

**UVOD SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ STROJARSTVA

KVALIFIKACIJSKI DOKTORSKI ISPIT

Đorđe Dobrota

**KVALITATIVNA ANALIZA
U PROCJENI POUZDANOSTI POMOĆNIH
BRODSKIH SUSTAVA**

Split, srpanj 2014.

SADRŽAJ

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | UVOD | 3 |
| 2 | DEFINIRANJE POUZDANOSTI | 6 |
| 3 | SUSTAVNI PRISTUP ANALIZI POUZDANOSTI | 8 |
| 4 | TEHNIČKI SUSTAV | 10 |
| 5 | KVALITATIVNA ANALIZA SUSTAVA | 14 |
| 5.1 | Funkcionalna analiza | 15 |
| 5.1.1 | <i>Podjela funkcija</i> | 16 |
| 5.1.2 | <i>Tehničke metode funkcionalne analize</i> | 17 |
| 5.1.2.1 | <i>Metoda funkcionalnog stabla</i> | 17 |
| 5.1.2.2 | <i>FAST metoda</i> | 21 |
| 5.1.2.3 | <i>SADT metoda</i> | 22 |
| 5.1.2.4 | <i>MFM metoda</i> | 26 |
| 5.1.2.5 | <i>GTST metoda</i> | 32 |
| 5.2 | Osnovni koncept analize kvarova | 34 |
| 5.1.1 | <i>Pojam kvara, greške i neispravnosti</i> | 35 |
| 5.1.2 | <i>Mod kvara</i> | 37 |
| 5.1.5 | <i>Uzrok i mehanizam kvara</i> | 38 |
| 5.1.6 | <i>Efekt i posljedica kvara</i> | 40 |
| 5.3 | Razvrstavanje kvarova | 41 |
| 5.3.1 | <i>Razvrstavanje kvarova prema modovima kvara</i> | 42 |
| 5.3.2 | <i>Razvrstavanje kvarova prema uzroku kvara</i> | 43 |
| 5.3.3 | <i>Razvrstavanje kvarova prema efektu i posljedicama kvara</i> | 46 |
| 5.3.4 | <i>Zavisni kvarovi</i> | 47 |
| 5.4 | Analiza pouzdanosti | 48 |
| 5.4.1 | <i>Temeljne matematičke definicije</i> | 48 |
| 5.4.1.1 | <i>Funkcija pouzdanosti</i> | 49 |
| 5.4.1.2 | <i>Funkcija učestalosti kvarova</i> | 52 |
| 5.4.1.3 | <i>Srednje vrijeme do kvara-MTTF</i> | 55 |
| 5.4.2 | Metode i tehnike analize pouzdanosti | 56 |
| 5.4.2.1 | <i>Kvalitativne i kvantitativne metode</i> | 64 |
| 5.4.2.2 | <i>Induktivne i deduktivne metode</i> | 65 |
| 5.4.2.3 | <i>Modeliranje zavisnosti</i> | 66 |
| 5.5 | Izvori podataka pouzdanosti | 69 |
| 5.5.1 | <i>Baza podataka događaja kvara funkcionalnog bloka</i> | 70 |
| 5.5.2 | <i>Baza podataka nesreća ili incidenata</i> | 70 |
| 5.5.3 | <i>Baze podataka pouzdanosti komponenti</i> | 72 |
| 5.5.4 | <i>Analiza podataka i kvaliteta podataka</i> | 73 |
| 6 | PRIMJER KVALITATIVNE ANALIZE TEHNIČKOG SUSTAVA | 81 |
| 6.1 | Tehnički opis sustava | 81 |
| 6.2 | Funkcionalna analiza sustava | 87 |
| 6.3 | Analiza pouzdanosti | 92 |
| 6.3.1 | <i>Analiza kvarova komponenti</i> | 93 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------|-----|
| 6.3.2 | <i>Ekspertno mišljenje</i> | 100 |
| 6.3.3 | <i>Bayesova metoda procjene pouzdanosti</i> | 102 |
| 6.3.4 | <i>Određivanje učestalosti kvarova komponenti</i> | 105 |
| 6.3.5 | <i>Model pouzdanosti hidrauličkog cilindra</i> | 113 |
| 7 | ZAKLJUČAK | 121 |
| | LITERATURA | 122 |
| | PRILOZI | 129 |
| | Popis slika | 129 |
| | Popis tablica | 131 |

1 UVOD

Svijet u dvadeset prvom stoljeću je vrlo kompleksan u socijalnom, političkom, ekonomskom i tehnološkom pogledu. Tako se danas u svim industrijskim granama radi postizavanja što boljih ekonomskih pokazatelja zahtijeva što veća efikasnost i konkurentnost. S druge strane sigurnost ljudi i zaštita okoliša čine osnovu održivog razvoja i napretka čovječanstva, dok noviji razvoj zahtijeva potrebu uzimanja u obzir i društvenih te kulturnih aspekata. Ova kompleksnost se reflektira u mnogim proizvodima i sustavima koji se proizvode i koriste.

Zadaci inženjera su dizajn i održavanje tehničkog proizvoda ili sustava. Međutim, izrada i održavanje pouzdanog proizvoda ili sustava postaje sve teži zadatak i to zbog njihove složenosti i sofisticiranosti, novih materijala i tehnologija izrade, inzistiranju na kvaliteti, svijesti javnosti, novih zakona i pravila koja se odnose na jamstva, ugovorni zahtjevi državnih tijela radi zadovoljavanja svojstva pouzdanosti i održavanja, te profita.

Svaka stvar neovisno o tome kako je dizajnirana, proizvedena ili održavana će se prije ili kasnije pokvariti. Zbog prirode mnogih faktora koji mogu biti uključeni, vrijeme pojave kvara je nepredvidivo, tj. slučajno. Postoje mnogi faktori koji dovode do kvara ili pridonose vjerojatnosti pojave kvara. To uključuje dizajn, materijale, izradu, kontrolu kvalitete, transport i manipulaciju, skladištenje, korištenje, okolina, pojave koje se odnose na prijašnje kvarove, kvar povezanih komponenti, dijelova ili sustava, kvaliteta popravka nakon kvara itd. Pošto se kvar ne može u potpunosti spriječiti, vrlo je važno minimizirati vjerojatnost pojave i utjecaj kvara kada se dogodi. Posljedice kvara (tj. utjecaj nepouzdanosti) mnoge su i raznolike u zavisnosti od zainteresiranih strana, ali skoro svi kvarovi imaju ekonomski učinak. Zainteresiranih strana može biti jedna ili više njih tako da mogu uključivati proizvođača, prodavača, kupca, korisnika, osiguravatelja, drugih trećih strana i u krajnjem slučaju društva u cjelini. Očekivanja svih zainteresiranih strana u svezi sposobnosti proizvoda ili sustava da

izvrše njihovu predviđenu funkciju, tj. za njihovom pouzdanošću, su uvijek velika i postaju sve veća. Pouzdanost je postala jednako važna kao i radne karakteristike tehničkog sustava, pa se stoga analizira kao poseban projektni zadatak. Analiza i povećanje pouzdanosti provode se kroz sve faze životnog ciklusa tehničkog sustava počevši od početne specifikacije, dizajna, uvođenja, rada, održavanja, promjena i konačno do povlačenja iz uporabe. Sukladno tome, pouzdanost ima potencijalno široki opseg područja primjene i to kod:

- inženjerskog dizajna,
- optimizacije održavanja i rada,
- analize rizika,
- zaštite okoliša,
- kvalitete,
- verifikacije kvalitete/pouzdanosti.

Zbog prirode mnogih faktora koji mogu biti uključeni, vrijeme pojave kvara je nepredvidivo, tj. slučajno. Pouzdanost i održavanje procjenjuje i predviđa vjerojatnost kvara pri čemu korištene metode kvantificiraju pouzdanost koristeći vjerojatnost i statistiku za predviđanje, mjerenje i analizu podataka pouzdanosti. Komponente i tehnički sustavi mogu uključivati računalne programe i ljude u mnogim različitim ulogama i to kao dizajnere, operatore ili osoblje održavanja. Stoga se pouzdanost može općenito podijeliti na tri grane i to na pouzdanost tehničkih komponenti ili sustava (pouzdanost hardvera), pouzdanost programa i pouzdanost čovjeka. Veze između tehničkog sustava, programa i čovjeka su vrlo važne, ali one neće biti teme ovog rada.

