT.K=IKPL+IKBR+IKVL+IKZP+IKPR+IKK+IKST+IKCP+IKR+IKV+IKZ+IKM+IKLB+^**  
**IKSP+IKTUL** \* INTENZITET OTKAZA TURBINE  
**C IKZP=0** \* INTENZITET OTKAZA ZAŠITNOG  
 POKLPCA TURBINE  
**C IKPR=0** \* INTENZITET OTKAZA PRIRUBNICE  
 TURBINE  
**C IKK=0** \* INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA TURBINE  
**C IKST=0** \* INTENZITET OTKAZA SPOJKE TURBINE  
**C IKCP=0** \* INTENZITET OTKAZA CEVNE PRIRUBNICE  
 TURBINE  
**C IKR=0** \* INTENZITET OTKAZA ROTORA TURBINE  
**C IKV=0** \* INTENZITET OTKAZA VIJKA TURBINE  
**C IKZ=0** \* INTENZITET OTKAZA ZUPČANIKA TURBINE  
**C IKM=0** \* INTENZITET OTKAZA MATICE TURBINE  
**C IKLB=0** \* INTENZITET OTKAZA LAVIRINTNE ZAPTIVKE  
 TURBINE  
**C IKSP=0** \* INTENZITET OTKAZA SIGURNOSNE  
 PODLOGE TURBINE  
**C IKTUL=0** \* INTENZITET OTKAZA TULJKA TURBINE  
 \* \*\*\*\*\*

**R DPTKMDT.KL=-(IKTKU.K)\*PTKM.K**  
 \* PROMENA POUZDANOSTI TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**L PTKM.K=PTKM.J+DT\*DPTKMDT.JK**  
 \* POUZDANOST TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**N PTKM=1/EXP(IKTKU\*T)**  
**A IKTKU.K=IKTK+BIETK\*GVIKEL**  
 \* UKUPAN INTENZITET OTKAZA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**C BIETK=2063**  
 \* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA TURBOKOMPRESORA MOTORA  
 \* \*\*\*\*\*

**A IKOTK.K=BKOTK/(BIEOTK\*VNKOTK)**  
 \* INTENZITET OTKAZA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA MOTORA  
**C BKOTK=2**  
 \* BROJ OTKAZA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA



**C BIEOTK=2068**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA

**A VNKOTK.K=(V NKOTK1+V NKOTK2)/2**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA

**C VNKOTK1=150.3**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA

**C VNKOTK2=327.05**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA OSOVINICE TURBOKOMPRESORA

\* \*\*\*\*\*

**A IKCUTK.K=BKCUTK/(BIECUTK\*V NK CUTK)**

\* INTENZITET OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C BKCUTK=1**

\* BROJ OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA

**C BIECUTK=2069**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA

**C V NK CUTK=285**

\* VREME NASTANKA OTKAZA CEVI ZA ULJE TURBOKOMPRESORA

\* \*\*\*\*\*

**A IKBRTK.K=BKBRTK/(BIEBRTK\*V NK BRTK)**

\* INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C BKBRTK=1**

\* BROJ OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA

**C BIEBRTK=2069**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA

**C V NK BRTK=495**

\* VREME NASTANKA OTKAZA ZAPTIVKE TURBOKOMPRESORA

\* \*\*\*\*\*

**A IKPATK.K=BKPATK/(BIEPATK\*V NK ATK)**

\* INTENZITET OTKAZA POMOĆNOG APARATA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C BKPATK=3**

\* BROJ OTKAZA POMOĆNOG APARATA TURBOKOMPRESORA

**C BIEPATK=2067**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POMOĆNOG APARATA TURBOKOMPRESORA

**A V NK ATK.K=(V NK ATK1+V NK ATK2+V NK ATK3)/3**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA POMOĆNOG APARATA

TURBOKOMPRESORA

**C V NK ATK1=558.15**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA POMOĆNOG APARATA

TURBOKOMPRESORA

**C V NK ATK2=577**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA POMOĆNOG APARATA

TURBOKOMPRESORA

**C V NK ATK3=580**

\* VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA POMOĆNOG APARATA

TURBOKOMPRESORA

\* \*\*\*\*\*

**A IKTK.K=IKOTK+IKCUTK+IKBRTK+IKPATK+IKKTK+IKPTK+IKZTK+IKHSTK+<sup>^</sup>  
IKRPTK+IKKZTK+IKMTK+IKPOTK+IKPPTK+IKRTK**

\* INTENZITET OTKAZA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKKTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKPTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA POKLOPCA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKZTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA ZUPČANIKA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKHSTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA HIDRAULIČNE SPOJKE TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKRPTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA PODLOŠKE ZA REGULACIJU TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKKZTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA KONIČNOG ZUPČANIKA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKMTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA MATICE TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKPOTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKPPTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA PODLOŽNE PLOČICE TURBOKOMPRESORA MOTORA

**C IKRTK=0**

\* INTENZITET OTKAZA ROTORA TURBOKOMPRESORA MOTORA

**R DPSMDT.KL=-(IKSU.K)\*PSM.K**

\* PROMENA POUZDANOSTI SPOJKE MOTORA

**L PSM.K=PSM.J+DT\*DPSMDT.JK**

\* POUZDANOST SPOJKE MOTORA

**N PSM=1/EXP(IKSU\*T)****A IKSU.K=IKS+BIES\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA SPOJKE MOTORA

**C BIES=8750**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA SPOJKE MOTORA

\* \*\*\*\*\*

**A IKKS.K=BKKS/(BIEKS\*VNKKS)**

\* INTENZITET OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE MOTORA

**C BKKS=1**

\* BROJ OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE

**C BIEKS=8762**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KUĆIŠTA SPOJKE

**C VNKKS=223**

\* VREME NASTANKA OTKAZA KUĆIŠTA SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**A IKPMS.K=BKPMS/(BIEPMS\*VKNPMS)**

\* INTENZITET OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE MOTORA

**C BKPMS=1**

\* BROJ OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM SPOJKE

**C BIEPMS=8762**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM  
SPOJKE

**C VNKPMS=228**

\* VREME NASTANKA OTKAZA POLUŽJA MEHANIZMA ZA PLOVIDBU KRMOM  
SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**A IKPSS.K=BKPSS/(BIEKSS\*VNKSS)**

\* INTENZITET OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE MOTORA

**C BKPSS=1**

\* BROJ OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE

**C BIEKSS=8762**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KANDŽASTE SPOJKE

**C VNKSS=89.5**

\* VREME NASTANKA OTKAZA KANDŽASTE SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**A IKRALS.K=BKRALS/(BIERALS\*VNKRALS)**

\* INTENZITET OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE

**C BKRA**

\*BROJ OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE

**C BIERALS=8761**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE

**A VNKRALS.K=(VNKRAL1+VNKRAL2)/2**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA RADIJALNO-AKSIJALNOG LEŽAJA  
SPOJKE

**C VNKRAL1=202**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA SPOJKE

**C VNKRAL2=220**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA  
SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**A IKPUS.K=BKPUS/(BIEPUS\*VNKPUS)**

\* INTENZITET OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

**C BKPUS=2**

\* BROJ OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

**C BIEPUS=8761**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

**A VNKPUS.K=(VNKPUS1+VNKPUS2)/2**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

**C VNKPUS1=102**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

**C VNKPUS2=120.5**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA POLUGE ZA UKLJUČIVANJE SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**A IKKSS.K=BKKSS/(BIEKSK\*VNKSSK)**

\* INTENZITET OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE

**C BKKSS=3**

\* BROJ OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE

**C BIEKSK=8760**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE

**A VNKSSK.K=(VNKSS1+VNKSS2+VNKSS3)/3**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE  
**C VNKKSS1=304.4**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE  
**C VNKKSS2=320**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE  
**C VNKKSS3=250**

\* VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA KONUSNOG SINHRONIZATORA SPOJKE  
 \* \*\*\*\*\*

**A IKRALR.K=BKRALR/(BIERALR\*VNKRALR)**

\* INTENZITET OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE  
**C BKRALR=3**

\* BROJ OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE  
**C BIERALR=8760**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**A VNKRALR.K=(VNKLR1+VNKLR2+VNKLR3)/3**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**C VNKLR1=330**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**C VNKLR2=430.3**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

**C VNKLR3=495**

\* VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA RADIJALNO AKSIJALNOG LEŽAJA REDUKTORA SPOJKE

\* \*\*\*\*\*

**AIKS.K=**

**IKKS+IKPMS+IKPSS+IKRALS+IKPUS+IKKSS+IKRALR+IKOS+IKTCS+IKGS+<sup>^</sup>  
 IKSUS+IKMS+IKVS+IKBS+IKPS+IKLS+IKZS+IKRS+IKČS+IKPOS+IKNS+IKTS+IKPL  
 S+<sup>^</sup>**

**IKOPS+IKOPRS+IKKRS+IKNLS+IKORS+IKRVS+IKPMVS+IKPBS+IKPOKS+IKBZS**

\* INTENZITET OTKAZA SPOJKE

**C IKOS=0**

\* INTENZITET OTKAZA OBUJMICE SPOJKE

**C IKTCS=0**

\* INTENZITET OTKAZA TELESKOPSKE CEVI SPOJKE

**C IKGS=0**

\* INTENZITET OTKAZA GRANIČNIKA SPOJKE

**C IKSUS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PUMPE ULJA SPOJKE

**C IKMS=0**

\* INTENZITET OTKAZA MATICE SPOJKE

**C IKVS=0**

\* INTENZITET OTKAZA VIJKA SPOJKE

**C IKBS=0**

\* INTENZITET OTKAZA ZAPTIVKE SPOJKE

**C IKPS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PRIRUBNICE SPOJKE

**C IKLS=0**

\* INTENZITET OTKAZA LEŽAJA SPOJKE

**C IKZS=0**

\* INTENZITET OTKAZA ZUPČANIKA SPOJKE

**C IKRS=0**

\* INTENZITET OTKAZA RASPRSKIVAČA SPOJKE

**C IKČS=0**

\* INTENZITET OTKAZA ČEPA SPOJKE

**C IKPOS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PODLOŠKE SPOJKE

**C IKNS=0**

\* INTENZITET OTKAZA NOSAČA SPOJKE

**C IKTS=0**

\* INTENZITET OTKAZA TULJKA SPOJKE

**C IKPLS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PLOČICE SPOJKE

**C IKOPS=0**

\* INTENZITET OTKAZA OPRUGE SPOJKE

**C IKOPRS=0**

\* INTENZITET OTKAZA OSOVINE PREKRETNE SPOJKE

**C IKKRS=0**

\* INTENZITET OTKAZA KUČIŠTA REDUKTORA SPOJKE

**C IKNLS=0**

\* INTENZITET OTKAZA NOSAČA LEŽAJA SPOJKE

**C IKORS=0**

\* INTENZITET OTKAZA OSOVINICE REDUKTORA SPOJKE

**C IKRVS=0**

\* INTENZITET OTKAZA REDUKCIJSKOG VENTILA SPOJKE

**C IKBZS=0**

\* INTENZITET OTKAZA BOCE ZA VAZDUH SPOJKI

**C IKPMVS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PUMPE MORSKE VODE U SPOJKI

**C IKPBS=0**

\* INTENZITET OTKAZA PRSTENASTE ZAPTIVKE SPOJKE

**C IKPOKS=0**

\* INTENZITET OTKAZA POKLOPCA SPOJKE

\*\*\*\*\*

**R DPBCMDT.KL=-(IKBCU.K)\*PBCM.K**

\* PROMENA OTKAZA BLOK-CILINDRA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**L PBCM.K=PBCM.J+DT\*DPBCMDT.JK**

\* POUZDANOST BLOK-CILINDRA MOTORA

**N PBCM=1/EXP(IKBCU\*T)**

**A IKBCU.K=IKBC+BIIBC\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA BLOK-CILINDRA MOTORA

**C BIIBC=476**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA BLOK-CILINDRA U ZADATOM INTERVALU

\*\*\*\*\*

**A IKBC.K=BKBC/(BIIBC\*VNKBC)**

\* INTENZITET OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C BKBC=7**

\* BROJ OTKAZA BLOK-CILINDRA

**A**

**VNKBC.K=(VNBKBC1+VNBKBC2+VNBKBC3+VNBKBC4+VNBKBC5+VNBKBC6+VNBKBC7)/7**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC1=124**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC2=220**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC3=322**

\* VREME NASTANKA TREĆEG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC4=350**

\* VREME NASTANKA ČETVRTOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC5=380**

\* VREME NASTANKA PETOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC6=395**

\* VREME NASTANKA ŠESTOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**C VNBKBC7=571**

\* VREME NASTANKA SEDMOG OTKAZA BLOK-CILINDRA

**R DPKMDT.KL=-(IKKU.K)\*PKM.K**

\* PROMENA OTKAZA KLIPA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**L PKM.K=PKM.J+DT\*DPKMDT.JK**

\* POUZDANOST KLIPA MOTORA

**N PKM=1/EXP(IKKU\*T)**

**A IKKU.K=IKKM+BIEK\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA KLIPA MOTORA

**C BIEK=23181**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIPOVA U ZADATOM INTERVALU

\* \*\*\*\*\*

**A IKOK.K=BKOK/(BIEOK\*VNBKOK)**

\* INTENZITET OTKAZA OSOVINE KLIPA

**C BKOK=1**

\* BROJ OTKAZA OSOVINE KLIPA

**C BIEOK=23183**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA OSOVINE KLIPA

**C VNBKOK=450.3**

\* VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINE KLIPA

\* \*\*\*\*\*

**A IKPK.K=BKPK/(BIEPK\*VNBKPK)**

\* INTENZITET OTKAZA PRSTENA KLIPA

**C BKPK=2**

\* BROJ OTKAZA PRSTENA KLIPA

**C BIEPK=23182**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENA KLIPA

**A VNBKPK.K=(VNBKPK1+VNBKPK2)/2**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENA KLIPA

**C VNBKPK1=461**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA PRSTENA KLIPA

**C VNBKPK2=495**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA PRSTENA KLIPA

\* \*\*\*\*\*

**A IKKM.K=IKOK+IKPK+IKCK+IKTKM**

\* INTENZITET OTKAZA KLIPA

**C IKCK=0**

\* INTENZITET OTKAZA ČEPA KLIPA

**C IKTKM=0**

\* INTENZITET OTKAZA TELA KLIPA

**R DPGKMDT.KL=-(IKGKU.K)\*PGKM.K**

\* PROMENA POUZDANOSTI GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**L PGKM.K=PGKM.J+DT\*DPGKMDT.JK**

\* POUZDANOST GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**N PGKM=1/EXP(IKGKU\*T)****A IKGKU.K=IKGK+BIEGK\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C BIEGK=34773**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA GLAVNE KLIPNJAČE U ZADANOM INTERVALU

\* \*\*\*\*\*

**A IKVOGK.K=BKVOGK/(BIEVOGK\*VNKVOGK)**

\* INTENZITET OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C BKVOGK=2**

\* BROJ OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C BIEVOGK=34774**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**A VNKVOGK.K=(VNKVOK1+VNKVOK2)/2**

\* UKUPNO VREME NASTANKA OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C VNKVOK1=380.3**

\* VREME NASTANKA PRVOG OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C VNKVOK2=490**

\* VREME NASTANKA DRUGOG OTKAZA VALJKASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

\* \*\*\*\*\*

**A IKPOGK.K=BKPOGK/(BIEPOGK\*VNKPOGK)**

\* INTENZITET OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C BKPOGK=1**

\* BROJ OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C BIEPOGK=34775**

\* BROJ ISPRAVNIH ELEMENATA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

**C VNKPOGK=236**

\* VREME NASTANKA OTKAZA PRSTENASTOG OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE

\* \*\*\*\*\*

**A****IKGK.K=IKVOGK+IKPOGK+IKTGGK+IKPGK+IKCSGK+IKGDLGK+IKČGK+IKZGK+<sup>^</sup>IKBGK+IKTPGK+IKSPGK+IKMPGK+IKOPGK+IKVPGK+IKRPGK**

\* INTENZITET OTKAZA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKTGGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA TULJKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA PROTIVTEGA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKCSGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA CEVI SPOJA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKGDLGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA GORNJEG I DONJEG LEŽAJA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKČGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA ČEPA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKZGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA ZATIKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKBGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA BUBNJA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKTPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA TULJKA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKSPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA SIGURNOSNE PODLOGE GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKMPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA MATICE PROTIVTEGA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKOPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA PODLOGE OSIGURAČA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKVPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA VIJKA PRSTENA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

**C IKRPGK=0**

\* INTENZITET OTKAZA REGULATORA PRSTENA GLAVNE KLIPNJAČE MOTORA

.....

