

# Metoda i primjena stabla odlučivanja u dijagnostici i upravljanju

---

Munivrana, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:018557>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET

KARLO MUNIVRANA

METODA I PRIMJENA STABLA ODLUČIVANJA U  
DIJAGNOSTICI I UPRAVLJANJU

DIPLOMSKI RAD

SPLIT, 2024.

SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET

STUDIJ: BRODOSTROJARSTVO

METODA I PRIMJENA STABLA  
ODLUČIVANJA U DIJAGNOSTICI I  
UPRAVLJANJU

DIPLOMSKI RAD

KOMENTOR:

Izv. prof. dr. sc. Joško Šoda

MENTOR:

Doc. dr. sc. Ivana Golub Medvešek

STUDENT:

Karlo Munivrana(MB:0171281173)

SPLIT, 2024.

## SAŽETAK

Ovim diplomskim radom analizirala se složenost dijagnostike i upravljanja brodskih strojni sustava. Glavni cilj rada bazirao se na istraživanju, analiziranju i prikazivanju primjene metode stabla odlučivanja u dijagnostici i upravljanju brodskih strojnih sustava. Svrha rada bila je praktično prikazati proces izgradnje binarnog stabla odlučivanja sustava odgovornog za hlađenje brodskog motora. Na temelju, logičkog modela koji je razvijen u ovom diplomskom radu, potvrđena je prednost navedene metode koja se očituje u jednostavnosti, transparentnosti i identifikaciji bitnih varijabli. Prikazana je mogućnost jednostavne interpretacije rezultata i donošenje informirane odluke na temelju vizualnih podataka.

**Ključne riječi:** *stablo kvarova, stablo odlučivanja, pouzdanost, dijagnostika, procjena rizika.*

**Commented [IV1]:** Procjena rizika? Rizik otkaza? Dijagnostika rizika?

## ABSTRACT

This master's thesis analyzed the complexity of diagnosing and maintenance of ship machinery systems. The main objective of the thesis was to investigate, analyze, and demonstrate the application of decision tree methodology in the diagnosis and management of ship machinery systems. The purpose of the thesis was to practically illustrate the process of constructing a binary decision tree responsible for the cooling system of the ship's engine. Based on the logical model developed in this thesis, the method's advantages were confirmed by simplicity, transparency, and identifying key variables. The thesis demonstrated the ability to interpret results easily and make informed decisions based on visual data.

**Keywords:** *fault tree, decision tree, reliability, diagnostics, risk evaluation.*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. POUZDANOST I ODRŽAVANJE BRODSKIH SUSTAVA</b> .....	<b>3</b>
2.1. POJAM POUZDANOSTI I VRSTE POUZDANOSTI.....	3
2.2. RIZIK I UPRAVLJANJE RIZICIMA .....	9
2.3. KVAR I VRSTE KVAROVA .....	11
2.4. ODRŽAVANJE BRODSKIH SUSTAVA .....	15
<b>3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA</b> .....	<b>21</b>
3.1. SUSTAVI ZA DIJAGNOSTIKU KVAROVA .....	23
3.2. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA MODELU .....	24
3.3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA HARDVERU .....	29
3.4. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA ISKUSTVU .....	30
<b>4. STABLO ODLUČIVANJA</b> .....	<b>33</b>
4.1. ELEMENTI STABLA ODLUČIVANJA .....	35
4.2. KREIRANJE STABLA ODLUČIVANJA .....	38
4.3. ODLUČIVANJE I TEORIJA ODLUČIVANJA .....	43
4.4. SOFTVERSKI ALATI ZA IZRADU STABLA ODLUČIVANJA .....	50
<b>5. IZGRADNJA LOGIČKOG MODELA STABLA ODLUČIVANJA</b>	<b>53</b>
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>59</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>60</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>62</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>63</b>
<b>POPIS KRATICA</b> .....	<b>64</b>

## 1. UVOD

Dijagnostika i upravljanje su temeljni elementi koji osiguravaju sigurnost i efikasnost brodskih strojnih sustava. Precizna dijagnostika omogućava pravovremeno otkrivanje i identifikaciju kvarova ili potencijalnih problema, čime se smanjuje rizik od ozbiljnih oštećenja i produženih zastoja. Upravljanje strojnim sustavima uključuje kontinuirano praćenje i optimizaciju rada svih komponenti, što doprinosi povećanju pouzdanosti i dugovječnosti sustava. Odabir i primjena odgovarajuće dijagnostičke metode može značajno utjecati na pouzdanost brodskih strojnih sustava, obuhvaćajući njegove tehničke i ekonomske aspekte. Tehnički aspekti sustava odnose se na performanse, sigurnost i dugoročnost sustava, a ekonomski aspekti uključuju troškove implementacije, potencijalne uštede kroz efikasnost sustava te troškove održavanja. Primarni cilj svake brodske kompanije je postići optimalnu ravnotežu između tehničke učinkovitosti i ekonomske isplativosti. Odnosno, kompanije teže postizanju rezultata koji osiguravaju pouzdanost sustava, ali u skladu sa sigurnosnim zahtjevima i uz minimalne troškove.

Jedna od takvih metoda koji se primjenjuju jest metoda stabla odlučivanja. Metoda stabla odlučivanja danas je jedna od najraširenijih metoda koji se primjenjuju ne samo u pomorskoj industriji, već i u drugim djelatnostima (poput bankarstva, građevinarstva, zdravstva itd.). Metoda se koristi za klasifikaciju i predikciju na temelju strukturiranih podataka. Ovakav pristup nudi mogućnost vizualizacije i olakšane interpretacije problema koji se analizira.

Cilj ovog diplomskog rada je istražiti, analizirati i prikazati primjenu stabla odlučivanja u dijagnostici i upravljanju brodskih sustava. Svrha rada je ilustrirati kako se primjenom stabla odlučivanja olakšava vizualizacija i interpretacija složenih dijagnostičkih problema, što olakšava i ubrzava proces donošenja odluke.

Glavna hipoteza rada je da primjena metode stabla odlučivanja u dijagnostici i upravljanju rezultira transparentnom i jednostavnom interpretacijom rezultata i donošenjem odluka temeljenih na vizualnim podacima.

Kako bi se dokazala postavljena hipoteza te ostvario cilj i svrha rada, korištene su metode koje uključuju kreiranje stabla kvarova sustava za hlađenje broskog motora, primijenjena je Booleova algebra kako bi se omogućilo logičko modeliranje i analiza sustava na temelju binarnih varijabli, zatim je na temelju podataka dobivenih Rauzyevim principom konstruirano binarno stablo odlučivanja.

Rad je podijeljen na pet poglavlja. Drugo poglavlje se odnosi na pojam pouzdanosti i vrste pouzdanosti, rizik i proces procjene rizika, zatim kvar i vrste kvarova te održavanje brodskih sustava. Treće poglavlje obrađuje temu dijagnostike kvarova na brodu, metode dijagnostike te koji sve sustavi dijagnostike danas postoje. U četvrtom poglavlju se objašnjava stablo odlučivanja, način izrade stabla te softverski alati za izradu stabla. U petom poglavlju je odabran brodski sustav i modelirano je stablo odlučivanja. U posljednjem poglavlju donesen je zaključak na temelju cjelokupne analize i prikazanog primjera primjene dijagnostičke metode stabla odlučivanja.

## 2. POUZDANOST I ODRŽAVANJE BRODSKIH SUSTAVA

U svim velikim sustavima, pa tako i u brodskim, svaki dio je dizajniran za specifičnu funkciju i cijeli sustav će raditi besprijekorno sve dok svaki pojedini dio obavlja svoju zadaću. Međutim, s vremenom pouzdanost pojedinih komponenti će opadati te kvar bilo kojeg dijela sustava dovodi do rizika pravilne funkcionalnosti sustava. Kako bi se izbjegli nepotrebni rizici i nepravilnost sustava, potrebno je usvojiti i primjenjivati neku od metoda za pravovremenu detekciju kvarova [1].

Primjena dijagnostičkih metoda uvelike utječe na pouzdanost brodskih sustava. U ovom poglavlju su objašnjeni pojmovi poput vrste i pojam pouzdanosti, rizik i proces procjene rizika, zatim pojam kvara te pristupi i proces održavanja brodskih sustava.

### 2.1. POJAM POUZDANOSTI I VRSTE POUZDANOSTI

Pouzdanost se (*engl. Reliability*) definira kao vjerojatnost da će navedeni sustav adekvatno zadovoljiti svoju namjenu u predviđenom periodu vremena pod određenim uvjetima rada. Vrlo često se pouzdanost poistovjećuje s pojmovima kao što su sigurnost i kvaliteta. Pouzdanost je varijabilan pojam, stoga je često teško odredit točnu pouzdanost nekog sustava ili komponente, tj. točan podatak koji će ukazati na to da će se kvar dogoditi baš u tom određenom trenutku. Temeljem informacija dobiveni od strane proizvođača opreme, na temelju prijašnjih iskustava i uz adekvatnim uvjetima rada, može se približno ustanoviti trajanje pouzdanosti sustava ili komponente [2].

Kao što je već navedeno, pouzdanost nije konstantna karakteristika, što znači da može varirati ovisno o različitim faktorima. Teorija pouzdanosti bavi se proučavanjem pouzdanosti, pritom se oslanjajući na teoriju vjerojatnosti. Da bi smo razumjeli pouzdanost, moramo razumjeti pojam vjerojatnosti [2].

Vjerojatnost (*engl. Probability*) se definira kao mogućnost pojave nekog specifičnog događaja. Gledano matematički, vjerojatnost možemo prikazati pomoću dva broja, nula i jedan, gdje nula predstavlja da se događaj neće ostvariti, dok jedan predstavlja ostvarivanje određenog događaja. Ako je događaj A (vjerojatnost događaja A) predstavljena kao  $P(A)$ , definira se kao omjer broja događaja koji odgovaraju događaju A i ukupnog broja drugih mogućih događaja u skupu uzroka.



Vjerojatnost je osnovni koncept u statistici, ekonomiji te u mnogim drugim znanostima. Koristi se pri kvantificiranju i predviđanju mogućih ishoda, analize rizika te u donošenju odluka u slučaju nesigurnosti ishoda [2].

Postoje četiri vrste pouzdanosti [2]:

- pouzdanost s obzirom na slučajne kvarove,
- pouzdanost s obzirom na dotrajalost,
- složena pouzdanost te
- pouzdanost uz zahvate.

Pouzdanost s obzirom na slučajne kvarove temelji se na načelu koji se naziva početna populacija komponenata. Ukupni broj komponenata predstavlja broj ispravnih komponenata s kojim je sustav započeo rad u određenom vremenskom period i taj broj predstavlja početnu populaciju komponenata

Primjerice, ako je pouzdanost za neki sustav 0,9 to znači da će prilikom obavljanja rada 90% operacija bit uspješnim, dok ostalih 10% će bit neuspješnim, tj. na 100 operacija 90 će ih završit bez kvara, dok preostalih 10 će završit s kvarom. Nadalje, ako sustav sadrži 100 komponenti s pouzdanošću od 0,9 možemo očekivati da će 90 komponenti ostati u funkciji nakon obavljenog rada, dok će 10 komponenti zakazati tijekom rada. [2].

Pouzdanost, koja je funkcija vremena, označava se oznakom  $R(t)$  i predstavlja omjer konačnog broja ispravnih komponenata nakon obavljenog rada u odnosu na početni broj komponenata, prikazana u sljedećem izrazu (1), [3]:

$$R(t) = \frac{N_I}{N} = \frac{N - N_F}{N} = 1 - \frac{N_F}{N} \quad (1)$$

gdje je:  $R(t)$  – pouzdanost u funkciji vremena,

$N$  – početni (ukupni) broj komponenti,

$N_I$  – broj ispravnih komponenti nakon vremena  $t$ ,

$N_F$  – broj neispravnih komponenti nakon vremena  $t$ .

Navedeni izraz (1) predstavlja stanje na kraju obavljenog rada u promatranom vremenskom periodu. U slučaju da se traži specifičan dio promatranog vremena, jednadžbu je potrebno derivirati, čime se dobije izraz (2), [3]:

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dN_F}{dt} \quad (2)$$

Omjer komponenata u kvaru u odnosu na ispravne komponente se naziva indeks kvarova i definira se izrazom (3), [3]:

$$\lambda = \frac{1}{N_i} \frac{dN_F}{dt} \quad (3)$$

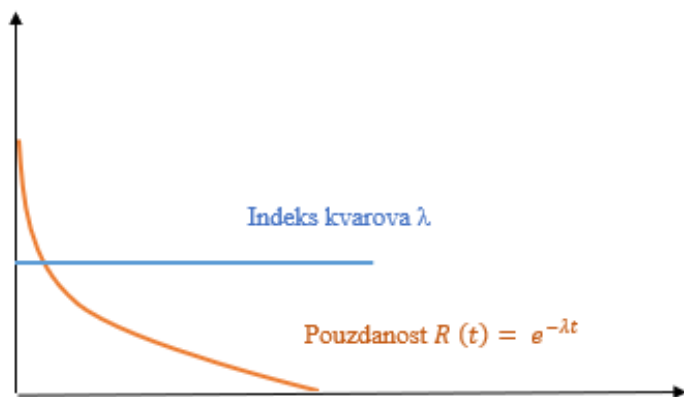
Uvrštavanjem izraza (3) u izraz (2) proizlazi sljedeći izraz (4), [3]:

$$\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = -\lambda \quad (4)$$

Integriranjem izraza (4) dobivamo konačnu formulu indeksa kvara koja je prikazana izrazom (5), [3]:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Izraz (5) se najviše primjenjuje u praktičnoj primjeni teorije pouzdanosti te prikazuje eksponencijalnu funkciju čijoj je tok prikazan na slici 1.

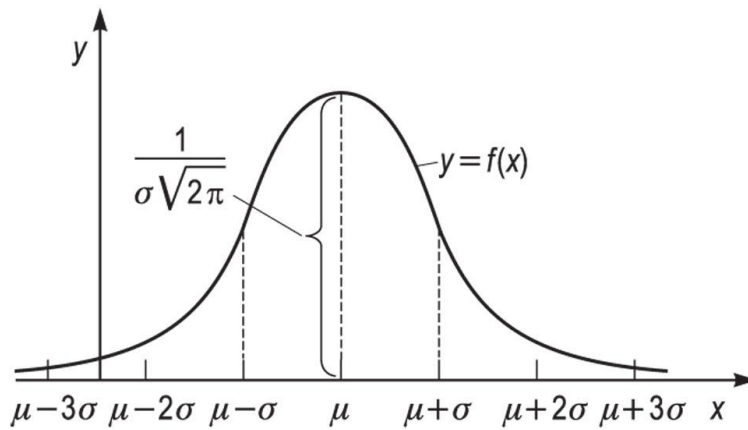


**Slika 1. Krivulja indeksa kvarova i krivulja pouzdanosti**

Prikazana krivulja pouzdanosti predstavlja jednadžbu pouzdanosti za komponente s konstantnim indeksom kvara. Kod razdiobe kvara može se uočiti da maksimalna vrijednost koju  $F(t)$  može poprimiti je jednaka jedan, i time je označena stopostotna pojava kvara. Vjerojatnost pojave kvara ne može nikad biti veća od 100%. Promatrajući sliku 1, možemo zaključiti kako je pouzdanost u početku maksimalna te s vremenom ona eksponencijalno pada i asimptotski se približava nuli.

Takva kategorija kvarova još se naziva slučajnim kvarovima, a konstantni indeks se naziva indeksom slučajnih kvarova. Ove jednadžbe primjenjuju se samo na komponentama koje nisu zahvaćene dotrajalošću, tj. nisu u kvaru, te su uspješno prošle period uhadavanja [2].

Pouzdanost s obzirom na dotrajalost prvenstveno ovisi o pravovremenom održavanju. Kontinuiranim radom komponenta gubi svoju kvalitetu i sposobnost pravilnog obavljanja rada, što dovodi do dotrajalosti koja prati normalnu Gaussovu distribuciju (funkcija gustoće kvarova). Gaussova distribucija ili normalna raspodjela je u teoriji vjerojatnosti raspodjela vjerojatnosti kontinuirane varijable, koja izražava vjerojatnost da će se bilo koje promatranje naći između bilo koje dvije stvarne granice ili između realnih brojeva, protivnom teži nuli. Iz tih razloga Gaussova distribucija je idealna za prikazivanje vjerojatnosti pojave kvara, slika 2, [2].



Slika 1. Gaussova distribucija [2]

Pri normalnoj distribuciji najveći broj komponenti zakaže oko vremena  $\mu$  (na grafu srednja isprekidana linija). Vrijeme (t) označava starost komponente, gdje normalna distribucija prvenstveno ovisi o starosti komponente [2].

Izraz (6) za funkciju gustoće kvarova pri normalnoj distribuciji je:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-M)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

gdje je: M – prosječni vijek trajanja,

T – akumulirano vrijeme rada od početka i

$\sigma$  – standardna devijacija akumuliranog i prosječnog vijeka trajanja.

Standardna devijacija akumuliranog i prosječnog vijeka trajanja ( $\sigma$ ) prikazana je izrazom

(7) :

$$\sigma = \frac{\sum(T - M)^2}{N} \quad (7)$$

gdje je: N- broj kvarova zbog dotrajalosti.

Pouzdanost kod kvarova uslijed dotrajalosti postiže se integriranjem površine ispod funkcije gustoće kvarova od  $t$  do  $\infty$ , gdje se dobiva izraz (8), [3]:

$$R_W(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^t e^{-\frac{(T-M)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (8)$$

Složena pouzdanost (*engl. Combined Reliability*) predstavlja kombinaciju pouzdanosti u odnosu na slučajne kvarove i kvarove zbog dotrajalosti. Složena pouzdanost podrazumijeva praćenje pouzdanosti tijekom cijelog životnog vijeka komponente. Ona se dobije umnoškom pouzdanosti u odnosu na slučajne kvarove i kvarove zbog dotrajalosti, izraz (9), [3]:

$$R_S(t) = e^{-\lambda t} R_W(T) \quad (9)$$

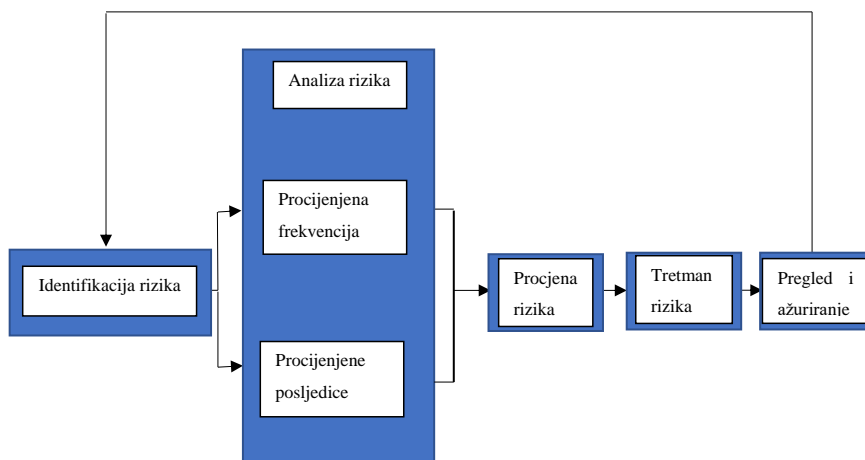
Pouzdanost uz zahvate temelji se na konfiguraciji sustava poznatog kao zalihost. Zalihost (*engl. Redundancy*) predstavlja konfiguraciju ili oblik koji određenom sustavu omogućuje kontinuirani rad usprkos kvaru jednog ili više broja komponenti. S obzirom na konfiguraciju imamo sustave sa zalihošću i sustave bez zalihosti. Sustav bez zalihosti jest serijski sustav. Kod serijskog sustava, kvar jedne komponente uzrokuje prekid rada cijelog sustava. U odnosu na serijski sustav, kod paralelnog sustava to nije isti slučaj. Prekid rada jedne komponente neće prouzrokovati da cijeli sustav zakaže, već će nastaviti sa daljnjim radom. S toga se pribjegava što je više moguće konfiguraciji sustava koji ima oblik paralelnog sustava. Iako je sustav sa zalihošću u većini slučajeva bolja opcija, ne smije se dugo čekati na popravcima i održavanjima. Ukoliko se zahvati i održavanja ne obave u planiranom roku, pouzdanost sustava značajno opada, usprkos tome što sustav i dalje može funkcionirati [3].