Kod analiza pouzdanosti tehničkih komponenti i sustava koriste se dva različita pristupa i to fizički pristup (eng. *physical approach*) i aktuarski pristup (eng. *actuarial approach*). Kod fizičkog pristupa uzima se u obzir promjenjivost osnovnih parametara kao što su masa, dimenzije, koeficijent trenja, čvrstoća i naprezanja. Svi ovi parametri nisu nikad apsolutni već su u praksi promjenjivi zbog promjena procesa i materijala, ljudskog faktora i primjene. Neki parametri se mijenjaju i s vremenom, pa se stoga svi parametri modeliraju kao slučajne varijable. Stoga razumijevanje zakona vjerojatnosti i uzroka i posljedica promjenjivosti je potrebno za stvaranje pouzdanog proizvoda ili sustava kao i za rješenje problema nepouzdanosti. Ovaj pristup se uglavnom koristi za analizu pouzdanosti elemenata konstrukcija. Kod aktuarskog pristupa svi dostupni podaci osnovnih parametara (npr. naprezanje, čvrstoća, itd.) komponenti i sustava opisuju se funkcijom kumulativne gustoće vjerojatnosti kvara $F(t)$. Pri tome se ne izvodi izričito modeliranje parametara. Svojstva pouzdanosti kao što su učestalost (intenzitet) kvara i srednje vrijeme do kvara izvode se izravno iz funkcije $F(t)$. Za modeliranje pouzdanosti sustava nekoliko komponenti mogu se koristiti različiti pristupi, a može se uključiti i održavanje te zamjena komponenti. Kada je više komponenti spojeno u sustav tada se govori o analizi pouzdanosti sustava.

Kod analize pouzdanosti komponenti ili cijelog tehničkog sustava potrebno je raditi s modelom. Ovi modeli mogu biti grafički ili matematički. Matematički model je potreban kako bi se mogli unijeti podaci te koristeći matematičke i statističke metode procijeniti pouzdanost, sigurnost ili parametre rizika. Stoga, za model i analizu pouzdanosti komponenti ili sustava potrebno je više vrsta podataka. Tehnički podaci su potrebni kako bi se razumjela funkcija i funkcionalni zahtjevi i uspostavio model, a obično se dobavljaju od proizvođača. Pogonski podaci i podaci okoline potrebni su za uspostavljanje modela komponenti i sustava. Podaci održavanja u obliku postupaka, resursa, kvalitete i trajanja popravaka potrebni su za uspostavljanje modela elementa i za određivanje raspoloživosti komponenti i sustava. Nadalje, potrebne su i različite vrste podataka pouzdanosti koji se odnose na informacije o

kvarovima i vremenima razdiobe kvarova. Ukoliko su ljudi aktivni operatori sustava potrebni su i podaci o njihovoj mogućnosti popravka kvara i povrata funkcija komponenti ili sustava.

Podaci pouzdanosti najčešće dolaze iz generičkih izvora podataka (baze podataka, iskustva drugih, prethodno znanje itd.) ili pak na temelju vlastitog iskustva (npr. zapisi testiranja opreme), kao i kombiniranom primjenom jednog i drugog. Korištenje modela pouzdanosti kao stohastičkih modela uključuje procjenu nepoznatih parametara modela. Obično se parametri procjenjuju na osnovu promatranih podataka, a zaključci analize pouzdanosti izrađuju se pretpostavljajući kako su parametri jednaki njihovim procjenama, tj. fiksni. Ovaj tzv. frekvencijski pristup (eng. *frequentist approach*) za procjenu nepoznatih parametara modela moguć je ukoliko se raspolaze s dovoljno podataka koji se promatraju. Međutim, korištenje modela pouzdanosti vrlo često je ograničeno nedostatkom odgovarajućih podataka pouzdanosti za procjenu parametara. Ovo se posebno javlja u slučaju kada se uvodi novi proizvod ili nova tehnologija. Problem nedostataka podataka nije samo svojstven za nove elemente (komponente/sustave), već se javlja i kod elementa koji su u radu. Stoga, kada generički podaci ili pak drugi promatrani podaci nisu dostatni ili potpuno mjerodavni, model pouzdanosti može se izraditi i potvrditi koristeći prikupljene podatke sličnih tehničkih komponenti ili sustava. Pri tome je pored konvencionalnih statističkih metoda moguće koristiti i statističku metodu koja se bazira na Bayesovom okviru. Ukoliko Bayesova analiza uključuje i ekspertno znanje predmetnog područja, kao što su informacije koje se posebno odnose na proces proizvodnje i iskustva sličnih komponenti i sustava, tada ona predstavlja snažan alat za rješavanje problema procjene parametara u slučaju nedostatnih ili nedovoljno mjerodavnih podataka.

Ovaj rad se bavi pregledom metodologija u inženjerstvu pouzdanosti. Poseban značaj je dan kvalitativnoj analizi sustava, a koja se mora sprovesti sa svrhom da se dobiju odgovori na pitanja kako sustav radi, kako se može pokvariti i koje su posljedice kvara.

U drugom poglavlju ovog rada definirani su osnovni pojmovi i definicije prema standardima koji se koriste u inženjerstvu pouzdanosti. Treće poglavlje opisuje sustavni pristup koji je osnova svake analize pouzdanosti. Četvrto poglavlje definira osnove i definicije tehničkih sustava prema standardima, kao i veze istih s okolinom o kojoj ovisi njihova pouzdanost. Navedeni su i načini prikazivanja strukturnog i funkcijskog odnosa u sustavu pomoću funkcijskih blok dijagrama.

Peto poglavlje opisuje metodologiju kvalitativne analize sustava koja uključuje niz aktivnosti kao što su familijarizacija sa sustavom, funkcionalna analiza, klasifikacija kvarova i procjena pouzdanosti komponenti/sustava. Navedene je podjela funkcija i kratko su opisane tehničke metode funkcionalne analize sustava koje se susreću u praksi i literaturi, a kojima je svrha identificirati i opisati sve funkcije sustava kako bi se dobio odgovor na pitanje kako sustav radi. Nadalje, definiran je pojam kvara, greške i neispravnosti sukladno standardima i preporukama drugih autora. Pri tome je opisan koncept kvara koji se zasniva na pojmovima kao što su mod kvara, uzrok kvara, mehanizam kvara, efekt i posljedica kvara. Prikazan je i način na koji se kvarovi razvrstavaju u literaturi, a koji se uglavnom zasniva na konceptu kvara. U ovom poglavlju opisane su osnovne matematičke definicije pouzdanosti. Nadalje, navedene i opisane su osnovne metode i tehnike analize pouzdanosti koje su preporučene raznim standardima i koje se susreću u literaturi. Pri tome je navedena i njihova podjela s obzirom kako se određuje vjerojatnost kvara i kako se istražuje odnos između uzroka i efekta kvara. Pregledom dostupne literature navedene su i nove metode koji razni istraživači preporučuju kao dinamičke modele pouzdanosti kojima se modeliraju zavisnosti između

komponenti unutar sustava. Konačno, navedeni su dostupni izvori podataka pouzdanosti, odnosno baze podataka koje se prikupljaju iz raznih izvora, pri čemu je naglašena potreba analize kvalitete podataka kod korištenja istih.

U šestom poglavlju prikazan je primjer kvalitativne analize tehničkog sustava, a na primjeru jednog od radnih sustava broda-samohodno usisno jaružalo, kao pomoćnom brodskom sustavu. Pri tome je sustav tehnički opisan kako bi se izvršila njegova funkcionalna analiza. Pregledom dostupne tehničke dokumentacije i podataka o kvarovima s broda izvršena je analiza i podjela kvarova, a kako bi se izvršila procjena pouzdanosti na primjeru hidrauličkog cilindra kao komponente sustava. Pri tome je korištena Bayesova metoda analize pouzdanosti koja daje mogućnost uzimanja u obzir prethodnog znanja (npr. baze podataka) i realnih dostupnih podataka pouzdanosti o komponentama, dobivenih tijekom njenog rada. Na osnovi tih informacija izračunata je učestalost pojave kvara hidrauličkog cilindra kao popravljive komponente i odgovarajuća nesigurnost te procjene, a koja se zatim može modificirati koristeći ekspertno mišljenje. Dobiveni rezultati su komentirani, te je naglašena svrha analize pouzdanosti komponente/sustava da se u kontekstu stvarnog problema donese odluka koja se može odnositi na politiku održavanja ili procjenu rizika.

Zadnje poglavlje sadrži zaključak ovog kao i smjernice budućeg rada, te naglašava potrebu potpunog pojmovnog razumijevanja svih relevantnih izraza i poznavanja tehničkih metoda koje se koriste u inženjerstvu pouzdanost.