**R DPKLMDT.KL=-(IKKLU.K)\*PKLM.K**

\* PROMENA OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**L PKLM.K=PKLM.J+DT\*DPKLMDT.JK**

\* POUZDANOST KLIZNOG LEŽAJA MOTORA

**N PKLM=1/EXP(IKKLU\*T)****A IKKLU.K=IKKL+BIEKL\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA MOTORA

**C BIEKL=428**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIZNOG LEŽAJA U ZADANOM INTERVALU

\*\*\*\*\*

**A IKKL.K=BKKL/(BIDKL\*VNKKL)**

\* INTENZITET OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA

**C BKKL=1**

\* BROJ OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA

**C BIDKL=482**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA KLIZNOG LEŽAJA

**C VNKKL=590**

\* VREME NASTANKA OTKAZA KLIZNOG LEŽAJA

\*\*\*\*\*

**R DPOPMDT.KL=-(IKOPU.K)\*POP.M.K**

\* PROMENA OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**L POPM.K=POP.M.J+DT\*DPOPMDT.JK**

\* POUZDANOST OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA

**N POPM=1/EXP(IKOPU\*T)****A IKOPU.K=IKOP+BIEOP\*GVIKEL**

\* UKUPNI INTENZITET OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA



**C BIEOP=2483**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA U ZADANOM INTERVALU

\*\*\*\*\*

**A IKOP.K=BKOP/(BIEOP\*VNKOP)**

\* INTENZITET OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA

**C BKOP=1**

\* BROJ OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA

**C VNKOP=590**

\* VREME NASTANKA OTKAZA OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA

\*\*\*\*\*

**R DPIVMDT.KL=-(IKIVU.K)\*PIVM.K**

\* PROMENA OTKAZA IZDUVNOG VENTILA U TOKU TRAJANJA MOTORA

**L PIVM.K=PIVM.J+DT\*DPIVMDT.JK**

\* POUZDANOST IZDUVNOG VENTILA MOTORA

**N PIVM=1/EXP(IKIVU\*T)****A IKIVU.K=IKIV+BIEIV\*GVIKEL**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA IZDUVNOG VENTILA MOTORA

**C BIEIV=5795**

\* BROJ ISPRAVNIH DELOVA IZDUVNOG VENTILA U ZADATOM INTERVALU

\*\*\*\*\*

**A IKIV.K=BKIV/(BIEIV\*VNKIV)**

\* INTENZITET OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

**C BKIV=1**

\* BROJ OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

**C VNKIV=580**

\* VREME NASTANKA OTKAZA IZDUVNOG VENTILA

\*\*\*\*\*

**A IKMU.K=IKTU+IKTKU+IKBCU+IKSU+IKGKU+IKIVU+IKKU+IKKLU+IKOPU**

\* UKUPAN INTENZITET OTKAZA MOTORA

**K SBSIK=1/IKMU**

\* SREDNJI BROJ ČASOVA IZMEĐU OTKAZA

**A UPPM=1/EXP(IKMU\*T)**

\* UKUPNA PREDVIĐENA POUZDANOST MOTORA

\*\*\*\*\*

**SAVE**

DPTMDT,PTM,IKTU,BKPL,BIEPL,IKPL,BKPL,BIEPL,VNKPL,VNKBR,IKBR,IKVL,GVI  
KEL,^

GVIKIE,IKT,DPIVMDT,PIVM,IKIV,IKIVU,DPOPMDT,POP,IKOP,IKOPU,DPKLM,DP  
KLM,^

IKKL,IKKLU,DPGKMDT,PGKM,IKGKU,IKGK,IKVOGK,IKPOGK,DPBCMDT,PBCM,IK  
BC,^

IKBCU,DPSMDT,PSM,IKSU,IKS,IKKS,IKPSS,IKPMS,IKRALS,IKPUS,IKKSS,IKRALR,  
DPTKMDT,^

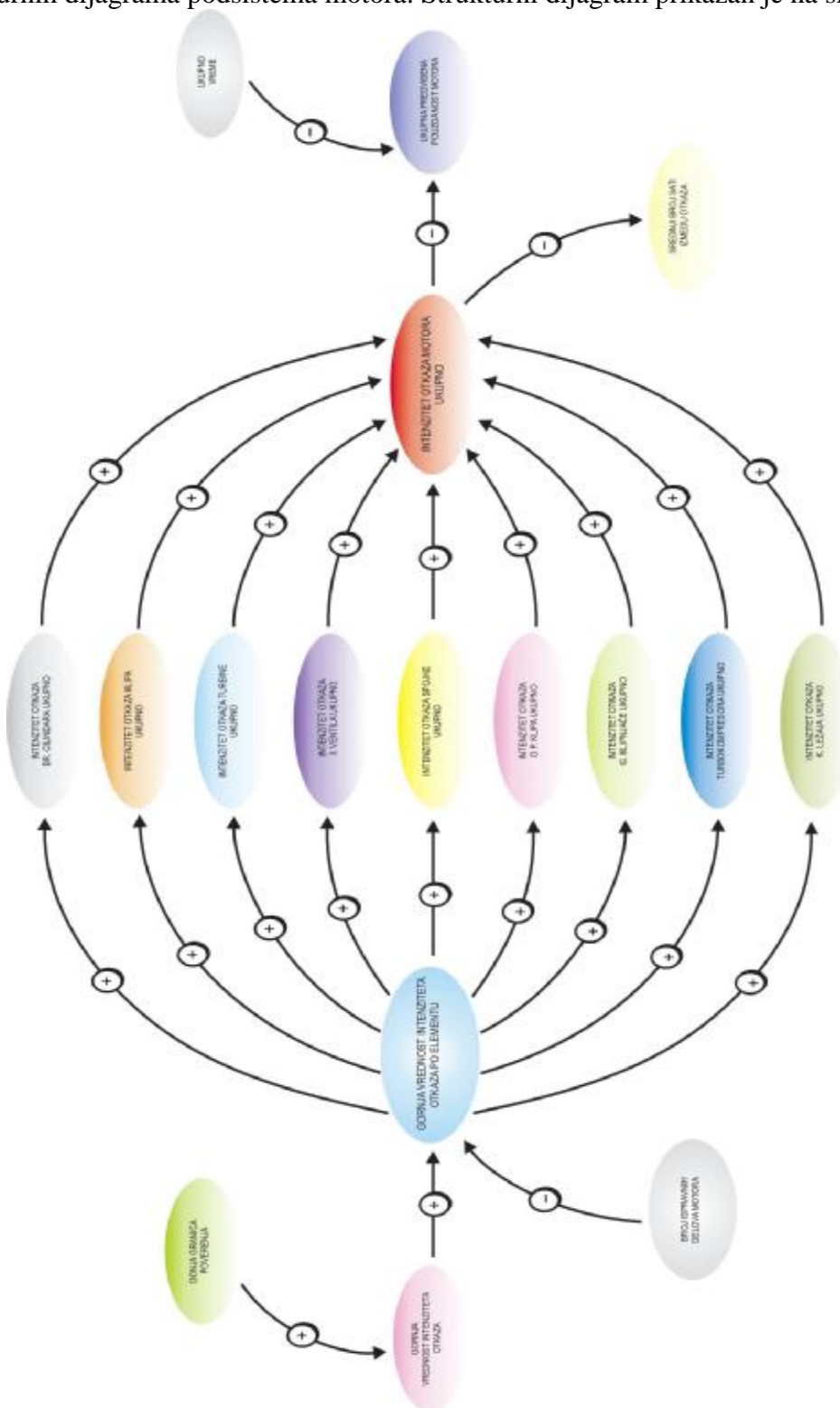
PTKM,IKTKU,IKTK,IKOTK,IKCUTK,IKBRTK,IKPATK,IKPATK,DPKMDT,PKM,IKK,BK  
OK,^

BIEOK,IKOK,BKPK,BIEPK,VNKOK,IKKU,IKMU,SBSIK,UPPM

SPEC DT=1,LENGTH=600,SAVPER=2

\*\*\*\*\*

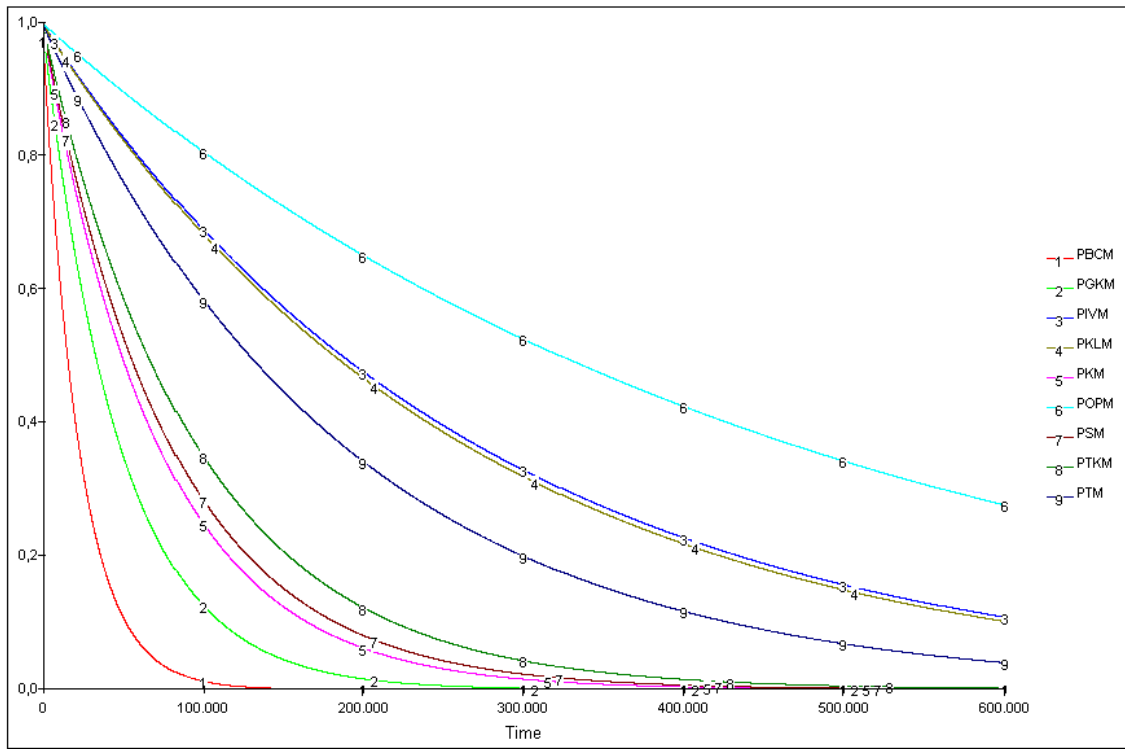
Strukturni dijagram modela pouzdanosti dizel motora M 503 A-2 daćemo kao sumu strukturnih dijagrama podsistema motora. Strukturni dijagram prikazan je na slici 7.56.



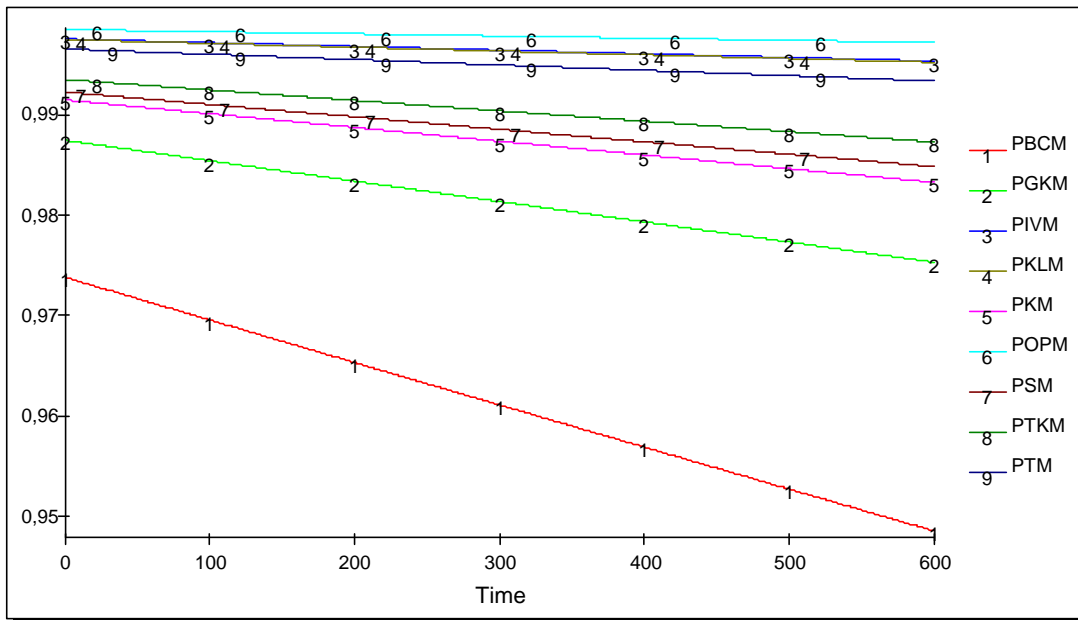
Slika 7.56. Strukturni dijagram modela pouzdanosti dizel motora M 503 A-2



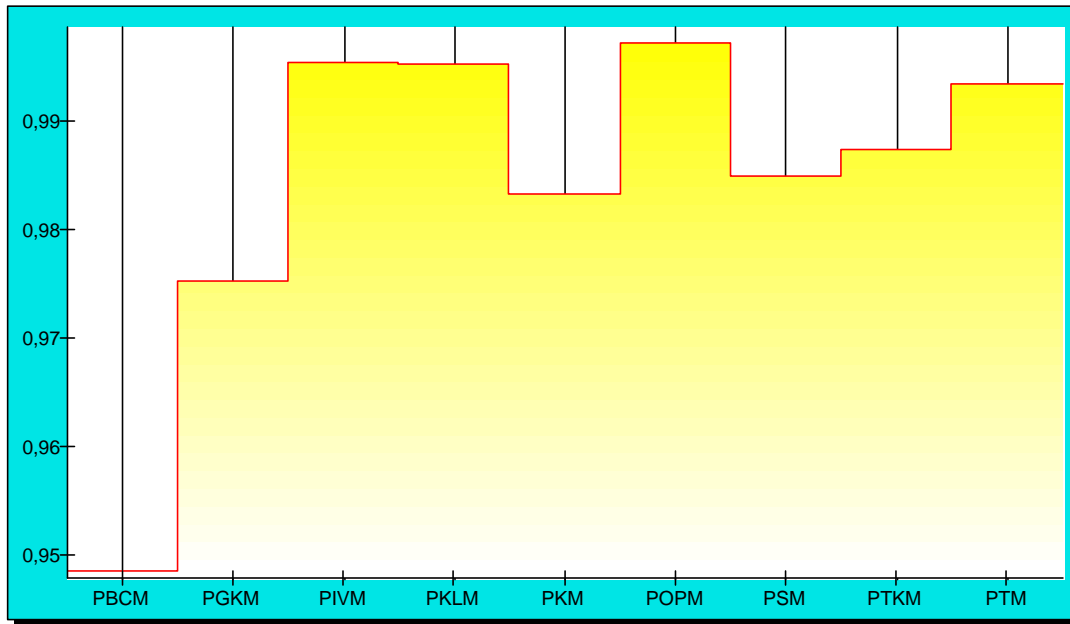
Dijagrami pouzdanosti podsistema motora:



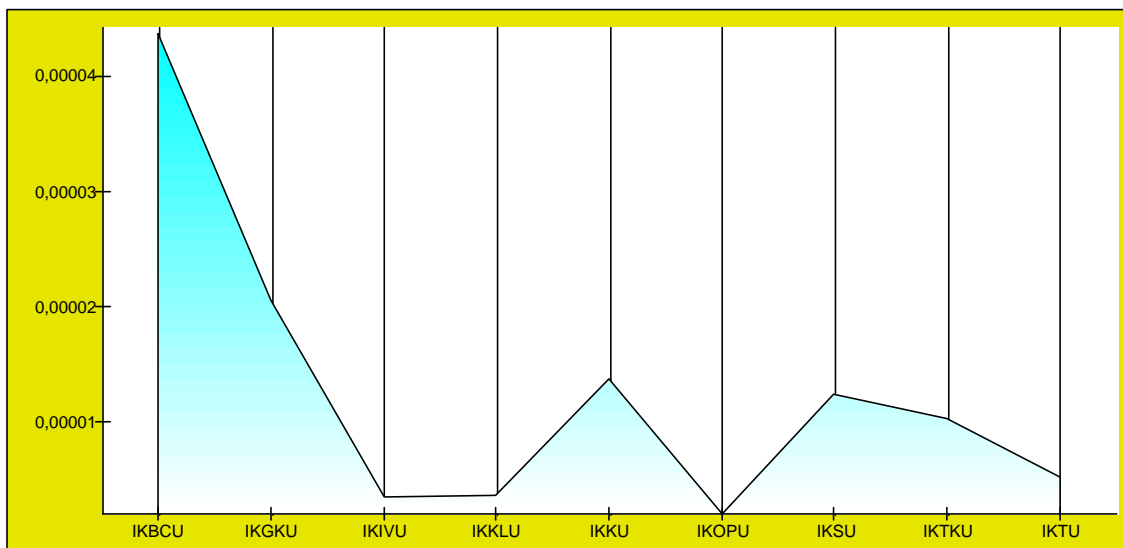
Grafikon 1. Dijagram vremenskog toka eksponencijalnog opadanja pouzdanosti podsistema motora u toku rada 600.000 časova



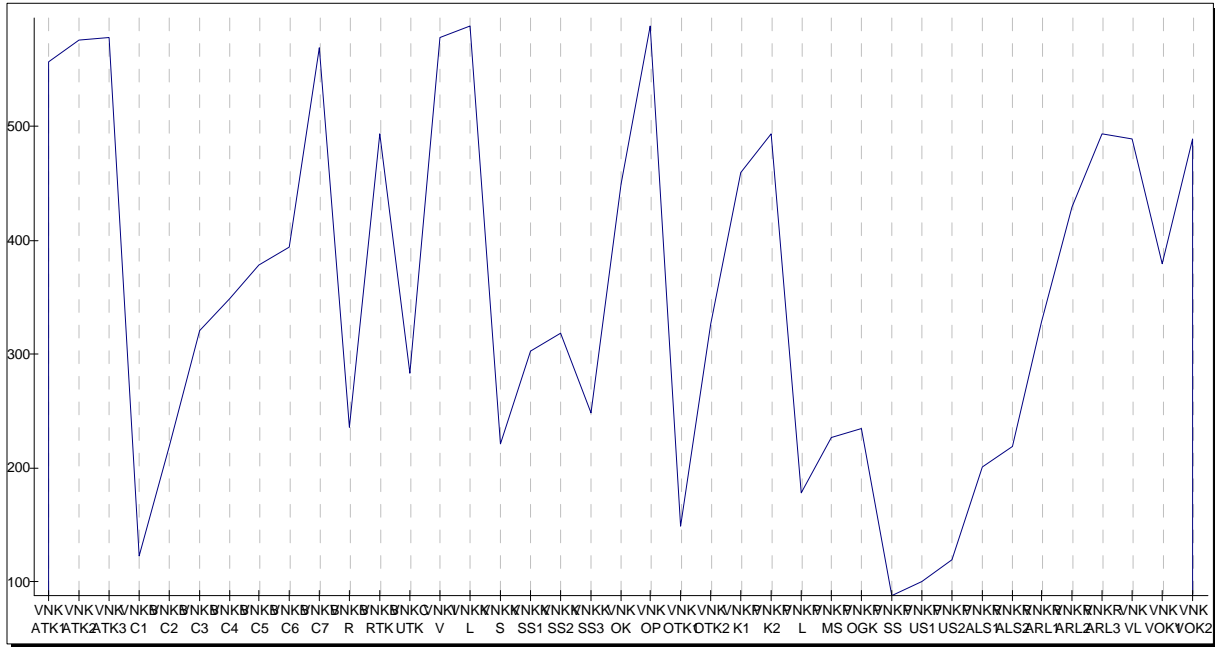
Grafikon 2. Dijagram vremenskog toka linearnog opadanja pouzdanosti podsistema motora u toku rada prvih 600 časova



Grafikon 3. Dijagram pouzdanosti podsistema motora nakon 600 sati rada



Grafikon 4. Dijagram ukupnog intenziteta otkaza podsistema motora



Grafikon 5. Dijagram vremena nastanka otkaza podsistema motora

Tabela 7.5. Tabelarni prikaz pouzdanosti podsistema motora:

Time	PBCM	PGKM	PIVM	PKLM	PKM	POPM	PSM	PTKM	PTM
0	0,974	0,988	0,998	0,998	0,992	0,999	0,992	0,994	0,997
10	0,974	0,987	0,998	0,998	0,992	0,999	0,992	0,994	0,997
20	0,973	0,987	0,998	0,998	0,991	0,999	0,992	0,994	0,997
30	0,973	0,987	0,998	0,998	0,991	0,999	0,992	0,993	0,997
40	0,972	0,987	0,998	0,998	0,991	0,999	0,992	0,993	0,997
50	0,972	0,987	0,998	0,998	0,991	0,999	0,992	0,993	0,997
60	0,971	0,986	0,998	0,997	0,991	0,999	0,992	0,993	0,996
70	0,971	0,986	0,998	0,997	0,991	0,999	0,992	0,993	0,996
80	0,971	0,986	0,997	0,997	0,991	0,999	0,992	0,993	0,996
90	0,97	0,986	0,997	0,997	0,99	0,999	0,991	0,993	0,996
100	0,97	0,986	0,997	0,997	0,99	0,999	0,991	0,993	0,996
110	0,969	0,985	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,993	0,996
120	0,969	0,985	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,992	0,996
130	0,968	0,985	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,992	0,996
140	0,968	0,985	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,992	0,996
150	0,968	0,985	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,992	0,996
160	0,967	0,984	0,997	0,997	0,99	0,998	0,991	0,992	0,996
170	0,967	0,984	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,992	0,996
180	0,966	0,984	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,992	0,996
190	0,966	0,984	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,992	0,996
200	0,966	0,984	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,992	0,996
210	0,965	0,983	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,992	0,996
220	0,965	0,983	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,991	0,996
230	0,964	0,983	0,997	0,997	0,989	0,998	0,99	0,991	0,996
240	0,964	0,983	0,997	0,997	0,988	0,998	0,99	0,991	0,996
250	0,963	0,983	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
260	0,963	0,982	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
270	0,963	0,982	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
280	0,962	0,982	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
290	0,962	0,982	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
300	0,961	0,982	0,997	0,997	0,988	0,998	0,989	0,991	0,995
310	0,961	0,981	0,997	0,997	0,987	0,998	0,989	0,991	0,995
320	0,96	0,981	0,997	0,997	0,987	0,998	0,989	0,99	0,995
330	0,96	0,981	0,997	0,996	0,987	0,998	0,988	0,99	0,995
340	0,96	0,981	0,997	0,996	0,987	0,998	0,988	0,99	0,995
350	0,959	0,981	0,996	0,996	0,987	0,998	0,988	0,99	0,995
360	0,959	0,98	0,996	0,996	0,987	0,998	0,988	0,99	0,995
370	0,958	0,98	0,996	0,996	0,987	0,998	0,988	0,99	0,995
380	0,958	0,98	0,996	0,996	0,986	0,998	0,988	0,99	0,995
390	0,958	0,98	0,996	0,996	0,986	0,998	0,988	0,99	0,995
400	0,957	0,98	0,996	0,996	0,986	0,998	0,988	0,99	0,995
410	0,957	0,979	0,996	0,996	0,986	0,998	0,987	0,989	0,995
420	0,956	0,979	0,996	0,996	0,986	0,998	0,987	0,989	0,995
430	0,956	0,979	0,996	0,996	0,986	0,998	0,987	0,989	0,994
440	0,955	0,979	0,996	0,996	0,986	0,998	0,987	0,989	0,994
450	0,955	0,979	0,996	0,996	0,986	0,998	0,987	0,989	0,994
460	0,955	0,978	0,996	0,996	0,985	0,998	0,987	0,989	0,994
470	0,954	0,978	0,996	0,996	0,985	0,998	0,987	0,989	0,994
480	0,954	0,978	0,996	0,996	0,985	0,998	0,987	0,989	0,994
490	0,953	0,978	0,996	0,996	0,985	0,998	0,986	0,989	0,994
500	0,953	0,978	0,996	0,996	0,985	0,998	0,986	0,989	0,994
510	0,952	0,977	0,996	0,996	0,985	0,998	0,986	0,988	0,994
520	0,952	0,977	0,996	0,996	0,985	0,998	0,986	0,988	0,994
530	0,952	0,977	0,996	0,996	0,984	0,998	0,986	0,988	0,994
540	0,951	0,977	0,996	0,996	0,984	0,998	0,986	0,988	0,994
550	0,951	0,977	0,996	0,996	0,984	0,998	0,986	0,988	0,994
560	0,95	0,976	0,996	0,996	0,984	0,998	0,986	0,988	0,994
570	0,95	0,976	0,996	0,996	0,984	0,997	0,985	0,988	0,994
580	0,95	0,976	0,996	0,996	0,984	0,997	0,985	0,988	0,994
590	0,949	0,976	0,996	0,995	0,984	0,997	0,985	0,988	0,994
600	0,949	0,976	0,996	0,995	0,983	0,997	0,985	0,988	0,994

## 8.0. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### 8.1. Saopštavanje rezultata istraživanja

Postavljeni cilj i zadaci ove disertacije su bili: istraživanje i izrada osnovnog modela (aparata) za donošenje odluka u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja. Osnovni cilj je da se na osnovu modela teorije prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti, formalizuju složeni mehanizmi donošenja odluke i da se izvrši njihova automatizacija prilagođena računarima. Međutim, zbog kompleksne prirode problema o kojima je reč, najveća pažnja istraživanju u oblasti prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti posvećena je određenim, konkretnim problemima, kao što su prepoznavanje karaktera ili klasifikacija otkaza u radu broskog postrojenja. Dalje, cilj ove disertacije je bio da se obrade matematički modeli tih praktičnih problema i da se obezbede matematički alati potrebni za njihovo rešavanje i interpretaciju. Matematički model optimizacije obuhvata formalizovanje funkcija stanja i funkcija promene stanja sa graničnim funkcijama procesa rada u smislu postavljanja konkretnog oblika funkcije cilja (funkcije kriterijuma, objektivne funkcije, funkcije reagovanja, funkcije kvaliteta). Metode optimizacije su razvijene za određivanje optimuma funkcije cilja po jednom od navedenih kriterijuma. Karakter posmatranog procesa rada i njegovog matematičkog modela opredeljuje podelu, izbor i upotrebu brojnih matematičkih metoda optimizacije. Sistem matematičkih metoda optimizacije obuhvata različite metode kao što su: matematičko programiranje, analitičke metode, Boks-Vilsonov gradijentni metod, simpleksni metod itd. Bez obzira na to koje metode se koriste, postupak optimizacije zahteva da se prethodno precizno definišu kriterijumi prema kojima treba odabrati najbolje, odnosno optimalno rešenje, kao i bitna ograničenja o kojima treba voditi računa. Da bi se mogle analizirati pouzdanost i raspoloživost nekog sistema, potrebno je znati kako on radi, kako je napravljen i od kojih elemenata, koji su mehanizmi otkaza tih elemenata i čitavog sistema.

Ovom doktorskom disertacijom vršena su teorijska i eksperimentalna (eksploataciona) istraživanja problematike modelovanja odlučivanja u procesima prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti brodskih postrojenja. Na bazi tih istraživanja dobijeni su rezultati koji predstavljaju naučni i stručni doprinos predmetnoj problematici. U teorijskim istraživanjima proučavane su savremene metode koje se bave prepoznavanjem tipa funkcije pouzdanosti, a mogu se efikasno primeniti u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja. Eksploataciona istraživanja su omogućila proveru postavljenih hipoteze i pohipoteza ove disertacije. Posebno u proveru pohipoteze: modeli bazirani na simulacijama mogu širem krugu donosilaca odluka olakšati pristup donošenju odluka u procesima prepoznavanja oblika pouzdanosti brodskih postrojenja. Složeno eksperimentalno istraživanje na reprezentativnom uzorku proučavanja pouzdanosti broskog motora metodama simulacije pokazalo je punu opravdanost za proučavanje osnovne problematike disertacije.

U eksperimentalnom istraživanju korišćeni su metoda paralelnih grupa, praćenje motora prema dnevniku mašine i simulacija motora prema izloženim algoritmima. Na osnovu dobijenih rezultata izvedeni su parcijalni i globani zaključci. U tabeli 7.5 izloženi



su rezultati praćenja rada motora u trajanju od 600 časova, na osnovu kojih se ističu pokazatelji relevantni za pouzdanost.

1) U vremenskom intervalu do prvog remonta, tj. do 600 časova, posmatrano je 69 motora, od kojih su samo četiri bila u otkazu. Prema podacima iz dnevnika mašina, ukupno vreme rada motora iznosilo je 28 909,8 časova. U tom vremenu bilo je 81 726 ispravnih elemenata.

2) Otkazi podsistema turbine dogodili su se na osnovnom delu  $A_{10}$  nakon 180 časova rada, na delu  $A_{12}$  nakon 237 časova rada i na delu  $A_{15}$  nakon 490,3 časova rada. Podsystem turbine sastoji se iz 54 elemenata, a za 69 dizel motora to iznosi 3 726 elemenata.

3) Otkazi podsistema turbokompresora dogodili su se na osnovnim delovima:  $B_4$  posle 150,3 časova i posle 327,05 časova rada, na delu  $B_6$  nakon 285,08 časova rada, na  $B_{12}$  nakon 495 časova rada i na delu  $B_{14}$  posle 558,15 časova, 577 i posle 580 časova rada.

4) Otkazi podsistema spojnice motora dogodili su se na osnovnim delovima:  $C_{18}$  posle 304,4 časova, 302 pa posle 250 časova rada, na delu  $C_{20}$  nakon 202 i 220 časova rada, na delu  $C_{23}$  posle 89,5 časova rada, na  $C_{24}$  nakon 102 i 120,5 časova rada, na delu  $C_{25}$  posle 330, 430,3 i 495 časova rada, na delu  $C_{26}$  posle 223 časa rada i na delu  $C_{27}$  posle 228 časova rada..

5) Svaki posmatrani motor ima sedam blok-cilindara, odnosno za 69 motora ukupno su se posmatrala 483 blok-cilindra. U vremenskom periodu od 600 časova dogodilo se sedam otkaza i to posle 124, 220, 322, 350, 380, 395 i 571 časa rada.

6) Ukupan broj klipnih prstenova za jedan motor iznosi 336, odnosno za 69 motora posmatrana su 23 184 elementa podsistema klipa. Otkazi su se dogodili na delu  $E_1$  posle 450,3 časova rada i na delu  $E_3$  posle 461 i 495 časova rada motora.

7) Glavna klipnjača je podsystem koji se sastoji od 15 osnovnih delova. Svaki osnovni deo može biti sastavljen iz više elemenata. Svaki motor ima šest glavnih klipnjača, a svaka klipnjača 84 elementa. Za 69 posmatranih motora u podsystemu glavnih klipnjača posmatralo se 34 776 elemenata. Otkazi su se pojavili na osnovnom delu  $F_{11}$  posle 236 časova rada i na delu  $F_{15}$  posle 380,3 i 490 časova rada.

8) Svaki motor ima sedam temeljnih kliznih ležaja, pa za 69 motora u podsystemu kliznih ležajeva ima 483 ležaja. U vremenskom periodu od 600 časova rada motora dogodio se samo jedan otkaz nakon 590 časova, i to zbog puknuća ležaja od zamora materijala.

9) Motor ima ukupno 84 izduvna ventila, odnosno podsystem izduvnih ventila za 69 posmatranih ima 5 796 ventila. U vremenu posmatranja dogodio se samo jedan otkaz, posle 580 časova rada motora, jer došlo je do blokiranja loze ventila u radilici, zbog nakupljanja gareži.

Na osnovu dobijenih jednačina funkcija modela pouzdanosti motora i njegovih sklopova, izvršeno je testiranje na bazi modela simulacije.

Pouzdanost sklopova i motora M 503 A-2 na bazi modela simulacije za određeni nivo pouzdanosti i maksimalno vreme eksploatacije motora, prema rezultatima, koji su prikazani na dijagramu G.1. daju mogućnost prognoze pouzdanosti i donošenja odluka na bazi odgovarajućeg tipa funkcije.

Ovim modelom mogu se prognozirati ispravna stanja rada sklopova u granicama dozvoljenog rizika čime se postiže ušteda koja se manifestuje u većoj eksploataбилности motora M 503 A-2 .

Rezultati simulacije pokazuju da je kod ove vrste motora, najmanje pouzdan blok motora (PBCM). Na osnovu dijagrama simulacije se konstatuje da se mogu očekivati otkazi već posle 25 000 časova rada, a da nijedan blok motora neće imati radni vek duži od 100 000 časova. U realnim uslovima praćenja serije od 69 motora (prema dnevniku mašina) potvrdila se pretpostavka pouzdanosti, jer je došlo do otkaza bloka nakon 600 časova rada. Dalje model simulacije je pokazao da se pri kriterijumu rizika 0.8 treba doneti odluka da se blok motora dijagnostikuje i da je potreban rezervni blok.

Glavna klipnjača motora je sledeća, po otkazu, značajna komponenta motora M 503 A-2, simulacija pokazuje da se njeni prvi otkazi mogu očekivati posle 50 000 časova rada, a da ne postoji mogućnost da nijedna klipnjača radi 200 000 časova.

Klip motora po pouzdanosti funkcionisanja se nalazi na trećem mestu. Na osnovu izvršene simulacije dobijeni rezultati pokazuju da postoji mogućnost otkaza u toku 65.000 časova rada, a da je maksimalno vreme eksplotacije klipova 400.000 časova rada.

Spojka motora M 503 A-2, po pouzdanosti u ovom istraživanju, nalazi se na četvrtom mestu. Prvi otkazi mogu se desiti do 65 000 časova, a da je maksimalan vremenski period rada 400 000 časova rada.

Prognoza pouzdanosti turbokompresora motora M 503 A-2, prema simulaciji njegovog rada pokazuje da se prvi otkazi mogu javiti u toku 80 000 časova rada. Takođe, simulacija pokazuje prognozu maksimalnog rada do 460 000 časova.

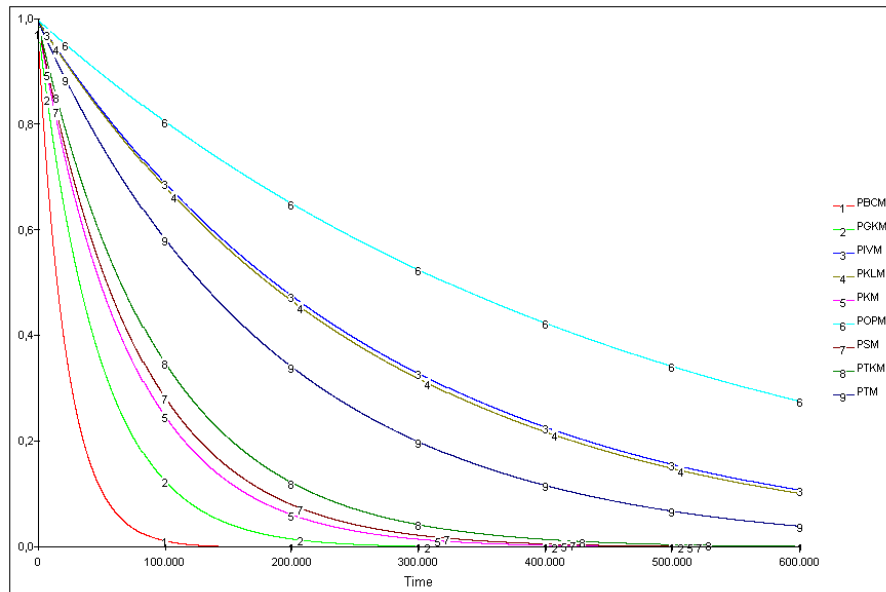
Pouzdanost turbine motora M 503 A-2 je relativno visoka, jer se prvi otkazi mogu javiti u 100 000 časova rada, a maksimalno moguće njeno funkcionisanje je preko 600000 časova rada.

Pouzdanost izduvnih ventila i kliznog ležaja motora M 503 A-2 je gotovo identična i prvi otkazi se mogu javiti do 100000 časova rada, a da je njihov eksplotacioni vek preko 600 000 časova rada.

Pouzdanost osovinice klipa motora M 503 A-2 najveća i otkazi se javljaju nakon 100 000 časova rada, a da mogu raditi preko 600 000 časova rada.

Dobijeni rezultati na bazi simlacije pokazuju visok stepen validnosti koji su komparirani sa rezultatima direktnog praćenja rada 69 motora u toku 600 časova rada, odnosno u periodu linearne funkcije.

Simulacioni model broskog motora M 503 A-2 omogućio je sagledavanje pouzdanosti njegove eksploatacije u dužem vremenskom trajanju 600.000 časova rada. Projektovani vek motora M 503 A-2 je 25 godina, što je bio razlog da se simulacija posmatra u datom periodu vremena.



G.1. Dijagram vremenskog toka eksponencijalnog opadanja pouzdanosti podsistema motora u toku rada 600 000 časova

1. PBCM- POUZDANOST BLOKA MOTORA
2. PGKM- POUZDANOST GLAVNE KLIPNJAČE
3. PIVM- POUZDANOST IZDUVNOG VENTILA
4. PKLM- POUZDANOST KLIZNOG LEŽAJA MOTORA
5. PKM- POUZDANOST KLIPA MOTORA
6. PPM- POUZDANOST OSOVINICE PRIKLJUČNOG KLIPA MOTORA
7. PSM- POUZDANOST SPOJKE MOTORA
8. PTKM- POUZDANOST TURBO KOMPRESORA MOTORA
9. PTM- POUZDANOST TURBINE MOTORA

Rezultati simulacije prema modelu koji je konstruisan u ovoj disertaciji, omogućuju dobijanja informacija na osnovu kojih se za date kriterijume mogu donositi odluke o pouzdanosti sklopova i samog motora, o planiranju remonta, o potrebnom stoku rezervnih delova, konačno i odluke o sigurnosti samog broskog postrojenja.

## 8. 2. Dokazivanje glavne hipoteze

U postavljenom problemu ove doktorske disertacije naglasili smo da pouzdanost komponenta i osnovnih sklopova brodskih konstrukcija se može definisati kao verovatnoća da posmatrani deo funkcioniše kako je predviđeno u svom veku trajanja. Da bi bilo moguće odrediti pouzdanost postupcima verovatnoće, potrebno je uvesti statističke varijable i stohastičke procese i definisati kada se brosko postrojenje smatra oštećenim, a kada ne.