## 2.2. RIZIK I UPRAVLJANJE RIZICIMA

U pomorstvu, pojam rizik označava stupanj vjerojatnosti da će se neki neželjeni događaj dogoditi ili ostvariti. Rizik u pomorstvu može bit mogućnost pojave kvara, ozljede pri radu, nesreće na moru i sl. Ukratko, rizik predstavlja vjerojatnost negativnog ishoda prilikom plovidbenog pothvata [4].

Rizik je uvijek sveprisutan, vrlo rijetko se može u potpunosti ukloniti, no može se limitirati i umanjiti. Da bi se umanjio i samim time umanjila vjerojatnost neželjenog događaja, mora se razviti pravilna strategija procjene rizika i upravljanja istima. Procjena predstavlja proces identificiranja vrste rizika, utjecaja te vjerojatnosti pojave. Procjena rizika brodskih strojeva i uređaja obuhvaća kreiranje i primjenu teorije pouzdanosti za probabilističku analizu scenarija kvara [4].

Proces procjene rizika sastoji se od četiri koraka. Na slici 3 prikazani su koraci procjene rizika.



Slika 3. Proces procjene rizika

Sukladno slici 3, prvi korak u procjeni rizika jest identificiranje rizika. To podrazumijeva identificiranje nastanka rizika, zbog čega se pojavljuje, njegov izvor te uzroke i moguće posljedice.

Zatim, drugi korak je analiza rizika. Primjenjuje se za određivanje učestalosti pojave rizika te posljedica koje donosi rizik.

Neželjeni događaj, odnosno rizik, može imati više posljedica, stoga u analizi rizika se moraju uzeti u obzir svi mogući ishodi neželjenog događaja, te sukladno ishodu razviti strategiju upravljanja rizikom. Pri razvijanju strategije treba analizirati učinkovitost već postojećih sigurnosnih mjera, te ih dodatno osigurati ukoliko je to pri razvijanju strategije utvrđeno. Učestalost i posljedica rizika se kombiniraju kako bi se odredila razina (stupanj) rizika. U većini slučajeva razina i točnost informacija će varirati, kao i kvantitativnost istih, stoga je ponekad potrebno provođenje dodatnih analiza za procjenu rizika radi postizanja boljih rezultata.

Nakon analize rizika, treći korak jest procjena rizika. Rezultati koji su ostvareni prilikom analize se primjenjuju u procjeni rizika, te u donošenju odluka. Ostvareni rezultati analize se uspoređuju s kriterijima prihvatljivosti rizika. Procjena rizika prvenstveno služi za odlučivanje je li navedenom riziku potreban tretman ili ne.

Tretman rizika je četvrti i ujedno i posljednji korak. Opseg tretmana ovisi o prikupljenim podacima, poput utjecaja rizika, mogućnosti pojave i sl. Bitno je provesti tretman što je prije moguće, kako bi se izbjegli veći rizici, a samim time i gubitci i štete [4].

Za pravilnu procjenu rizika potrebno je definirati njegovu vrstu. Postoje više vrsta koji se razlikuju ovisno o učestalosti, mjestu i vremenu nastanka, broju faktora koji dovode do nepoželjnih događaja, načinu opisivanja istih itd.

Prema stupnju identifikacije, rizici se klasificiraju na [4]:

- specifične rizike, tj. rizike koji se u potpunosti mogu identificirati i čija se učestalost može utvrditi, te
- globalne ili generalne rizike, tj. rizike koje nije moguće u potpunosti identificirati i čija se učestalost ne može u cijelosti utvrditi.

Procjena rizika se provodi prije svakog posla kojeg se obavlja samo ako za taj navedeni posao nije unaprijed obavljena procjena. Ukoliko je procjena za navedeni posao ili radnju obavljena, treba provjeriti jesu li dobiveni podaci i dalje mjerodavni, te ukoliko nisu, provesti novu procjenu s novim podacima i pristupom [8].

Pristupi za procjenu rizika variraju od kvalitativnih, polu-kvalitativnih i kvantitativnih. Koji pristup će se primjenjivati u određenom vremenu ovisi o odluci organizacije te opsegom aktivnosti kojim se bavi. Primarni cilj svakog pristupa je ublažavanje rizika sa ključnom karakteristikom praktičnosti. Kvalitativni pristup je najjednostavniji, zahtjeva najmanje ulaganja i potrebnih vještina, no pruža najmanje informacija (uvida). Kvalitativni pristup je zasnovan na binarnim podacima, podaci koji mogu poprimiti samo dvije vrijednosti, nula i jedan. To znači da se kvalitativni pristup primjenjuje većinom za rizike poznatog ishoda i jednostavnije prirode. Kvantitativni pristup je suprotan kvalitativnom, kompliciraniji i zahtjevniji po pitanju ulaganja i potrebnih vještina, no pruža najveći uvid i donosi najviše informacija.

Kvantitativna metoda se najčešće koristi kod odlučivanja gdje treba odstupati od uobičajene prakse, posebno u slučajevima gdje su uključene značajne ekonomske implikacije. Stoga se kvalitativna i polu-kvalitativna metoda najčešće primjenjuje pri nižim stupnjevima rizika, dok se kvantitativna metoda može primjenjivati za sve stupnjeve rizika [5].

### 2.3. KVAR I VRSTE KVAROVA

Sustav može imati tri radna stanja, to su „u radu“, „u kvaru“ i „u zastoju“. Osim navedenih stanja, u realnom vremenu sustav može biti u više različitih sustava koji se nalaze između „u radu“ i „u kvaru“.

Stanje sustava u realnom vremenu opisuje stupanj funkcionalnosti i mogućnosti obavljanja zadane funkcije, stoga je potrebno definirati različita stanja funkcionalnosti [6].

Stanja sustava opisana su na četiri načina [6]:

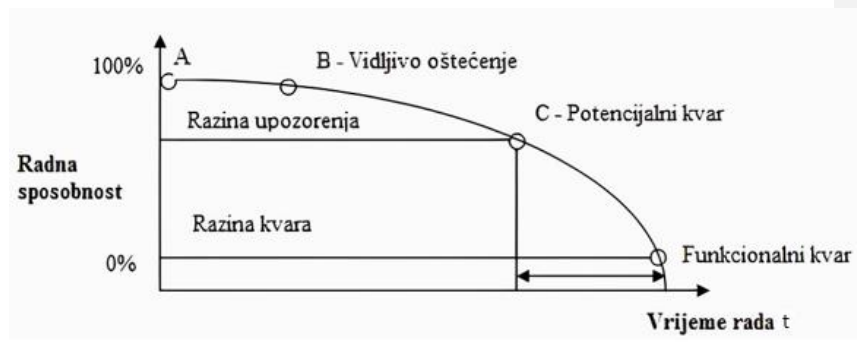
- Oštećenje (*engl. Damage*) predstavlja stanje sustava u kojem sustav, iako je prisutno oštećenje, i dalje može funkcionirati. Ukoliko se oštećenje ne ukloni, može preći u kvar.
- Greška (*engl. Error*) je odstupanje od željenih intervala ili parametara vrijednosti tehničke ispravnosti. Sposobnost uređaja da pravilno obavlja svoju funkciju će s vremenom opadati, te se to naziva promjena radne sposobnosti u vremenu eksploatacije.



- Kvar (*engl. Failure*) predstavlja promjenu stanja sustava u kojem jedan dio ili više dijelova ne funkcioniraju, te samim time onemogućuju pravilan rad sustava, te naposljetku i prekid rada.
- Zastoj (*engl. Stoppage*) je najteži oblik u kojem sustav prekida rad zbog prevelikog oštećenja jednog ili više dijelova sustava, što može dovesti do pogubnih utjecaja za sigurnost.

Generalno gledano, kvar predstavlja nepravilan rad ili potpuni prekid rada komponente ili sustava. Svaki uređaj ili komponenta je projektiran da obavlja svoju funkciju po parametrima i režimima rada koji su unaprijed postavljeni. Naravno, ti se parametri s vremenom mogu mijenjati, što ovisi o situaciji i potrebama, no bitno je da uređaj “prati” i obavlja rad onako kako je projektirano. U trenutku kada uređaj to ne obavlja ukazuje na kvar ili grešku.

Primjerice, pumpa ulja za podmazivanje služi za protok ulja koji podmazuje određene dijelove stroja. Na ulazu u pumpu i na izlazu definirane su granice tlakova i protok koje pumpa mora ostvariti. U ovom slučaju, kvar pumpe nastaje kada protok ili tlak prelazi zadane granice. Pumpa i dalje radi, ali nepravilno, te može prouzročiti kvar drugih komponenti u sustavu. Takvo stanje se generalno naziva greška. Opći prikaz promjene radne sposobnosti u vremenu eksploatacije je prikazan na sljedećoj slici 4, [6].



Slika 2. Promjena radne sposobnosti u vremenu eksploatacije [6]

Potencijalni kvar je stanje u kojem sustav obavlja svoju funkciju sa smanjenom efikasnošću i sigurnošću, te ukoliko se ne sanira potencijalno oštećenje, može dovest do funkcionalnog kvara.

Funkcionalni kvar je stanje u kojem sustav ne obavlja više svoju funkciju. Vremenski interval između potencijalnog i funkcionalnog kvara je razdoblje u kojem možemo intervenirati i sanirati kvar ili grešku. Takav vremenski interval se još naziva i vrijeme reakcije [6].

Kako bi se lakše otklonio kvar, potrebno je poznavati okvirno kad može nastupiti kvar. Vrijeme do kvara (*engl. Time to Failure - TTF*) je vremenski interval od početka rada komponente, kada ona obavlja svoju funkciju, do trenutka kada kvar nastupa. S obzirom da kvar može nastupiti u bilo kojem trenutku, vrijeme do kvara je ništa drugo nego slučajna varijabla, koja nam samo okvirno pruža uvid kad bi kvar mogao nastupiti [7].

Gustoća kvara (*engl. Failure Density*) je veličina koja ovisi o vremenu (označena sa  $f(t)$ ) te je definirana graničnom vrijednošću omjera vjerojatnosti nastupanja kvara u vremenu  $\Delta t$  koje je povezano sa vremenom  $t$  proteklo od  $t = 0$ , tj. trenutka kada je komponenta uključena u rad, te vremena  $\Delta t$  ako ono teži nuli. Izraz (10) prikazuje gustoću kvara [7]:

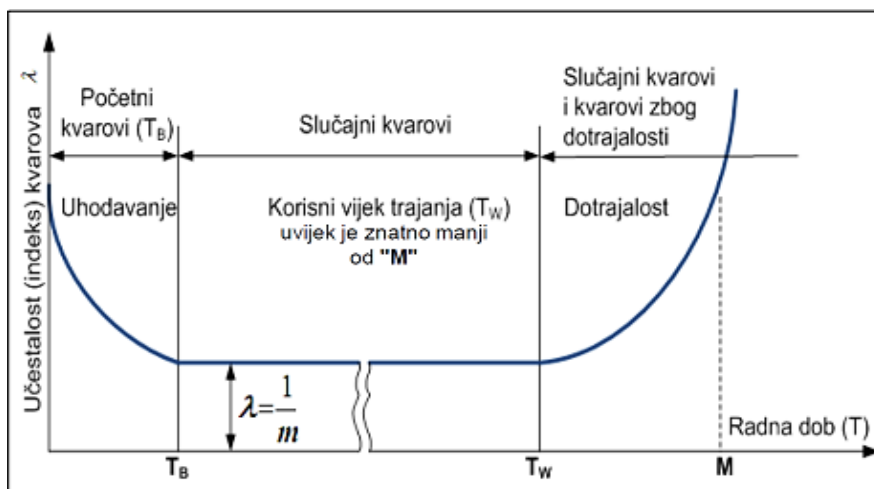
$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P \{t < T_f \leq t + \Delta t\}}{\Delta t} \quad (10)$$

Učestalost kvara (*engl. Failure Rate*) vremenski je ovisna veličina (označena sa  $\lambda(t)$ ), definirana graničnom vrijednošću omjera vjerojatnosti nastupa kvara u vremenu  $\Delta t$  koje je povezano sa vremenom  $t$  proteklo od  $t = 0$ , tj od trenutka kada je komponenta uključena u rad, te vremena  $\Delta t$  ako ono teži nuli, pri tom da je komponenta cijelo to vrijeme u radnom stanju dulje od vremena  $t$ . Izraz (11) za učestalost kvara glasi [7]:

$$\lambda = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P \{t < T_F \leq t + \Delta t / T_F > t\}}{\Delta t} \quad (11)$$

Statistički kvalitativni vremenski dijagram učestalosti kvarova, prikazan na slici 5, prikazuje tri karakteristična razdoblja koja se pojavljuju tijekom radnog vijeka komponente, a to su [7]:

- razdoblje s padajućom učestalošću kvara
- razdoblje s konstantnom učestalošću kvara te
- razdoblje s rastućom učestalošću kvara.



Slika 3. Kvalitativni vremenski dijagram učestalosti kvarova [7]

Razdoblje s padajućom učestalošću kvara je razdoblje u kojem se pojavljuju prvi znači kvara, tj. kvarovi koji nastaju u početnom razdoblju radnog vijeka komponente ili sustava. Takav tip kvara ima slučajnu razdiobu tijekom vremena (nisu očekivani), te se uglavnom prepisuju nedostatku unutar materijala ili proizvodnom procesu. Navedeni kvar se rješava odmah u početku uhodavanja, na način da se svaka komponenta s greškom zamijeni s ispravnom odgovarajućom komponentom [7].

Razdoblje s konstantnom učestalošću kvara je razdoblje tijekom standardnog radnog vijeka komponente ili sustava. Kvarovi nastali u tom razdoblju su uglavnom kvarovi prouzrokovani neželjenim utjecajima na rad komponente. Oni se ne mogu riješiti ni pravilnim uhodavanjem ni učestalim održavanjem [7].

Razdoblje s rastućom učestalošću kvara je razdoblje gdje se kvarovi pojavljuju pri završnim razdobljima radnog vijeka komponente. Kvarovi koji nastupaju u tom periodu su obično prouzrokovani starošću komponente, zamoru materijala, istrošenosti i sl. Svaka komponenta ima svoj koristan vijek trajanja, koji predstavlja vremenski period od završetka uhodavanja do pojave kvara zbog dotrajlosti. Ovo je najčešći oblik kvara na brodu, koji se pravovremenim održavanjem može s lakoćom sanirati [7].

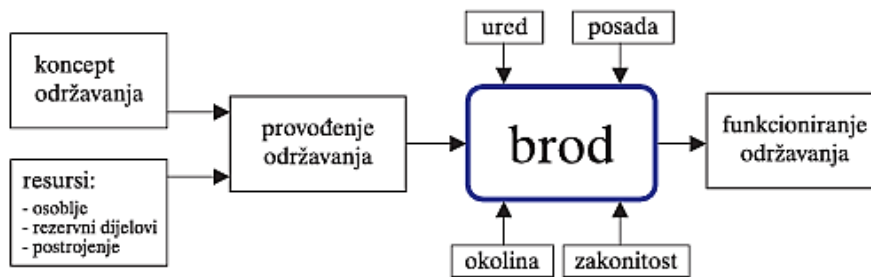
Pojava kvara u vremenu je varijabilna vrijednost, odnosno slučajan proces tijekom radnog vijeka komponente koji se ne može predvidjeti. S obzirom da su karakteristike navedenih procesa slučajne promjenjive, pri tome zaključujemo da je i obrada tih istih podataka zasnovana na metodama teorije vjerojatnosti i matematičke statistike. Prema tome, s obzirom na utjecaj, postoje svojstveni i nesvojstveni kvarovi. Svojstveni (inherentni) kvarovi spadaju pod kvarove gdje se utjecaj tj. uzrok kvara nalazi u samom uređaju. Pod svojstvene kvarove ubrajamo početne kvarove, slučajne i vremenske kvarove. Nesvojstveni (prouzrokovani) kvarovi spadaju pod kvarove koji su prouzrokovani vanjskim čimbenikom, tj. uzrok se ne nalazi unutar samog uređaja. Pod vanjskim uzrocima se podrazumijeva na nepravilno rukovanje, sudar broda ili sraz broda te utjecaj više sile, poput požara ili prodora vode [7].

#### **2.4. ODRŽAVANJE BRODSKIH SUSTAVA**

Kako bi brodski sustav zadržao svoju pouzdanost i stupanj korisnog djelovanja, mora se provoditi redovno održavanje pogona. Uz pravovremeno i pravilno održavanje, vijek trajanja i sama pouzdanost uvelike raste. Održavanje mora biti planirano, korektno i uz što manje troškova. Svaki zastoj povećava ukupni trošak i gubitak za kompaniju, stoga je u interesu kompanije, a i same posade, da do toga rijetko dolazi [9].

Plan održavanja broskog pogona se prvenstveno zasniva na uputama proizvođača. Princip održavanja po vremenu, koji je jedan od najraširenijih pristupa za održavanje na brodu, nije najdjelotvorniji način za provođenje održavanja. Takvi pristup je nepouzdan, ovisi o mnogo promjenjivih faktora na kojih se ne može uvijek utjecati, te generalno je nepredvidiv način održavanja broskog pogona. Stoga kompanije pribjegavaju načinima održavanja koji im je najpovoljniji po pitanju troška i pouzdanosti [9].

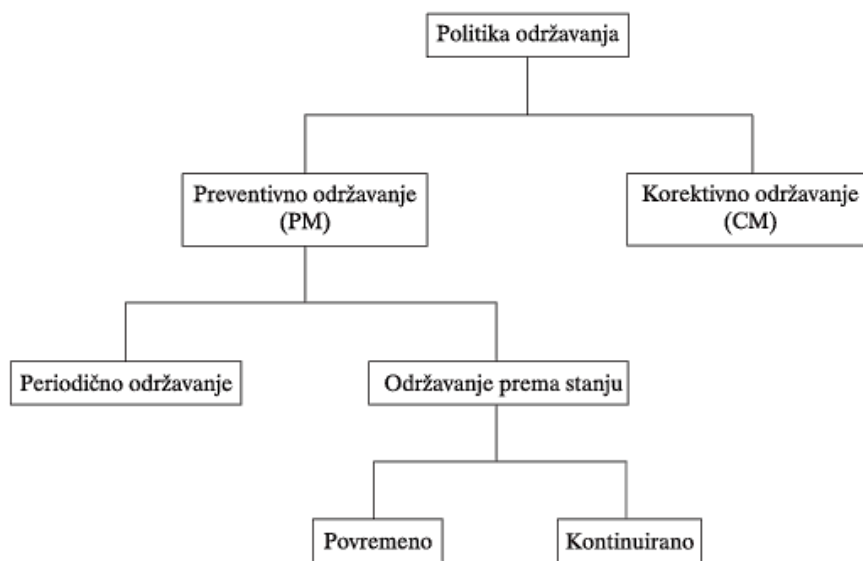
U pomorstvu, održavanje bi predstavljalo niz radnji koje je potrebno poduzeti s ciljem da se zadrži integritet i pouzdanost broskog sustava. Primarni cilj održavanja je ostvarivanje efikasnog praćenja broda i njegovih sustava uz minimalne troškove i da zadovoljavaju sigurnosnim zahtjevima. Održavanje predstavlja organizacijsku cjelinu, koja je sadržana od resursa (osoblje, uređaji, zamjenski dijelovi itd.), metode (postupci i informacije), te objekta održavanja (brod i brodski sustavi). Četiri su faktora koja uvelike utječe na funkcionalnost procesa održavanja broda i brodskih sustava, a koja su prikazana na slici 6.