2 DEFINIRANJE POUZDANOSTI

Sve do 1960 godine pouzdanost je bila definirana kao: "*Vjerojatnost da će element izvršiti zadanu funkciju pod utvrđenim uvjetima za utvrđeni period vremena*". Neki autori još uvijek preferiraju ovu definiciju, Rausand i Høyland (2004). Ipak, većina autora koristi općenitiju definiciju pouzdanosti date standardima ISO 8402:1986 i BS 4778:1991, a koji definiraju pouzdanost kao: "*sposobnost elementa da obavi zahtijevanu funkciju, pod zadanim okolišnim i radnim uvjetima i za utvrđeni period vremena*". Prema ovoj definiciji izraz "*element*" označava svaku komponentu, pod-sustav ili sustav koji se može smatrati kao objekt. Zahtijevana funkcija može biti jedna ili kombinacija funkcija, a koja je potrebna za pružanje određene aktivnosti. Svi tehnički elementi (komponente, pod-sustavi i sustavi) su dizajnirani za obavljanje jedne ili više funkcija, te moraju zadovoljavajuće raditi u određenom periodu vremena, pri stvarnoj primijeni za koju su namijenjeni.

Značenje pojma pouzdanosti obično se shvaća kao vjerojatnost uspješnog izvršenja. Procjena pouzdanosti obavlja se na osnovu dostupnih podataka testiranja, kvarova ili pak promatranjem performansi pod stvarnim ili simuliranim uvjetima. Pošto rezultati mogu varirati, procjena pouzdanosti može se razlikovati za jedan skup podataka u odnosu na drugi i to čak ukoliko nema bitne promjene fizičkih karakteristika elementa koji se procjenjuje. Stoga, uz procjenu pouzdanosti potrebno je također mjeriti i točnost procjene nazvanu razinu sigurnosti (povjerenja). Sukladno tome, Kececioglu's definira pouzdanost sljedećom definicijom: "*Pouzdanost je vjerojatnost uz definiranu razinu sigurnosti (povjerenja), da će sustav na zadovoljavajući način i bez kvara izvršavati tražene funkcije, u određenom periodu vremena, kada se koristi na način, i u uvjetima okoliša i njima svojstvenoj razini opterećenja*". Razina sigurnosti (eng. *confidence level*) ovisi o količini dostupnih promatranih podataka i/ili rezultata. Podaci se obično ravnaju prema nekoj parametarskoj funkciji distribucije. To znači kako se podaci mogu prikazati matematičkim izrazom kojim se opisuje

određena statistička (diskretna ili kontinuirana) funkcija distribucije vjerojatnosti. Većina analiza pouzdanosti i životnog vijeka fokusira se na modeliranje distribucije vremena kvara elementa, odnosno modeliranje svojstava kontinuirane slučajne varijable T . Svojstva kontinuirane slučajne varijable T mogu se opisati koristeći funkciju gustoće vjerojatnosti $f(t)$ ili funkciju kumulativne gustoće vjerojatnosti $F(t)$, funkciju pouzdanosti $R(t)$ i funkciju učestalosti kvarova $\lambda(t)$.

Ovisno o pojedinoj situaciji, pouzdanost se može kvantificirati na razne načine, kao npr.:

- srednje vrijeme do kvara (eng. *Mean Time To Failure*; kratica *MTTF*) za elemente koji nisu popravljivi,
- srednje vrijeme između kvarova (eng. *Mean Time Between Failures*; kratica *MTBF*) za elemente koji se poprave i vrate u funkciju,
- učestalost kvarova, tj. broj kvarova u jedinici vremena (eng. *failure rate*),
- vjerojatnost da element neće otkazati u vremenskom intervalu $(0, t]$ (vjerojatnost preživljavanja),
- vjerojatnost da je element sposoban funkcionirati u vremenu t (raspoloživost u vremenu t).

Kod nepopravljivih elemenata pouzdanost je vjerojatnost preživljavanja tijekom očekivanog vijeka trajanja kada se može dogoditi samo jedan kvar. Pri tome nepopravljivi elementi mogu biti pojedinačni dijelovi kao što su (npr. žarulje, elektronički elementi itd.) ili sustavi sastavljeni od mnogo dijelova (npr. mikroprocesor, motor rakete, bespilotna letjelica itd.). Tijekom vijeka elementa vjerojatnost prvog i jedinog kvara naziva se trenutna učestalost (intezitet) kvara (eng. *instantaneous hazard rate*) i obično se označava kao λ . Kod elementa koji se popravljaju nakon kvara, pouzdanost je vjerojatnost da se kvar neće dogoditi u periodu interesa kada se može dogoditi više od jednog kvara. Pouzdanost popravljivih elemenata najčešće se kvantificira kao učestalost pojave kvarova (*ROCOF-Rate Of Occurrence Of Failures*). Ponekad se elementi mogu promatrati kao popravljivi i nepopravljivi. Tako npr. raketa može biti popravljiv sustav dok je predmet predviđenog testiranja i dok se nalazi na tlu, ali postaje nepopravljiv sustav kada se lansira. Stoga analiza pouzdanosti takvih sustava mora uzeti u obzir takva različita stanja. Isto tako popravljivi elementi razmatraju se kao popravljivi samo pod određenim uvjetima. Tako npr. motor ili vozilo mogu se tretirati kao popravljivi samo do određene starosti ili troškova popravka.

Popravljivi elementi nakon kvara ulaze u proces popravka. Dakle, popravak je akcija održavanja kada se desi kvar. Održavanje se prema standardu Međunarodnog elektrotehničkog komiteta IEC 60050(191):1990 (eng. *International Electrotechnical Commission*; kratica *IEC*), definira kao: "Kombinacija svih tehničkih i pripadajućih administrativnih akcija uključujući akcije nadzora predviđene za zadržavanje subjekta u ili njegovog povrata u stanje u kojem može izvršiti zahtijevanu funkciju." Glavna mjera pouzdanosti održavanog elementa je raspoloživost (eng. *availability*) $A(t)$, a koja se prema britanskom standardu BS 4778 definira kao: "sposobnost elementa da obavi njegovu zahtijevanu funkciju u utvrđenom trenutnom vremenu ili iznad utvrđenog perioda vremena". Kao i pouzdanost, raspoloživost je vjerojatnost da komponenta ili sustav obavi zahtijevanu funkciju u zadanoj točki vremena ili iznad utvrđenog perioda vremena kada radi i održava se na predviđeni način. Stoga je raspoloživost funkcija svojstvene pouzdanosti elementa, pogodnosti za održavanje elementa i podrške održavanju, a što je prikazano na slici 1.



Slika 1. *Raspoloživost kao funkcija svojevne pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju.*

Za predviđanje raspoloživosti mora se uzeti u obzir distribucija vjerojatnosti kvara i popravka. Stoga se i za kvantificiranje raspoloživosti moraju primijeniti pravila teorije vjerojatnosti. Raspoloživost se može tumačiti kao vjerojatnost da je element, tj. komponenta ili sustav operativan u zadanoj točki vremena, vremenskom intervalu ili pak postotku vremena u nekom intervalu u kojem je komponenta ili sustav operativan. Sukladno tome razlikujemo raspoloživost u točki (eng. *point availability*) i prosječnu raspoloživost, a koja se još naziva i raspoloživost u intervalu ili misiji (eng. *interval or mission availability*). Prosječna raspoloživost interpretirana kao srednja prosječna raspoloživost unutar dugog perioda vremena u kojem je element sposoban funkcionirati naziva se raspoloživost dugog rada (eng. *long run availability*). Ukoliko postoji granica dugog perioda rada tada se govori o graničnoj raspoloživosti ili raspoloživosti stabilnog stanja (eng. *steady state availability*). Oblici raspoloživost dugog rada ili raspoloživosti stabilnog stanja ovise o definiranju vremena prekida rada (eng. *downtime*) i vremena rada (eng. *uptime*), pa sukladno tome razlikujemo svojevnu, ostvarenu i operativnu raspoloživost.

Pogodnost za održavanje (eng. *maintainability*) se prema britanskom standardu BS 4778 definira kao: "Sposobnost elementa da se pod utvrđenim uvjetima korištenja zadrži ili povrati u stanje u kojem može obaviti njegovu zahtijevanu funkciju, kada je održavanje izvedeno pod utvrđenim uvjetima i koristeći propisane postupke i resurse." Kao i pouzdanost, pogodnost održavanja se definira kao vjerojatnost da će se pokvarena komponenta ili sustav povratiti ili popraviti u određeno stanje unutar vremena kada je održavanje izvedeno u skladu s propisanim postupcima. Pogodnost održavanje je karakterizirana distribucijom vjerojatnosti vremena neispravnosti koju je stoga potrebno odrediti. Vrijeme neispravnosti komponente ili sustava obično se odnosi sumu faktora kao što je vrijeme pristupa, vrijeme dijagnosticiranja kvara, popravka ili zamjene, provjere itd. Duljina popravaka ovih elemenata ovisi o lakoći pristupa, pogodnosti za održavanje i raspoloživosti osoblja, alata i dijelova. Vrijeme neispravnosti određenog kvara stoga se procjenjuje na osnovu poznavanja svih ovih faktora.