Sve metode pouzdanosti su približne i problemi postaju teži s porastom broja slučajnih promenljivih, a složenost funkcija raste u slučaju prisutnosti statističke zavisnosti slučajnih promenljivih. Osnovna prednost projektovanja održavanja brodskih

postrojenja metodama pouzdanosti je uključivanje neizvesnosti delovanja brodskih konstrukcija u procese projektovanja, analiziranja i eksploataisanja postrojenja na racionalan i logičan način.

Radi ostvarivanja postavljenih ciljeva i zadataka, u disertaciji su postavljene glavna hipoteza i pothipoteze. Glavna hipoteza je glasila:

Primenom poznatih probablističkih metoda i postupaka ocene pouzdanosti radi ocene verovatnoće mogućih događaja u vreme eksploataisanja broskog postrojenja, omogućiće se ocene neizvesnosti delotvornosti samog broda u službi. Razmatranje međudelovanja svih komponenata sistema i odnosa među mogućim događajima, prema značaju i važnosti, doprineće utvrđivanju modela (aparata) za donošenje odluka statističkim putem u procesima prepoznavanja oblika pouzdanosti broskog postrojenja.

Zajedništvo tih svojstava sa svojstvom sigurnosti omogućiće dobijanje mera za poboljšanje ukupne sigurnosti u korišćenju i održavanju brodskih postrojenja.

Kao pothipoteze navedene su sledeće:

- 1) Osnovni problemi donošenja odluka u procesima prepoznavanja oblika pouzdanosti brodskih postrojenja jesu problemi transfera i distribucije znanja, a uzrokovani su multidisciplinarnošću samog procesa odlučivanja, kao i brzim izmenama tehnologije gradnje i eksploatacije brodskih postrojenja.
- 2) Rešavanje problema odlučivanja moguće je ostvariti reinženjeringom procesa donošenja odluka o prepoznavanju oblika pouzdanosti brodskih postrojenja, korišćenjem statističkih i drugih analitičkih metoda.
- 3) Modeli bazirani na simulacijama mogu širem krugu donosilaca odluka olakšati pristup donošenju odluka u procesima prepoznavanja oblika pouzdanosti brodskih postrojenja.
- 4) Sistemi veštačke inteligencije, simuliranjem različitih scenarija predloženih odluka, olakšavaju pronalaženje optimalnih rešenja donošenja odluka u prepoznavanju pouzdanosti.

Glavna hipoteza je sintetizovala oba aspekta istraživanja, teorijski i eksploatacioni. Teorijska istraživanja su zasnovana na matematičkim i drugim formalnim modelima, a potvrdila su mogućnost egzaktnog donošenja odluka u procesu prepoznavanja oblika (tipa funkcije) pouzdanosti broskog postrojenja. Dalje, na bazi teorijskih istraživanja sačinjen je sistematičan pregled naučno zasnovanih metoda koje se mogu aplicirati na problematiku modelovanja procesa donošenja odluka u procesu prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti broskog postrojenja.

U dužem periodu eksploatacionih istraživanja i sistematskom obradom eksperimentalnih podataka, metodom simulacije na primeru broskog dizel motora M 503 A-2, dokazana je pothipoteza o primeni metode simulacije u donošenju odluka u procesu prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti. Sprovođenje eksploatacionog istraživanja zasnivalo se na komparativnoj metodi praćenja motora u eksploataciji i simuliranim situacijama funkcionisanja istih motora. Rezultati dobijeni metodom simulacije omogućuju prognoziranje pouzdanog režima rada i pojavu otkaza pojedinih delova – sklopova broskog motora. Na taj način, moguće je sa visokim stepenom prognozirati otkaze, odnosno moguće je planirati potrebne rezervne delove, vreme i troškove održavanja.

Teorijska razmatranja i eksperimentalna – eksploataciona istraživanja su u potpunosti potvrdili glavnu hipotezu.

### 8. 3. Vrednovanje rezultata istraživanja

Pouzdanost brodskih postrojenja je u velikoj meri neodvojivo, ugrađeno svojstvo sistema, komponente ili nekog proizvoda, posledica složenog međudelovanja komponenta sistema, i kao takva ona je važan činilac u razmatranju (projektovanju) inženjerskih sistema i procesa. Ocenjivanje pouzdanosti može se u brodskim postrojenjima sprovesti na više strukturnih nivoa: brodski trup u celini, palube, dno, bok, pregrade, statve, nosači, okviri, rešetke, roštilji, paneli, limovi, motor i detalji u konstrukciji uz definisanje kriterijuma otkaza na svakom nivou za sve komponente. Logičan pristup proceni pouzdanosti i sigurnosti brodskog postrojenja je statistički, jer treba opisati slučajne varijable o kojima zavisi opterećenje i izdržljivost konstrukcije i na osnovi toga definisati pouzdanost broda kao verovatnoću da neće doći do njenog otkaza ili loma.

Pouzdanost komponenta i osnovnih sklopova brodskih postrojenja se definiše kao verovatnoća da razmatrani deo funkcioniše kako je predviđeno u svom veku trajanja. Za određivanje pouzdanosti verovatnosnih postupaka, uvedene su statističke varijable i stohastički procesi i definisano je kada se brodsko postrojenje smatra oštećenim, a kada ne. Određivanje pouzdanosti komponenta i sklopova brodskog postrojenja ostvareno je na osnovu poznavanja načina delovanja, statističkih svojstava i veličina kojima se opisuje funkcionisanje brodskih postrojenja, statističkih svojstava opterećenja i materijala, kao i primene verovatnosnih postupaka.

Za potrebe proračuna pouzdanosti brodskog postrojenja pristupom na bazi verovatnoće potrebni su statistički podaci o opterećenjima broda u funkciji, kao što su geometrijske karakteristike limova, njihovih profila, kao i svojstva materijala, i drugim parametrima (npr. uticaj korozije i trošenja) u cilju određivanja verovatnoće raznih događaja. Za definisanje slučajnih varijabli u projektovanju brodskih postrojenja potrebno je istražiti uzroke neizvesnosti i promenljivosti njihovih vrednosti.

U teorijskim razmatranjima disertacije sistematizovali smo metode za određivanja pouzdanosti kod kojih su zastupljeni postupci verovatnoće u različitoj meri, na četiri nivoa:

**Nivo 1.** Neizvesni parametri modeluju se pomoću jedne karakteristične vrednosti kao u pravilima klasifikacionih metoda. Metode prvog nivoa nazivaju se *metode parcijalnih faktora sigurnosti*.

**Nivoa 2.** Neizvesni parametri modeluju se pomoću očekivanja (srednja vrednost) i standardne devijacije, kao i pomoću koeficijenata korelacije između stohastičkih varijabli. Metode pouzdanosti drugog nivoa koriste statističke momente prvog i drugog reda, ali ne i funkcije raspodele, zbog toga se ti postupci zovu *metode drugih momenata*. Prema složenosti bavljenja funkcijama graničnih stanja razlikuju se metode prvog reda (*First Order Methods*) kod kojih se funkcija graničnog stanja samo linearizuje i funkcije drugog reda (*Second Order Methods*) kod kojih se funkcije graničnih stanja aproksimiraju funkcijama drugog reda. Stohastičke varijable se implicitno smatraju da su raspodeljene po normalnoj raspodeli. Verovatnoće otkaza se ne mogu tačno izračunati, ali se mogu odrediti donje i gornje granice. Primer metode ovog nivoa je metoda indeksa

pouzdanosti ( $\beta$ ). Napredniji postupci ovog nivoa pretpostavljaju da varijable ne moraju biti raspodeljene normalno nego mogu imati bilo koju raspodelu.

**Nivo 3.** Neizvesne veličine se modeluju zajedničkim funkcijama raspodele slučajnih varijabli. Metode trećeg nivoa zovu se '*egzaktne metode*'. Mera pouzdanosti je verovatnoća da ne dođe do otkaza posmatranog dela postrojenja. Taj nivo je vrlo složen i uključuje numeričke integracije i simulacione tehnike u određivanju verovatnoće otkaza.

**Nivo 4.** Četvrti nivo uključuje bilo koju od prva 3 u sprezi sa ekonomskim parametrima za predviđanje maksimalne dobiti ili minimalne cene. Metode četvrtog nivoa zovu se *metode odlučivanja*. Kod tih metoda posledice otkaza se takođe uzimaju u obzir i rizik (posledice $\times$ verovatnoća otkaza) se koristi kao mera pouzdanosti. Na taj način različiti slučajevi se mogu uporediti na ekonomskoj osnovi, uzimajući u obzir neizvesnosti, cenu i dobit.

Ocenjivanje pouzdanosti je iterativan proces koji počinje sa specificiranjem ciljeva pouzdanosti uz zadata ograničenja i uopšteno se sastoji od sledećih koraka:

1. Odabrati nivo pouzdanosti (zahtevana pouzdanost).
2. Identifikovati oblike otkaza strukture.
3. Razdeliti oblike otkaza na serijske sisteme i paralelne sisteme od jedne komponente (ukoliko se oblici otkaza sastoje od više od jedne komponente).
4. Formulirati funkcije graničnih stanja za svaki oblik otkaza i za svaku komponentu sistema.
5. Identifikovati stohastičke varijable i determinističke parametre u funkcijama otkaza. Specificirati tipove distribucija i statističke parametre za stohastičke varijable i zavisnosti među njima.
6. Proceniti pouzdanost svakog pojedinog oblika otkaza (npr. određivanjem indeksa pouzdanosti).
7. Izmeniti strukturu (projekt) ukoliko pouzdanosti ne odgovaraju traženim pouzdanostima.
8. Vrednovati rezultat pouzdanosti pomoću analize osetljivosti.

U eksploatacionim istraživanjima metodom praćenja brodskog dizel motora M 503 A-2. Tokom 600 časova rada opservacijom je obuhvaćeno 69 motora. Grafikon 2. prikazuje dijagram vremenskog toka linernog opadanja pouzdanosti podsistema motora u toku rada prvih 600 časova. Dobijeni rezultati pokazuju samo deo teorijske zakonitosti pouzdanosti i ne pruža realnu sliku za donošenje zaključaka o pouzdanosti brodskog motora.

Drugi deo eksploatacionih istraživanja zasnovan je na metodama simulacije. Simulacijom brodskog motora M 503 A-2 grafikon 1 (Dijagram vremenskog toka ekspancijalnog opadanja pouzdanosti podsistema motora u toku rada 600.000 časova) omogućio je dobijanje potpune predstave pouzdanosti motora ako bi on funkcionisao 600 000 časova rada. Na dijagramu je prikazano ponašanje pouzdanosti pojedinih podsistema motora i uočeni su nivoi njihove pouzdanosti.

Već se na jednostavnim primerima, s malim brojem komponenata pokazalo da je broj mogućih događaja velik. Zbog toga je u okviru rada pripremljen i programiran sekvencijalni kombinovani pristup za generisanje grupa događaja određenih svojstava. Na osnovu poznatog postupka za analizu operacionih stanja, pojedinim događajima i



grupama događaja pripisani su odgovarajući atributi delovanja. Iskorišćavanjem aditivnih svojstava pouzdanosti omogućeno je bavljenje velikim brojem događaja, posebno onih od većeg uticaja i važnosti, koji se neizbežno susreću u delovanju složenih konstrukcija broda do postizanja potrebne tačnosti proračuna.

Pored ostvarenih rešenja u razmatranju predmetne problematike doktorske disertacije, nisu uzeti u obzir neki posebni slučajevi kao što su:

U razmatranju mogućnosti povezivanja fizičkih svojstava komponenata brodskih postrojenja sa mogućim događajima u životnom veku, treba uzeti u obzir sve relevantne mogućnosti ispravnog delovanja pri redovnom obavljanju predviđenih zadataka, načina loma i načina oštećenja, kao što su popuštanje, izvijanje, granična čvrstoća, zamor i krti lom, kao i iznenadane slučajeve kao što su sudari, eksplozije ili nasukavanja, kako nalažu savremena dostignuća iz teorije čvrstoće brodskih konstrukcija.

Postupci tradicionalnog modelovanja brodskih postrojenja korišćenjem tehničkih i inženjerskih znanja i iskustava, mogu se proširiti na modelovanje događajima brodskih postrojenja prema pretpostavkama tehničkog modelovanja događajima (TMD). Za primenu TMD postupka u analizi brodskih postrojenja potrebno je uočiti sve događaje koji se javljaju u pojedinačnim komponentama, sklopovima i čitavom brodom postrojenju i odrediti verovatnoće pojavljivanja pojedinih događaja u svrhu definisanja konačnih shema za prikaz sistema događaja kojima bi se opisala delovanja delova ili celine konstrukcije broda. U slučajevima kada postoje događaji koji nisu značajni ili primetljivi ili se verovatnoće pojavljivanja pojedinih događaja ne mogu odrediti delovi brodske konstrukcije mogu se modelovati nepotpunim sistemima događaja.

## 9.0. ZAKLJUČAK

### 9.1. Rezime svakog poglavlja

U strukturnom pogledu doktorska disertacija

**Prvi deo disertacije** se bavi opisom i definisanjem problema istraživanja, predmetom, ciljevima i zadacima, hipotezama i naučnim doprinosom disertacije, kao i metodama, tehnikama i instrumentima istraživanja. Osnovni naglasak je dat na suštinu proučavanja problematike metoda pouzdanosti sistema, jer su one, u poslednjih deset godina, u samom vrhu interesovanja najboljih svetskih matematičara. Postavljeni cilj i zadaci ove disertacije su usmereni u smislu da se nastavi započeta tradicija, zasnovana na primeni rezultata dobijenih na bazi istraživanja novih metoda u oblasti pouzdanosti, a to je novost u okvirima naše nauke, ali se uklapa i u svetske trendove.

**Drugi deo doktorske disertacije** razmatra teorijske osnove pouzdanosti. One su obuhvaćene sledećim sadržajima: pojam i značaj pouzdanosti, definicije pouzdanosti, osnovni pokazatelji pouzdanosti elemenata, uređaja i sistema, pregled nekih osnovnih metoda koje se primenjuju u teoriji pouzdanosti. Izloženi sadržaji su rezultat detaljnog proučavanja dostupne literature. Analizom proučene literaturne građe omogućeno je da se formuliše predmet istraživanje u doktorskoj disertaciji i da se definišu cilj, zadaci, glavna hipoteza i podhipoteze.

**Treći deo disertacije** se bavi problematikom donošenja odluka u procesima prepoznavanja oblika pouzdanosti tehničkih sistema, konkretno brodskih postrojenja. U njemu su razmatrane teorijske osnove procesa odlučivanja. Navedene su metode odlučivanja, vrste odluka prema nivoima odlučivanja, vrste odluka prema stepenu strukturiranosti. Zatim su izloženi: struktura procesa odlučivanja, tehnologija i metode odlučivanja, intuitivno odlučivanje, odlučivanje na temelju procenjivanja i racionalno odlučivanje.

**Četvrti deo disertacije** ove studije bavi se teorijskim osnovama prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti, a obuhvatio je sledeće: teorija statističkog prepoznavanja oblika, Bajesovo pravilo odlučivanja minimalne greške, Neyman-Pearsonov test, Minimax test, Burdickova (Burdick) karta, ostali testovi hipoteza, sekvencijalno testiranje hipoteza, Waldov sekvencijalni test. Izložen je matematički aparat koji se koristi u prepoznavanju oblika izlaznih veličina kao osnove za donošenje odluka o pouzdanosti podsistema i sistema.

**U petom delu disertacije** razmatrana je mogućnost primene fazi logike i grubih skupova radi prepoznavanja oblika pouzdanosti. Naglašena je prednost fazifikacije, koja se sastoji u višem nivou generalizacije i iskazivanja, sa većom mogućnošću modeliranja realnih problema i specifičnom metodologijom za analizu tolerancije u uslovima nepreciznosti. Fazi logika je po svojoj prirodi vrlo primerena metodama za prepoznavanje oblika, iz jednostavnog razloga što su pojmovi klasa, klastera i klasifikacije često subjektivne prirode i definisani nenumeričkim atributima. U tom delu prikazani su i neke osnovne karakteristike i aspekti primene teorije grubih skupova, kao novog matematičkog pristupa, koji donosi odluku pruža jasniju sliku problema u situacijama neizvesnosti, nejasnoće i nepreciznosti.



Veštačke neuronske mreže i prepoznavanje oblika pouzdanosti naslov je **šestog dela** disertacije, a obuhvatio je sledeće sadržaje: pojam i suština neuronskih mreža, koncept neuronskih mreža, osnovni modeli i pravila obučavanja, višeslojna feedforward neuronska mreža, formalizacija algoritma. Na osnovu vrlo široke primene neuronskih mreža u prepoznavanju oblika (kao što su: u obradi signala, analizi podataka, raznim kontrolama, kompresiji slike, konverziji jezika, postavljanju dijagnoza otkaza raznih postrojenja, prepoznavanju oblika pouzdanosti, psihijatrijskim procenama, analizi električnih kola, kompresiji zvuka, predviđanju kretanja na tržištu, izboru osumnjičenih u kriminološkim istraživanjima, analizi medicinskih testova, spektralnoj analizi itd.), izložena je mogućnost njihove primene u rešavanju problema pouzdanosti, pomoću prepoznavanja izlaznih veličina na brodskim postrojenjima.

**Sedmi deo disertacije** se odnosio na simulacione metode u procesu donošenja odluka prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti. Detaljnije su izloženi: problematika simulacije, modela i modeliranja, systemske dinamike, programski paketi systemske dinamike i primene simulacija. Takođe, u okviru tog dela disertacije prikazani su rezultati eksperimentalnog istraživanja simulacije na primeru broskog motora i njegovih delova. U eksploatacionim istraživanjima izvršena je komparacija rezultata dobijenih iz realnih uslova eksploatacije broskog motora i simulacije istih motora. To je omogućilo validaciju projektovanog modela simulacije i na taj način dokazana je ispravnost pristupa da se simulacijom proučava pouzdanost broskih postrojenja, što je u osnovi i bio cilj ove disertacije.

Sintezom teorijskih i analitičkih saznanja i numerički potkrepljenim praktičnim rezultatima (simulacijama) težilo se osmišljavanju preporuka za usklađivanje procesa donošenja odluka na bazi prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti s ukupnom sigurnošću broskih postrojenja, na način kako se do sada nije činilo. Razvojem odgovarajućih metoda, prilagođenih većim problemima, svojstvenim praktičnim zahtevima, s vremenom bi se rešavali sve složeniji i krupniji zadaci vezani za delotvorno i sigurno korišćenje broskih postrojenja.