**Slika 4. Proces broskog održavanja [9]**

Prema slici 6, u procesu broskog održavanja uključen je ured (direktno od strane posade ili indirektno od strane ureda koji se nalazi na obali-operatori), zatim okolina u kojoj spada promet, luke, klima, uvjeti na moru itd., zakonitost (propisi i pravila koje brod mora zadovoljiti), te na samom kraju održavanje. Brod je centralni dio održavanja, te se većina faktora prilagođava brodu (osim sigurnosnih propisa i pravila). Resursi koji su uključeni u održavanje broda su sukladni uputama koje su specificirane za koncept održavanja koji se provodi na brodu. Koncept održavanja definira način i postupak održavanja, tj. funkcionalnost održavanja. Način održavanja podrazumijeva reakciju operacije sustava, što uključuje promjene sustava poput pogoršanja, postupnog slabljenja te nastup kvara. Troškove održavanja određuje funkcionalnost održavanja, te se ti troškovi poslije koriste u vrednovanju efikasnosti koncepta održavanja. Pod vrednovanjem efikasnosti koncepta održavanja se također ubraja i usklađenost sa sigurnosnim propisima. Također, u konceptu održavanja sadržane su i specifikacije preventivnih i korektivnih zadataka koji su nužni da vrate ili održavaju opremu u odgovarajuće stanje. Plan izvršenja zadataka, resursi potrebni za izvršenje te razina izvršenja zadataka su sastavni dio svakog koncepta održavanja [9].

S obzirom na sve složenije sustave koji se iz dana u dan sve više razvijaju, nužno je bilo razviti takav koncept održavanja koji bi zadovoljio svim potrebama, koji bi odgovarao sigurnosnim protokolima, a u isto vrijeme osigurao pouzdanost i funkcionalnost sustava uz što niže troškove održavanja. Kao što je navedeno, osnovni cilj održavanja je osiguranje funkcionalnosti sustava pod zadanim uvjetima uz minimalne troškove. Navedeni cilj se može ostvariti različitim konceptima i modelima održavanja, koji su navedeni na slici 7.



**Slika 5. Različiti pristupi održavanja [9]**

Korektivno održavanje (*engl. Corrective Maintenance - CM*) je održavanje koje se provodi tek nakon pojave kvara, te se zamjenom istrošenih ili pokvarenih dijelova sustava sustav vraća u radno stanje. Korektivno održavanje jedan je od najstarijih koncepta održavanja, i ujedno jedan od najjednostavnijih koncepta održavanja, iz razloga što se nije zahtijevala nikakva priprema aktivnosti održavanja, već kad nastupi kvar tek tad kreće proces održavanja. Također, korektivno održavanje je ujedno i najjeftinije, baš iz toga razloga što nema unaprijed planiranih priprema za održavanje.

U prijašnjim vremenima korektivno održavanje je ujedno bio i glavni koncept održavanja, no danas nije tako. Jedina prednost korektivnog održavanja je potpuna iskoristivost elemenata i dijelova brodskog sustava. No, nedostaci su znatno značajniji.

Glavni nedostatak korektivnog održavanja jest nepouzdanost sustava. Sustav je radio onoliko koliko je radila najslabija komponenta prije njezinog otkazivanja. Stoga je uvijek potrebno imati dovoljan broj rezervnih dijelova na brodu, što je kod ovakvog pristupa održavanja dolazilo nerijetko do nestašice rezervnih dijelova. Nadalje, nedostatak je što bi u nekim slučajevima kvar jedne komponente prouzrokovao kvar druge komponente, u nekim slučajevima i veći broj komponenti, stoga je teško procijeniti mogući rasplet kvara ako ne postoji unaprijed postavljen plan održavanja. Nedostatak je svakako i nizak stupanj iskoristivosti u eksploataciji, te nemogućnost planiranja aktivnosti održavanja. Uz sve navedene nedostatke, korektivno održavanje je danas sve rjeđe prisutno kao glavni koncept održavanja. Ono se i dalje provodi, ali samo na uređajima koji ne utječu na sigurnost i funkcionalnost broda kao većine, te se primjenjuje skupa sa drugim, prikladnijim konceptom održavanja (poput preventivnog održavanja). Većinom se korektivno održavanje primjenjuje na uređaje sekundarne važnosti, poput sanitarne i kuhinjske opreme [9].

Tijekom eksploatacije, kvaliteta i pouzdanost sustava opada, stoga je nužno provesti:

- mali popravak,
- srednji popravak te
- opći popravak.

Navedeni postupci se podrazumijevaju pod radnjama koji su potrebni za korekciju stanja promatranih elemenata, kako bi se sustav čim prije doveo približno početnim karakteristikama prije nastupa kvara. Mali popravak se provodi kada nastupi kvar sitnih dijelova koji ometaju pravilan rad stroja ili sustava, tj. elementi koji se obično najbrže potroše. Mali popravak omogućuje strojevima eksploatacijsku preciznost samo za operacije koje se trenutačno obavljaju na njima [9].

Srednji popravak je popravak kod kojeg je stroj izvan funkcije na duže vrijeme. Stroj se kompletno rastavlja, čisti, mijenjaju se istrošeni dijelovi, te se obavljaju sve dodatne radnje dok je stroj još na temeljnoj ploči. Srednji popravak ne garantira preciznost poput novog stroja. Opći popravak je najteži oblik popravka, kod kojeg se stroj rastavlja u potpunosti, skida sa temeljne ploče te se odvodi na remont u radionicu. Generalno, obavljaju se sve potrebne radnje koje se ne provode u srednjem i malom popravku. Opći popravci su ujedno i najskuplji popravci, te troškovi popravka mogu doseći i do 70% cijene novog stroja [9].

Preventivno održavanje (*engl. Preventive Maintenance - PM*) je održavanje koje se temelji na već unaprijed postavljenom planu održavanja, gdje se održavanje provodi i prije nastanka kvara. Nakon obavljenog procesa održavanja smatra se da su komponente dobre kao i nove. Preventivno održavanje se temelji na principu da se održavanje obavlja sukladno vremenskom intervalu, koja su unaprijed određena, bilo to godišnje, mjesečno ili po broju sati. U tom periodu vrši se obnova istrošenih dijelova, zamjena dijelova te održavanje kompletnog stroja, te pri obavljanju održavanja uzimaju se u obzir zahtjevi klasifikacijskog društva, preporuke proizvođača te smjernice propisane od strane sigurnosnih zahtjeva [9].

S obzirom na korektivno održavanje, preventivno održavanje znatno je sigurnije iz razloga što je unaprijed postavljen plan održavanja, međutim znatno je skuplji u odnosu na korektivno, zbog toga što se u većini slučajeva mijenjaju dijelovi koji su mogli još funkcionirati, samim tim gubi se na zamjenskim dijelovima što povećava ukupan trošak. Današnjim razvojem dijagnostike i nadzornih sustava omogućilo je puno efikasniji princip održavanja sukladno stanju u odnosu na periodični sustav. Takav princip je opće prihvaćen i od strane klasifikacijskih društava te je uz određene uvjete dozvoljeno preventivno održavanje zamijeniti za održavanje koje se bazira na stanju. To naravno nije primjenjivo na svim sustavima, već na određene stavke na koje se takav princip može primijeniti [9].

Preventivno održavanje obuhvaća sljedeće aktivnosti [10]:

- preventivne periodične preglede,
- kontrolne preglede,
- tehničku dijagnostiku,
- dijagnostika i otklanjanje slabih točaka u sustavu te
- popravke (male, srednje ili opće).

Preventivno održavanje se dijeli na:

- periodično održavanje i
- održavanje prema stanju.



Periodično održavanje (*engl. Periodic Maintenance - PM*) je održavanje temeljeno na vremenskom intervalu. Može bit baziran na kalendaru ili vremenu rada (broj sati rada). Većinom je prikladnije, i na brodu se prakticira, praćenje sukladno vremenu rada jer za kontinuirane procese i operacije prikladnije je praćenje broj ciklusa. Odabir perioda dijagnostičkih mjerenja je važan za prikupljanje odgovarajućih parametara za ocjenu stanja sustava. Period može i ne mora biti fiksna te se može prilagođavati u odnosu na potrebe. Ukoliko prilikom obavljanja periodičnih kontrola je utvrđeno da nema promjena, period provođenja kontrola se može produžiti, u protivnom ako dolazi do bržih i većih promjena, skratiti period provođenja kontrola [10].

Održavanje prema stanju (*engl. On-Condition Maintenance - OCM*) je održavanje sačinjeno od dva koraka. Prvi korak je procjena stanja, tj. kontrola ispravnosti komponenti zbog mogućeg kvara. Održavanje prema stanju može biti povremeno ili kontinuirano. Kod kontinuiranog održavanja kontinuirano se prate i mjeru parametri rada pogona, te se održavanje obavlja u slučajevima kada parametri prijeđu optimalne granice rada. Privremeno održavanje se obavlja vizualnim pregledom ili uz pomoć adekvatnih instrumenata. Za dobivanje točne slike stanja pogona potrebno je obavljati veći broj periodičnih mjerenja te pratiti promjene i fluktuacije u radu, jer samo sa jednim praćenjem se ne može dobiti točan uvid u problem. Na temelju prikupljenih informacija može se odrediti vremenski raspon u kojem će pogon raditi ispravno i kada bi kvar mogao nastupiti, te u skladu s prikupljenim podacima donijeti odluku o načinu obavljanja održavanja ili u nekim slučajevima samo jedna od aktivnosti održavanja.

Dijagnosticiranje stanja ostvaruje se s raznim matematičkim metodama. Strategije održavanja sukladno stanju možemo podijeliti na [10]:

- kontrolu parametara te
- kontrolu razine pouzdanosti.

Prema tome, održavanje sukladno stanju je ništa drugo već dijagnostički proces koji nam daje uvid u stanje sustava te planiranje aktivnosti održavanja. Time se eliminira nepotreban zastoja rada pogona i ostvaruje se veći efikasan rad [10].

Za pravilnu provedbu programa održavanja prema stanju potrebno je imati [10]:

- odgovarajuće instrumente i postupke,
- stručno osoblje,
- pogodnu organizaciju,
- raspoloživosti komponenti za inspeksijski pregled.

### 3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA

Dijagnostika kvarova je ključan proces u otkrivanju problema i pronalaženju uzroka kvara. Dijagnostika je prvi proces u održavanju brodskih sustava u dijagnosticiranju uzroka, stoga je bitno razviti jasnu politiku dijagnosticiranja kvarova. Nakon dijagnostike, idući korak je lokalizacija kvara, što podrazumijeva klasifikaciju različitih vrsta kvarova te ono najbitnije utvrđivanje mjesta nastanka kvara. To podrazumijeva klasifikaciju različitih vrsta kvarova te, ono što je iznimno bitno, utvrđivanje mjesta nastanka kvara. Zadnji korak je analiza kvara, to podrazumijeva veličinu, intenzitet i uzrok kvara [11].

Sustav dijagnostike se bazira prvenstveno na prikupljanje podataka povezanih sa kvarom, te tehničkim stanjem sustava kojeg se razmatra, a dobiveni se rezultati uspoređuju sa projektiranim podacima, te se na takvim mjerenjima donose zaključci. Princip reziduala se temelji na odnosu izmjerenih podataka sa podacima temeljenih na modelu. Rezidual je podatak koji ukazuje na kvar, ako je rezidual jednak nuli onda sustav pravilno funkcionira. Ako je odstupanje od nule veliko, sustav je u kvaru [12].

Gledano s aspekta održavanja, razlika između dijagnostike i automatskog upravljanja je ta što se kod automatskog upravljanja mjeri samo jedna fizikalna veličina, te nakon mjerenja se i upravlja tom istom veličinom. Dijagnostiku čine objekt dijagnosticiranja, sredstva dijagnosticiranja i operater. Dijagnostika podrazumijeva mjerenje i upravljanje čitavim nizom veličina koje utječu na funkcionalnost sustava i upravo zato je kompleksnija u usporedbi s automatskim upravljanjem [11].

Dva su standardna načina ostvarenja dijagnosticiranja, a to su test dijagnostika te funkcionalna dijagnostika. Test dijagnostika je dijagnostika kod koje se na zadani objekt djeluje sa test-varijabilnim veličinama i na temelju odbijenih rezultata izvodi se zaključak o stanju objekta. Kod funkcionalne dijagnostike zaključci se donose na temelju ponašanja objekta uz primjenu radnih veličina [11].

Formiranje parametara u dijagnostici je složen i neformalan proces, što znači da se može obaviti na više načina. Prikupljanje informacija zahtjeva dosta uloženog vremena, što može utjecati na krajnji rezultat, stoga je potrebno razviti pravilnu strategiju prikupljanja informacija koja je djelotvorna, a u isto vrijeme i ne zahtjeva puno vremena.

Stoga postoje dva načina prikupljanja informacija [11]:

- povećanje brzine prikupljanja informacija,
- prognoziranje zasnovano na bazi neophodnih dobivenih podataka.

Prognoziranje je zasnovano na bazi ostvarivanja slučajnih procesa promjenjivih parametara kvalitete rada u nekom određenom vremenskom periodu. Prilikom dijagnosticiranja složenijih sustava, treba uzeti u obzir različitu prirodu nastalih kvarova, poznavati broj kontrolnih točaka sustava te brzi proces protjecanja neispravnosti u sustavu. U takvim situacijama kada su u pitanju složeniji sustavi najjednostavniji pristup je metoda postupnih povezanih ispitivanja, kako sustav u cijelosti, tako i svaka njegova komponenta zasebno [11].

Dijagnostika je izrazito složen i zahtjevan proces iz više razloga [19]:

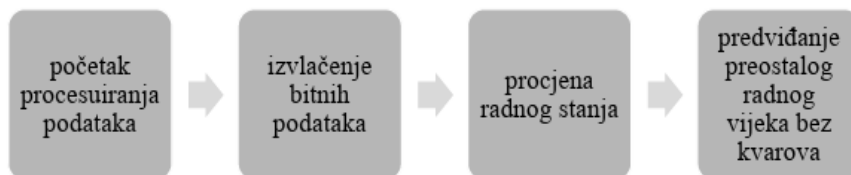
- Veliki dio postrojenja nadzire se i kontrolira iz jedne kontrolne sobe. Prikupljaju se stotine procesnih mjerenja.
- Iako se provodi veliki broj mjerenja, mjeri se samo mali dio ukupnog broja procesnih varijabli.
- Postrojenja su izrazito složeni procesi. Postoje mnogi putovi koji povezuju interakcije između procesnih varijabli te visoko integrirane procesne jedinice.
- Potrebno je prepoznati veliki broj grešaka koji se pojavljuju u postrojenjima
- Širenje greške može biti brzo i utjecati na nekoliko jedinica istovremeno (u odnosu na brzinu djelovanja). Budući da se poremećaji tlaka i protoka šire brzinom zvuka, simptomi kvara mogu se pojaviti gotovo sigurno daleko od izvora kvara.
- Kontrolni i rezervni sustavi mogu biti komplicirani i imati više ciljeva i namjena. Operateru možda nije očita namjera i svrha koja stoji iza dizajna kontrolne sheme. Stoga bi operater mogao imati poteškoća u razumijevanju kako i zašto proces reagira onako kako reagira tijekom smetnje. Bez dovoljnog razumijevanja kontrolnih sustava, aktivni alarmi ne mogu ništa doprinijeti rješavanju uzroka smetnje.
- Dijagnostika uključuje sintezu velike količine informacija, uključujući prijenos mase i topline, statiku i dinamiku fluida, termodinamiku, kinetiku reakcije, fizikalna i kemijska svojstva procesa.
- Mjerna nesigurnost, degradacija senzora i pogreške u kalibraciji smanjuju vjerovanje u generirane hipoteze greške.
- Moguće su ozbiljne posljedice ako se kvar ne otkrije, dijagnosticira i ne ispravi na vrijeme. Velika mogućnost gubitka stvara pritisak na operatera da reagira i djeluje.

Ukratko, lociranje izvora kvarova u procesnim postrojenjima prilično je složeno i zahtijeva integraciju brojnih vrsta znanja.

### 3.1. SUSTAVI ZA DIJAGNOSTIKU KVAROVA

Sustav za dijagnostiku kvarova u pravilu započinje svoju funkciju tek nakon nastupanja kvara. Sam proces sastoji se od niza koraka, od kojih je prvi zaprimanje signala dobivenih od strane senzora koji su ugrađeni s ciljem da prikupljaju sve relevantne podatke. Ti podaci nam ukazuju na istrošenost pojedinih komponenti u sustavu, kao i uzrok nastanka kvara. Idući korak je ostvarivanje jasne slike radnog stanja sustava procjenom vrijednosti radnih parametara tokom određenog vremenskog perioda, sve u svrhu procjene stupnja istrošenosti pojedinih komponenti (kao i istrošenosti sustava kao cjelina). Zadnji korak u dijagnosticiranju jest predviđanje preostalog životnog vijeka sustava koristeći adekvatne matematičke modele [12].

Nakon što se otkrije odstupanje, može se upotrijebiti jedna ili više dijagnostičkih strategija kako bi se s abnormalnih simptoma prešlo na specifične potencijalne kvarove. Dijagnostički sustav prvo pokušava identificirati poremećaj procesa uspoređujući odstupanja senzora s pohranjenim obrascima mjerenja u svojoj bazi podataka. Ovaj početni pregled smetnji koristi se za prepoznavanje uobičajenih kvarova (tj. onih koji su prethodno dijagnosticirani i pohranjeni). Ako se odstupanja procesa ne podudaraju s pohranjenim uzorcima, sustav tada primjenjuje dijagnostičku strategiju temeljenu na modelu [11]. Sam proces dijagnosticiranja je prikazan na slici 8.



Slika 6. Proces dijagnostike [12]

Ključni dio svakog kvalitetnog predviđanja kvara jest da se svi prikupljeni podaci konvertiraju u korisne informacije koje nam ukazuju na pravo stanje stroja, što uključuje istrošenost pojedinih komponenti te sustava gledanog u cijelosti. Predviđanje u realnom vremenu je sačinjeno od procesuiranja prikupljenih podataka, zatim iz tih podataka je potrebno raščlaniti one bitne koji ukazuju na cjelokupno stanje, procijeniti stanje uz pomoć navedenih podataka te predvidjeti preostalo radno vrijeme bez kvara. U slučaju pojave znakova istrošenosti u početnom stadiju, primjenjuju se dijagnostičke metode.

Odabir metode dijagnostike ovisi o stupnju istrošenosti i vrsti kvara, kao i slobodnom odabiru kompanije [11].