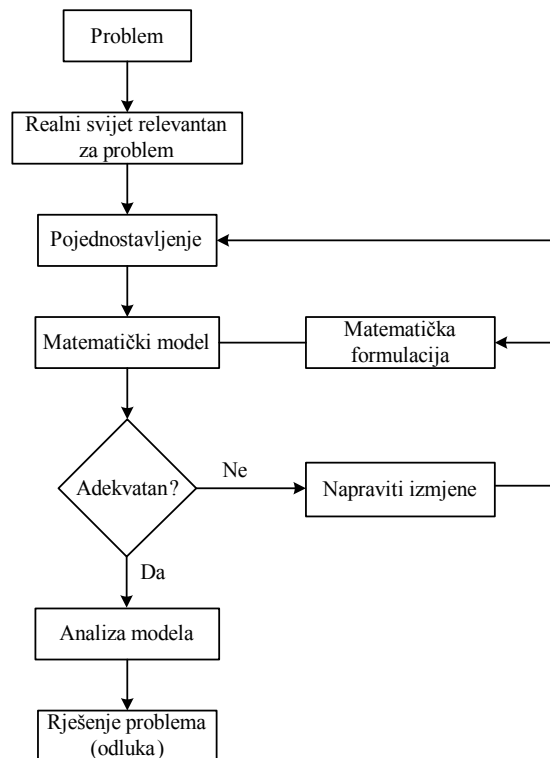
Za procjenu vremena neispravnosti obično se koriste eksponencijalna, normalna i lognormalna (najčešće) distribucija vjerojatnosti. Pogodnost održavanja elementa ovisi o faktorima dizajna kao što je ugrađena testna oprema, modularizacija, standardizacija, dispozicija dijelova i njihova pristupačnost, ergonomnost, lakoća rastavljanja i sastavljanja i dr. Druga grupa utjecaja koje utječu na pogodnost održavanja, a samim tim i na raspoloživost je podrška održavanju koja ovisi o sposobnosti i primjerene stručnosti održavatelja, njihovog broja i dostupnosti, alatima, prikladnosti tehničkih uputa prema kojima se provodi postupak održavanja, kvaliteti i dostupnosti rezervnih dijelova i dr. Postoji više mjera pogodnosti održavanja. Najčešće korištena je srednje vrijeme popravka (*MTTR-Mean Time To Repair*).

Druge moguće mjere su medijan (centralna vrijednost) vremena popravka (eng. *median time to repair*) ili vjerojatno vrijeme popravka (eng. *repair time*), vrijeme u kojem se određeni postotak kvarova mora popraviti, srednje vrijeme popravka plus srednje vrijeme prekida rada preventivnog održavanja i broj sati održavanja prema satima rada. Ova zadnja mjera kvantificira ukupnu količinu rada, dok se druge fokusiraju na vrijeme prekida rada.

3 SUSTAVNI PRISTUP ANALIZI POUZDANOSTI

Analiza pouzdanosti objekta uključuje izučavanje njegovih mjerljivih karakteristika izraženih preko vjerojatnosti da će obaviti zahtijevanu funkciju, pod zadanim okolišnim i radnim uvjetima i za utvrđeni period vremena. Pošto se pouzdanost definira u probabilističkom smislu, osnovni kvantitativni modeli su matematički, zasnovani na teoriji vjerojatnosti. Time se uvode statističke metode u analizu. Kako bi kvantitativni model bio realističan, potrebno je razumijevanje nekih od mnogih osnovnih koncepata kvarova.

Sustavni pristup je osnova svake analize pouzdanosti, Blische i Murthy (2003). Time se osigurava okvir za integraciju različitih tehničkih, komercijalnih i upravljačkih aspekta analize. Naime, osnovni cilj analize pouzdanosti mora i jest davanje informacija kao osnove za odluku. Ovakav pristup rješavanja realnih problema pouzdanosti uključuje niz koraka (slika 2), a čije uspješno izvršenje zahtijeva primjenu raznih koncepata i tehnika iz mnogih disciplina. Proces započinje s pažljivom definicijom stvarnog realnog problema na koji se odnosi. Pri tomu moraju se odrediti ciljevi, granični uvjeti i ograničenja analize na način da su potrebne mjerodavne ulazne informacije za odluku dostupne, u ispravnom obliku i pravodobne. Da bi se pristupilo rješavanju problema analitički, obično je potrebno napraviti neke pretpostavke i druga pojednostavljenja koje predstavljaju odstupanja u većoj ili manjoj mjeri od stvarnog svijeta. Sljedeći korak, koji je ključan za cijeli proces, je karakterizacija sustava na takav način da su bitni detalji problema jasno razrađeni i adekvatno modelirani.



Slika 2. Sustavni pristup za rješenje problema.[3]

Modeliranje pouzdanosti zahtijeva odabir modela, procjenu parametara i potvrđivanje modela. U početnoj fazi analize pouzdanosti, proces modeliranja započinje s kvantitativnim (grafičkim) modelom, npr. blok dijagramom koji prikazuje strukturu sustava, tj. prikaz dijelova i komponenti sustava i njihovih veza, a što može biti učinjeno na različitim razinama složenosti i detalja. Nadalje, kvalitativnim modelom indicira se vrsta i razina podataka, kao i druge informacije koje su potrebne za analizu.

Sljedeći korak u procesu je dodjeljivanje mjerljivih karakteristika pouzdanosti za uspješan rad blokova u dijagramu. Mjere pouzdanosti obično se procjenjuju na osnovu podataka koji su dostupni iz generičkih izvora podataka. Ukoliko generički podaci nisu u potpunosti odgovarajući mogu se prilagoditi ekspertnim mišljenjem. Pouzdanost sustava izračunava koristeći se logički strukturni model. Procjena tih vjerojatnosti je jedna od najvažnijih aspekata analiza pouzdanosti. Stoga, matematički model mora biti dovoljno jednostavan kako bi se moglo postupati s raspoloživim matematičkim i statističkim metodama.

Nakon što se matematički model razradi, potrebno je provjeriti njegovu primjerenost. Ukoliko model nije primjeren izvode se promjene sve dok se ne postigne dovoljno realan prikaz stvarnog problema. Kada se dobije adekvatan model, izvodi se analiza, a po potrebi i optimizacija. To zahtijeva korištenje matematičkih tehnika iz vjerojatnosti, statističke analize, stohastičkih procesa i optimizacije, Blische i Murthy (2003). Teorija pouzdanosti omogućuje koncepte i alate za tu svrhu. Završni, vrlo važan korak u procesu je tumačenje rezultata matematičke i statističke analize u kontekstu stvarnog problema.

4 TEHNIČKI SUSTAV

Prema Pahlu, Beitzu, Feldhusemnu i Groteu (2007), osnove tehničkih sustava čine:

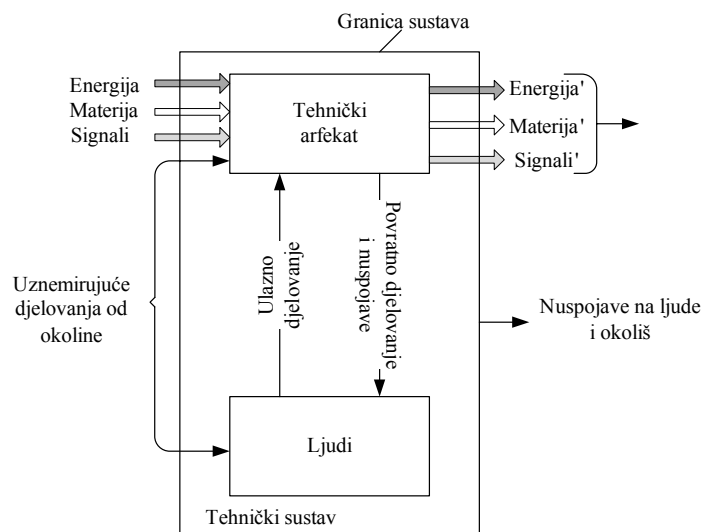
- sustav, postrojenje, oprema, stroj, sklop i komponenta,
- pretvorba energije, materijala i signala,
- funkcionalni međuodnos,
- radni međuodnos,
- konstrukcijski međuodnos,
- sustavni međuodnos,
- ciljevi i ograničenja.

Tehnički zadaci se obavljaju uz pomoć tehničkih artefakta kao što su postrojenja, oprema, strojevi, sklopovi i komponente, a koji su ovdje navedeni približno prema stupnju složenosti. Ovi izrazi ne moraju imati jednaku primjenu u različitim područjima. Tako dio opreme, npr. reaktor, može ponekad biti složeniji od postrojenja, dok artefakti imenovani kao postrojenja u nekim područjima mogu biti opisani kao strojevi u drugima. Stroj se sastoji od sklopova i komponenti. Upravljačka oprema se slično koristi u postrojenjima i u strojevima, te može biti sastavljena od sklopova i komponenti pa možda čak i od manjih strojeva. Različita primjena ovih izraza odražava zapravo povijesni razvoj i područja primjene.