Zaključak disertacije prikazuje i analizira ostvarene rezultate istraživanja. Posebno je dat pregled mogućnosti daljih istraživanja rešenja koja su obuhvaćena disertacijom.

## 9.2. Ključni zaključci

Razmatranja u ovoj disertaciji osnovnu pažnju su posvetila primeni prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti koja se može okarakterisati ili kao klasifikacija nekih signala ili kao klasifikacija geometrijskih oblika. Taj se problem svodi na prepoznavanje signala u smislu da li pripada klasi signala snimljenih na ispravnom ili neispravnom broskom postrojenju. S druge strane, prepoznavanje štampanih karaktera u nekom izveštaju o funkcionisanju broskog postrojenja, odgovara problemu prepoznavanja geometrijskih oblika. Kao aktivnost koja prethodi klasifikaciji, jeste određivanje koje su to merne veličina koje će na što je moguće bolji način, karakterisati uzorak koji treba prepoznati. Kada su oblici signala u pitanju, razumno je meriti vrednosti signala u nekim ekvidistantnim vremenskim trenucima, dok je kod problema štampanih karaktera uobičajeno formirati sekvencu belih i crnih piksela.

Polazeći od činjenice da se teorija pouzdanosti zasniva na teoriji verovatnoće i matematičkoj statistici, osnovne raspodele u teoriji pouzdanosti su: eksponencijalna

raspodela, normalna raspodela, lognormalna raspodela, Vejbulova raspodela, Gama raspodela, binomna raspodela, Poasonova raspodela, ali one nisu bile predmet disertacije. Međutim, metode zasnovane na stablu odlučivanja, metode zasnovane na pravilima, neuronske mreže, statistički zasnovane metode, metode zasnovane na podržavajućim vektorima, te su metode bile u fokusu interesovanja u disertaciji.

Razmatrani su fenomeni pouzdanosti u tradicionalnom smislu, ali osnovna intencija je bila na istraživanju novih pristupa za njihovo proučavanje. Disertacija je obuhvatila teorijske osnove pouzdanosti, počev od osnovnih definicija i raspodela, preko metoda proračuna pouzdanosti sistema do modela pouzdanosti vremenski zavisnih sistema. Polazna osnova je bila da je pouzdanost vremenska funkcija stanja proizvoda i/ili usluge, koja izražava verovatnoću da će proizvod ili usluga uspešno vršiti funkciju namene, u granicama dopuštenih odstupanja u projektovanom ili definisanom vremenu trajanja, ako se eksploatacija odvija u predviđenim uslovima okoline. Osnovni činioci pouzdanosti su:

- verovatnoća ispravnog stanja proizvoda i/ili usluge,
- zadovoljavajuće izlazne i/ili upotrebne karakteristike,
- vreme,
- uslovi eksploatacije i/ili uslovi okoline.

Verovatnoća ispravnog rada broskog postrojenja izražava se brojčanim vrednostima od 0 do 1 ili procentima (od 0% do 100%), čime se izražava relativna frekvencija ispravnoga rada sistema tokom posmatranog ili zadatog vremena. Pouzdanost kao funkcija verovatnoće podrazumeva da su njene vrednosti slučajne veličine, koje treba uvek posmatrati unutar određenih granica poverenja.

Zadovoljavajuće izlazne i/ili upotrebne karakteristike sadrže konstantne kvalitativne i kvantitativne kriterijume i merila na osnovu kojih je moguće procenjivati i ocenjivati tehničko stanje broskog postrojenja tokom eksploatacije. Ako je, na primer, pad pritiska ulja na nekom prečistaču ulja veći od 10 %, takvo stanje će se identifikovati kao otkaz. Pouzdanost tako pokazuje verovatnoću vršenja funkcije namene unutar dopuštenih granica vrednosti izlaznih karakteristika, ali uz uslove poštovanja propisanih, zadatih ili predviđenih uslova okoline. Analiza pouzdanosti sistema koja uključuje akcije održavanja klasično se zasniva na modelima Markova, odnosno modelima Markovljevih lanaca (Markov Chains). Ovaj pristup je veoma popularan kod inženjerakoji se bave pouzdanošću. Osnovna pretpostavka je da posmatrani procesi imaju osobinu Markova, tj. da su bez pamćenja. Tu osobinu imaju samo procesi kod kojih je vreme između dva događaja raspodeljeno po eksponencijalnom zakonu verovatnoće, što u praksi po pravilu nije slučaj, naročito kada se posmatra trajanje operacija održavanja.

To što je pouzdanost vremenska funkcija pokazuje da se njene vrednosti tokom upotrebe neprekidno menjaju. Od posebne važnosti je mogućnost predviđanja pouzdanosti tokom određenog vremenskog perioda, što je osnovni preduslov uspešnog planiranja eksploatacije i održavanja tehničkog sistema. Primer: srednje vreme između pojave kvarova (MTBF - Mean Time Between Failure) i srednje vreme između održavanja (MTBM - Mean Time Between Maintenance) vrlo su važni pokazatelji pouzdanosti svakog sistema.

Uslovi eksploatacije, u kojima se očekuje ostvarivanje funkcije namene, izražavaju se kroz:

- uslove okruženja i mesto, geografski položaj, klimatski uslovi, temperatura, vlažnost i salinitet vazduha;
- uslove sprovođenja osnovnog zadatka: mehanička naprezanja, nivo radnih opterećenja, vibracije, udari;
- uslove rukovanja i održavanja: ispravnost rukovanja, kvalitet preventivnog i korektivnog održavanja;
- uslove integralne logističke potpore.

Pouzdanost je unutrašnje, sopstveno (inherentno) svojstvo svakog dela, sklopa, podsistema ili složenog sistema, koje pokazuje njegovu trajnost i verovatnoću ispravnog rada.

Kod mnogih sistema raščlanjivanje pouzdanosti neizostavno u sebi sadrži sledeća stanovišta:

- uticaj pouzdanosti na ličnu sigurnost korisnika,
- uticaj pouzdanosti na izvršenje zadataka ili funkcije namene,
- uticaj pouzdanosti na integralne logističke činioce (održavanje, modeli, organizacija i tehnologija, snabdevenost rezervnim delovima itd.).

Pouzdanost svakog proizvoda i/ili sistema direktno je povezana s pojavom otkaza pojedinih sastavnih delova ili nižih konstrukcijskih celina. Sasvim je razumljivo da u slučaju otkaza sistem nije sposoban da vrši svoju osnovnu funkciju namene, te mu je u tom trenutku pouzdanost jednaka 0. Ako je reč o popravljivom sistemu, tada odgovarajućim aktivnostima održavanja (zamenom ili popravkom neispravnih delova), sistemu se vraća ili podiže nivo pouzdanosti.

Obični pokazatelji pouzdanosti, kojima se najčešće operiše radi analize bezbednosti u fazi eksploatacije, nisu dovoljni, jer ne karakterišu težinu poremećaja. Važna karakteristika poremećaja bila bi koliko je poremećaj blizak udesu. Zbog toga, kada se obavlja analiza bezbednosti broda u eksploataciji, na primer, po broju poremećaja u jedinici vremena  $n$ ,  $n_A < n_B$  ne znači i da je brod A bezbedniji od broda B, jer se može ispostaviti da su poremećaji broda A bliži udesu nego poremećaji broda B. Prema tome, klasični pokazatelji pouzdanosti nisu dovoljni za potpunu karakterizaciju bezbednosti proizvoda i bilo je potrebno uvesti nove.

Istraživanja obavljena u izradi ove disertacije ukazala su na mogućnost primene novih naučnih otkrića iz drugih oblasti na problematiku pouzdanosti. Stoga se u ovoj disertaciji pažnja koncentrisala na teoriju odlučivanja u oblasti prepoznavanja oblika (tipa funkcije) signala – izlaznih veličina kao indikatora stanja sistema, odnosno njegove pouzdanosti.

Metod klasifikacije koji se zasniva na testiranju hipoteza na bazi minimalizacije verovatnoće greške ili cene odlučivanja najbolji je mogući klasifikator, ali ne treba zanemariti da takav metod klasifikacije iziskuje egzaktno poznavanje uslovnih funkcija gustine verovatnoće. U najvećem broju praktičnih problema te funkcije nisu poznate, već se uglavnom raspolaže nizom oblika na osnovu kojih treba isprojektovati klasifikator. Jedan od načina na koji se prepoznavanje oblika može izvesti jeste da se na osnovu niza oblika estimiraju uslovne funkcije gustine verovatnoće, ali takav postupak podrazumeva jako veliki broj podataka i skopčan je sa mnogobrojnim numeričkim problemima. Otuda se vrlo često primenjuju postupci klasifikacije koji nisu optimalni ni u kom smislu, ali su vrlo jednostavni. Najčešće korišćeni metodi su: linearni, kvadratni i deo po deo linearni

klasifikator. Istini za volju, postoje slučajevi kada se Bajesov klasifikator svodi na jednostavnu formu. U tom kontekstu smo, kao moguća rešenja, pomenuli: Bajesov linearni klasifikator, korelacioni klasifikator, matched filter i klasifikator distance.

Detaljna pažnja, ovde je posvećena teoriji statističkog prepoznavanja oblika. Merenja dobijena sa jednog oblika ili objekta tretiraju se kao slučajni vektori. Konstatovana je neophodnost poznavanja osnovnih metoda za karakterizaciju slučajnih vektora. Zato su razmatrani matematički modeli odlučivanja putem testiranja hipoteza analizom slučajne promenljive i njihove statistike. U teoriji prepoznavanja oblika operiše se slučajnim vektorima dobijenim iz različitih klasa (kategorija), i svaka od njih je okarakterisana svojom funkcijom raspodele. Dva najčešće korišćena tipa raspodele su uniformna i normalna (ili Gausova) raspodela slučajnih promenljivih. Prvi način je funkcija raspodele za slučajnu promenljivu koja se ne može predstaviti u kompaktnoj formi, već se obično daje u obliku integrala ili korišćenjem takozvane *erf* funkcije. Drugi način da se okarakteriše slučajni vektor je pomoću funkcije gustine verovatnoće. U eksperimentima prepoznavanja oblika obično se javlja potreba generisanja uzoraka koji su normalno raspodeljeni vektorom matematičkog očekivanja  $\mathbf{M}$  i kovarijansionom matricom  $\Sigma$ .

Osnovni cilj prepoznavanja tipa funkcije pouzdanosti jeste da se donese odluka kojoj kategoriji posmatrani uzorak pripada. Na osnovu opservacija ili merenja formira se vektor merenja. Taj vektor služi kao ulaz u pravilo odlučivanja, kroz koje se ovaj vektor pridružuje nekoj od analiziranih klasa. Ukoliko je merni vektor slučajni vektor čija uslovna funkcija gustine verovatnoće zavisi od klase, te ukoliko su ove uslovne funkcije gustina verovatnoće poznate, tada se problem prepoznavanja oblika svodi na statističko testiranje hipoteza, koje su u četvrtom poglavlju detaljno obrađene. Linearni klasifikator je najjednostavniji klasifikator i vrlo je blizak tehnikama kao što su korelacioni klasifikator ili klasifikator distance. Linearni klasifikator se vrlo često koristi, prvenstveno zbog svoje jednostavnosti. Još jedna bitna osobina odlikuje linearni klasifikator, a to je robusnost. Zahvaljujući tome linearni klasifikator vrlo neosetljiv na promene u statističkim karakteristikama oblika koji se klasifikuju. S obzirom na to da linearni klasifikator ne zahteva poznavanje uslovnih funkcija gustine verovatnoće, treba ga isprojektovati u tom obliku.

Matematički modeli koji se zasnivaju na klasičnoj dvovalentnoj logici i koji koriste isključivo egzaktno vrednosti često nisu pogodni za rešavanje stvarnih problema. Realno okruženje i situacije se ne mogu uvek precizno i potpuno opisati. U istraživanju problematike odlučivanja u prepoznavanju tipa funkcije pouzdanosti, rešenja su nađena u primeni fazi logike. Fazi logika je po svojoj prirodi vrlo primerena metodama za prepoznavanje oblika, iz jednostavnog razloga što su pojmovi klasa, klastera i klasifikacije često subjektivne prirode, definisani nenumeričkim atributima. Fazi logika se u proces prepoznavanja oblika može uvesti na dva načina. Jedan od njih je fazifikacija prostora u kome se definiše vektor obeležja, dok je drugi vezan za fazifikaciju klasifikatora.

Mogućnost upotrebe fazi logike je u vrlo raznorodnim komercijalnim aplikacijama i industrijskim sistemima. Mogućnost primene je i u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja, kao što su: brodski motori, merni instrumenti, kamere s autofokusiranjem, klima-uređaji, navigacioni uređaji, kompresori i mnogi drugi.

Otuda je fazi logika našla primenu u teoriji upravljanja, prepoznavanju oblika, kvantitativnoj analizi, ekspertskim sistemima za dijagnostikovanje, planiranje i predikciju, informacionim sistemima itd. Takođe, teorija grubih skupova, kao matematička oblast, omogućuje primenu za analiziranje i rešavanje mnogih problema odlučivanja u različitim oblastima, kao što su: ekonomija, lingvistika, baza podataka, medicina, farmakologija, inženjerstvo i dr. Kod problema odlučivanja svi objekti koji se analiziraju opisuju se uređenim parom (atribut, vrednost). Teorija grubih skupova, praktično, predlaže tehnike za generisanje optimalnog skupa pravila za odlučivanje u određenom procesu donošenja odluka, koji se naziva skup mogućih odluka.

Oblast koju danas poznajemo kao neuronske mreže nastala je kao rezultat veze nekoliko veoma različitih pravaca istraživanja: obrade signala, neurobiologije i fizike. Neuronske mreže predstavljaju tipičan primer interdisciplinarnosti. Neuronske mreže, koje su razmatrane u šestom delu disertacije, predstavljaju sistem sastavljen od veoma velikog broja jednostavnih elemenata za obradu podataka. Ovakvi sistemi su sposobni za prikupljanje, memorisanje i korišćenje eksperimentalnog znanja. Neuronske mreže su u osnovi matematički model delovanja ljudskog mozga. Poznato je više vrsta neuronskih mreža, koje se međusobno razlikuju po strukturi kao i po načinu učenja, dok su glavne karakteristike svih mreža slične. Slično delovanju ljudskog mozga, znanje se i kod matematičkog modela skladišti u neuronima. Na samom početku neuronska mreža o postavljenom problemu ne zna ništa. Dok joj se u procesu obučavanja istovremeno prikazuju primeri ulaznih podataka kao i odgovarajući izlazni podaci, neuronska mreža će prilagoditi svoju unutrašnju strukturu na način kako bi uzorke za obučavanje na ulazu i izlazu što bolje povezala. Pri tome je najvažnije svojstvo neuronske mreže njena sposobnost uopštavanja dobijenog znanja - nakon uspešno završenog učenja ona pronalazi odgovarajuće izlazne podatke za do tada joj nepoznate podatke na ulazu.

Neuronske mreže su za sada najzrelija i najprimenljivija tehnologija u teorijskim razmatranjima problematike klasifikacije, odnosno prepoznavanja oblika, konkretno donošenja odluka u oblasti pouzdanosti. Klasifikacija neuronskim mrežama se pokazala vrlo dobrom upravo na težim klasifikacionim problemima, kod kojih je teško ili nemoguće koristiti klasične tehnike simboličkog učenja. Neuronske mreže mogu izraziti vrlo složene granice među klasama, za razliku od klasičnih tehnika, koje presecaju univerzum linearnim funkcijama, i to obično paralelno sa osama univerzuma. Osim toga, neuronske mreže su dobro prilagođene klasifikaciji u uslovima šuma u podacima.

Neuronske mreže se vrlo dobro ponašaju upravo u težim klasifikacionim problemima, kod kojih je teško ili nemoguće koristiti druge metode, poput stabla odlučivanja ili metoda indukcije, koje "presecaju" prostor primera linearnim funkcijama (obično paralelno na ose atributa).

U takvim primerima je najčešće jedino moguće rešenje upotreba jedne od tehnika mašinskog učenja. Primer takvih tehnika koje se danas uveliko koriste su neuronske mreže.

Metodologija simulacije zasniva se na računarskim naukama, statistici, numeričkoj matematici, operacionim istraživanjima i veštačkoj inteligenciji, ali je danas ona dovoljno koherentna i razvijena da s pravom može nositi naziv zasebne naučne discipline. Simulacija nije obično izvršavanje računarskog programa, ona nije samo statistički test dobijenih rezultata, ali ni optimizaciona procedura, kao linearno programiranje.

Brzina rada savremenih računara omogućila je primenu metoda simulacije za rešavanje brojnih složenih problema u najrazličitijim oblastima ljudskog rada i praktično doprinela naglom razvoju i sve većoj primeni simulacije. Zato, posmatrano danas, možemo slobodno reći da je simulacija sistema, iz perspektive jednog inženjera, organizatora, programera ili naučnika, postala svakodnevna računarska aplikacija.

Za izvršavanje funkcija koji su mu namenjene, svaki brod je zavisan od pouzdanosti funkcionisanja brodskih postrojenja. To znači da se i kod projektovanja broda mora voditi računa o pouzdanosti svake komponente, odnosno pouzdanosti svakog sistema i podsistema ugrađenog u brod.

U mnogim područjima nauke i tehnologije sve je značajnije predviđanje svojstava pomoću modela. Glavni razlog tome je svakako smanjenje troškova različitih laboratorijskih analiza kao i troškova probne proizvodnje.

Osnova modela treba biti način povezivanja poznatih ulaznih podataka sa onima koje se žele dobiti, u zavisnosti od tih ulaznih podataka. Kada je takvu vezu moguće opisati osnovnim fizičkim zakonima, odgovarajući model biće više ili manje kompleksna fizikalna jednačina, ili pak, odgovarajuća simulacija istinitog događanja.

Često su veze ulaznih sa izlaznim podacima kompleksne do te mere da se čak i simulacijama ne dobiju upotrebljivi rezultati, ili pak, uopšte nisu poznati mehanizmi zavisnosti izlaznih od ulaznih podataka. Za rešavanje te problematike u teoriji pouzdanosti postoji veći broj metoda. Razvoj nauke i tehnologije doneo je mnoga rešenja primenjiva i u oblasti donošenja odluka na bazi prepoznavanja oblika ponašanja sistema, kao novih metoda za proučavanje pouzdanosti. To je uzrokovalo da se autor ove disertacije bavi istraživanjem novih metoda koje se mogu promeniti u oblasti pouzdanosti brodskih postrojenja.