Postoje razne metode dijagnostike kvarova. Te metode variraju od jednostavnijih do kompleksnih. Neke metode zahtijevaju puno više informacija dok pojedine metode zahtijevaju samo podatke prijašnje dijagnostike. Stoga je glavna podjela metoda dijagnostike kvarova sljedeća [12]:

- dijagnostika kvarova zasnovana na modelu,
- dijagnostika kvarova zasnovana na hardveru te
- dijagnostika kvarova zasnovana na iskustvu.

Kada i koja će se metoda koristiti, ovisi o više varijabli, poput učestalosti kvara, vrsti kvara, stručnoj spremi osoblja (operatera) te stupnju razvijenosti opreme za nadzor i dijagnostiku. Neće svaka metoda odgovarati za pojedine kvarove, stoga je bitno znati prepoznati kada i koja je najučinkovitija u pojedinom trenutku.

### **3.2. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA MODELU**

Dijagnostika kvarova zasnovana na modelu je dijagnostika koja se oslanja na modelu koji je razvijen na temelju razumijevanja fizike i prirode sustava ili nekog procesa. Pristupi temeljeni na modelu oslanjaju se na razumijevanje temeljnih mehanizama ili ponašanja sustava. Nasuprot tome, strategije temeljene na iskustvu povezuju obrazac uočenih abnormalnih simptoma izravno s greškom.

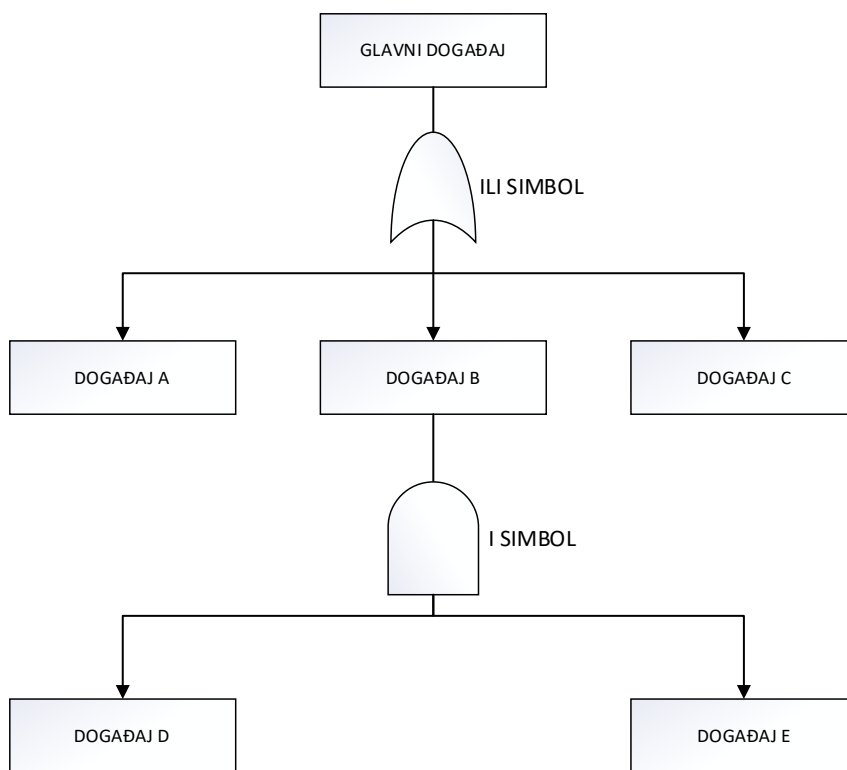
Prednost dijagnostičkih strategija temeljenih na modelima jest ta što nadoknađuju ograničenja koja su prisutna kod pristupa temeljenih na iskustvu. Poznavanje temeljnih mehanizama može pomoći u dijagnosticiranju nepoznatih grešaka, a modeli komponenti sustava neovisni su o postrojenju ili procesu koji se razmatraju. Modeli koji su bazirani po komponenti koja se razmatra može se razviti jednom i koristiti za različite procese. Znanje koje je sadržano u modelima pomaže u rješavanju grešaka. Iako se nekoliko uzoraka baze podataka može podudarati s opaženim simptomima, mnogi obrasci možda nisu u skladu s osnovnim fizičkim ponašanjem sustava [13].

Glavni nedostatak dijagnostičkih strategija temeljenih na modelu je da je potreban model sustava. Modele može biti teško formulirati jer uključuje stjecanje razumijevanja temeljnih fizičkih principa sustava ili procesa. To je osobito prisutno u područjima gdje je ljudsko razumijevanje fizičkih mehanizama slabo ili ga uopće nema. Model također mora biti sposoban karakterizirati sustav u cijelom rasponu operacija. Postupci rješenja potrebni su za procjenu ili rješavanje. Dijagnoza temeljena na modelu općenito je sporija od metode temeljene na iskustvu, jer rješavanje modela zahtijeva više napora nego usporedba promatranih sustava s pohranjenim podacima. U općoj dijagnozi kvarova zasnovanog na modelu metode su podijeljene na kvalitativne i kvantitativne [13].

Kvalitativna metoda dijagnostike kvarova koristi model u kojem je input-output uzorka izražen u terminu kvalitativnih funkcija koji se temelje na osnovu različitih jedinica u procesu. Kvalitativna dijagnostika je sposobnost rasuđivanja i rješavanja problema korištenjem kvalitativnog opisa sustava i kvalitativnih promjena u parametrima sustava. Ljudi, kada obavljaju dijagnostičke zadatke, ne rješavaju sustav diferencijalnih i algebarskih jednadžbi, već oni razmišljaju dodjeljujući kvalitativne vrijednosti parametrima kvalitativnog modela. “Nisko” i “visoko” u “niskom tlaku” i “visokoj temperaturi” su primjeri kvalitativnih vrijednosti. Numeričke vrijednosti parametara sustava nisu potrebne za donošenje zaključaka. U mnogim je područjima kvalitativno razmišljanje superiornije od formuliranja i rješavanja sustava kvantitativnih jednadžbi jer je razmišljanje temeljeno na kvalitativnim modelima i podacima dovoljno za obavljanje željenog zadatka i zahtijeva manje računanja, samim tim postiže se ušteda na vremenu. Širok raspon modela može se koristiti za predstavljanje bilo kojeg fizičkog sustava. Odabir modela ovisi o karakteristikama domene, vrsti rasuđivanja koje treba izvesti i prirodni željenog rješenja. Kvalitativna metoda dijagnostike kvarova obuhvaća modele poput apstraktne hijerarhije, stabla grešaka, DIEX dijagram te neizrazita logika [19].

Apstraktna hijerarhija temelji se na dekompoziciji. Glavna misao dekompozicije je donijeti zaključke o ponašanju cjelokupnog sustava te o zakonima koji reguliraju ponašanje komponenti sustava, tj. njegovih podsustava. U sustavima upravljanja, ti podsustavi predstavljaju pojedinačne regulacijske petlje. Apstraktna hijerarhija sastoji se od pet razina, a to su funkcijska namjena (definira osnovnu svrhu sustava), apstraktna funkcija (opisuje glavne funkcije), generalizirana funkcija (opisuje detaljnije funkcije koje pokrivaju specifične aspekte), fizička funkcija (konkretne tehničke funkcije koje komponente sustava obavljaju) te fizička forma (fizički izgled i struktura komponenti) [17].

Stablo kvarova je blok-dijagram koji je strukturiran na način da se prati od odozgo prema dolje, tj. grafički model koji prikazuje putove unutra sustava koji u konačnici dovode do krajnjeg događaja (u većini slučajeva nepoželjne događaje, odnosno kvar) [14]. Navedeni putovi povezuju događaje i stanja koji doprinose konačnom ishodu uz pomoć logičkih simbola I i ILI. Simboli (vrata) I i ILI su dva najčešće korištena simbola za prikaz stabla kvarova, jer najbolje opisuju pojedini ishod koji se može dogoditi. Na slici 9. je prikazana pojednostavljena shema blok dijagrama stabla kvarova.



Slika 7. Blok dijagram stabla kvara

Prema blok dijagramu sa slike 9, na vrhu je glavni događaj koji se događa jedino ako se prethodni događaji ostvare. Kao što je već navedeno, postoje I i ILI vrata. U slučaju I vrata, oba poddogađaja se moraju dogoditi kako bi nastupio navedeni događaj, dok kod vrata ILI potrebno je da se samo jedan od tih događaja ostvari kako bi se ostvario krajnji događaj [18].

DIEX (*engl. Diagnostic Expert - DIEX*) je prototip dijagnostičkog sustava temeljen na modelu koji gradi informacijski dijagram i izvršava dijagnostičku strategiju. DIEX dijagram je grafikon ili skup čvorova povezanih rubovima, gdje svaki pojedinačni rub ima pridružen smjer. Usmjereni lukovi vode čvorove “uzroka” do čvorova “posljedica”. Svaki čvor u dijagramu odgovara odstupanju od stacionarnog stanja varijable [19]. Topografija postrojenja i sve specifične informacije o dizajnu jedinice unose se putem interaktivnog dizajnerskog programa. Numeričke vrijednosti parametara procesa su potrebne kako bi se točno specificirale uzročne interakcije iz uzročnih modela. Strukturne informacije jedinice koriste se za usklađivanje priključaka međusobno povezanih jedinica. Program za dizajniranje grafikona stvara podatkovnu datoteku koju zatim koristi drugi program za konstruiranje informacijskog dijagrama. Za određivanje dijagrama koristi se objektno-orijentirano programiranje. Čvorovi i lukovi koriste se za konkretiziranje specifičnih procesnih varijabli i njihovih uzročnih interakcija [19].

Tijekom generiranja, DIEX konstruira valjano stablo za svako abnormalno mjerenje iz lukova u informacijskom dijagramu. Kvalitativne vrijednosti mjerenja mogu se unijeti u prototip dijagnostičkog sustava jedna po jedna ili u grupama, što ovisi o opsegu informacija s kojima se radi. Kada je više od jednog mjerenja valjano, održava se aktivni skup primarnih odstupanja od postavljenog presjeka. Stoga se tijekom svakog prolaza izvodi jedno raskrižje. Uzročna simulacija koja koristi vremenske odgode i heuristička pravila implementirana je za testiranje prikupljenih informacija. Preslikavanje grešaka u primarne devijacije učinjeno je za pojedine kontekste proučavanih primjera procesa [19].

Neizravna logika (*engl. Fuzzy Logic*) je metoda koja se koristi u posebnim područjima dijagnostike kvarova, preciznije rečeno na metodama koji se temelju i na kvalitativnoj metodi i na temelju prijašnjih dijagnostika. Nejasno logički sustavi preuzimaju lingvističke pojmove koji uzimaju u obzir nepredvidivu prirodu procesa sustava i sustava stvarnog svijeta.



Neizrazita logika omogućuje opisuje proces ponašanja temeljeno na dostupnim empirijskim ili iskustvenim informacijama iz senzorskih sustava i/ili ljudskog operatera, te se može nositi sa nelinearnim, viševarijabilnim i vremenskim promjenjivim procesima bez da ima potrebu definirati ih kao precizne matematičke pojmove. Ovakav pristup je baziran na temelju operacija sa kvalitativnim parametrima i uglavnom učinkovit za sustave koji rade u nesigurnim uvjetima funkcioniranja. Upravljači sustava, temeljeni na neizrazitom algoritmu teorije skupova, većinom su “fokusirani” na glavnim signalima, te su manje osjetljivi na šumove [15].

Kvantitativna metoda dijagnostike kvarova koristi model u kojem je odnos ulaz-izlaz određenog sustava izražen matematičkim pojmovima funkcije. Kvantitativne jednadžbe bile su dominantna metoda za modeliranje fizičkih sustava. Dinamički modeli, koji uključuju sustave diferencijalnih i algebarskih jednadžbi, dobro su razvijeni i dostupni su komercijalnim računalnim programima za njihovo rješavanje. Glavne poteškoće uključuju određivanje točnih varijabli i oblika jednadžbi, prilagođavanje parametara modela i jamčenje da je sustav jednadžbi valjan tijekom cijelog raspona rada. Također, za rješavanje sustava potreban je potpuno specificiran skup ulaza [13].

Kvantitativni model, koji radi paralelno s procesom, može otkriti odstupanja procesa od predviđanja modela, no model se ne može izravno koristiti za identifikaciju specifičnog kvara nakon što se identificiraju abnormalna mjerenja. Numeričke jednadžbe ne sadrže eksplicitnu usmjerenost; stoga ne mogu opisati put širenja kvara kroz sustav. Kvar se može identificirati samo neizravno kroz simulaciju kvara. To zahtijeva ponovljene simulacije i da se učinci svih mogućih grešaka matematički karakteriziraju. Ova ograničenja kvantitativnih prikaza daju poticaj za razvoj kvalitativnih modela za dijagnozu grešaka [19].

Kvantitativnu metodu dijagnostike kvarova čini analitička redundancija, prostor rijetkosti, Kalman filter, procijene parametara te dijagnostičko promatranje. Analitička redundancija uzima u obzir matematički model sustava. U literaturi za dijagnostiku kvarova, analitička redundancija se često naziva i dijagnoza greške temeljena na modelu. Uporabom analitičke redundancije postiže se dijagnoza greške usporedbom izmjerenih signala iz stvarnog sustava i signala iz generiranog sustava (sustav iz procijenjenog matematičkog modela). Razlika između tih signala generira rezidual. Za procjenu navedenog reziduala koristi se logika dijagnostike i rezultati te procjene određuju je li potreban alarm za kvar. No, tu se javlja potencijalni problem podizanja lažnog alarma, a uzrok tome može biti loša kvaliteta matematičkog modela, greške modela te visoke promjene u sustavu [13].

Osnovna ideja paritetnog prostora je osigurati pravilnu (kontinuiranu) provjeru pariteta ulazno-izlaznih mjerenja sustava koji se razmatra. U teoriji, u stacionarnim uvjetima rada, rezidual koji se generira metodom prostora pariteta jednak je nuli. Međutim, reziduali su različiti od nule zbog ulazno-izlaznih promjena parametara koji su prouzrokovani greškama u sustavu, modelu te neočekivanim promjenama. KF (*engl. Kalman filter - KM*) koristi se za oblikovanje opreme za procjenjivanje uz minimalne greške pri procjeni. Svojstvo KF da predvidi grešku može se koristiti za formiranje reziduala za detektiranje greške. Općenito, kada je rezidual jednak nuli, tada je sustav u ispravnom stanju bez mogućih grešaka, u protivnom ako je rezidual različit od nule, tada je prisutna greška u sustavu [13]. U većini slučajeva, do kvara dolazi zbog promjene nekih parametara. Kod metode dijagnostike praćenjem parametara, najbitnije je pratiti odnos ulaznih i izlaznih parametara i ukoliko dođe do prevelikih oscilacija od zadanih parametara, kvar ili greška je prisutna u sustavu.

### 3.3. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA HARDVERU

Dijagnostika kvarova na temelju hardvera je druga glavna klasificirana metoda koja se primjenjuje. Glavna razlika u odnosu na već spomenute metode jest ta što se kod dijagnostike kvarova na temelju hardvera ne upotrebljavaju matematički modeli sustava ili procesa. Dijagnostika kvarova temeljena na hardveru obuhvaća hardversku redundanciju, tehniku na bazi glasnoće, posebne hardvere, provjera ograničenja te frekvencijsku analizu. Hardverska redundancija je klasičan pristup dijagnostici kvara koja koristi višestruke senzore i aktuatora s ciljem mjerenja potrebne varijable od interesa. Glavni nedostatak ove metode jest potreba za dodatnom opremom (senzori i aktuatori), potrebno dodatno održavanje te troškovi koji dolaze s održavanjem. Nadalje, potreba za dodatnim prostorom za smještaj opreme čini ovu metodu nepraktičnom u većini slučajeva [13].

Tehnika na bazi glasnoće vrlo često se upotrebljava u sustavima koji uključuju visoki stupanja paralelne hardverske redundancije. Ovakva tehnika je prilično jednostavna za implementaciju i uobičajeno se koristi za dijagnostiku kvarova mehaničkih grešaka. Primjerice, u sustavu postoje tri identična senzora koji mjere istu varijablu. U trenutku kada jedan od tih senzora proizvodi drugačiji signal za razliku od ostalih, taj drugačiji signal ukazuje na grešku. Općenito, razlika između dva identična signala u paru tih dvaju signala ukazuje na nastalu grešku u sustavu ili procesu [13].

Posebni hardveri su primjenjivi kod dinamičkih sustava. Pod posebne hardvere podrazumijevaju se senzori koji mjere veličine poput temperature, tlak, zvuk i vibraciju. Uz to, vrši se i provjera ograničenosti u sustavu koji mogu ukazivati na nedostatke i eventualne greške u sustavu [13].

Provjera ograničenosti u sustavu ili procesu je usporedba izmjerene varijable procesa sa poznatom granicom te varijable. Prije samog mjerenja potrebno je uspostaviti granicu zadane varijable te nakon toga izmjeriti navedenu varijablu, i onda usporediti dobivene vrijednosti. Bilo koje odstupanje od očekivanog raspona između izmjerene i postavljene vrijednosti ukazuje na kvar. Primjer ovakve metode bi bili senzori dima na brodu, koji se aktiviraju kada razina dima prijeđe dozvoljenu vrijednost [13].

Analiza frekvencija je prikladna metoda za dijagnostiku grešaka kod dinamičkih sustava iz razloga što svaka varijabla u sustavu emitira neku vrstu frekvencije pri normalnom radu. Stoga bilo kakvo odstupanje ili abnormalnost u emitiranju frekvencija ukazuje na mogućnost kvara, pogotovo što se određene greške mogu uočiti jedino pomoću tih frekvencija koje se emitiraju [13].

### **3.4. DIJAGNOSTIKA KVAROVA ZASNOVANA NA ISKUSTVU**

Dijagnostika kvara zasnovana na prijašnjim dijagnostikama ili iskustvu je ujedno i zadnja skupina metoda koje se primjenjuju u dijagnostici. Kao što samo ime govori, dijagnostika se temelji na rezultatima prijašnjih dijagnostika. Za razliku od prijašnje dvije metode, kod ove metode se koriste modeli već izmjerenih i poznatih varijabli, ne koristi matematičke modele koje su zasnovane na razumijevanju prirode i fizičkih veličina stvarnog procesa ili postrojenja [13].

Izraz "temeljen na iskustvu" ili "temeljen na heurizmu" koristi se jer poznati obrasci opažanja dolaze izravno iz iskustva, tj. znanja iz prijašnjih dijagnostika. Sam princip ove metode je zasnovan na generiranju modela procesa koji povezuje izmjerene ulaze na izmjerene izlaze, te se taj model koristi naspram stvarnog procesa za stvaranje reziduala. Tijekom dijagnoze, abnormalni simptomi iz sustava uspoređuju se s pohranjenim obrascima kako bi se dobio niz mogućih kvarova koji se mogu pojaviti u sustavu. Kvar koji se smatra najvjerojatnijim je onaj koji se najbliže podudara sa podacima. Jedan od nedostataka dijagnostike temeljene na iskustvu je da se simptomi svakog kvara moraju znati prije dijagnoze.

Ako određeni kvar i njegovi simptomi nisu pohranjeni u dijagnostičkom sustavu, tada se kvar ne može dijagnosticirati i sustav ne generira nikakve informacije. Ovo ograničenje je posebno opasno jer kvarovi s kojima će operater imati najviše poteškoća u identificiranju, tj. oni kvarovi s niskom stopom pojavljivanja, općenito nisu pokriveni iskustvom [19].