Svi tehnički sustavi uključuju pretvorbu energije, materijala i/ili signala koja mora biti određena kvantitativnim, kvalitativnim i ekonomskim izrazima. U svrhu opisa funkcionalnog međuodnosa tehničkog sustava, potrebno je odrediti opću funkciju sustava s jasnim i jednostavno načinjenim odnosima između ulaza i izlaza. Pri tome ulazi i izlazi svih veličina uključenih u proces moraju imati poznate stvarne ili potrebne karakteristike.

Opća funkcija sustava može se često podijeliti u prepoznatljive pod-funkcije koje odgovaraju pod-zadacima. Odnos između pod-funkcija i opće funkcije je vrlo često upravljana određenim ograničenjima s obzirom da neke podfunkcije moraju biti zadovoljene prije drugih.

Tehnički artefakti ili sustavi (slika 3) ne djeluju izdvojeno i uglavnom su dijelovi većeg sustava.



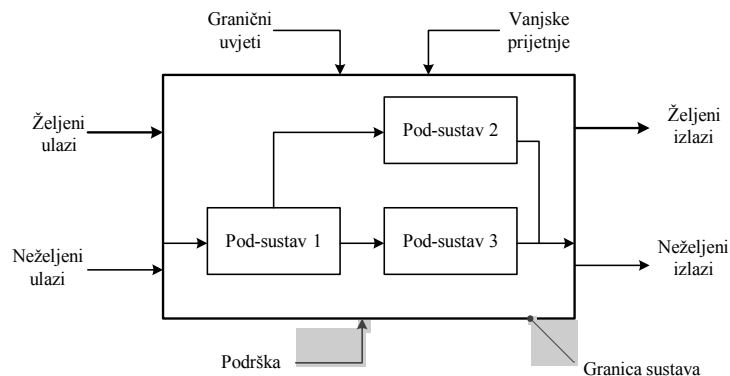
Slika 3. Međuodnosi u tehničkom sustavu uključujući ljude.

Radi ispunjenja svoje ukupne funkcije sustav često uključuje ljude kroz njihovo ulazno djelovanje. Sustav odgovara povratnim djelovanjem ili signalima koji potiču na dalju akciju. Na taj način ljudi podupiru ili omogućuju predviđeno djelovanje tehničkog sustava. Osim željenih ulaza, na tehničkih sustav mogu djelovati i neželjeni iz okruženja ili iz susjednih sustava. Takva uznemiravajuća djelovanja mogu izazvati nuspojave kao npr. odstupanja oblika ili položaja. Također je moguće da se uz željeno radno djelovanje pojavi i neželjeno, poput vibracija, od pojedine komponente unutar cjelokupnog sustava. Ove neželjne pojave mogu imati negativan utjecaj na ljude i okolinu. Stoga se mora razlučiti razlika između željenog djelovanja, ulaznog djelovanja, povratnog djelovanja, ulaznih smetnji i nuspojava, te odrediti glavne ciljeve i ograničenja.

Tehnički artefakti se stoga mogu se sagledavati kao sustavi povezani s okolinom koristeći ulaze i izlaze. Sustav se može podijeliti u pod-sustave. Što pripada pojedinom sustavu određeno je granicom sustava. Ulazi i izlazi prijelaze granice. S ovim pristupom moguće je definirati određeni sustav u svakom stupnju njegove apstrakcije, analize i podjele.

Sukladno gore navednim prihvaćenim postavkama teorije tehničkih sustava, standard američke vojske za sigurnost sustava MIL-STD 882E:2012, definira tehnički sustav kao: "organizacija hardvera, softvera, materijala, postrojenja, podataka i službi potrebnih za obavljanje dizajnirane funkcije unutar određene okoline sa naznačenim rezultatima". Standardom ISO 9000:2000 sustav je definira kao skup međusobno povezanih ili djelujućih elemenata. Elementi te zasebne jedinice koriste se zajedno u zahtijevanom radnom (pogonskom) ili podržanom okruženju za obavljanje određenog zadatka ili postizavanje određene namjene, podrške ili zahtijeve misije. Nadalje, svaki tehnički sustav ima vezu s ljudima koji mogu obavljati funkcije upravljanja, čišćenja, podmazivanja, ispitivanja i

održavanja sustava ili pak mogu biti korisnici sustava. Pozdanost tehničkog sustava će stoga ovise o njegovoj povezanosti s okolinom, pa je nepohodno proučiti kako te veze utječu na sustav. Primjer tehničkog sustava i njegovih veza prikazano je na slici 4.



Slika 4. Tehnički sustav i njegove veze.

Na slici 4, prikazani su sljedeći elementi:

1. *Sustav* koji je predmet analize obično se sastoji od nekoliko funkcijskih blokova.
2. *Granica sustava* koja određuje koji se elementi smatraju dijelom sustava, a koji su elementi izvan sustava.
3. *Izlazi* koji se mogu podijeliti u dvije grupe:
 - *Željeni izlazi*: To su željeni rezultati zahtijevane funkcije kao što su npr. materijali, energija ili informacije.
 - *Neželjeni izlazi*: Skoro svi sustavi mogu proizvesti neželjene izlaze. Takvi izlazi mogu biti zagađenje zraka, vode ili zemlje, te ozljede i negativni utjecaji na zdravlje ljudi i okoline oko sustava.
4. *Ulazi* koji se isto tako mogu podijeliti u dvije grupe:
 - *Željeni ulazi*: To su materijali i energija koje sustav koristi za obavljanje zahtijevane funkcije pri čemu kvaliteta i količina željenih ulaza mogu biti predmet varijacija.
 - *Neželjeni ulazi*: To su ulazi pridruženi željenim ulazima koji se ne mogu smatrati kao normalne varijacije željenih ulaza. Npr. neželjeni ulaz čestice nečistoće u radnoj tekućini na usisnoj strani pumpe.
5. *Granični uvjeti*: rad sustava može biti predmet određenog broja graničnih uvjeta, kao npr, prihvatljivost rizika i kriteriji okoliša određeni od strane vlade ili kompanije.
6. *Podrška*: Sustav obično zahtijeva funkcije podrške kao što su čišćenje, podmazivanje održavanje i popravak.
7. *Vanjske prijetnje*: Sustav može biti izložen različitim vanjskim prijetnjama. Neke od njih mogu direktno utjecati na sustav, dok druge mogu imati utjecaj na ulaze sustava. Vanjske prijetnje mogu se podijeliti u četiri grupe:
 - *Prirodne prijetnje okoline*: To su prijetnje sustavu od vanjske okoline kao što su poplave, oluje i potresi.
 - *Infrastrukturne prijetnje*: Te su prijetnje uzrokovane nedostacima ili prekidom infrastrukture kao što je prekid dobave električne energije ili komunikacije.
 - *Društvene prijetnje*: prijetnje od pojedinaca i organizacija kao što su palež, sabotaze, hakerstvo ili napad računalnim virusima.
 - *Prijetnje od drugih tehničkih sustava*: Djelovanje drugih sustava koji se nalaze u blizini ili su u vezi s tehničkim sustavom koji je predmet analize.