Testiranje modela, koje je obavljeno na odabranim i reprezentativnim primerima, potvrdilo je postavljenu naučnu hipotezu o delotvornoj primeni stohastičkih modela u procesu donošenja odluka u prepoznavanju oblika pouzdanosti. Vrednost predloženih modela je u mogućnosti njihove primene za uspešno upravljanje pouzdanošću.



# 10. PREDLOG DALJIH ISTRAŽIVANJA

## 10.1. Novi pravci istraživanja

Buduća istraživanja problematike pouzdanosti tehničkih sistema treba usmeriti u pravcu novih naučnih i tehničkih dostignuća primenom osnovnih ideja modelovanja neuronskim mrežama, sa pregledom najznačajnijih alata modela. Pre svake optimizacije potrebno je imati adekvatnu zamenu za posmatrani sistem ili doći do matematičkog modela sistema. Matematički model nazvan modelom predviđanja - Predictive modeling (PM), predstavlja seriju jednačina i relacija koje matematički opisuju posmatrani fenomen-sistem. Ovakve modele čine inputi kao što su procesni podaci ili procesni faktori. Procesni podaci sakupljeni u dužem vremenskom periodu čine istorijske podatke i njihovo pretraživanje uz pomoć računara vrlo često može otkriti skrivene veze i trendove između grupa podataka. Izvlačenje znanja iz ogromne baze podataka zahteva upotrebu savremenih statističkih analiza i alata za matematičko modelovanje. Mogućnost pretraživanja i analiziranja ogromnog broja procesnih podataka predstavlja ključnu tehniku za poboljšanje kvaliteta u procesu donošenja značajnih odluka u pogledu pouzdanosti tehničkih sistema. Pomoću nove metodologije moguće je precizno predvideti rezultat i otkriti veze, odnosno relacije, u analiziranim podacima. Model povezuje set ulaznih promenljivih, kao što su procesni faktori sa izlaznim veličinama.

Model jednom napravljen može se koristiti za predviđanje rezultata odziva za nove vrednosti procesnih faktora. Slaganje procenjenih vrednosti odziva sa stvarnim vrednostima odziva predstavlja meru kvaliteta dobijenog modela. Optimizacija koristi model za strategijsku analizu procesa koristeći najnovije optimizacione softverske pakete. Donosiocu odluka pruža se šansa da analizira proces unoseći različita ograničenja na procesne faktore i odzive, u cilju upoređivanja različitih strategija i veličina efekata radi donošenja odluka u oblasti pouzdanosti.

Optimizacija se može izvesti simulirajući dobijeni model na računaru, variranjem procesnih faktora i analizom efekata na odziv sistema. Ovakve promene faktora su ekstremno komplikovane, a variranje više procesnih faktora u isto vreme čini zadatak izračunavanja odziva izuzetno teškim. Optimizacijom se mogu ne samo izračunati efekti promena procesnih faktora već i predvideti odziv za slučaj istovremenog variranja većeg broja procesnih faktora.

Matematičko modelovanje je proces utvrđivanja relacija odnosno veza između ulaznih nezavisnih promenljivih - procesnih faktora, i izlaznih zavisnih promenljivih-odziva. Princip modelovanja pripada fizičkom modelovanju i ima svoje prednosti i nedostatke.

### **Prednosti:**

1. može doprineti nauci;
2. predstavlja osnovu za ekstrapolacije;
3. model ima fizičko značenje.

**Nedostaci:**

1. zahteva veliko znanje o procesu;
2. računarski je skupo, što znači da ima dosta izračunavanja;
3. vrlo često se svodi na linearnu aproksimaciju nelinearnog sistema.

Buduće istraživanje treba, takođe, usmeriti na primene Petrijevih mreža u modeliranju, analizi i simulaciji problema iz oblasti pouzdanosti, efektivnosti, rizika i održavanja sistema. Svođenje opisa sistema na samo dva stanja, ispravno ili neispravno, veoma je ograničavajuće, čak i u slučajevima kada se razmatra pouzdanost. Pored toga, standardne tehnike imaju i druge osobine koje ih ograničavaju u davanju bogatijeg opisa sistema. Stablo događaja počinje definisanim događajem koji inicira akcident. Ovaj događaj može nastati kao posledica otkaza komponente sistema ili može biti iniciran eksternim uticajem na sistem. Mogu se konstruisati i procenjivati različita stabla događaja da bi se analizirao skup mogućih akcidenata. U stablima neispravnosti i stablima događaja pravac prostiranja greške se modelira usmerenim grafovima i pretpostavlja se trenutno prostiranje greške. Ove tehnike su pogodne za otkrivanje mogućih stanja i sleda događaja ali su nepogodne za analizu ponašanja sistema u vremenu i uključivanje u razmatranje odluka kojima se proces može usmeravati.

Petrijeve mreže zbog svojih dobrih osobina i mogućnosti koje pružaju analitičarima postaju potreban deo znanja inženjera koji se bave pouzdanošću. Institucije u tehnološki razvijenom svetu koje se bave konsultacijama i obrazovanjem profesionalaca u oblasti pouzdanosti, rizika i održavanja, insistiraju na primeni Petrijevih mreža i uključuju ih u svoje programe.

Petrijeve mreže su originalno razvijene za modelovanje procesa, odnosno dinamike sistema. One su u odnosu na stabla neispravnosti komplikovanija predstava razmatranog sistema, ali u isto vreme i snažnija paradigma za njegovu analizu i razumevanje. Razlog ovoj tvrdnji je činjenica da Petrijeve mreže omogućavaju modelovanje fenomena koje ranije tehnike nisu mogle obuhvatiti. Radi se o mogućnosti analize sistema sa više stanja, čije trajanje je slučajne prirode, pri čemu su i prelazi iz jednog stanja u drugo takođe stohastički procesi. To je znatna razlika u odnosu na stabla neispravnosti, u kojima se događaji odvijaju trenutno. Petrijeve mreže imaju prednosti i u odnosu na Markovljeve modele, kojima se pretpostavlja da su razmatrani sistemi bez memorije, što primenu Markovljevog modela ograničava na sisteme u kojima se trajanje modelira kao slučajna veličina raspodeljena isključivo po eksponencijalnom zakonu.

Raznovrsnost i težina problema koje ljudi rešavaju koristeći računare, pogotovo u eri interneta, zahteva kvalitetne programske alatke. Ugradnja elemenata ljudske inteligencije u programe pomaže razvoju sistema sposobnih za samostalan rad i donošenje odluka u složenim, nepotpuno karakterisanim i/ili nejasnim situacijama, koje često predstavljaju opis realnosti. Formalni sistemi matematičke logike su univerzalni jezik i moćno oruđe za opisivanje ljudskog znanja, posebno u oblasti kvalitativnog i kvantitativnog modeliranja neizvesnosti, verovanja, odlučivanja itd. Ovi sistemi predstavljaju teorijsku osnovu za razvoj inteligentnih programskih sistema, poput informacionih sistema i internet-agenata koji su sposobni za samostalno delovanje u nepredvidljivoj i složenoj okolini. Algebarske i fazi metode, kao i neuronske mreže, koriste se za optimizaciju dijagrama odlučivanja, u obradi signala, projektovanju, analizi pouzdanosti i testiranju digitalnih sistema.



## 10.2. Prognoze

Moguća istraživanja bi se odnosila na:

- ispitivanje potpunosti, odlučivosti, složenosti i drugih osobina raznih logika;
- konzervativno uopštavanje klasične do  $[0,1]$ -vrednosne polivalentne logike i primene;
- uvođenje novih operatora (verovatnosnih, fazi) u logiku;
- razvoj, primenu i adaptaciju metoda dokazivanja i ispitivanja zadovoljivosti za razne logike;
- nalaženje konačnih modela i kontramodela;
- Bulove i Postove jednačine, nalaženje opštih i reproduktivnih rešenja i njihovih odnosa;
- analizu i podizanje efikasnosti razvijenih algoritama;
- primenu razvijenih postupaka na realna polja, algebarske i druge teorije, rešavanje funkcionalnih jednačina itd.;
- algebarsku teoriju grupa i primenu u teoriji automata;
- neuronske mreže, algebarske i hibridne metode sa primenama u upravljanju, projektovanju, analizi rizika i testiranju tehničkih sistema;
- razvoj programa za aproksimativno rezonovanje, dokazivača teorema baziranih na tabloima i srodnim metodama sistema za učenje na WWW, inteligentnih internet-agenata.

# 11. LITERATURA

1. A. R. J. M. Lloyd, Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather, John Wiley & Sons, 1989.
2. Adamović, Ž., Avramović, D., Informacioni sistem održavanja tehničkih sistema, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1999.
3. Adamović, Ž., Avramović, D., Josimović, Lj., Logistika održavanja tehničkih sistema, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1999.
4. Adamović, Ž., Računar u procesu održavanja tehničkih sistema, Klub "Nikola Tesla", Beograd, 1989.
5. Adamović, Ž., Vasić, B. i dr, Razvoj informacionog sistema održavanja, OMO, Beograd, 2001.
6. Adamović, Ž., Golubović, D., Totalno održavanje, Pronalazaštvo, Beograd, 2000.
7. Adamović, Ž., Hidraulika i pneumatika, Sartid, Smederevo, 2001.
8. Adamović, Ž., Jovanović, D., Terotehnologija u industriji čelika, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
9. Adamović, Ž., Jovanović, R., i dr, Pouzdanost i dijagnostika mašina, OMO, Beograd, 2002.
10. Adamović, Ž., Kucora, I., Radovanović, D., Sigurnost funkcionisanja tehničkih sistema, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1999.
11. Adamović, Ž., Lambić, M., Stojićević, D., Hidropneumatska tehnika, OMO, Beograd, 2003.
12. Adamović, Ž., Logistički sistem održavanja, Privredni pregled, Beograd, 1989
13. Adamović, Ž., Metode i postupci obnavljanja istrošenih delova sistema, Klub "Nikola Tesla", Beograd, 1995.
14. Adamović, Ž., Održavanje prema stanju u mašinstvu, Pronalazaštvo, Beograd, 1990.
15. Adamović, Ž., Planiranje i upravljanje održavanjem pomoću računara, Privredni pregled, Beograd, 1987.
16. Adamović, Ž., Preventivno održavanje u mašinstvu, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
17. Adamović, Ž., Stojićević, D., Cvejić, R., Dijagnostika energetskih postrojenja, Tehnički fakultet "M. Pupin", Zrenjanin, 1999.
18. Adamović, Ž., Stojićević, D., Hidropneumatske mašine, Sartid, Smederevo, 2001.
19. Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika u mašinstvu, Privredni pregled, Beograd, 1986.
20. Adamović, Ž., Tehnologija održavanja tehničkih sistema, Sartid, Smederevo, 2001.
21. Adamović, Ž., Todorović, J., Savremene metode održavanja u industriji, Jugoslovenski zavod za produktivnost rada, Beograd, 1985.
22. Ž. Adamović, Đ. Nadrljanski, M. Tomašević: Metodologija naučno istraživačkog rada - Statističke metode u istraživanju, Pedagoški fakultet Sombor 2007.
23. Adamović, Ž., Tomić, M., Pouzdanost u funkciji održavanja tehničkih sistema, Tehnička knjiga, Beograd, 1986.
24. Andersen, M. R., "Fatigue Crack Initiation and Growth in Ship Structures", Ph.D, Thesis, Department of Naval Architecture, Technical University of Denmark, 1998.
25. Andrijuščenko, A. I., Nadežnost teploenergetičeskog oborudovanija TES i AES, Visšaja škola, Moskva, 1991.

26. Ang, A. H-S, Tang, W.H., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol. 2, Decision, Risk and Reliability, John Wiley and Sons, New York, 1983, pp. 186-228, 450-3.
27. Ang, H. S., Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering planning and Design, John Wiley & Sons, Vol.II, 1984.
28. Assakkaf, I. A., Reliability-Design of Panels and Fatigue Details of Ship Structures, PhD Thesis, University of Maryland, 1998.
29. Atua, K., Assakkaf, I., Ayyub, M., Statistical Characteristics of Strength and Load Random Variable of Ship Structures, Proc. 7th Speciality Conference on 'Probabilistic Mechanisms and Structural Reliability', ASCE, Massachusetts, August 1996.
30. Ayyub, B.M. et. all., Reliability-based Design of Ship Structures: Current Practice and Emerging Technologies, SNAME Technical Report MM1C76, July, 1998.
31. Ayyub, M., Assakkaf, I., Reliability-Based Design of Ships Using Load and Resistance Factor Design Approach, 2004.
32. Backović, M., Matematički modeli i metodi u ekonomiji, Ekonomski fakultet, Beograd, 2000.
33. Baker, M. J., Review of the Theoretical Basis for Risk and Reliability Assessment of Structures, Proc. I Mech E Seminar, 'Risk Assessment of Structures', 10 December, 1999, London.
34. Banks, J., Principles of Quality Control, J. Wiley & Sons, New York, 1989.
35. Billinton, R., Allan, R. N., Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques, Pitman Advanced Publishing Program, London, 1983.
36. Billinton, R., Power System Reliability Evaluation, New York, Gordon and Breach Science Publishers, 1970.
37. Bonefačić, B., O preventivno-planskom održavanju brodova u kontekstu terotehnologije, Zbornik radova Fakulteta za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1984.
38. Bonello, M. A. et all., Ultimate Strength Design of Stiffened Panels Under Axial Compression and Bending, Elsevier Science, Marine Structures 6, 1993, pp 533-552
39. Bonello, M. A., Chryssanthopoulos, M. K., Buckling Analysis of Plated Structures Using System Reliability Concepts, Proc. 12th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, 1993, Vol. II
40. Booch, G., Object - Oriented Analysis and Design with Applications, Addison-Wesley Object Technology Series, 1994.
41. Borkovec, M., Extremal Behavior of the Autoregressive Process with ARCH(1) Errors, Stoch. Proc. And Their Appl. 85, 2000, 189-207.
42. Breitung, K., Asymptotic approximations for multinormal integrals, Journal of EngineeringMechanics, ASCE 110(3), March 1984, 357-367.
43. Bucher, C. G., Adaptive Sampling - an Iterative Fast Monte Carlo Procedure, Structural Safety, Vol. 5, No. 2, 1988, pp.119-126.
44. Bureau Veritas, Rules and Regulations for the Construction and Classification of steel Vessels, 2000.
45. Caperaa, P., Fougeres, A.L., Genest, C., A nonparametric estimation procedure for bivariate extreme value copulas, Biometrika 84, 3, 1997, 567-577.
46. CARNet CERT & LSS, Upravljanje sigurnosnim rizicima, CARNet CERT, 2003. (in Croatian)

47. Choo, C. W., Information Management for the Intelligent Organization, Information today, Inc., 2000.
48. Collard, R., La Qualita Totale, F. Angeli, Milano, 1991.
49. Cornell, C.A., A Probability-Based Structural Code, ACI-Journal, Vol. 66, 1966, pp. 974-985.
50. CORUS Ltd., Methods Applications and Software for Structural Reliability Assessment, Swindon Technology Center, Report no.SL/WEM/R/M8663, 2001.
51. Cui, W. et al., Strength of Ship Plates Under Combined Loading, Elsevier Science, Marine Structures 15, 2002. pp 75-97.
52. Čaval, J., Statističke metode u privrednim i društvenim istraživanjima, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1981.
53. Der Kiureghian, P., Liu, L., Structural Reliability under Incomplete Probability Information, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1986, Vol. 112, No. 1, 85-104.
54. Det Norske Veritas, Fatigue Assessment of Ship Structures: Influence of Extreme Stress Level on Estimated Fatigue Damage Accumulation, Report, 12/1995.
55. Ditlevsen, O., Bjerager, P., Methods of Structural Systems Reliability, Elsevier Science, Structural Safety, 3, 1986. pp 195-229 .
56. Ditlevsen, O., Madsen, H. O., Structural Reliability Methods, Technical University of Denmark, Lyngby, (2nd ed.), 2003.
57. Ditlevsen, O., Narrow Reliability Bounds for Structural Systems, Journal of Structural Mechanics, Vol. 7, No. 4, pp. 453-472. 1979.
58. Dolinski, K., First-order Second-moment Approximation of Structural Systems: Critical Review and Alternative Approach, Struct. Safety, 1, 3, 1983, pp. 211-231.
59. Douglas, B. P., Real-time UML: developing efficient objects for embedded systems, Addison-Wesley Object Technology Series, 1998.
60. Duncan, A. J. , Quality Control and Industrial Statistics, Irwin, Homewood, Illinois, 1974.
61. Endrenyi, J., Reliability Modeling in Electric Power Systems, John Wiley and Sons, New York, 1978.
62. Enevoldsen, I., Sørensen, J. D., Reliability-Based Optimization in Structural Engineering, Structural Safety, Vol.15. No. 3, 1994, pp. 169-196.
63. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures - Part 1: Basis of design. ENV 1991-1, 1994.
64. Fishman, G. S., Principles of discrete event simulation, Wiley-Interscines, New York, 1978.
65. Forrester, J., Industrial dynamics, The M.I.T. Press, 1965.
66. Fricke, W., Petershagen, H., Paetzold, H., Fatigue Strength of Ship Structures, Germanicher Lloyd-Technology, Hamburg, 1997.
67. Galambos, T. V., Ravindra, M. K., Properties of Steel for Use in LRFD, ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 104, N0. ST9, pp. 1459-1467, 1978.
68. Galgano, A., I Sette Strumenti della Qualita Totale, Il Sole 24 Ore, Milano, 1992.
69. Gaushell, D. J., et al., Analysis of analog data dynamics for supervisory control and data acquisition system IEEE Transactions PAS-102, No.2, 1983.
70. Gawrys, M., Sienkiewicz, J., Rough Set Library, User's manual, Warsaw University of Tehnology, Poland,1993.