Uzorci pohranjeni u bazi podataka ovise o određenom kontekstu, što znači da ako dva sustava nisu identična, znanje u bazi podataka ne može se prenijeti i koristiti za dijagnozu drugog sustava. Baza podataka uzoraka mora se kreirati od nule za svaki novi sustav. Dijagnostika kvara zasnovana na prijašnjim dijagnostikama obuhvaća FL (*engl. Fuzzy Logic - FL*), neuronske mreže, grupiranje, samoorganizirane mape, statističke metode, ekspertne sustave i prepoznavanje uzoraka [19].

Tehnika grupiranja je prikladan alat kada se radi s većim brojem podataka. Bit ove tehnike je grupirati, tj. stvoriti i odijeliti pojedine grupe podataka iz jedne velike skupine kako bi se lakše dijagnosticiralo stanje i ponašanje sustava ili procesa. Ova tehnika je usko povezana s metodom nejasnog modela, te se upotpunjuju. Samoorganizirane mape spadaju u vrstu neuronskih mreža koje klasificiraju ulazne vektore sukladno tome kako su ti vektori grupirani u ulaznim varijablama [13].

Metoda statističke analize je jedna od standardnih metoda u dijagnostici. Razne statističke metode se koriste za razvijanje odnosa između ulaza i izlaza sustava ili procesa koji se razmatra. Neki od primjera statističkih metoda podrazumijeva linearnu, višestruku te polinomsku regresiju, analizu glavnih komponenti, parcijalni najmanji kvadrate i logističku regresiju. Statističke analize mogu se podijeliti na jednovarijantne i multivarijantne statističke analize. Općenito, jednovarijantna statistička analiza zanemaruje relevantnost među varijablama (tj. značajkama kvara) te je stoga prikladna za dijagnosticiranje kvarova s malim dimenzijama značajki, kao što je u statistici to kontrola procesa. Suprotno tome, multivarijantna statistička analiza je učinkovita u opisivanju relevantnosti među varijablama, i stoga se lako može primijeniti za dijagnozu greške s velikim dimenzijama. Analiza glavnih komponenti je najraširenija multivarijantna statistička metoda za dijagnozu [17].

Statističkim analizama se uvelike služe ekspertni sustavi za dijagnozu. Ekspertni sustavi su računalni softveri koji pružaju uvid u stanje sustava ili procesa. Ekspertni sustavi za sam razvoj koriste metode stjecanja znanja, izbor reprezentacije znanja, kodiranje znanja u bazi znanja, razvoj postupka zaključivanja za dijagnostičko zaključivanje te razvoj ulazno izlaznih sučelja.

Prednosti ekspertnog sustava je jednostavnost u uporabi, transparentno razmišljanje, uvid u rješenja za ponuđene probleme te sposobnost u rasuđivanju uslijed neizvjesnosti. No, nedostaci su ti da su specifični za sustav koji razmatraju, što znači da nisu prilagodljivi, zatim mogućnost za velikim odstupanjima od normalnog te su zahtjevni za poboljšanja i nadogradnje [16].

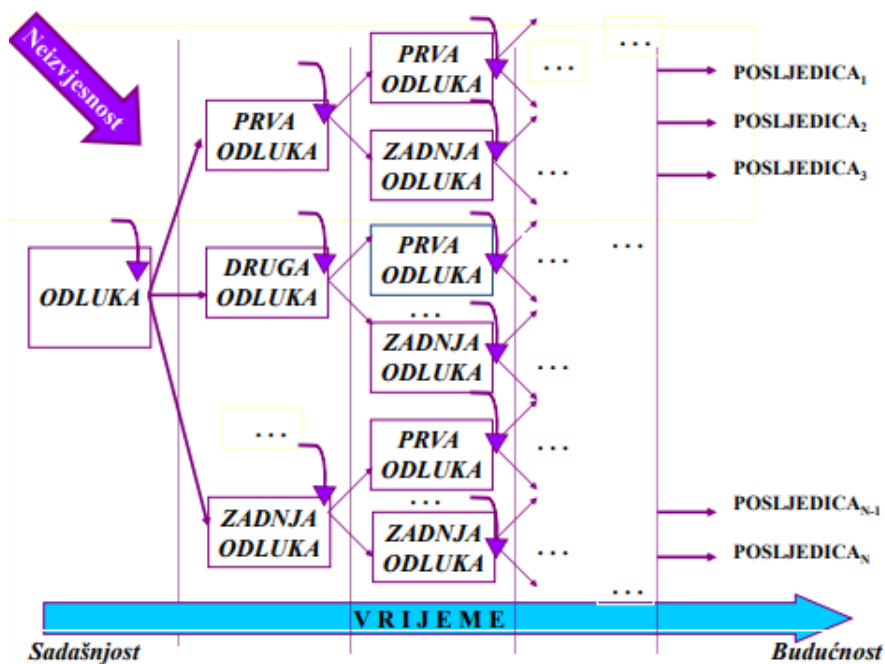
Sustavi neuronskih mreža spadaju pod ekspertne sustave. Uglavnom su prikladni za analizu nelinearnih dinamičkih sustava. Neuronske mreže imaju karakteristike kao što su učenje, samoorganizacija te sposobnost modeliranja velikih klasa nelinearnih sustava. Također imaju sposobnost preslikavanja ulazno-izlaznih odnosa i s tim formirati memoriju koja je povezana sa navedenim odnosima (ulaz-izlaz), a ta memorija dohvaća odgovarajuće izlazne signale kada je prezentirana sa neviđenim ulaznim signalima [12].

Osnovne značajke umjetnih neuronskih mreža su sljedeće [12]:

- mogućnost obrade nelinearnosti,
- mogućnost poopćavanja,
- dobra prilagodljivost promjenama,
- paralelizam (velika obrada podataka i informacija), te
- sposobnost samoučenja koje je zasnovano na prijašnjim podacima.

#### 4. STABLO ODLUČIVANJA

Stablo odlučivanja (*engl. Decision Tree*) je grafički prikaz procesa odlučivanja, tj. procesa odlučivanja koji se sastoji od niza manjih odluka koji su slijedno povezani i koji dovode do konačne odluke. Po strukturi nalikuje stablu kvarova (*engl. Fault Tree*), razlika je u tome što se kod stabla odlučivanja koriste čvorovi i grane odluke, dok se kod stabla kvarova koriste logička vrata za modeliranje uzroka i njihovih odnosa. Na prvu su oba alata dosta slična, za analizu i pronalaženje rješenja koriste grafički prikaz, no glavna razlika je ta što se stablo kvara fokusira na analizu pouzdanosti i sigurnosti promatranog sustava identificiranjem potencijalnih i prisutnih kvarova, dok stablo odlučivanja glavni fokus pridaje na donošenju odluka i predikciju ishoda različitih opcija. Na slici 10. prikazana je principijelna shema stabla odlučivanja [20].



Slika 8. Shema stabla odlučivanja [21]

Stablo odlučivanja je najbolje primjenjivo kada su ostvareni sljedeći uvjeti [23]:

- primjeri su predstavljeni parovima atribut-vrijednost,
- kada postoji konačan popis atributa i svaki atribut ima svoju vrijednost,
- kada se algoritam može proširiti kako bi se obradili atributi s realnim vrijednostima,
- ciljana funkcija ima diskretne izlazne vrijednosti,
- mogućnost da stablo odluke svaki primjer klasificira kao jednu od izlaznih vrijednosti i
- kada postoje samo dvije moguće klase (Boolova klasifikacija).

Osnovna bit stabla odlučivanja je da jasno prikaže sve mogućnosti i da definiira koji je problem odlučivanja. Stablo odlučivanja se općenito primjenjuje kada je potrebno donijeti neku odluku koja uz sebe ima prisutan rizik. Pogodno je koristiti ga u rizičnim situacijama jer nam daje mogućnost biranja između većeg broja odluka, te nam daje uvid koje su posljedice za svaku moguću odluku. Upravo iz tih razloga metoda stabla odlučivanja ima široku primjenu u industriji i svijetu, pogotovo u rizičnim situacijama gdje je svaka odluka bitna [22].

Rješavanje problema primjenom stabla odlučivanja ima svojih prednosti, ali i nedostataka. Prednosti primjene metode stabla odlučivanja su sljedeće [20]:

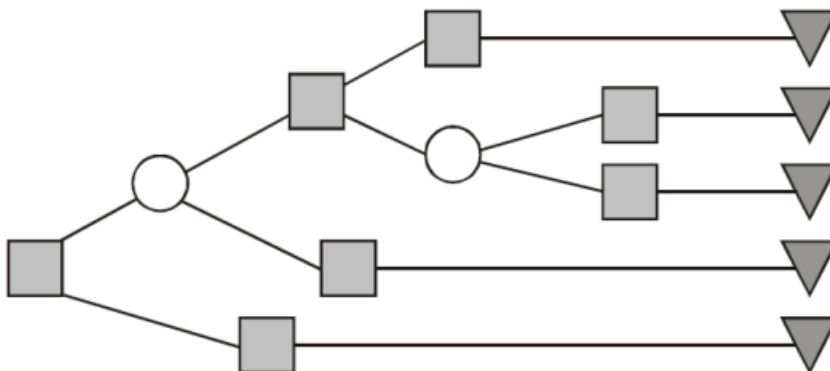
- Grafički prikaz stabla odlučivanja je jednostavan i razumljiv, čak i ako se ne posjeduje veliko matematičko znanje, pogotovo u slučajima kada stablo nema puno grana i čvorova, jednostavnost u korištenju.
- Stablo odlučivanja prikazuje sve moguće ishode i posljedice ishoda.
- Vrlo lako je razlučiti graf, kao i povezanost između odluka.
- Odabir konačne odluke je olakšan iz razloga što je moguće uvidjeti sve moguće ishode, te se odabire onaj s najboljim ishodom.
- Mogućnost primjene u kombinaciji s drugom metodom.

Nedostaci primjene metode stabla odlučivanja su sljedeći [20]:

- Konačna odluka uvelike ovisi o svim slijednim odlukama, što znači ako dođe i do relativno malih promjena podataka u stablu, to može uvelike utjecat na konačni ishod, stoga je potrebno modificirati stablo sukladno promjenama, vrlo često i napraviti novo stablo, što iziskuje vremena pogotovo ako je stablo kompleksno.
- Koliko god je stablo odlučivanja jednostavno u svojoj izvedbi, toliko može biti i kompleksno, pogotovo ako se obrađuju radnje koje sadrže puno ishoda i odluka, što izradu stabla čini kompliciranijom i zahtjevnijom.
- Velike količine informacija su u pravilu dobre, ali u slučaju stabla odlučivanja mogu zakomplicirati izradu i učiniti stablo nepreglednim i nepouzdanim.
- Složenost stabla odlučivanja zahtjeva visoku obrazovanost, što metodu čini skupom.

#### 4.1. ELEMENTI STABLA ODLUČIVANJA

Stablo odlučivanja je grafički prikaz koji je sačinjen od niza elemenata koji su povezani međusobnim odnosima, od početka do kraja, gdje su simbolima prikazana određena stanja i odluke koje se moraju dogoditi ili provesti kako bi se došlo do konačnog cilja, u ovom slučaju konačni ishod (posljedica). Elementi stabla odlučivanja, kao i njihov generalni izgled, su prikazani na slici 11.



Slika 9. Elementi stabla odlučivanja [22]

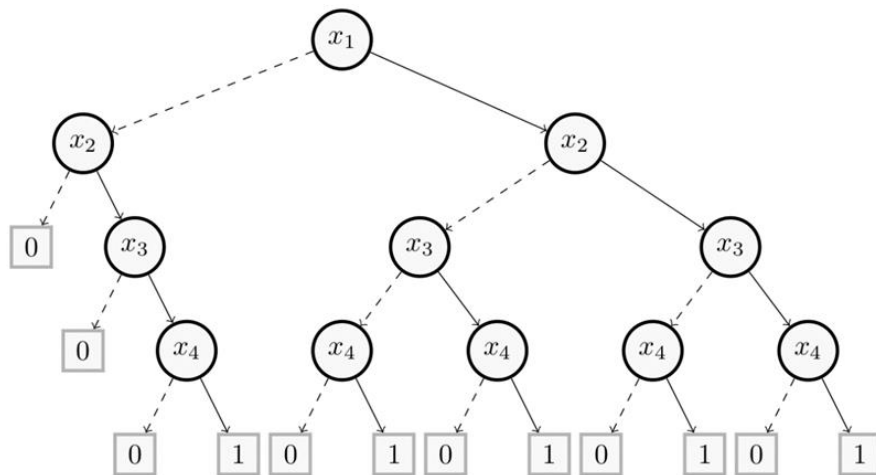


Svako stablo sadrži elemente koji su prikazani na prethodnoj slici, no razlika je u količini elemenata koje određeno stablo sadrži. Čvor odluke (prikazan kvadratom) predstavlja točku u stablu odlučivanja gdje donosimo odluku. Svaka odluka ima svoj ishod. U stablu odlučivanja može biti (ali i ne mora) više čvorova odluka, što ovisi o opsegu problema kojeg se razmatra. Prvi čvor odluke u stablu odlučivanja se naziva početni čvor, jer od te odluke se granaju druge odluke i ishodi. Čvorovi posljedica (prikazani krugom) su ishodi čvorova odluka.

Grane koje izlaze iz čvorova posljedica su grane mogućih posljedica. Kao što samo ime govori, one ukazuju na mogućnost pojave pojedinog ishoda, tj. posljedica. Svaka grana mogućih posljedica uz sebe može imati određeni postotak, a taj postotak ukazuje na mogućnost pojave tog događaja. Ako se primjenjuje, svaka grana mogućih posljedica mora imat izračunat postotak pojavljivanja, nebitno radilo se o subjektivnoj ili objektivnoj procijenjenoj vrijednosti. Uglavnom su te vrijednosti vjerojatnosti prikazane decimalnim brojevima, te zbroj svih vjerojatnosti svake grane daje 1, u protivnom ako nije jednako 1 nešto u izračunu nije u redu. Grane mogućih posljedica mogu završavati i uglavnom završavaju sa ishodom, odnosno krajnjim čvorom, no mogu i rezultirati s novom granom koja može sadržavati čvor odluke ili pak čvor posljedica [20].

Uz grane mogućih posljedica postoje i grane alternativnih aktivnosti. Grane alternativnih aktivnosti izlaze iz čvora odluke, te ukazuju na alternativne aktivnosti od kojih mi odabiremo jednu, sukladno situaciji i problemu kojeg se analizira. Kao i kod grana mogućih posljedica, grane alternativnih aktivnosti rezultiraju sa čvorom odluke, čvorom posljedica ili pak završnim čvorom. Završni čvor (prikazan trokutom) je ujedno i posljednji element u stablu odlučivanja. Ono nam ukazuje na završetak određene alternative i ishod te alternative [20].

Uz standardno stablo odlučivanja, postoji i binarno stablo odlučivanja. Binarno stablo odlučivanja (*engl. Binary Decision Diagram - BDD*) se upotrebljava prvenstveno u svrhu provjere i analize modela, hardvera, te valjanosti protokola u sustavu, s ciljem donošenja konačne odluke. BDD-ovi također pružaju odgovarajuće algoritme za izračunavanje vjerojatnosti kvara i omogućuju analizu stabla kvara određenog događaja [28]. Generalni izgled BDD-a je prikazan na slici 12.



**Slika 10. Binarno stablo odlučivanja [27]**

Binarno stablo odlučivanja se sastoji od prijelaznih čvorova (na slici prikazane linijom), zatim događaji (prikazani krugom) te vrijednost tih događaja (prikazani kvadratom). Određeni događaj može završavati ili novim događajem (slijedni događaj) ili završava završnim čvorom, koji ima vrijednost 0 (netočno) ili 1 (istina). Također, prijelazne linije koje povezuju događaje mogu biti pune linije ili isprekidane linije. Ako se događaj ostvari, tj. ako ima vrijednost 1, onda je na stablu ono povezano punom linijom, a ako se događaj ne ostvari, tj. vrijednost je jednaka 0, onda je taj događaj povezan isprekidanom linijom.

Glavna razlika između običnog stabla odlučivanja i binarnog stabla odlučivanja je ta što svaki čvor u binarnom stablu odlučivanja može imati samo dvije vrijednosti, odnosno ishoda, a to su 1 i 0. Ovakva struktura omogućava jednostavniju implementaciju i efikasnije donošenje odluka. Binarna stabla odlučivanja su jednostavan, ali moćni alat u analizi podataka i izuzetno korisna kod strojnog učenja [29].

## 4.2. KREIRANJE STABLA ODLUČIVANJA

Kada je potrebno donijeti odluku u nekom složenom procesu, potrebno je izgraditi stablo odlučivanja. Stablo odlučivanja je ujedno i najbolja metoda za donošenje odluka kada se radi o nizu slijednih odluka koje je potrebno donijeti kako bi se postiglo rješenje za donošenje krajnje glavne odluke.

Postupci pri izradi stabla odlučivanja su [22]:

- priprema i prikupljanje podataka,
- izbor parametara i algoritma,
- izgradnja logičkog modela i numeričke strukture stabla,
- tumačenje rezultata,
- primjena stabla odlučivanja.

Prije same izrade stabla, potrebno je definirati problem. Definiranje problema nam pomaže u prikupljanju informacija i podataka koje ćemo unositi u stablo odlučivanja. Prije stabla odlučivanja, postojale su tablice odlučivanja. Prikupljeni podaci su se unosili u tablicu, a primjer tablice odlučivanja je prikazan u tablici 1 [20].

**Tablica 1. Opći oblik tablice odlučivanja [20]**

		Stanje svijeta			
		$\Theta_1$	$\Theta_2$	....	$\theta_n$
Akcije	$a_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1n}$
	...	...	...	...	...
	$a_m$	$x_{m1}$	$x_{m2}$	...	$x_{mn}$

Stanje svijeta je generalan pojam i može se odnositi na bilo što, i on je označen s oznakom  $\theta$ , dok su akcije označene sa slovom  $a$ . Sukladno stanju svijeta i vrsti problema, odabire se prikladna akcija. Posljedica odabrane akcije,  $a$  i svake druge akcije, označeno je sa  $x$ . Prilikom odabira akcije potrebno je uzeti u obzir i posljedicu, i s tim odabrati akciju koja ima najpoželjniju posljedicu.

Tablica odlučivanja može biti nepregledna, i danas se rijetko koristi, stoga se općenito pristupa izradi stabla odlučivanja, ali nam može poslužiti za prikupljanje i spremanje potrebnih podataka za izradu stabla odlučivanja. Podaci moraju biti što točniji i informativni, iz razloga što odluke koje donosimo ovisi o prikupljenim podacima, te i mala greška ili promjena može utjecati na velike promjene u stablu, pa čak i stvaranje novog stabla [20].

Nakon prikupljanja podataka slijedi izbor parametara i algoritma. Pod tim se podrazumijeva na dodjeljivanje pripadajuće vrijednosti svakom pojedinom stanju u stablu. Svaka odluka, posljedica te grana ima svoju vrijednost i vjerojatnost, što utječe na donošenje konačne odluke. Sljedeći korak jest izgradnja logičkog modela, odnosno izgradnja stabla odlučivanja. Tu se generiraju čvorovi odluke, čvorovi posljedica, grane alternativnih aktivnosti, grane mogućih posljedica te završne čvorove. Svaka od navedenih elemenata ima svoj redoslijed pojavljivanja, tj. redoslijed koji prati smjer donošenja odluka. Također, svakom tom elementu dodajemo izračunatu vrijednost pojavljivanja. Ako se prije izgradnje logičkog modela generirala tablica sa svim podacima, to ubrzava sam proces izgradnje logičkog modela zbog toga što imamo pregledan popis svih podataka koji se ubacuju u logički model [22].