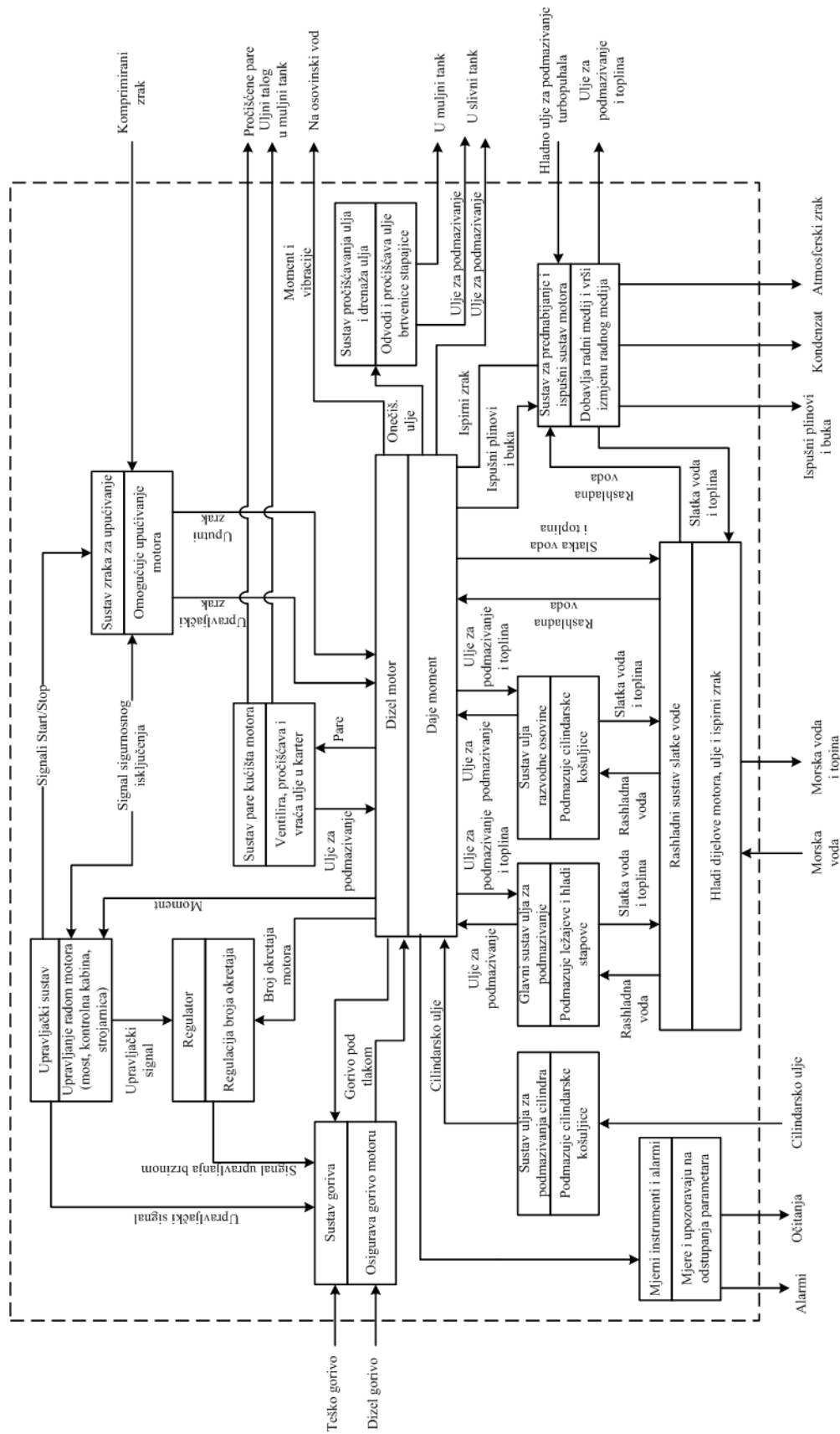
Kod analize tehničkog sustava i njegovih veza, razlika između neželjenih ulaza i vanjske prijetnje ne treba biti uvijek jasna. Nadalje, nije važno podjela različitih ulaza, ali je važno da se svi ulazi i prijetnje prepoznaju i razmotre u analizi.

Kompletni opis tehničkog sustava zahtijeva definiranje, Lambert i dr (1999):

- Strukturnog modela koji pokazuje dijelove sustava koji izvode funkcije.
- Funkcionalni model koji opisuje različite funkcije.
- Model ponašanja (behavioristički model) koji pokazuje način na koji se funkcije obavljaju.

Kako će se razmatrati tehnički sustav ovisi o vezi tehničkog sustava i ljudi, fazi životnog ciklusa sustava i ciljevima proučavanja sustava. Tako je kod strukturnog opisa (modela) od područje interesa fizička struktura različitih pod-sustava i komponenti i veze između njih. Područje interesa kod funkcionalnog opisa su razne funkcije sustava. Stoga je funkcionalni model usmjeren na ciljeve postignute funkcijama i omogućuje procjenu posljedica gubitka funkcije. Budući da se strukturni i behavioristički opis vežu za funkciju, funkcionalna analiza je središnja i iz tog razloga najvažnija. Tako se u ranoj fazi procesa dizajna novog sustava obično počinje s definiranjem niza željenih funkcija i razvojem sustava koji je sposoban ispuniti te funkcije. Ta analiza se obično izvodi metodom analize vrijednosti (eng. *value analysis*), a koja se sastoji u opisu sustava u odnosu na potrebne funkcije za ispunjenje zahtijeva korisnika, Lambert i dr. (1999). U toj fazi se ne odlučuje o fizikalnoj realizaciji funkcija sustava. Nakon toga potrebno je sustav opisati očekivanim funkcijama i njihovim karakteristikama, a što se izvodi raznim tehničkim metodama.

Više vrsta dijagrama koriste se radi prikazivanja strukturnog i funkcijskog odnosa u sustavu. Mnogi od tih dijagrama se zovu funkcijski blok dijagrami, a koji se mogu poprilično razlikovati u odnosu na simbole i izgled. Pri tome funkcijski blok označava element sustava koji može biti komponenta ili veliki pod-sustav. Na slici 5, prikazan je primjer funkcijskog blok dijagrama za sporohodni dvotaktni dizel motor.



Slika 5. Primjer funkcijskog blok dijagrama za brodski sporohodni dizel motor.

Funkcijski blok dijagram je grafički prikaz rada sustava. Obično sadrži ulaze (npr. materijale, izvore energije) koji ulaze unutar granica sustava, funkcijske blokove koji prikazuju funkcije koje se događaju unutar granica sustava i izlaze (npr. materijali, enegija, signali) koji

napuštaju granicu sustava. Nadalje, za opisivanje toka materijala, energije, signala koji ulaze i izlaze iz sustava i funkcijskih blokova koriste se strjelice. Unutar granica, svaki funkcijski blok prikazuje funkciju koju mora osigurati sustavu radi pretvorbe ulaza u izlaze.

Funkcijski blok dijagrami preporučeni su od strane standarda američke vojske MIL-STD 1629A, kojim se opisuje postupak izvođenja tehnike *Modovi kvara, efekti i kritična analiza* (eng. *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*; kratica *FMECA*), te čine osnovu kod metode održavanja usmjerenom na pouzdanosti (eng. *Reliability Centered Maintenance*; kratica *RCM*), Rausand i Høyland (2004).

U procesnoj industriji, sustavi se obično prikazuju procesnim i instrumentacijskim dijagramom (eng. *Process and Instrumentation Diagram*; kratica *P&ID*) i dijagramom toka procesa (eng. *Process Flow Diagram*; kratica *PFD*). Ovi informacijski modeli prikazuju strukturu postrojenja, te tok mase i energije pod određenim uvjetima.

5 KVALITATIVNA ANALIZA SUSTAVA

Tehnički sustav obično se sastoji od većeg broja podsustava i komponenti povezanih na takav način da je sustav sposoban obaviti niz zahtijevanih funkcija. Vrlo često su podsustavi i komponente, od kojih se sastoji sustav, različitih tehnologija čime se povećava složenost sustava. U ovom radu će se za označavanje elementa sustava, bez obzira da li se radi o komponenti ili pod-sustavu, koristi pojam funkcionalnog bloka.

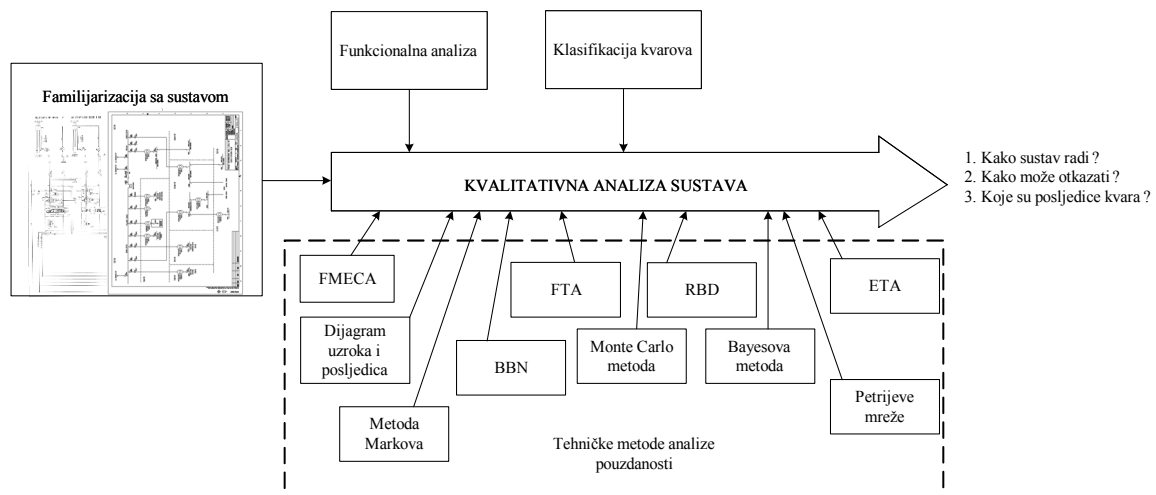
Glavni interes inženjerstva pouzdanosti je prepoznavanje potencijalnih kvarova i sprječavanje pojave tih kvarova, Rausand i Høyland (2004). Prema britanskom standardu BS 4778, kvar funkcionalnog bloka definira se kao: "*Prekid njegove sposobnosti za obavljanje zahtijevane funkcije*". Stoga, u inženjerstvu pouzdanosti potrebno je prepoznati sve značajne funkcije i kriterije uspješnosti koje se odnose na svaku funkciju tehničkog sustava.