71. Gawrys, M., Sienlaewicz, J., Rough Set Library, Software package, Warsaw University of Tehnoloav, Poland. 1993.
72. Germanischer Lloyd, Rules for Classification and Construction of Ships, 1997.
73. Gollwitzer, S., Rackwitz, R., An Efficient Numerical Solution to the Multinormal Integral, Probabilistic Engineering Mechanics, 3, 2, 1988, pp. 98-101.
74. Gray, R. M., Entropy and Information Theory, Springer Verlag, 1990.
75. Haim, Ben Y., A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models, Structural Safety, 17, 1995.
76. Hammersley, J. M., Handscomb, D. C., Monte Carlo methods, John Wiley & sons, New York, 1964.
77. Hansen, A. M., Reliability Methods for the Longitudinal Strength of Ships, PhD Thesis, Technical University of Danemark, 1995.
78. Hansen, P. F., Fatigue Damage in the Side Shells of Ships, Marine Structures, str. 631–655, 8/1995.
79. Hansen, P. F., Reliability Analysis of Midship Section, PhD Thesis, Technical University of Danemark, 1994.
80. Harrell, Bateman, Gogg, Mott: System Improvement Using Simulation; Promodel Corporation Orem, 1996.
81. Hartley, R. V., Transmission of Information, Bell Systems Tech J. 7, 1928.
82. Hasofer, A. M., Lind, N. C., An Exact and Invariant First Order Reliability Format. ASCE, Journ. Eng. Mech. Div, 1974., pp. 111-121.
83. Hauge, L. H., Loseth, R., Skjong, R., Optimal Code Calibration and Probabilistic Design, Proc. OMAE'92, Vol. II, pp. 191-199, 1992.
84. Hilderbrand, C., Does  $KM = IT$  ?, CIO Enterprise Magazine, 1999.
85. Hohenbichler, M., Rackwitz, R., First-Order Concepts in Systems Reliability, Structural Safety, Vol. 1, No. 3, pp. 177-188, 1983.
86. Hudson, J. C., Kapur, K. C., Reliability Analysis of Multistate Systems with Multistate Components, Transactions of IIE 15, 1983, pp 127-135.
87. Hughes, O. W., Ship Strucural Design, A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach, J.Wiley & Sons, New York, 1983.
88. International Standard ISO 2394, General principles on reliability for structures, second edition, 1998-06-01, 1998.
89. Ishikawa, K., Guide to Quality Control, Quality Resources, New York, 1996.
90. ISO/IEC 27001, Information technology – Security techniques – Information security management systems – Requirements, 1st edition, 2005.
91. ISO/IEC TR 13335-3, Information technology – Guidelines for the management of IT security, 1st edition, 1998.
92. James, T., McClave, F., Dietrich., Statistics, Collier Macmillan Publishers, London, 1988.
93. Juran, J. M., Quality Control Handbook, McGraw-Hill, New York, 1988.
94. Kadirkamanathan, V., A statistical inference based growth criterion for the RBF network, In Proc. IEEE Workshop on Neural Networks for Signal Processing, 1994.
95. Kallianpur G., Karandikar R., Introduction to Option Pricing Theory, Birkhauser, 2000.

96. Kam, J. C. P., Snell R. O. and Shetty, N. K., A Review of Structural System Reliability Analysis for Offshore Structures, Proc. 14th Intl. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Vol. II, pp223-234, 1995, ASME
97. Kam, W. L., Priddy, A. P., Power Plant System Desing, John Wiley & Sons Inc., New York, 1985.
98. Kapulin, S. M., Optimizacije nadežnosti energoustanovah, Nauka, Novosibirsk, 1982.
99. Khinchin, A. I., Mathematical Foundations of Information Theory, Dover Publications, NY, 1957.
100. Klarin, M., Ivanović, G., Stojanović, P., raičević, R., Principu terotehnoških postupaka, MF, Beograd, 1994.
101. Kloeden P., Platen E., Numerical Solution of Stochastic Differential Equations, Springer, 1999.
102. Kolowrocki, K., An asymptotic approach to reliability evaluation of large multi-state systems with applications to piping transportation systems, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80, 2003, 59-73.
103. Kolowrocki, K., Reliability of Large Systems, Elsevier, 2004.
104. Kondić, Živko, Kvaliteta i pouzdanost tehničkih sistema, Tiva, Varaždin, 1999.
105. Krejsig, E., Advanced Engineering Mathematics, 7th ed., John Wiley & Sons, New York, 1993.
106. Kronfeld, B., Teorija vjerojatnosti i matematička statistika, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 1973.
107. Kumamoto, H., Henley, E. J., Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists, Second Edition, IEEE Press, New York, 1996.
108. Kuo, W., Zuo, M. J, Optimal Reliability Modelling: Principles and Applications, John Wiley & Sons, 2003.
109. Kurepa, S., Konačno dimenzionalni vektorski prostori, Sveučilišna naklada Zagreb, 1979.
110. Lawrence L. Lapin, Modern Engineering Statistics, Duxbury Press, 1 Belmont, CA, 1997.
111. Leheta, H. W., Manosur, A. E., Reliability-based Method for Optimal Structural Design of Stiffened Panels, Elsevier Science, Marine Structure, 10, 1997., pp. 323-352.
112. Leveson, N. G., A New Approach To System Safety Engineering, Aeronautics and Astronautics, MIT, 2002.
113. Levitin, G., Lisnianski, A., Joint redundancy and maintenance optimisation for series-parallel multistate systems, Reliability Engineering and System Safety 64, 1998, 33-42.
114. Limić, N., Pašagić, H., Rnjak, Č., Linearno i nelinearno programiranje, Informator, Zagreb, 1978.
115. Lipschutz, S., Linear Algebra, McGraw-Hill Book Company, London, 1974.
116. Lovrić, J., Osnove brodske terotehnologije, Pomorski fakultet Dubrovnik, Dubrovnik, 1989.
117. Lu, Z., Yu, Y., Woodman, N. J., Blockley, D. I., A Theory of Structural Vulnerability, The Structural Engineer 77(10), 1999.
118. Maleković, M., Čubrilo, M., Knowledge, Belief and Desire in Multi-Agent Systems, CD Proceedings, 2003 IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, INES 2003.
119. Madsen, H. O., Krenk, S., Lind, N. C., Methods of Structural Safety, Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1986.
120. Maleković, M. (1998), Integrated Knowledge, Information Technology Interfaces ITI'98, 1998.



121. Maleković, M., Reasoning about Knowledge: Some Agent Properties, Zbornik radova, Journal of Information and Organizational Sciences, Vol. 22, No. 1, pp. 1-11,1998.
122. Malhotra, Y., Knowledge Management and New Organization Forms: A Framework for Business Model Inovation, Information Resources Management Journal (special issue on Knowledge Management and Virtual Organization), 13(1), 5-14,1998.
123. Malhotra, Y., Knowledge Management and Virtual Organization, Idea Group Publishing, 2000.
124. Mansour, A. E., Hovem, L., Probability–Based Ship Structural Safety Analysis, Journal of Ship Research, Vol.38, No.4, str. 329–339, 12/1994.
125. Mansour, A. E., Wirsching, P. H., Probabilistic-Based Design Requirements for Ship Structures, Proc. 7th Speciality Conf. on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, ASCE, Massachusetts, 1996, pp 98-101.
126. Martić, Lj., Matematičke metode za ekonomske analize, II, Narodne novine, Zagreb, 1972.
127. Martić, Lj., Nelinearno programiranje, Odabrana poglavlja, Informator, Zagreb, 1973.
128. Mc.Clave J. T., Dietrich F. M., Statistics, Dellen Publ., San Francisco, 1988.
129. McClave, J. I., Dietrich, F. H. II, Statistics, Dellen Publ., San Francisco, 1988.
130. Munitić, A., Primjena elektroničkih računala, Pomorski fakultet, Split, 2004.
131. Munitić, A., Kompjuterska simulacija, Brodosplit, Split, 1989.
132. Meden, G. i dr., Ljetna škola kvalitete, Međunarodno središte hrvatskih sveučilišta u Istri, Tehnički fakultet, Rijeka, 1994, 1995 i 1996.
133. Melchers, R., Simulation in time-invariant and time-variant reliability problems, Proceedings, IFIP WG 7.5, Munich, September 1991, pp. 39-82.
134. Melchers, R. E., Structural Reliability Analysis & Prediction, Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, 2nd ed., 1999.
135. Mendenhall, W., Schaeffer, R. L., Wackerly, D., Mathematical Statistics with Applications, 2nd ed., North Scituate, Massachusetts & Duxbury, 1980.
136. Michael Pidd: Computer Simulation in Management Science, John Wiley & Sons, New York, 1994.
137. Miller, I., Freund, F. J., Probability and Statistics for Engineers, Prentice-Hall, New Jersey, 1977.
138. Montgomery, Runger: Applied Statistics and Probability for Engineers, John Wiley & Sons, New York, 1994.
139. Nikolić, I., MngSpj - Menadžment poduhvatima (projektima) unapređenja efikasnosti poslovanja primenom softvera CA- SuperProject, CD rom, Fakultet organizacionih nauka Beograd, Vojnoizdavački zavod Beograd, Institut za bakar Bor, 2000-2001.
140. Nikolić, I. Borović, S., Višekriterijumska optimizacija - metode, primena u logistici, softver, Centar vojnih škola, Beograd, 1996.
141. Nikolić, I., Upravljanje projektom i upravljanje projektima u graditeljstvu, CD rom, Fakultet za graditeljski menadžment, Beograd, 2004.
142. Okada, H. et all., A method for reliability-based sensitivity analysis of ship's hull structures using combined plate and frame structure models, Proceedings of OMAE '96, Florence, Italy, 1996, p. 235}43.
143. Östlund, L., General European Principles of Codes Concerning Reliability, Proc. ICOSSAR'89, pp. 1943-1948, 1989.
144. Padmanabhan, D., Tappeta, R. V., Monte Carlo Simulation in Reliability Based Optimization Applied to Mutlidiciplinary System Design, AIAA Report, May, 2003.

145. Paik, J. K. et all., On Advanced Ultimate Limit State Design of Ship Stiffened Panels and Grillages, ABS Houston, 2001 SNAME Annual Meeting
146. Paik, J. K., Park, Y. I., Local Buckling of Stiffeners in Ship Plating, Journal of Research Institute of Technology, Vol.52, 1997.
147. Pandey, M. D., An effective approximation to evaluate multinormal integrals, Structural Safety, 20, 1998, pp. 51-67 .
148. Parunov, J., Senjanović, I., Incorporating Model Uncertainty in Ship Reliability Analysis, SNAME Transactions, Vol. 111, pp 377-408, 2003.
149. Pauše, Ž., Vjerojatnost – informacija – stohastički procesi , II, promijenjeno izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 1978.
150. Pauše, Z., Uvod u teoriju informacija, Tehnički školski centar JNA, Zagreb, 1972.
151. Pauše, Ž., Vjerojatnost, informacija, stohastički procesi, Školska knjiga, Zagreb, 1974.
152. Pavazza, R., Lozina, Ž., An analytical approach to the bending of large tankers with no distorted cross-sections, Proc. of 10th Internatioal Congress of the IMAM 2002, Rethymno, Hellas, 13-17 May 2002.
153. Pavić, I., Statistička teorija i primjena, Tehnička knjiga, Zagreb, 1994.
154. Pavličić, D., Teorija odlučivanja, Ekonomski fakultet, Beograd, 2004.
155. Pavlič, Statistička teorija i primjena, III izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1985.
156. Pawlak, Z., Rough Set Approach to KnowledgeBased Decision Support, EURO XIV Conference Jerusalem, Jul 1995.
157. Pawlak, Z., Rough Sets, Rough Relations and Rough Functions, Working paper, Warsaw University of Tehnology, Poland, maj 1994.
158. PD 3002:2002, Guide to BS 7799 Risk Assessment, British Standards Institution, 2002.
159. Pedersen, T., Wave Load Prediction – A Design Tool, PhD Thesis, Technical University of Danemark, 2000.
160. Petrić, J., Jevtić, M., Tošić, T., Stojanović, V., Pouzdanost, Privredni pregled, Beograd, 1972.
161. Petrović, R., Vujošević i Petrović, D., Optimizacija redudantnih sistema, SF, Beograd, 1993.
162. Pieruschka, E., Principles of Reliability, Prentice-Hall, 1963.
163. Platt, J., A resource allocating network for function interpolation, Neural Computation, vol. 3, no. 2. 1991, 213-225.
164. Pokorni, S, Ramović, R. , Parčina, N., Teorija pouzdanosti tehničkih sistema - Zbirka rešenih zadataka, Centar vojnih škola VJ, Vojna akademija VJ, Beograd, 1997.
165. Pokorni, S., Pouzdanost i održavanje tehničkih sistema, Vojna akademija, Beograd, 1999.
166. Polkowski, L., Skowron, A., Rough Mereology: Logic of Rough Inclusion Rough Mereological, Functions, Rought Functions, Working paper, Warsaw Uruversity of Tehnology, Poland, mart 1994.
167. Popirin, L. S., Matematičeskoe modelirovanie i optimizacija tegloenergeti českih ustanovah, Energija, Moskva, 1978.
168. Prvo i drugo savjetovanje o pouzdanosti u elektrotehnici, Elektrotehnika, časopis SEITH i udruženih izdavača, godišta 1980, 1981, 1983, Zagreb
169. Pugh, A., DYNAMO user's manual, The M.I.T. Press, Cambridge Mosr., 1963.
170. Rackwitz, R., Reliability analysis – past, present and future, 8th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, 2000.



171. Rajkov, M., Dinamika organizacionih i ekonomskih sistema, Kultura, Beograd, 1988.
172. Rao, A., et all., Total Quality Management: A Cross Functional Perspective, John Wiley & Sons, New York, 1996.
173. Rao, S. S., Reliability-Based Design, McGraw-Hill, 1992.
174. Ravindra, M. K., Galambos, T. V., Load and Resistance Factor Design for Steel, ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 104, no. ST9, pp. 1337-1353, 1978.
175. Reitman, J., The use of enhanced GPSS (GPSS/H),. Simulation (USA), Vol. 38, no.1, p. 23-5, 1982.
176. Rejec, E., Terotehnologija: suvremena organizacija održavanja sredstava za rad, Informator, Zagreb, 1974.
177. Rejec, E., Terotehnologija. Suvremena organizacija održavanja sredstava, Informator, Zagreb, 1989.
178. Renyi, A., Probability Theory, North-Holland, Amsterdam, 1970.
179. Ronald L. Krutz, Russell Dean Vines, The CISSP Prep Guide—Mastering the Ten Domains of Computer Security, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
180. Sarkadi, K., Vincze, I., Mathematical Methods of Statistical Quality Control, Academic Press, New York, 1974.
181. Schmidtm B., GPSS-FORTRAN, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
182. Schriber, T. J., Introduction to GPSS, 1981 Winter Simulation Conference Proceedings, Atlanta, GA, USA, p. 289-91 vol 1, 1981.
183. Schroder, K., Grosse Dampfkraftwerke, Springer Verlag, Berlin, 1968.
184. Seila, A. F., Čerić, V., Tadikamalla, P., Applied Simulation Modeling, Thomson - Brooks/Cole, 2003.
185. ServiceModel Users Guide; Promodel 1999.
186. Sexsmith, R. G., Probability-based safety analysis – value and drawbacks, Elsevier, Structural Safety 21, 1999, pp 303-310.
187. Shaked, M., Tong, Y. L., editors, Stochastic Inequalities, Lecture Notes / Monograph Series, Vol. 22, IMS 1992.
188. Shannon, C. E., Weaver, W., The mathematical theory of communication, Urbana University of Illinois Press, 1949.
189. Shriber, T. J., Simulation using GPSS, John Wiley & Sons, 1974.
190. Smith, M. A. J., Dekker, R., Preventive maintenance in a 1 out of n system: The uptime, downtime and costs, Eur. J. Oper. Res. 99, No. 3, 565-583, 1997.
191. SO/IEC 17799, Information technology – Security techniques – Code of practice for Information security management, 2nd edition, 2005.
192. Soares, C. G., Uncertainty Modelling in Plate Buckling, Technical University of Lisbon, Shipbuilding Engineering Program, 1998.
193. Sørensen, J. D., Structural reliability: Level 1 approaches, Institute of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, April 2000.
194. Srikantaiah, T. K., Koenig, M. E. D., Knowledge Management for the Information Professional, Information Today, Inc., 2001.
195. Steel J., Stochastic Calculus and Financial Applications, Springer, 2001.
196. Šegudović, H., Upravljanje sigurnošću informacijskih sustava, KOM 2003 p III-31, 2003, in Croatian.

197. Šimunić, J., MSSI – Modular structure of stochastic proces information for power system control, CIT 3, 1995.
198. Šimunić, J., Analiza događaja EES-a uz pomoć modularne strukture informacija, Energija, Zagreb, 1994.
199. Šošić, I., Serdar, V., Uvod u statistiku, Školska knjiga, Zagreb, 1997.
200. Šošić-V.Serdar, Uvod u statistiku, Školska knjiga, Zagreb, 2002.
201. Tang, L. K., Melchers, V, Improved Approximation for Multinormal Integral, Structural Safety, 4, 1987, pp. 81-93.
202. Thoft-Christensen, P., Baker, M. J., Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer Verlag, New York, 1983, 13-35.
203. Thoft-Christensen, P., Murotsu, Y., Applications of Structural Systems Reliability Theory, Springer Verlag, New York, 1986.
204. Todorović, J., Zelenović, D., Efikasnost sistema u mašinstvu, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
205. Tourki, M., Backović, M. , Cvjetičanin, D., Matematički modeli i metodi u ekonomiji, Ekonomski institut, Beograd, 1997.
206. Ugrin-Šparac, D., Primijenja teorija vjerojatnosti, I i II dio, Sveučilište u Zagrebu, Elektrotehnički fakultet, 2000.
207. Vučković, B., Optimalnost troškova održavanja i efektivnost proizvodne opreme u uvjetima serijske strojne obrade dijelova, TFR, magistarski rad, 1986.
208. Vučković, M., Simulacija i simulacioni jezici, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 1984.
209. Vujanović, N. , Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1990.
210. Wiig, K. M., Knowledge Management Foundation, Schema Press, 1995.
211. Wirsching, P. H. , Mansour, A. E., Ayyub B. M. and White, G. J.: Probability-Based Design Requirements with Respect to Fatigue in Ship Structures, Proc. 7th Speciality Conference on 'Probabilistic mechanics and Structural Reliability', ASCE, Massachusetts, 1996.
212. Wong, Z., Stochastic Processes in Information and Dynamical Systems, McGraw Hill Co., New York, 1971.
213. Yaglom, A. M., An Introduction to the Theory of Stationary Random Functions, Dover Publications Inc., New York, 1962.
214. Yaglom, A. M., Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions I, II, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987.
215. Yee, R. D., Malik, L., Barn, R. and Kirkhope, K., Guide to Damage Tolerance Analysis of Marine Structures, US Department of Commerce, Report SSC-402, Ship Structure Committee, 1997.
216. Zeljković, V. , Papić, Lj., Testiranje pouzdanosti, Institut "Lola", Beograd, 2001.
217. Zenzerović, Z., Statističke metode u tehnologiji prometa, Fakultet za pomorstvo i saobraćaj, Rijeka, 1988.
218. Zenzerović, Z., Statistički priručnik, Pomorski fakultet, Rijeka, 2004.
219. Žiha, K., Descriptive Sampling in Structural Safety, Elsevier Science, Structural safety 17, 1995, pp 33-41.
220. Žiha, K., Projektiranje brodske konstrukcije na osnovi pouzdanosti određene statističkim postupcima, disertacija, FSB Zagreb, 1989.