*Rollback* algoritam, odnosno računanje vrijednosti odluka unatrag, je algoritam gdje vrijednost odluke računamo od unatrag, tj. računanje kreće od krajnjeg desnog elementa (završnog čvora) prema prvom elementu (početni čvor odluke). Računanje vrijednosti odluka unatrag izvodi se izračunom očekivane vrijednosti, pod uvjetom da [24]:

- zadnji čvor (završni čvor) ima svoju izračunatu pripadajuću vrijednost,
- vrijednost koja je pridružena čvoru odluke mora biti jednaka najvećoj prethodno izračunatoj vrijednosti koja se nalazi nakon promatranog čvora odluke,
- čvor posljedica mora imati pridružene vrijednosti koje se računaju po izrazu (12):

$$EV_{i-1} = \sum_j p_j EV_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (12)$$

gdje je:  $EV_{i-1}$  – očekivana vrijednost u čvoru  $i - 1$ ,

$EV_i$  – očekivana vrijednost u čvoru  $i$ ,

$p_j$  – vjerojatnost grane  $j$  koja izlazi iz čvora posljedica  $i - 1$ .

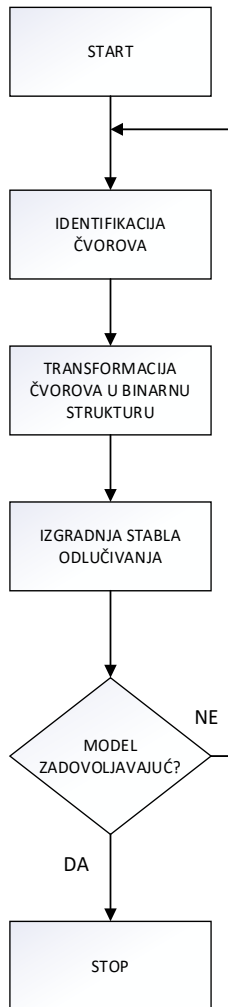
Nakon što je izračunata vrijednost odluke, pristupa se pronalaženju optimalnog puta. Traženje optimalnog puta kreće od prve točke u stablu, a to je početni čvor odluke, pa sve do krajnje točke u stablu, odnosno završnog čvora. Vrijednost početnog čvora je jednaka vrijednosti grane koja se nalazi na alternativnom putu, te se tako nastavlja sve dok se ne dođe do završnog čvora [21].

Kada je stablo odlučivanja generirano pristupa se analiziranju i tumačenju postignutih rezultata. Analizira se korisnost i preferencija pomoću kojih se dolazi do optimalnog puta i rješenja. Odabire se put (rješenje) koje najbolje odgovara stanju radnje i funkcije problema kojeg se obrađuje. Ukoliko operater ne raspolaže sa podacima vjerojatnosti za svaki pojedini put, operater može koristiti druge metode odlučivanja sukladno kojima može donijeti konačnu odluku [22].

U svim navedenim koracima za pomoć je prisutna i suvremena tehnologija. Suvremenu tehnologiju treba promatrati kao alat kojom ipak na kraju upravlja čovjek operater, stoga ljudski učinak ne smije biti zanemaren. Kada je konačna odluka donesena, nju treba provest i temeljno ispitat.

Izrada binarnog stabla odlučivanja je drugačija u odnosu na standardno stablo odlučivanja. Jedan od pristupa za izradu binarnog stabla odlučivanja jest Rauzyev princip. Rauzyev princip koristi ite tehniku (if-then-else) za pretvorbu stabla kvarova u binarno stablo odlučivanja. Pri pretvorbi, identificiraju se svi čvorovi unutar stabla kvarova i ti se čvorovi umjesto standardnih vrata I i ILI mijenjaju u binarnu strukturu, gdje svaki čvor ima dvije vrijednosti, 1 i 0. Prilikom izgradnje binarnog stabla odlučivanja treba imati na umu varijabilni poredak čvorova, jer ono uvelike ovisi o pravilnoj izgradnji stabla te utječe na donošenje konačne odluke. Kada su se postavili odnosi u stablu i kada su se definirali svi čvorovi i njihove pripadajuće vrijednosti, pristupa se izgradnji binarnog stabla odlučivanja. Prije samog završetka, obavlja se validacija izgrađenog stabla i provjerava se njegova valjanost. U slučaju da rezultati nisu ispunili očekivane zahtjeve i očekivanja, pristupa se ponovnoj izgradnji binarnog stabla odlučivanja uzimajući u obzir greške koje su bile prisutne u početnoj izgradnji stabla. Ako je model zadovoljavajući, izgradnja binarnog stabla odlučivanja je gotova i stablo je spremno za uporabu [29].

Postupak primjene Rauzyevog principa je prikazan dijagramom toka na slici 13.



**Slika 11. Rauzyev princip kreiranja binarnog stabla odlučivanja**

Neka je  $f(x)$  Booleova funkcija za krajnji događaj. U tom slučaju zadana ite struktura  $ite(X, f_1, f_2)$  opisuje sljedeću situaciju; ako se varijabla  $X$  pojavi ( $X$  predstavlja kvar),  $f_1$  se isto pojavljuje, a ako nije  $f_1$ , onda  $f_2$  se pojavljuje.  $f_1$  i  $f_2$  su Booleove funkcije, opisani kao reziduali funkcije  $f$ , s tim da vrijedi  $X = 1$  i  $X = 0$  u oba slučaja. Stoga, ako čvor u binarnom stablu odlučivanja kodira varijablu  $X$ ,  $f_1$  bi predstavljao prijelazni čvor čija je vrijednost 1, a  $f_2$  bi predstavljao prijelazni čvor čija je vrijednost 0 [30].

Primjerice, ako su A i B dva događaja stabla kvarova koja su pretvorena u formu binarnog stabla odlučivanja i prikazana kroz ite tehniku, gdje je  $A = \text{ite}(X, f_1, f_2)$  i  $B = \text{ite}(Y, g_1, g_2)$ , u tom slučaju vrata stabla kvarova prati jednu od sljedećih uvjeta:

- ako se X pojavljuje prije Y tada vrijedi izraz (13):

$$A \langle \text{op} \rangle B = \text{ite}(X, f_1 \langle \text{op} \rangle B, f_2 \langle \text{op} \rangle B) \quad (13)$$

- ako je  $X = Y$  tada vrijedi izraz (14):

$$A \langle \text{op} \rangle B = \text{ite}(X, f_1 \langle \text{op} \rangle g_1, f_2 \langle \text{op} \rangle g_2) \quad (14)$$

gdje je:  $\langle \text{op} \rangle$  - Booleov operator vrata u stablu kvarova

Kada su definirana vrata i događaji, čvorovi u stablu kvarova se mogu prikazati ite tehnikom. Poredak  $a < b < c < d < e$  se ostvaruje obilaskom stabla kvara na jednostavan način odozgo prema dolje s lijeva na desno. Primjena uvjeta za veze vrata A i B i glavnog događaja, dobije se sljedeći izraz (15), [30]:

$$\begin{aligned} A &= b \cdot c \cdot d \\ &= \text{ite}(b, 1, 0) \cdot \text{ite}(c, 1, 0) \cdot \text{ite}(d, 1, 0) \\ &= \text{ite}(b, \text{ite}(c, 1, 0), 0) \cdot \text{ite}(d, 1, 0) \\ &= \text{ite}(b, \text{ite}(c, \text{ite}(d, 1, 0), 0), 0) \\ B &= b \cdot e \\ &= \text{ite}(b, 1, 0) \cdot \text{ite}(e, 1, 0) \\ &= \text{ite}(b, \text{ite}(e, 1, 0), 0) \end{aligned} \quad (15)$$

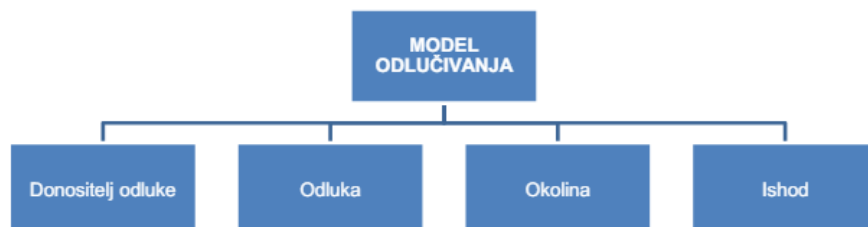
$$\begin{aligned} \text{Glavni događaj} &= a + A + B \\ &= \text{ite}(a, 1, 0) + \text{ite}(b, \text{ite}(c, \text{ite}(d, 1, 0), 0), 0) + B \\ &= \text{ite}(a, 1, \text{ite}(b, \text{ite}(c, \text{ite}(d, 1, 0), 0), 0)) + \text{ite}(b, \text{ite}(e, 1, 0), 0) \\ &= \text{ite}(a, 1, \text{ite}(b, \text{ite}(c, \text{ite}(d, 1, \text{ite}(e, 1, 0), \text{ite}(e, 1, 0)), 0), 0)) \end{aligned}$$

Tehnika ite proizvodi uređeno binarno stablo odlučivanja, gdje se redosljed varijabli zadržava kroz cijelo binarno stablo odlučivanja. To je ključno jer se svaki korak u procesu pretvorbe izvodi uzimajući u obzir varijabilni poredak. Tehnika ite automatski koristi dijeljenje podčvorova gdje je svaka ite struktura pohranjena u memoriju samo jednom i ponovo se koristi ako se dalje izračunava u procesu [30].

### 4.3. ODLUČIVANJE I TEORIJA ODLUČIVANJA

Svakodnevno se susrećemo sa procesom donošenja odluke, bilo privatno ili profesionalno. Broj odluka svakodnevno raste, i ponekad je teško donijeti pravu odluku koja bi donijela najbolji ishod. Odlučivanje je proces koji traje određeno vrijeme, a završava određenom odlukom. Prilikom odlučivanja najčešće se susrećemo sa dvije ili više opcija, a odluku je potrebno donijeti u kraćem ili dužem periodu ovisno o situaciji u kojoj se nalazimo. U pogledu broda, odluke su jako bitne jer u većini slučajeva su to bitne odluke po pitanju održavanja i načina vođenja broda, i uglavnom se te odluke moraju donijeti u kraćem vremenskom periodu. Nepravovremeno donošenje odluka većinom dovodi do negativnih posljedica, što može uvelike naštetiti brodu i po tehnološkom aspektu, ali i po aspektu poslovanja.

Prema prethodnoj definiciji odlučivanja koja glasi da je odlučivanje proces koji traje određeno vrijeme, a završava odlukom, isto tako se može zaključiti da će rezultat odluke imati istu težinu kao i sama odluka. Prilikom donošenja odluke moraju se uzeti u obzir svi čimbenici koji utječu na donošenje odluke. Čimbenici koji utječu na donošenje odluke su prikazani na slici 14 [24].



Slika 12. Čimbenici modela odlučivanja [24]

Kao što je navedeno u slici 12. model odlučivanja se sastoji od donositelja odluke, odluke, okoline i ishoda. Odluke se razlikuju po svom obujmu i po svojoj učestalosti. Odluke koje se često pojavljuju i imaju malu promjenu na ishod su uglavnom jednostavne prirode i već od prije poznate, stoga je donošenje odluke relativno lagano i zahtjeva manje vremena. No, ukoliko su odluke većeg obujma i mogu znatno utjecati na ishod, donositelj odluke mora biti u stanju suočiti se sa izazovima i promjenama novih trendova i sukladno tome pravodobno donijeti odluku koja će pozitivno utjecati na ishod.



Ako ishod ne utječe u velikom obujmu na okolinu ili pojedinca, tada su one manje važne, ali ako utječe, potrebno je pažljivo promišljanje u koracima procesa donošenja odluke [24].

Model odlučivanja se može definirati kao prikaz nekog procesa ili objekta ispitivanja, s tim da se koristi u svrhu kontrole i predviđanja. Modeli odlučivanja su od velike važnosti, iz razloga što mogu uvelike pomoći da se izbjegne pristranost pri odlučivanju, tj. nepotrebnom pridavanju prevelike važnosti najnovijim informacijama i događanjima. Modeli su u većini slučajeva realniji od ljudskih prognoza i procjena, jer ljudi imaju tendenciju da vjeruju da su njihove procjene točnije nego što u stvarnosti jesu [24].

Postoje dvije vrste modela odlučivanja, otvorenog tipa i zatvorenog tipa. Otvoreni tip modela odlučivanja složeniji je od dva tipa modela, iz razloga što se mogućnost izbora proteže preko različitih dimenzija ponašanja te su pod tim obuhvaćeni i iracionalni i racionalni aspekti odlučivanja. Zatvoreni model odlučivanja je jednostavniji u odnosu na otvorenog tipa. Zatvoreni model odlučivanja podrazumijeva klasične situacije odlučivanja gdje donositelj odluke ima na raspolaganju poznate skupine inačica, i među njima odabire onu koja nudi najbolje rješenje [24].

Donijeti odluku u mnogim slučajevima je teško i zahtjevno, pogotovo ako se u pitanje dovodi sigurnost i ako je prisutna neizvjesnost i rizik. Okolnost pri donošenju odluke uvelike utječe na donošenje odluke, jer nije isto donijeti odluku za problem koji je već od prije poznat i donijeti odluku za problem koji nije čest, za kojeg se ne zna ishod. Donošenje odluka se prema tome dijele na [22]:

- donošenje odluka u uvjetima sigurnosti,
- donošenje odluka u uvjetima rizika, te
- donošenje odluka u uvjetima neizvjesnosti.

Odlučivanje u uvjetima sigurnosti je prva i najpoželjnija tehnika donošenja odluka, iz razloga što, kao što i samo ime govori, donosimo odluku sa sigurnošću. Sa sigurnošću se podrazumijeva da je donositelj odluke siguran i vjeruje u ono što zaključuje, bilo da je to neki događaj s kojim već ima iskustva ili ima saznanja u ishode koji će se dogoditi. Pod takvim okolnostima u današnje vrijeme se najčešće koriste tehnike iz područja linearnog programiranja i operacijskih istraživanja.

Operacijska istraživanja spadaju u granu primijenjene matematike, a koja koristi matematičke modele modeliranja, statistike i algoritme u svrhu postizanja prihvatljivih rješenja za složene probleme. Pod operacijska istraživanja spadaju tehnike linearnog programiranja, koja danas imaju široku primjenu u rješavanju složenih problema. Tehnike linearnog programiranja se primjenjuju za probleme čiji rezultat uključuje veći broj mogućih alternativnih rješenja. Glavni cilj linearnog programiranja jest ostvarivanje najboljeg rezultata pri ograničenim resursima. Isto tako metoda linearnog programiranja se koristi za definiranje i pronalaženje minimalnih, odnosno maksimalnih vrijednosti pri ograničenim resursima. Ukratko, linearno programiranje je metoda za rješavanje određenih problema pri određenim ograničenjima. Princip rada je takav da se cilj koji se želi u konačnici ostvariti opiše linearnom funkcijom, a navedena ograničenja su opisana linearnim ili ne linearnim jednadžbama [22].

Poznato je da rizik označava stupanj vjerojatnosti da će se nepoželjni događaj ostvariti. Kod odlučivanja u uvjetima rizika, razlika u odnosu kod donošenja odluka u uvjetima sigurnosti jest ta da donositelj odluke zna rješenja za određene probleme, ali nisu poznate posljedice. To znači da određena solucija može ponuditi rješenje, ali to rješenje može u konačnici dovesti do nepovoljnih ishoda koji mogu biti veći i od početnog problema. Rizik nikada nije poželjan, te se uvijek nastoji izbjeći donošenje odluka u prisustvu rizika, no to je u većini slučajeva neizbježno, pogotovo u situacijama gdje je operativnost broda kao i sigurnost posade u pitanju. Prilikom donošenja odluka u uvjetima rizika poželjno je koristiti se sa više vrijednosti, a ne samo s jednom vrijednosti kao što je to slučaj u donošenju odluka u uvjetima sigurnosti. Navedenim vrijednostima se pridodaju njihove procijenjene vjerojatnosti pojavljivanja, stoga je lakše donijeti konačnu odluku koja ima najbolji ishod uz malo rizika [21].

Odlučivanje u uvjetima nesigurnosti je posljednja i ujedno i nepoželjna metoda odlučivanjima s obzirom na okolnosti. Dok kod odlučivanja u uvjetima sigurnosti donosimo odluke sa sigurnošću, ovdje se donose odluke sa određenom dozom nesigurnosti, u čestim trenucima i s potpunom nesigurnošću. Iz tih razloga ovo je nepoželjna metoda odlučivanja, jer donosimo odluke bez potrebnih informacija, bez dovoljno iskustva ili jednostavno bez saznanja o problemu ili ishodu koji se može dogoditi.

Postoje dvije vrste odlučivanja koje su prisutne kod ove metode. Prva bi bila kada donositelj odluke zna inačice rješenja (vrlo slično kao i kod odlučivanja s rizikom) ali ne zna njihove vjerojatnosti nastupanja, a druga bi bila da donositelj odluke ne zna niti rješenja niti ishode određenog problema. Razlog tomu je uglavnom nedostatak informacija, nepouzdana alati za dijagnozu ili jednostavno nedostatak stručne spreme.

Nemogućnost pronalaženja adekvatnog rješenja dovodi do stvaranja većeg broja kriterija kojeg donositelj odluke stvara kako bi olakšao donošenje konačne odluke [25]. Stoga, na osnovu toga postoje četiri kriterija koja se primjenjuju u situacijama neizvjesnosti, odnosno nesigurnosti, a to su [22]:

- kriteriji pesimizma (*engl. Criteria of Pessimism*), max/min,
- kriteriji optimizma (*engl. Criteria of Optimism*), min/max,
- kriteriji minimalnog nezadovoljstva (*engl. Criteria of Minimum Dissatisfaction*),
- kriteriji realnosti (*engl. Criteria of Reality*),
- kriteriji racionalnosti (*engl. Criteria of Rationality*).

Temeljni princip kriterija pesimizma je da se odrednu za svaku alternativu najlošiji rezultati, pa se između tih rezultata bira ona najbolja. Što znači da se određuje najlošija opcija koja rezultira u maksimalnoj šteti, a minimalno u dobrom učinku, a koja se može ostvariti, te se potom bira opcija koja donosi upravo ono suprotno, maksimalni dobar učinak a minimalnu štetu. Kriteriji optimizma je suprotnost kriteriji pesimizma, određuje se za svaku alternativu najbolje rješenje, pa se među tim najboljim rješenjima odabire ona s najboljim mogućim ishodom.

Prilikom donošenja odluka, nije uvijek poželjno ići iz jedne krajnosti u drugu, jer to u stvarnosti nije tako, stoga je potrebno naći kompromis, odnosno, aritmetičku sredinu između ove dvije metode. To se određuje na način da se kriteriju optimizma i pesimizma dodaju pripadajuće vrijednosti, odnosno parametri, gdje bi parametar za kriteriji optimizma bio od 0 do 1, a sva razlika bi predstavljala parametar za kriteriji pesimizma. Uz takve postavljene uvijete, moguće je izračunati aritmetičku sredinu između dva kriterija, što uvelike približava dobiveno rješenje realnoj vrijednosti [22].