Analiza pouzdanosti u svrhu, procjene pouzdanosti ima važnu ulogu tijekom cijelog životnog ciklusa tehničkog sustava. Krajnji cilj analize pouzdanosti je modeliranje i izračunavanje pouzdanosti tehničkog sustava. Kako bi to moglo izvršiti potrebno je sprovesti kvalitativnu analizu sustava (slika 6). Ova analiza uključuje niz aktivnosti kao što su familijarizacija sa sustavom, funkcionalna analiza, klasifikacija kvarova i analiza pouzdanosti, a sa svrhom da se dobiju odgovori na sljedeća pitanja:

- Kako sustav radi?
- Kako se može pokvariti?
- Koje su posljedice kvara?

Odgovor na prvo pitanje dobiva se funkcionalnom analizom sustava kojoj je svrha identificirati i opisati sve funkcije sustava. Prethodno je potrebno izvršiti familijarizaciju sa sustavom koja predstavlja prvi korak kvalitativne analize sustava s ciljem izgradnje znanja o tome kako sustav funkcionira. U ovom koraku potrebno je utvrditi modove rada tehničkog sustava koji mogu biti normalan rad, testni rad, rad u nepredviđenim okolnostima uzrokovani kvarovima, neispravnosću ili greškom u radu. Familijarizacija se zatim nastavlja s pregledom dokumentacije hardvera i softvera kao što su npr. tehnički nacrti, funkcionalne sheme, radne upute i upute održavanja, postupci testiranja, postupci u slučaju nužde dr. Ukoliko je ugrađena testna oprema, testiranje hardvera i integritetnog softvera sustava obavlja se u njegovoj radnoj fazi, a s svrhom otkrivanja skrivenih kvarova i potvrde da eventualno svaka modifikacija

hardvera i softvera sustava vodi do predviđenog rezultata. Radi stjecanja dodatnih znanja o sustavu, vrlo često je potrebno zatražiti i mišljenje eksperata iz predmetnog područja, informacije o iskustvima sličnih sustava i djelovanje okoline ukoliko je to bitno. Ove aktivnosti čine osnovu za analizu pouzdanosti.



Slika 6. Kvantitativna analiza sustava.

Analizom pouzdanosti dobivaju se odgovori na pitanja "Kako se sustav može pokvariti?" i "Koje su posljedice kvara?". Odgovori zahtijevaju prethodni opis neispravnosti, tj. modova kvara kojim se opisuju kako se kvar sagledava. Pošto se funkcije sustava obično dijele na pod-funkcije, klasifikacija kvarova s obzirom na uzroke i posljedice važna je iz razloga što je potrebno povezati modove kvara sa funkcijama na nižim razinama s višim, odnosno s glavnom funkcijom sustava. Uzroci kvara su bitne informacije kojima se sprječavaju kvarovi ili ponovna pojava kvarova. Podjela kvarova s obzirom na posljedice važna je iz razloga što su pojedini modovi kvara više kritični od drugih.

Analiza pouzdanosti tehničkih sustava izvode se korištenjem jedne od tehničkih metoda i to: analiza modova, efekta i kritičnosti kvara (*FMECA-Failure Modes, Effects and Criticality Analysis*), analiza stabla kvarova (*FTA-Fault Tree Analysis*), analiza stabla događaja (*ETA- Event Tree Analysis*), posljedično uzročni dijagram (eng. *cause and effect diagram*), blok dijagrami pouzdanosti (*RBD-Reliability Block Diagram*), Bayesova metoda, Bayesove mreže vjerovanja (*BBN-Bayesian belief networks*), metoda Markova, Monte Carlo metoda i dr. Izbor tehnike ovisi dostupnim podacima pouzdanosti, tipu sustava i stručnosti osoblja koje izvodi analizu. Vrlo često pojedini standardi, zavisno od tipa sustava, sugeriraju koje tehnike koristiti. Osim gore opisanih metoda i nekoliko drugih metoda imaju primjenu u industriji. Mnoge od tih metoda su integrirane s drugim alatima za analizu kako bi se poboljšala njihova primjenjivost, Pillay i Wang (2003).

5.1 Funkcionalna analiza

Kako bi se mogli identificirati svi potencijalni kvarovi, potrebno je temeljeno razumjeti razne funkcije u svakom funkcijskom bloku i kriterije izvršenja koji se odnose za različite funkcije. Funkcija je predviđen učinak funkcionalnog bloka i mora biti definirana tako da svaka funkcija ima jednu određenu predviđenu namjenu. Prema tome, funkcionalna analiza je važan korak u analizi pouzdanosti čiji je cilj:

1. Odrediti sve funkcije u sustavu.
2. Odrediti sve funkcije potrebne za razne radne modove (načine rada) sustava.
3. Dati hijerarhijsku dekompoziciju funkcija sustava.
4. Opisati kako se svaka funkcija realizira.
5. Odrediti vezu između funkcija.
6. Odrediti dodirne točke s drugim sustavima i okolinom.

Pri tome je poželjno da se naziv funkcije izrazi na način da ima deklarativnu strukturu u obliku *glagol plus imenica* na način da se kaže što treba učiniti, a kao što i prikazuje primjer na slici 4. Kriteriji izvršenja funkcije specificirani su funkcijskim zahtjevima. Ukoliko je npr. funkcija dizel motora da daje zakretni moment, funkcijski zahtjev može biti da je zakretni moment na zamašnjaku motora, pri maksimalnom broju okretaja, bude između 345-350 Nm. U pojedinim slučajevima, neke od funkcija mogu imati i po nekoliko funkcijskih zahtjeva.

5.1.1 Podjela funkcija

Složeni sustav može imati veliki broj zahtijevanih funkcija. Međutim, sve funkcije nisu jednako važne i stoga radi prepoznavanja i analize moraju biti klasificirane, Rausnad i Høyland (2004). Jedan način podjele funkcije je na:

1. *Bitne funkcije* (eng. *essential function*) koje su potrebne da se ispuni namjena funkcijskog bloka.
2. *Pomoćne funkcije* (eng. *auxiliary functions*) su one funkcije koje su potrebne za podršku osnovnim funkcijama. U mnogo slučajeva ove funkcije mogu biti važne kao i osnovne funkcije, a isto tako kvar na njima može biti puno više kritičan s obzirom na sigurnost nego na kvar osnovnim funkcijama.
3. *Zaštitne funkcije* (eng. *protective functions*) su one funkcije kojima je namjena zaštita ljudi i okoline od štete i ozljeda. One se mogu klasificirati na sigurnosne, higijenske, te funkcije zaštite okoliša.
4. *Informacijske funkcije* (eng. *information functions*) koje obuhvaćaju nadzor stanja, razne mjerne instrumente i alarme.
5. *Funkcije međudjelovanja* (eng. *interface functions*) koje omogućuju međudjelovanje između elemenata funkcijskog bloka i na druge funkcijske blokove. Mogu biti aktivne i pasivne. Pasivno međudjelovanje je npr. prisutno kada je funkcijski blok podrška ili osnova drugom funkcijskom bloku.
6. *Nepotrebne funkcije* (eng. *supefluous function*) su one funkcije koje funkcijski blok nikad ne koristi ili pak nisu nužno potrebne.

Gore klasificirane funkcije nužno se ne isključuju. To znači kako pojedine funkcije mogu biti svrstane u više od jedne vrste.

Prema Moubrayu (1997), funkcije se dijele u dvije osnovne kategorije, primarne i sekundarne, a koje se kasnije dijele u razne podvrste. Primarne funkcije imaju istu namjenu kao i bitne funkcije. Pomoćne funkcije imaju namjenu dodatnih funkcija, a koje se mogu podijeliti u nekoliko kategorija kako slijedi:

- sigurnosnog/strukturnog integriteta,
- integriteta okoline,
- upravljanja, skladištenja, komfora,
- vidljivosti,
- zaštite,

- ekonomičnosti/efikasnosti,
- nepotrebne funkcije.

Pri tome funkcija mora biti opisana riječju, sredstvom i određenom mjerom performansi.

U mnogo slučajeva je važno razlikovati vidljive i skrivene kvarove, pa se sukladno tome funkcije mogu podijeliti na aktivne (*on-line*) i neaktivne (*off-line*) funkcije, Rausnad i Høyland (2004) ili na vidljive i skrivene Moubray (1997). Prve su one funkcije koje su u radu kontinuirano ili vrlo često one za koje operator zna njihovo stanje. Prekid aktivne funkcije naziva se evidentni kvar. Neaktivne funkcije su one funkcije koje se koriste povremeno ili rijetko zbog čega se raspoloživost ovih funkcija nije poznata bez posebnih provjera ili testova. Mnoge zaštitne funkcije su ovog tipa. Prekid sposobnosti obavljanja neaktivne funkcije naziva se skriveni kvar. U istom kontekstu razmatraju se vidljive i skrivene funkcije.