## 12. PRILOZI

Prilog 1. Vrednost  $c_0^2$  i pripadne vrednosti  $P(c^2 > c_0^2)$  sa stepenom slobode  $k=1,2,\dots,30$



Stepen slobode	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,000	0,001	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,706	3,841	5,412	6,635	10,827
2	0,020	0,040	0,103	0,211	0,446	0,713	1,386	2,408	3,219	4,605	5,991	7,824	9,210	13,815
3	0,115	0,185	0,352	0,584	1,005	1,424	2,366	3,66-5	4,642	6,251	7,815	9,837	11,341	16,268
4	0,297	0,429	0,711	1,064	1,649	2,195	3,357	4,878	5,989	7,779	9,488	11,668	13,277	18,465
5	0,554	0,752	1,145	1,610	2,343	3,000	4,351	6,064	7,289	9,236	11,070	13,388	15,086	20,517
6	0,872	1,134	1,635	2,204	3,070	3,828	5,348	7,231	8,558	10,645	12,592	15,033	16,812	22,457
7	1,239	1,564	2,167	2,833	3,822	4,671	6,346	8,383	9,803	12,017	14,067	16,622	18,475	24,322
8	1,646	2,032	2,733	3,490	4,594	5,527	7,344	9,524	11,030	13,362	15,507	18,168	20,090	26,125
9	2,088	2,532	3,325	4,168	5,380	6,393	8,343	10,656	12,242	14,684	16,919	19,679	21,666	27,877
10	2,558	3,059	3,940	4,865	6,179	7,267	9,342	11,781	13,442	15,987	18,307	21,161	23,209	29,588
11	3,053	3,609	4,575	5,578	6,989	8,148	10,341	12,899	14,631	17,275	19,675	22,618	24,725	31,264
12	3,571	4,178	5,226	6,304	7,807	9,034	11,340	14,011	15,812	18,549	21,026	24,054	26,217	32,909
13	4,107	4,765	5,892	7,042	8,634	9,926	12,340	15,119	16,985	19,812	22,362	25,472	27,688	34,528
14	4,660	5,368	6,571	7,790	9,467	10,821	13,339	16,222	18,151	21,064	23,685	26,873	29,141	36,123
15	5,229	5,985	7,261	8,547	10,307	11,721	14,339	17,322	19,311	22,307	24,996	28,259	30,578	37,697
16	5,812	6,614	7,962	9,312	11,152	12,624	15,338	18,418	20,465	23,542	26,296	29,633	32,000	39,252
17	6,408	7,255	8,672	10,085	12,002	13,531	16,338	19,511	21,615	24,769	27,587	30,995	33,409	40,790
18	7,015	7,906	9,390	10,865	12,857	14,440	17,338	20,601	22,760	25,989	28,869	32,346	34,805	42,312
19	7,633	8,567	10,117	11,651	13,716	15,352	18,338	21,689	23,900	27,204	30,144	33,687	36,191	43,820
20	8,260	9,237	10,851	12,443	14,578	16,266	19,337	22,775	25,038	28,412	31,410	35,020	37,566	45,315
21	8,897	9,915	11,591	13,240	15,445	17,182	20,337	23,858	26,171	29,615	32,671	36,343	38,932	46,797
22	9,542	10,600	12,338	14,041	16,314	18,101	21,337	24,939	27,301	30,813	33,924	37,659	40,289	48,268
23	10,196	11,293	13,091	14,848	17,187	19,021	22,337	26,018	28,429	32,007	35,172	38,968	41,638	49,728
24	10,856	11,992	13,848	15,659	18,062	19,943	23,337	27,096	29,553	33,196	36,415	40,270	42,980	51,179
25	11,524	12,697	14,611	16,473	18,940	20,867	24,337	28,172	30,675	34,382	37,652	41,566	44,314	52,620
26	12,198	13,409	15,379	17,292	19,820	21,792	25,336	29,246	31,795	35,563	38,885	42,856	45,642	54,052
27	12,879	14,125	16,151	18,114	20,703	22,719	26,336	30,319	32,912	36,741	40,113	44,140	46,963	55,476
28	13,565	14,847	16,928	18,939	21,588	23,647	27,336	31,391	34,027	37,916	41,337	45,419	48,278	56,893
29	14,256	15,574	17,708	19,768	22,475	24,577	28,336	32,461	35,139	39,087	42,557	46,693	49,588	58,302
30	14,953	16,306	18,493	20,599	23,364	25,508	29,336	33,530	36,250	40,256	43,773	47,962	50,892	59,703

Prilog 2. Tabela parametara motora za proračun pouzdanosti

PODSISTEM	Ukupan broj delova podsistema	Broj otkaza	Intenzitet otkaza $I \cdot 10^{-6}$ (otkazi/čas)	Srednje vreme između otkaza (h)	Vreme nastanka otkaza (h)	Vreme rada (h)
A – turbina	3726	3	6,798	147102,1	-	600
A <sub>10</sub> – prsten ležaja	69	1	1,491	670680	180	600
A <sub>12</sub> – zaptivka	138	1	1,132	882825	237	600
A <sub>15</sub> – valjkasti ležaj	69	1	0,547	1826367	490,3	600
ostala 3 723 elemen.	-	-	3,628	275662	-	600
B – turbokompresor	2070	7	9,2469	108144,35	-	600
B <sub>4</sub> – osovina	69	2	2,02503	493818,57	150,3, 327,05	600
B <sub>6</sub> – cevi za ulje	1	1	1,69587	589667,84	285	600
B <sub>12</sub> – zaptivke	138	1	0,97600	1024156	495	600
-	-	-	-	-	558,15, 577,	600
B <sub>14</sub> – pripadna apar.	69	3	2,53860	393912,78	580	600
ostala 2 064 elemen.	-	-	2,01140	497159,78	-	600
C – spojnica	8 763	13	15,94742	62706,68	-	600
C <sub>18</sub> – konus sinhro.	69	3	-	-	304,4, 320,	600
-	-	-	1,1804	847189,3	250	-
C <sub>20</sub> – rad.-aks. ležaj	69	2	1,0189	924285,5	202, 220	600
C <sub>23</sub> – kandžasta spo.	69	1	1,2752	784199	89,5	600
C <sub>24</sub> – poluga za uklj	69	2	2,05199	487330,6	102, 120,5,	600
C <sub>25</sub> – ležaj reduktora	69	3	-	-	330, 430,3,	600
-	-	-	0,81845	1221825,3	495	-
C <sub>26</sub> – kućište spojnice	69	1	0,51179	1953926	223	600
C <sub>27</sub> – polužje mehan.	-	-	-	-	-	-
za plovidbu krmom	69	1	0,50057	1997736	228	600
ostalih 8 750 elemen.	-	-	8,52712	117272,82	-	600
D – blok-cilindar	-	-	44,0517	22700,60	124, 220, 322,	-
jedan blok-cilindar	483	7	43,582	22945	350, 380,	600
ostala 482 blok cilin.	-	-	0,4697	2128916,56	395, 571	-
E – klipovi	23184	3	22,87892	43708,36	-	600
E <sub>1</sub> – osovina klipa	2898	1	0,0979	10435354,5	450,3	600
E <sub>3</sub> – prsten	11592	2	0,18049	5540496	461, 495	600
preostala 23181 elem.	-	-	22,59053	44266,33	-	600
F – glavna klipnjača	34776	3	34,14128	29290,05	-	600
F <sub>11</sub> – prstenasti osig	138	1	0,12185	8206900	236	600
F <sub>12</sub> – valjkasti osig.	207	2	0,13217	7565953	380,3, 490	600
ostala 34733 elemen.	-	-	33,88726	29509,60	-	600
G – klizni ležaj	-	-	3,9858	250890,66	-	600
jedan klizni ležaj	483	1	3,5164	284380	590	600
ostala 482 kliz. ležaja	-	-	0,4694	2128916,56	-	600
H – osovina	-	-	3,10819	321730,65	-	600
priključak klipa	2484	1	0,6884	0,999587	-	600
jedan element	-	-	2,41975	0,998550	585	600
ostala 2483 elemen.	-	-	-	-	-	600
K – izduvni ventil	-	-	5,9449	168211,4	-	600
jedan element	5796	1	0,2975	3361100	580	600
ostala 5795 elemen.	-	-	5,6474	177073	-	600
Σ	81765	68	-	-	-	-

## 13. BELEŠKA O AUTORU

Mr Marko Tomašević je rođen 23. januara 1949. godine u Širokoj Rijeci, u Republici Hrvatskoj. Posle završetka osmogodišnje škole, upisao se u Gimnaziju "Tone Horvat" u Velikoj Kladaši, koju je završio 1967. odličnim uspehom. Kao srednjoškolac, učestvovao je na republičkom takmičenju iz matematike 1966 godine, na kome je delio prvo mesto.

Godine 1967/68. upisao se na studije matematike na Prirodno-matematičkom fakultetu u Zagrebu. Diplomirao je 1972. na smeru Praktična matematika i stekao zvanje dipl. inž. matematike.

Na poslediplomske studije matematike na Prirodno-matematičkom fakultetu u Zagrebu upisao se 1974. godine i položio sve ispite s prosečnom ocenom odličan. Magistarski rad s temom "Kontinuirani komunikacijski kanal" odbranio je 1979. godine i stekao akademski stepen magistra prirodnih nauka iz oblasti matematike.

Nakon regulisanja vojne obaveze 1972/73, zaposlio se 13. oktobra 1973. godine u Mornaričkom školskom centru. U zvanje asistenta matematike prvi put je izabran 19. marta 1975. god, a drugi put biran je za asistenta matematike, uz poveru predavanja i ispitivanja, 13. septembra 1979. godine.

U zvanje predavača za predmet Matematika, izabran je 13. novembra 1980. godine, a 1981. dobija zvanje višeg predavača za predmet Matematika. U tom zvanju je ostao sve do 1987. godine. Pošto zvanje višeg predavača po zakonu nije više postojalo a 21. aprila 1987. izabran je u zvanje predavača na Znanstveno-nastavnom vijeću OOUR-a Matematički odjel PMF-a Sveučilišta u Zagrebu.

Od prvog izbora do 1979. godine vodio je vežbe iz Više matematike I, II, III i IV, Teorije vjerojatnosti i Matematičke statistike. Osim toga, držao je dve godine na Građevinskom fakultetu u Splitu, vežbe iz Više matematike I i II, kao i iz predmeta Osnovi teorije vjerojatnosti i Matematička statistika.

Od februara 1982. godine do jula 1987. neprekidno je radio, u dopunskom radnom odnosu, na Višoj pomorskoj školi u Splitu, odnosno na Pomorskom fakultetu Dubrovnik - Studij u Splitu, u zvanju višeg predavača za predmete Viša matematika I i II. Devetog jula 1987. godine Savjet Pomorskog fakulteta u Dubrovniku, na osnovu predloga Znanstveno-nastavnog vijeća Pomorskog fakulteta u Dubrovniku od 8. jula 1987, doneo je odluku da se izabere u nastavno zvanje predavača za oblast matematike u dopunski radni odnos. Od 1. septembra 1988. godine zaposlen je na puno i neodređeno radno vreme u zvanju predavača matematike na Pomorskom fakultetu Dubrovnik - studij u Splitu, gde i danas radi.

Od 1979. godine do danas držao je predavanja iz mnogih predmeta. U Mornaričkom školskom centru predavao je: Višu matematiku I, II, III, IV, Teoriju vjerojatnosti, Statistiku, Operacijska istraživanja, Teoriju informacija i kodiranja, a na Pomorskom fakultetu: Višu matematiku I i II, Statističke metode, Primenjenu matematiku, Matematičke analize III i IV, te Operaciona istraživanja koje i danas drži. Osim toga, na poslediplomskim studijama držao je nastavu iz Teorije pouzdanosti s primenama na brodskim sistemima.

Radio je tri godine u dopunskom radnom odnosu na PMF-u u Zagrebu, Studij u Splitu, kao predavač na predmetu Osnovi teorije vjerojatnosti i matematičke statistike.

Za vreme rada u MŠC-u bio je u grupi za NIR, koja se bavila naučnoistraživačkim radom na projektu "Matematičko-statistički modeli u analizi brodskih energetskih postrojenja", i iz tog područja ima, u rukopisu, oko 160 stranica materijala. Godine 1991/92. pripremio je za štampanje rukopis o Fourierovim i Laplaceovim transformacijama. Taj materijal sadrži 212 stranica.

### Naučne knjige i monografije nacionalnog značaja, udžbenici –

1. **Tomašević, M.**, Metodička zbirka rješениh zadataka iz Više matematike I, Mornarički školski centar, Split, 1975, pp. 291
2. **Tomašević, M.**, Metodička zbirka rješениh zadataka iz Više matematike II, Mornarički školski centar, Split, 1976, pp. 331
3. **Tomašević, M.**, Zbirka zadataka iz matematike za vojne akademije, Vojno izdavački zavod, Beograd, 1982, pp. 674
4. **Tomašević, M.**, Teorija informacija i kodiranja, Mornarički školski centar, Split, 1987, pp. 199
5. **Tomašević, M.**, Mathematics I (sets numbers functions), 1983, pp. 210
6. **Tomašević, M.**, Mathematics II (sequences and series linear algebra), 1983, pp. 240
7. **Tomašević, M.**, Mathematics III (differential calculus), 1983, pp. 230
8. **Tomašević, M.**, Mathematics IV (integral calculus), 1983, pp. 230
9. **Tomašević, M.**, Matrični i vektorski račun, Pomorski fakultet, Split, 1997, pp. 188
10. **Tomašević, M.**, Skupovi, brojevi, funkcije, Viša pomorska škola, Split, 2001, pp. 472
11. **Tomašević, M.**, Diferencijalni račun, Viša pomorska škola, Split, 2001, pp. 341
12. **Tomašević, M.**, Metodička zbirka zadataka iz neodređenih i određenih integrala, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 348
13. **Tomašević, M.**, Metodička zbirka zadataka iz diferencijalnih jednačbi prvog i drugog reda, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 280
14. **Tomašević, M.**, Statistička teorija i primjena, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 320
15. **Tomašević, M.**, Teorija integralnog računa i diferencijalne jednačbe I i II reda, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 270
16. Adamović, Ž., Nadrljanski, Đ., **Tomašević, M.**, **Metodologija naučno istraživačkog rada** - Statističke metode u istraživanju, Pedagoški fakultet, Sombor, 2007, pp. 315
17. **Tomašević, M.**, Integrali. Funkcije više varijabli i diferencijalne jednačbe (teorija), Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 253
18. **Tomašević, M.**, Višestruki, krivolinijski i plošni integrali (teorija), Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 190
19. **Tomašević, M.**, Zbirka zadataka iz integralnog računa: Funkcije više varijabli i diferencijalnih jednačbi, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 342
20. **Tomašević, M.**, Zbirka zadataka iz integralnog računa: Višestruki, krivolinijski i plošni integral, Pomorski fakultet, Split, 2006, pp. 220



**Radovi međunarodnog značaja:**

1. Kecman, V., **Tomašević, M.**, Eigenvector Approach for Reduced-Order Optimal Control Problems of Weakly Coupled Systems, in print in, Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems: An International Journal for Theory and Applications (DCDIS), B: Applications and Algorithms, Volume 13, Number 5, pp. 569-587, 2006
2. **Tomašević, M.**, Odlučivanje i suvremene matematičke metode faktor uspješnog menadžmenta, međunarodni naučni skup "Društvo i tehnologija 2006" – "Elektronički mediji u tranziciji", jun 2006. Zbornik radova, Zadar
3. Nadrljanski, Đ., Nadrljanski, M., **Tomašević, M.**, System theories in education, međunarodni naučni skup MIPRO, "Zbornik radova Kompjutor u obrazovanju", Opatija, 2006, pp.191.-196
4. **Tomašević, M.**, Kovačević, D., Kovačević, A., Hardware simulation of growth and decay in discrete environment, ITI 99 Proceedings of the 21st International conference on INFORMATION TECHNOLOGY INTERFACES, 2004.
5. Munitić A., Vidučić V., **Tomašević, M.**, Uloga i razvitak morskog putničkog linijskog brodarstva u Republici Hrvatskoj, Suvremeni promet, god. 26, br. 5, 2006, 372-376
6. Nadrljanski, Đ., Nadrljanski, M., Roguljić, M., **Tomašević, M.**, Knowledge management as a factor of the company's development, Međunarodna znanstvena konferencija proizvodnog inženjerstva, Korčula, Lumbarda, 2006, pp.159-174
7. Vidučić, V., Vidučić, Lj., **Tomašević, M.**, Impact of tourism on linear maritime passenger traffic, DAAAM Scientific book 2006, DAAAM International, Vienna
8. Komar, I., Antonić, R., **Tomašević, M.**, Experimental tuning of marine diesel engine speed controller parameters on engine test bed. Marine technology journal, 2006.

**Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja**

1. Nadrljanski, Đ., Nadrljanski, M., **Tomašević, M.**, Chaos theory and Systemic dynamics in educations, Časopis za promet POVA Zagreb, 2006.

**Radovi objavljeni u časopisima nacionalnog značaja**

1. **Tomašević, M.**, Razmatranje pouzdanosti u procesu konstruiranja strojnih elemenata, Pomorski fakultet, Split, 2002.
2. **Tomašević, M.**, Sistem dinamički simulacijski model pouzdanosti dizel motora M 503 A-2 pouzdanost tehničkih sistema, Pomorski fakultet, Split, 2004.
3. **Tomašević, M.**, Pouzdanost sistema i teorija Markovljeva, Pomorski fakultet, Split, 2005.
4. **Tomašević, M.**, Oršulić, M., Predviđanje pouzdanosti broskog dizel motora, Pomorski fakultet, Split, 2006.