Kriteriji minimalnog nezadovoljstva predstavlja propuštenu priliku, uglavnom propuštena povoljna prilika za ostvarivanje pozitivnog ishoda u uvjetima nesigurnosti. Taj trenutak ima neku svoju vrijednost, jer označava razliku između propuštenog povoljnog ishoda i trenutačnog ostvarenog ishoda. U kombinaciji sa kriterijem pesimizma, moguće je izraditi tzv. matricu žaljenja, u kojoj se utvrđuju najlošiji ishodi problema. Između tih najlošijih ishoda, potrebno je odabrati onu najbolju, tj. najpovoljniji ishod [22].

Kriteriji realnosti se primjenjuje kada postoji spoznaja da svi mogući ishodi imaju jednaku vrijednost pojavljivanja, stoga je nepotrebno davati prednost jednom ishodu više nego ostalim ishodima i sl. U teoriji, svaki ishod se gleda jednako i svakom se pristupa s jednakom dozom pažnje [22].

Kako bi se lakše razumio sam postupak donošenja odluka, mora se poznavati teorija koja stoji iza donošenja odluka. Teorija odlučivanja se sastoji od niza načina i procesa koji modeliraju pristup donošenju odluka. U samom središtu teorije odlučivanja ležu svi bitni aspekti koji su ključni za postizanje odluke, a to su [22]:

- vrijednost,
- nesigurnost,
- rizici,
- informacije,
- objekt problema.

Postoje razne teorije odlučivanja, ali u današnjem vremenu tri su najzastupljenije teorije odlučivanja, a to su:

- normativni pristup odlučivanju,
- deskriptivni pristup odlučivanju,
- preskriptivni pristup odlučivanju.

Karakteristike pojedinih pristupa odlučivanja su prikazana u tablici 2.

**Tablica 2. Karakteristike pojedinih pristupa [21]**

	Normativni pristup	Deskriptivni pristup	Preskriptivni pristup
Naglasak	Kako ljudi trebaju konzistentno odlučivati	Kako i zašto ljudi odlučuju onako kako odlučuju	Kako pomoći ljudima da donesu bolje odluke
Kriteriji	Teorijska prikladnost	Iskustvena potvrda	Efikasnost i upotrebljivost
Opseg	Sve odluke	Provjerene vrste odluka	Specifične odluke za specificirane probleme
Teorijska podloga	Aksiomi teorije očekivane koristi	Kognitivne znanosti; psihologija, vjerovanja i preferencije	Normativna i deskriptivna teorija; aksiomi analize i odluke
Operativni naglasak	Analiza inačica; određivanje preferencija	Sprječavanje sustavnih pogrešaka u ljudskom odlučivanju	Procesi i procedure; životni ciklus odluka
Sudci	Matematičari, teoretičari	Eksperimentalni istraživači	Primijenjeni analitičari

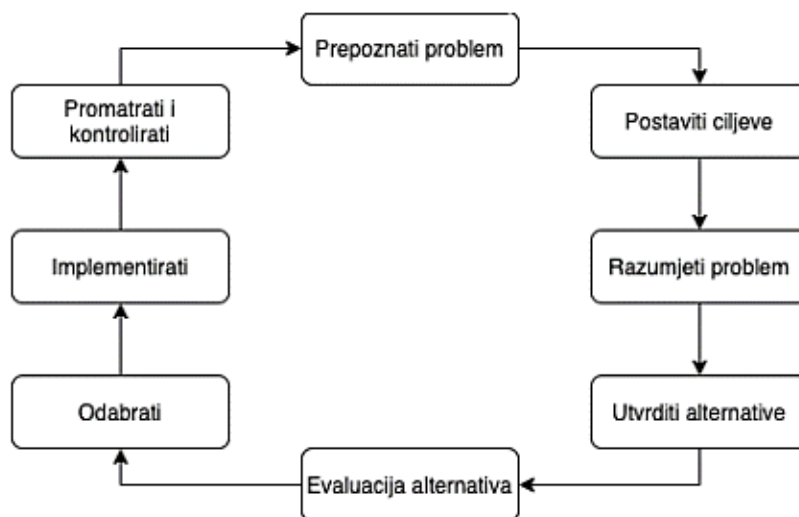
Normativni pristup odlučivanja svoje zaključke temelji isključivo na osnovama matematike i statistike. Razlika među navedenim pristupima je u tome koja pitanja pojedini pristupi postavljaju. Normativni pristup odgovara na pitanja vrednovanja razmišljanja, prosudbe i donošenja odluka sukladno određenim standardima. Generalno, normativni pristup obrađuje optimalne odluke gdje je optimalno vrlo često definirano kao idealni donositelj odluke koje je sposobno donijeti odluku potpuno racionalno pri tome uzimajući u obzir sve moguće aspekte odlučivanja i okoline. Pri tome normativni pristup zanemaruje sva kognitivna i psihološka ograničenja donositelja odluke, dakle, obrađuje samo racionalni dio odlučivanja.

Problem kojeg se rješava, tj. ono zbog čega se odluka donosi, modelira se na način da krajnja odluka bude što racionalnija, a modeliranje se vrši na bazi matematičkog modeliranja. U slučaju da se donosi odluka u uvjetima rizika, pri normativnom pristupu donositelj odluke odabire kriteriji očekivane vrijednosti, odnosno, što je očekivana vrijednost veća to je odabir poželjniji [26].

Normativni model odlučivanja pretpostavlja da svi donositelji odluke imaju sljedeće karakteristike [26]:

- posjeduju potrebno znanje o domeni te s toga mogu prepoznati sve moguće alternative i uspješno razlučiti sve moguće ishode,
- posjeduju potrebnu sposobnost procjene što im omogućuje da razvrstaju sve moguće ishode sukladno njihovoj vrijednosti,
- posjeduju sposobnost da logički, objektivno i racionalno donose zaključke i odluke.

Princip koji se provodi pri normativnom pristupu je prikazan na slici 15.



**Slika 13. Normativni model odlučivanja [26]**

Normativni pristup je danas uvriježen u svijetu kao jedna od standardnih pristupa odlučivanja, no način i uvijete koji normativni pristup postavlja u praksi i često nije prikladan, jer potpuno objektivna, informativna i racionalna donositelj odluke u praksi često nije moguć.

Deskriptivni pristup odlučivanju odgovara na pitanja vezana na način razmišljanja koja provodimo pri donošenju odluke, te što sve sprječava da situacija bude bolja od trenutane. Deskriptivni pristup se u potpunosti udaljava od normativnog i djeluje na suprotan način, jer prilikom donošenja odluka uzima u obzir kognitivna i psihološka ograničenja donositelja odluke. Deskriptivni pristup analizira dosadašnju praksu odlučivanja u nastojanju da utvrdi optimalne opcije uzimajući u obzir trenutačno stanje. To se uglavnom odnosi na odluke koje se donose na svakodnevnoj bazi. Bit deskriptivne teorije odlučivanja nije sam problem kojeg se obrađuje, već postupak samog odlučivanja i način koji se provodi kako bi se došlo do konačne odluke [26].

Preskriptivni pristup odlučivanja je kombinacija normativnog i deskriptivnog pristupa odlučivanju. Primjenjuje aspekte obaju pristupa s ciljem racionalnog donošenja odluke uzimajući u obzir kognitivne i psihološke strane odlučivanja. Prema tome, preskriptivni pristup odlučivanju ujedno je i najpristupačniji, jer se ni jednom aspektu ne predaje više pozornosti s obzirom na drugi, nego za cilj postavlja rješavanje problema pri tom uzimajući u obzir sve nužne aspekte prilikom odlučivanja [26].

#### 4.4. SOFTVERSKI ALATI ZA IZRADU STABLA ODLUČIVANJA

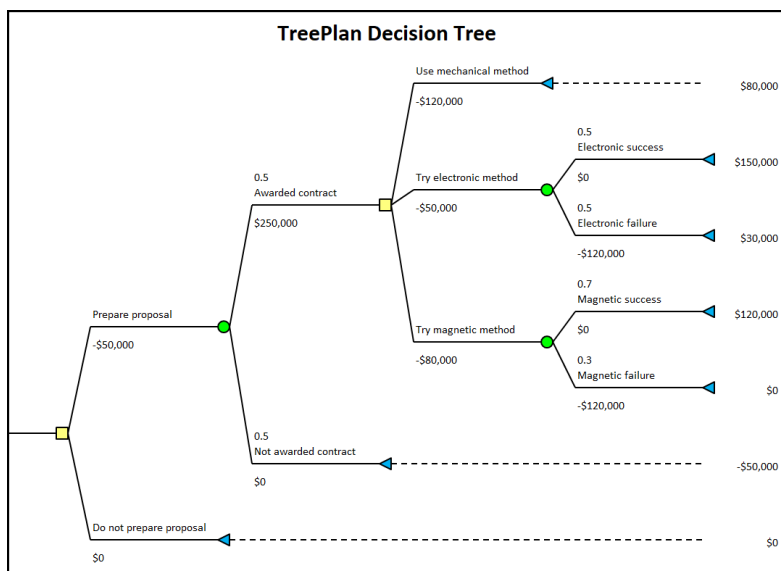
Za izradu stabla odlučivanja, potrebno je obaviti i primijeniti određene izračune. Ti izračuni variraju po pitanju kompleksnosti, što prvenstveno ovisi o vrsti i obujmu problema kojeg se razmatra. Kao što je već prije navedeno, svaka mala greška ili promjena u stablu odlučivanja može značiti izradu novog stabla, što iziskuje vremena i resursa. Stoga, kako bi se uštedilo na vremenu i proces izgradnje stabla odlučivanja učinila bržom, postoje brojni softverski alati za izradu stabla.

*TreePlan* je softverski alat koji je zapravo dodatak *MS Excel-u*. Alat je razvio profesor *Michael R. Middleton* iz Sveučilišta u *San Franciscu* u suradnji sa profesorom *Jamesa E. Smith*. Ovaj alat pruža mnoge mogućnosti i jednostavan je za korištenje.

Prednosti alata su [21]:

- jednostavna instalacija i korištenje,
- ušteda vremena pri izgradnji stabla odlučivanja,
- mogućnost provedbe analize osjetljivosti korištenjem tablica u *MS Excel-u*.

Primjer stabla odlučivanja u programu *TreePlan* prikazan je na slici 16.



Slika 14. Primjer stabla odlučivanja u programu *TreePlan* [32]

*Decision Tree Analysis* je alat za izradu stabla odlučivanja kojeg je razvila tvrtka *Vanguard Software*, a uz izradu stabla omogućuje i analizu istog. Alat je svojevrsni dodatak koji se nadodaju na platformu pod nazivom *The Vanguard System*. Alat se uglavnom primjenjuje u poslovnom području. Uz kreiranje stabla odlučivanja, alat nudi druge mogućnosti poput [21]:

- mogućnost definiranja osobne sklonosti riziku tijekom analize modela odlučivanja,
- mogućnost izrade tablice i grafikona s ciljem lakšeg prikazivanja svih mogućih ishoda i vjerojatnosti,
- mogućnost izračunavanja vrijednosti predviđanja tj. vrijednosti savršenih podataka.

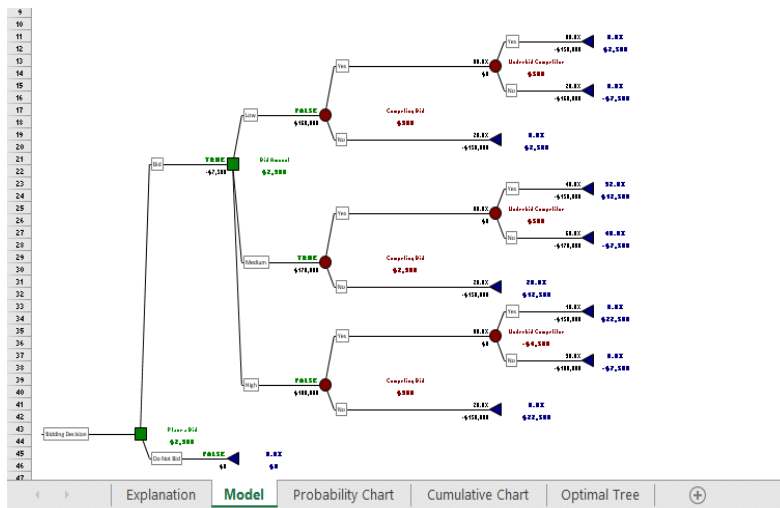
*Precision Tree* je alat za izradu stabla odlučivanja, razvijen od tvrtke *Palisade*. Kao i *TreePlan*, *Precision Tree* je također dodatak *MS Excel-u*. Jedan je od poznatijih alata za korištenje u svijetu, gdje broji preko 150 000 korisnika u poslovnom svijetu, te preko 60 000 studenata koji koriste alat u svrhu stjecanja znanja. Softver je također dostupan za korištenje na 8 različitih jezika.



Prednosti ovog alata su sljedeći [21]:

- jednostavnost u korištenju,
- jednostavnost u izradi stabla odlučivanja,
- integracija sa alatom MS Excel,
- mogućnost kreiranja dijagrama utjecaja,
- mogućnost provedbe analize osjetljivosti,
- omogućuje pojednostavljenje kompliciranih stabla.

Prikaz stabla odlučivanja u programu *Precision Tree* je prikazan na slici 17.



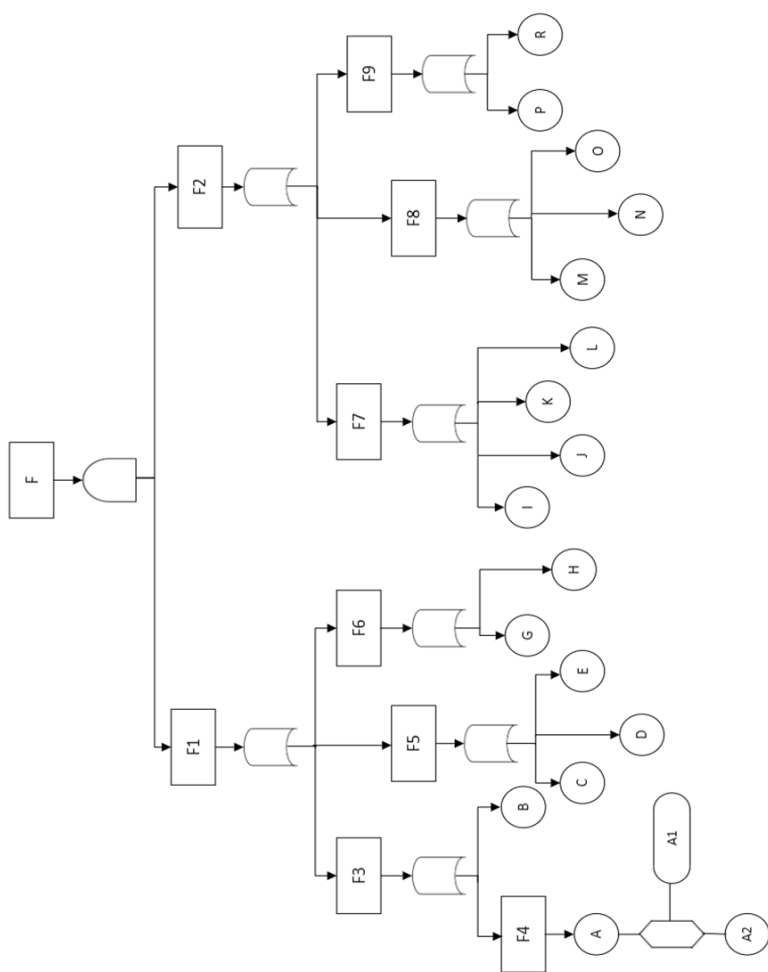
Slika 15. Grafički prikaz stabla odlučivanja u alatu *Precision Tree* [33]

*TreeAge Pro* je alat razvijen od tvrtke *Tree Age Software*. Kao i već navedeni alati, omogućuje izradu stabla, analizu stabla i analizu osjetljivosti podataka. Alat omogućuje prikaz nastalog modela u obliku stabla odlučivanja ili dijagrama utjecaja. Posebnost ovog alata je što nema ograničenja, tj. nema ograničenja u broju čvorova, grana i sl. [21].

Uz ove alate postoje još dva online alata za izradu stabla odlučivanja, a to su *MindOnMap* i *Canva*. Prednosti ovih alata je što su besplatni, što ih čini iznimno popularnim, pogotovo za početnike iz razloga što su oba alata vrlo jednostavni za koristiti. Omogućuju izradu stabla odlučivanja, te izradu grafikona i tablica za prikaz svih podataka.

## 5. IZGRADNJA LOGIČKOG MODELA STABLA ODLUČIVANJA

Prije izgradnje stabla odlučivanja, prvo treba izgraditi stablo kvara određenog brodskog sustava. U ovom slučaju, odabrani brodski sustav je sustav za hlađenje brodskog motora. Sustav hlađenja brodskog motora vitalni je sustav gdje se u slučaju njegovog zakazivanja dovodi u opasnost pravilni rad brodskog motora. Stablo kvara sustava za hlađenje brodskog motora prikazan je na slici 18.



Slika 16. Stablo kvara sustava za hlađenje brodskog motora

Popis sastavnih elemenata stabla sa slike 18. naveden je u tablici 3 i tablici 4.

**Tablica 3. Kvarovi sustava za hlađenje brodskog motora**

<b>Kvarovi sustava</b>	
<b>F</b>	kvar sustava hlađenja brodskog motora
<b>F1</b>	kvar na pumpi goriva
<b>F2</b>	neispravan rad rashladnog sustava
<b>F3</b>	mehanički kvar pumpe
<b>F4</b>	neispravan rad filtra
<b>F5</b>	električni kvar
<b>F6</b>	komplikacije s gorivom
<b>F7</b>	nedovoljna cirkulacija rashladne tekućine
<b>F8</b>	curenje rashladne tekućine
<b>F9</b>	neodgovarajuća rashladna tekućina

**Tablica 4. Simptomi sustava za hlađenje brodskog motora**

<b>Simptomi sustava</b>	
<b>A</b>	smanjen učinak filtracije (nakupljanje nečistoća u filtru - A1 i smanjeni protokom filtra - A2)
<b>B</b>	istrošeni dijelovi pumpe
<b>C</b>	smanjena učinkovitost elektromotora
<b>D</b>	oštećeni osigurači
<b>E</b>	neispravni spojevi
<b>G</b>	kontaminirano gorivo
<b>H</b>	niska razina goriva
<b>I</b>	ograničeni protok u cijevima
<b>J</b>	fluktuacija temperature
<b>K</b>	smanjena učinkovitost pumpe goriva
<b>L</b>	prisutnost zraka u rashladnom sustavu
<b>M</b>	oštećenje cijevi ili spojeva
<b>N</b>	oštećenje hladnjaka
<b>O</b>	neispravno brtvljenje
<b>P</b>	kontaminacija rashladne tekućine
<b>R</b>	fluktuacija temperature rashladne tekućine

Glavni kvar kreiranog stabla na slici 16. je kvar sustava hlađenja brodskog motora (F). Navedeni kvar može se dogoditi kao posljedica pojava kvara na pumpi goriva (F1) i uslijed neispravnog rada rashladnog sustava (F2). Logička vrata I između F i njegovih poduzročnih kvarova (F1, F2) pokazuju kako se oba kvara trebaju dogoditi kako bi se realizirao glavni kvar.

Logička vrata ILI povezuju kvar F1 sa mehaničkim kvarom pumpe (F3), neispravan rad filtra (F4), električni kvar (F5) te komplikacije s gorivom (F6). Kako bi se ostvario kvar F1 dovoljna je samostalna pojava bilo kojeg od četiri navedena kvara. Kvar F3 dogodit će se uslijed neispravnog rada filtra (F4) ili zbog istrošenosti pumpe (B).

Kvar F4 izravno je povezan sa smanjenjem učinka filtracije koji se događa nakupljanjem nečistoća u filtru (A1), a što uzrokuje smanjeni protok filtra (A2). Uslijed pojave kvara F5 dogodit će se jedan ili više simptoma koji ukazuju na njegovu pojavu, a to su smanjenja učinkovitost elektromotora (C), oštećeni osigurači (D) te neispravni spojevi (E). Komplikacije s gorivom (F6) rezultiraju pojavom kontaminiranog goriva (G) ili niskom razinom goriva (H).

Do pojave kvara F2, čija prisutnost direktno dovodi do kvara sustava hlađenja brodskog motora, može doći pojavom jednog ili više kvarova koji uključuju nedovoljnu cirkulaciju rashladne tekućine (F7), curenje rashladne tekućine (F8) te neodgovarajuću rashladnu tekućinu (F9).

Kao posljedica kvara F7 može se pojaviti jedan ili više simptoma, a to su ograničeni protok u cijevima (I), fluktuacija temperature (J), smanjenje učinkovitosti pumpe goriva (K) i prisutnost zraka u rashladnom sustavu (L).

Simptomi oštećenja cijevi ili spojeva (M), oštećenja hladnjaka (N) ili neispravnog brtvljenja (O) direktno su povezani s realizacijom kvara F8. Pojava kvara F9 dovodi do pojave kontaminacije rashladne tekućine (P) ili fluktuacije temperature rashladne tekućine (R).

Uzročno posljedične veze koje su grafički prikazane stablom kvarova mogu se izraziti i matematički. Stoga je za analizu stabla kvara sustava za hlađenje brodskog motora primijenjena Booleova algebra. Booleova algebra spada pod kvalitativne pristupe analize, jer se fokusira na logičke veze i uzročno-posljedične odnose između događaja u sustavu [31]. Stablo kvara sustava za hlađenje brodskog motora opisano je Booleovom algebrom i prikazano izrazom (16).

$$\begin{aligned}
F &= F1 \cdot F2 \\
F1 &= F3 + F5 + F6 \\
F3 &= F4 + B \\
F4 &= A \\
F5 &= C + D + E \\
F6 &= G + H \\
F7 &= I + J + K + L \\
F8 &= M + N + O \\
F9 &= P + R
\end{aligned}
\tag{16}$$

Nakon što je stablo kvara sustava hlađenja brodskog motora definirano i analizirano, pristupa se stvaranju stabla odlučivanja. Najčešća metoda za opisivanje i stvaranje stabla odlučivanja je Rauzyev princip. Upravo je navedeni princip uz kreirano stablo kvarova sa slike 16. poslužio za dobivanje izraza (17) kojim se opisuje svaki prikazani čvor.

$$\begin{aligned}
F4 &= \text{ite}(A, 1, 0) \\
F3 &= \text{ite}(A, 1, 0) + \text{ite}(B, 1, 0) \\
&= \text{ite}(A, 1, \text{ite}(B, 1, 0)) \\
F5 &= \text{ite}(C, 1, 0) + \text{ite}(D, 1, 0) + \text{ite}(E, 1, 0) \\
&= \text{ite}(C, 1, \text{ite}(D, 1, 0)) + \text{ite}(E, 1, 0) \\
&= \text{ite}(C, 1, \text{ite}(D, 1, \text{ite}(E, 1, 0))) \\
F6 &= \text{ite}(G, 1, 0) + \text{ite}(H, 1, 0) \\
&= \text{ite}(G, 1, \text{ite}(H, 1, 0)) \\
F7 &= \text{ite}(I, 1, 0) + \text{ite}(J, 1, 0) + \text{ite}(K, 1, 0) + \text{ite}(L, 1, 0) \\
&= \text{ite}(I, 1, \text{ite}(J, 1, 0)) + \text{ite}(K, 1, \text{ite}(L, 1, 0)) \\
&= \text{ite}(I, 1, \text{ite}(J, 1, \text{ite}(K, 1, \text{ite}(L, 1, 0)))) \\
F8 &= \text{ite}(M, 1, 0) + \text{ite}(N, 1, 0) + \text{ite}(O, 1, 0) \\
&= \text{ite}(M, 1, \text{ite}(N, 1, 0)) + \text{ite}(O, 1, 0) \\
&= \text{ite}(M, 1, \text{ite}(N, 1, \text{ite}(O, 1, 0))) \\
F9 &= \text{ite}(P, 1, 0) + \text{ite}(R, 1, 0) \\
&= \text{ite}(P, 1, \text{ite}(R, 1, 0)) \\
F1 &= F3 + F5 + F6 \\
F2 &= F7 + F8 + F9
\end{aligned}
\tag{17}$$

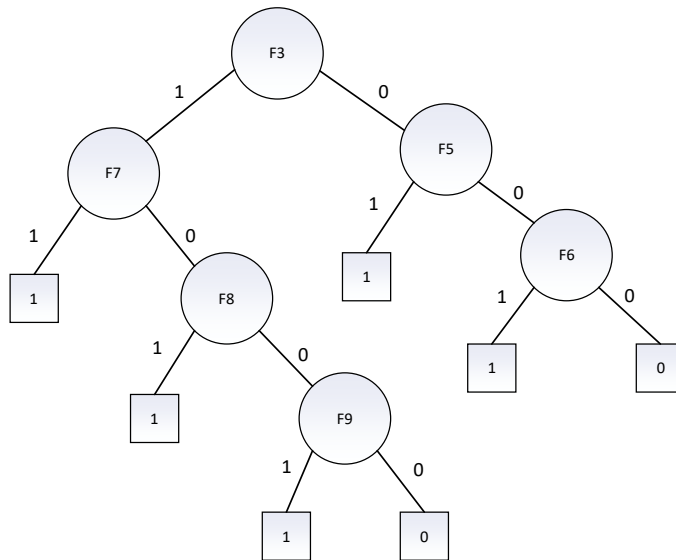
S obzirom da je mogućnost pojave glavnog kvara izvediva jedino u slučaju pojave kvara F1 i F2, onda vrijedi izraz (18):

$$F = F1 \cdot F2 \quad (18)$$

Korištenjem izraza (13) i (14) dobit ćemo izraz (19):

$$\begin{aligned} F1 &= \text{ite}(F3, 1, 0) + \text{ite}(F5, 1, 0) + \text{ite}(F6, 1, 0) \\ &= \text{ite}(F3, 1, \text{ite}(F5, 1, 0)) + \text{ite}(F6, 1, 0) \\ &= \text{ite}(F3, 1, \text{ite}(F5, 1, \text{ite}(F6, 1, 0))) \\ F2 &= \text{ite}(F7, 1, 0) + \text{ite}(F8, 1, 0) + \text{ite}(F9, 1, 0) \\ &= \text{ite}(F7, 1, \text{ite}(F8, 1, 0)) + \text{ite}(F9, 1, 0) \\ &= \text{ite}(F7, 1, \text{ite}(F8, 1, \text{ite}(F9, 1, 0))) \\ F &= \text{ite}(F3, 1, \text{ite}(F5, 1, \text{ite}(F6, 1, 0))) \cdot \text{ite}(F7, 1, \text{ite}(F8, 1, \text{ite}(F9, 1, 0))) \\ &= \text{ite}(F3, \text{ite}(F7, 1, \text{ite}(F8, 1, \text{ite}(F9, 1, 0))), \text{ite}(F6, 1, 0)) \end{aligned} \quad (19)$$

Na temelju prikazane matematičke analize moguće je prikazati binarno stablo odlučivanja, slika 19.



Slika 17. Binarno stablo odlučivanja sustava za hlađenje brodskog motora

Kod binarnog stabla odlučivanja, slika 19., dijagnostika promatranog sustava za hlađenje brodskog motora započinje sa kvarom F3 (mehanički kvar pumpe). Ako se kvar F3 pojavi, tj. ako mu je vrijednost 1, u tom slučaju postoji mogućnost pojave kvara F7 (nedovoljna cirkulacija rashladne tekućine), a u koliko je vrijednost kvara F7 jednaka 1, to će rezultirati u pojavi jedno (ili svih) od kvarova koji su usko povezani sa F7, a to su ograničeni protok u cijevima, fluktuacija temperature, smanjena učinkovitost pumpe goriva te prisutnost zraka u rashladnom sustavu.

U slučaju da je vrijednost kvara F7 jednaka 0, tada može nastupiti kvar F8 (curenje rashladne tekućine), te ako je vrijednost navedenog kvara jednaka 1, pojavit će se jedan ili više navedenih uzroka kvara, a to može biti oštećenje cijevi ili spojeva, oštećenje hladnjaka ili neispravno brtvljenje.

Ako je vrijednost kvara F8 jednaka 0, u tom slučaju može nastupiti kvar F9 (neodgovarajuća rashladna tekućina), te ako je vrijednost kvara F9 jednaka 1, nastupaju simptomi koji se mogu pojaviti skupa ili zasebno, a to su kontaminacija rashladne tekućine ili fluktuacija temperature rashladne tekućine.

Navedeni kvarovi i simptomi se pojavljuju jedino u slučaju kada je vrijednost kvara F3 jednaka 1. Ali, ako je vrijednost kvara F3 jednaka 0, u tom slučaju postoji mogućnost pojave kvara F5 (električni kvar), te ako mu je vrijednost jednaka 1, dolazi do pojave jednog ili više uzročnika kvara, koji mogu biti smanjena učinkovitost elektromotora, oštećeni osigurači ili neispravni spojevi.

Vrijednost kvara F5 jednaka 0 može rezultirati u pojavi kvara F6 (komplikacije s gorivom), te ako je vrijednost kvara F6 jednaka 1, to dovodi do mogućnosti pojave jednog ili većeg broja uzroka kvara, a to su niska razina goriva ili kontaminirano gorivo.

## ZAKLJUČAK

Održavanje i dijagnostika su ključni elementi u osiguranju pouzdanosti svih brodskih sustava, kao i broda u cjelini. Stoga pravilna strategija održavanja kao i primjena dijagnostičkih metoda uvelike doprinose postizanju toga cilja. Pravovremena i odgovarajuća strategija održavanja, kao i primjena učinkovitih dijagnostičkih metoda, povećavaju pouzdanost i operativnost broda i brodskih sustava, smanjujući pritom pojavu nepotrebnih rizika.

Jedna od metoda koja se ističe u ovom kontekstu je primjena stabla odlučivanja u dijagnostici i upravljanju. Stablo odlučivanja je izuzetno moćan alat u domeni dijagnostike i upravljanja, zahvaljujući svojoj transparentnosti i jednostavnosti. Njegova glavna prednost interpretabilnost, što omogućuje korisnicima lakše razumijevanje modela i donošenje informiranih odluka koje uvelike utječu na cjelokupan proces dijagnostike.

Stabla odlučivanja omogućuju obradu velikih količina podataka i njihovo pregledno prikazivanje, što je prijeko potrebno u situacijama gdje je svaka odluka bitna. Kroz ovaj diplomski rad su analizirani i primijenjeni osnovni principi konstrukcije stabla odlučivanja, čime se dodatno predočila prednost navedenog alata.

Osim toga, stabla odlučivanja su vrijedan dodatak drugim alatima i metodama dijagnostike. Njihova kompatibilnost s drugim alatima ne samo da povećava efikasnost i preciznost u odlučivanju, već osigurava i omogućuje dublje razumijevanje kompleksnijih problema u analizi podataka i podršku pri odlučivanju. Daljnja istraživanja i unapređenja u metodama izgradnje i interpretacije stabla odlučivanja, kao i njihova integracija s drugim dijagnostičkim metodama, čine ovu dijagnostičku metodu iznimno privlačnom za dijagnosticiranje i upravljanje, obećavajući dodatna poboljšanja i veću preciznost u primjeni.



## LITERATURA

- [1] <https://moodle.srce.hr/2021-2022/course/view.php?id=118107Fsd> (pristupljeno 29.2.2024)
- [2] Bratić, K.: *Analiza primjene suvremenih strategija održavanja u pomorstvu*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Split, 2016.
- [3] Lovrić, J.: *Osnove brodske terotehnologije*, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Dubrovnik, 1989.
- [4] Mohović, R.; Mohović, Đ.: *Upravljanje rizikom u pomorstvu*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, 2011.
- [5] Morgan, M.G.; Henrion M.: *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge, UK, 1990.
- [6] Bukša, A.; Šegulja, I.; Tomas, V.: *Ship Machinery Maintenance Concept Adjustment and Design*, Pomorski fakultet u Rijeci, 2009.
- [7] Kraš, A., Bonato, J., Draščić Ban, B.: *Pouzdanost i raspoloživost digitalnih sustava*, Pomorski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2017.
- [8] Mirano, H., Kos, S., Njegovan, M.: *Procjena i kontrola operativnih rizika na brodu u skladu s ISM pravilnikom*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2011.
- [9] Šegulja, I., Bukša, A.: *Održavanje broskog pogona*, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2006.
- [10] Majdandžić, N., *Strategija održavanja i informacijski sustavi održavanja*, Slavonski Brod, Strojarski fakultet, 1999.
- [11] Radica, G.: *Dijagnostika kvarova*, Pomorski fakultet u Splitu, Split, 2010.
- [12] Labađuk, F.: *Sustav za dijagnostiku i predviđanje kvara*, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, Rijeka, 2020
- [13] Mouzakitis, A.: *Classification of Fault Diagnosis Methods for Control Systems*, Warwick, UK, 2013.
- [14] [https://www.researchgate.net/publication/3412840\\_Object\\_Worlds\\_in\\_Work\\_Domain\\_Analysis\\_A\\_Model\\_of\\_Naval\\_Damage\\_Control#pf6](https://www.researchgate.net/publication/3412840_Object_Worlds_in_Work_Domain_Analysis_A_Model_of_Naval_Damage_Control#pf6) (pristupljeno 16.3.2024)
- [15] Kondratenko, Y.P., Kondratenko, G.V., Pidoprigora, D.M., Sidorenko, S.A., Timchenko V.L.: *Fuzzy approach for desings of ships decision-making systems*, Ukrainian State Maritime Technical University, Grenoble, France, 2000.

- [16] Škalic, B.: *Primjena ekspertnih sustava za održavanje suvremenih brodskih motora*, Diplomski rad, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Split, 2016
- [17] [https://www.researchgate.net/publication/250718075\\_A\\_Hierarchical\\_Rule-Based\\_Fault\\_Detection\\_and\\_Diagnostic\\_Method\\_for\\_HVAC\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/250718075_A_Hierarchical_Rule-Based_Fault_Detection_and_Diagnostic_Method_for_HVAC_Systems) (pristupljeno 16.3.2024)
- [18] <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/fault-tree-analysis-reliability-block-diagrams-and-blocksim> (pristupljeno 18.3.2024)
- [19] Bernard, L., Palowitch, JR.: *Fault diagnosis of process plants using casual models*, B. S. University of Pittsburgh, SAD, 1987.
- [20] <https://www.studocu.com/ph/document/university-of-cebu/bs-accountancy/introduction-to-decision-trees/9176302> (pristupljeno 1.3.2024)
- [21] Kidemet, M.: *Primjena metode stablo odlučivanja*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike, Zagreb, 2018.
- [22] Perošević, M.: *Stablo odlučivanja te primjena u ekonomiji*, Završni rad, Ekonomski fakultet u Osijeku, Osijek, 2020.
- [23] [http://dms1.irb.hr/tutorial/hr\\_tut\\_dtrees.php](http://dms1.irb.hr/tutorial/hr_tut_dtrees.php) (pristupljeno 4.5.2024)
- [24] Ledenko, A.: *Modeli odlučivanja*, Završni rad, Sveučilište u Puli, Pula, 2019.
- [25] Perković, M.: *Načini odlučivanja*, Završni rad, Sveučilište u Puli, Pula, 2019.
- [26] Gašljević, K.: *Sustav za podršku odlučivanju metodom ekvivalentnih zamjena*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike, Zagreb, 2020.
- [27] <https://www.cril.univ-artois.fr/pyxai/documentation/explanations/DTexplanations/> (pristupljeno 23.6.2024)
- [28] Lisandro, A., Jimenez-Roa, Heskens, T., Stoelinga, M.: *Fault Trees, Decision Trees, And Binary Decision Diagrams: A Systematic Comparison*, University of Twente, Nizozemska, 2023.
- [29] <https://www.microsoft.com/en-us/research/uploads/prod/2006/01/Bishop-Pattern-Recognition-and-Machine-Learning-2006.pdf> (pristupljeno 3.7.2024)
- [30] Remenye-PreScott, R., Andrews, J.D.: *An Enhanced Component Connection Method for Conversion of Fault Trees to Binary Decision Diagrams*, Vienna, Austria, 2006.
- [31] Sinnamon, Roslyn M., Andrews, J.D.: *Fault Tree Analysis and Binary Decision Diagrams*, Loughborough University, Loughborough, 2008.
- [32] <https://treeplan.com/> (pristupljeno 3.7.2024)
- [33] [https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-Graphic-representation-of-a-decision-tree-Precision-tree-Palisade-corporation\\_fig1\\_326440954](https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-Graphic-representation-of-a-decision-tree-Precision-tree-Palisade-corporation_fig1_326440954) (pristupljeno 10.5.2024)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Krivulja indeksa kvarova i krivulja pouzdanosti.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 2. Gaussova distribucija [2].....	7
Slika 3. Proces procjene rizika .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Slika 4. Promjena radne sposobnosti u vremenu eksploatacije [6] .....	12
Slika 5. Kvalitativni vremenski dijagram učestalosti kvarova [7].....	14
Slika 6. Proces brodskog održavanja [9] .....	16
Slika 7. Različiti pristupi održavanja [9].....	17
Slika 8. Proces dijagnostike [12] .....	23
Slika 9. Blok-dijagram stabla kvara .....	26
Slika 10. Shema stabla odlučivanja [21] .....	33
Slika 11. Elementi stabla odlučivanja [22].....	35
Slika 12. Binarno stablo odlučivanja [27] .....	37
Slika 13. Rauzyev princip kreiranja binarnog stabla odlučivanja .....	41
Slika 14. Čimbenici modela odlučivanja [24] .....	43
Slika 15. Normativni model odlučivanja [26] .....	49
Slika 16. Primjer stabla odlučivanja u programu <i>TreePlan</i> [32].....	51
Slika 17. Grafički prikaz stabla odlučivanja u alatu <i>Precision Tree</i> [33].....	52
Slika 18. Stablo kvara sustava za hlađenje brodskog motora.....	53
Slika 19. Binarno stablo odlučivanja sustava za hlađenje brodskog motora.....	57

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Opći oblik tablice odlučivanja [20] .....	38
Tablica 2. Karakteristike pojedinih pristupa [21] .....	48
Tablica 3. Kvarovi sustava za hlađenje brodskog motora .....	54
Tablica 4. Simptomi sustava za hlađenje brodskog motora .....	54

## POPIS KRATICA

TTF (engl. <i>Time to failure</i> )	vrijeme do pojave kvara
CM (engl. <i>Corrective Maintenance</i> )	korektivno održavanje
PM (engl. <i>Preventive Maintenance</i> )	preventivno održavanje
PM (engl. <i>Periodic Maintenance</i> )	periodično održavanje
OCM (engl. <i>On-Condition Maintenance</i> )	održavanje sukladno stanju
DIEX (engl. <i>Diagnostic Expert</i> )	ekspertni sustav dijagnostike
KM (engl. <i>Kalman filter</i> )	Kalman filter
FL (engl. <i>fuzzy logic</i> )	neizrazita logika
BDD (engl. <i>Binary Decision Diagram</i> )	binarno stablo odlučivanja