Sustav i njegovi funkcionalni blokovi mogu općenito imati nekoliko načina rada (radnih modova) i nekoliko funkcija po svakom radnom modu. Radni modovi mogu uključivati normalni, testni i prijelazni način rada, te alternativni, prouzročen kvarom ili greškom sustava ili operatera. Utvrđivanje različitih načina rada sustava je bitno iz razloga što se na taj način utvrđuju i druge funkcije koje bi se mogle predvidjeti zbog prevelikog fokusiranja na bitnu funkciju. Nadalje, utvrđivanjem različitih načina rada sustava osigurava se strukturna osnova za prepoznavanje modova kvara koji su kompletno povezani, a time i ovisni za zadani radni mod sustava.

5.1.2 Tehničke metode funkcionalne analize

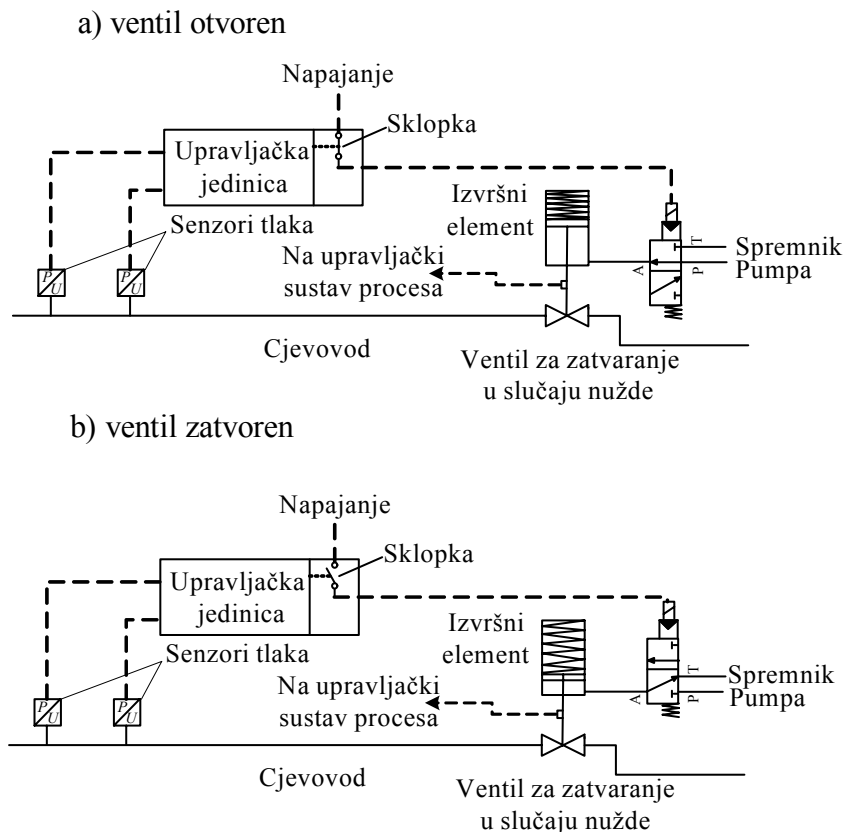
Funkcionalna analiza tehničkog sustava može se izvršiti koristeći više tehničkih metoda kao npr.: funkcionalno stablo (eng. *Functional Tree*), strukturna analiza i tehnike dizajna (eng. *Structured Analysis and Design Tehnique*; kratica *SADT*), tehnika funkcionalne analize sustava (eng. *Functional Analysis System Technique*; kratica *FAST*), višerazinsko modeliranje toka (eng. *Multilevel Flow Modeling*; kratica *MFM*), stablo ciljeva-stablo uspješnosti (eng. *Goal Tree- Success Tree*; kratica *GTST*).

5.1.2.1 Metoda funkcionalnog stabla

U teoriji složenih sustava metoda funkcionalnog stabla je dijagram koji prikazuje ovisnost između funkcija sustava. Ova metoda raščlanjuje funkcije prema hijerarhiji. Funkcionalno stablo se kreira pitanjem *kako* se već uspostavljena funkcija izvršava. Ovo se ponavlja sve dok se funkcije na najnižoj razini ne postignu. Dijagram se može razviti i u suprotnom smjeru pitanjem *zašto* je funkcija potrebna.

Primjer funkcionalne analize metodom funkcionalnog stabla prikazati će se na primjeru sustava upravljanja ventilom za zatvaranje protoka u slučaju prekoračenja dopuštene razine radnog tlaka procesnog medija (slika 7), opisanog u radu Lundteigena (2008). U radu, autori opisuju polu-automatski *PST* (*Partial Stroke Testing*) postupak testiranja sustava zatvaranja procesnog ventila u slučaju nužde (eng. *process shutdown valve*), a na primjeru sustava za zaštitu integriteta podmorskog cjevovoda od prekomjernog tlaka, tj. *HIPPS* sustava (*High Integrity Pressure Protection System*). Ovaj postupak testiranja, bez prekida procesa, zasniva se na djelomičnom kratkotrajnom zatvaranju procesnog ventila koji se potom vraća u

početni položaj. Izvodi se radi otkrivanja kvarova i predstavlja standardnu tehniku koja se primjenjuje u petrokemijskoj industriji.



Slika 7. Shema SIS sustav zatvaranja ventila u slučaju nužde.

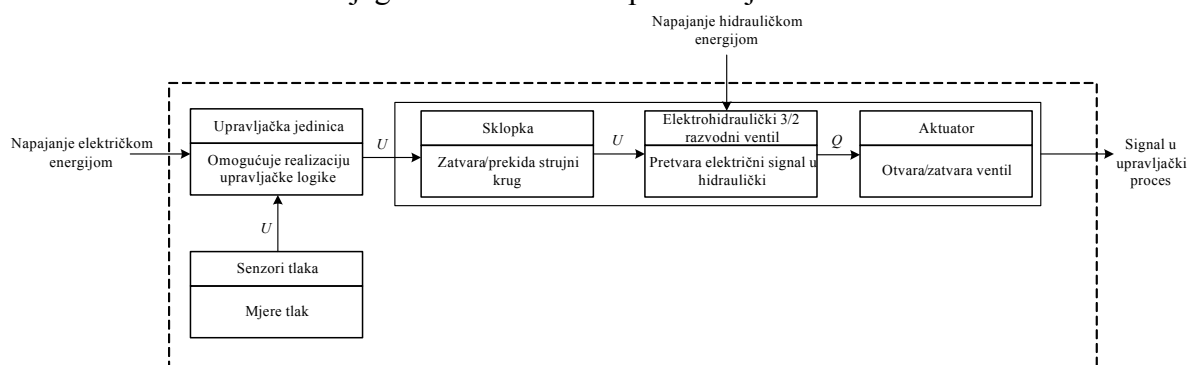
Sustav zatvaranja procesnog ventila u slučaju nužde često se koristi kao završni element u sustavima sigurnosnih instrumenata (eng. *Safety Instrumented Systems*; kratica *SIS*). Ovi sustavi su važni sigurnosni okvir u određenim opasnim sustavima naznačenim kao oprema pod kontrolom, tj. *EUC* oprema (eng. *Equipment Under Control*; kratica *EUC*). U ovu opremu mogu spadati različite vrste strojeva, aparata ili procesnih postrojenja, postrojenja za proizvodnju, transport, liječenje ili druge aktivnosti, Rausand i Høyland (2004).

Namjena SIS sustava je detektiranja opasnih događaja i/ili ublažavanja njihovih posljedica na ljude, materijalna sredstva i okoliš, Lundteigen (2008). Općenito, SIS sustavi mogu obavljati jednu ili više sigurnosnih funkcija, te mogu biti dio sveobuhvatnog sustava zaštite kao što je protupožarni sustav i sustav detekcije plinova i sustav za zaustavljanje procesa u slučaju nužde. Obično se sastoji se od tri glavna pod-sustava: ulaznih-signalnih elementa (npr. senzori tlaka, detektori plina itd.), upravljačke jedinice (npr. logika zasnovana na relejima, elektroničkim pločama ili logičkim programibilnim kontrolerima), završnim elementima koji uključuju, npr. ventile, strujne prekidače, alarme itd. Ventil za zatvaranje protoka sastoji se od aktuatora (izvršnog elementa) koji se najčešće aktivira hidraulički ili pneumatski i zapornog ventila. Zaporni ventil je najčešće izvedenog kao zasun pošto se ovaj tip ventila najčešće koristi kada se zahtijeva brzo zatvaranje protoka. Ulazni elementi koriste se za detektiranje nastupa opasnog (hazardnog) događaja, upravljačka logika za odlučivanje što učiniti, a završni elementi izvršavaju radnju prema upravljačkoj odluci. SIS sustav radi u tzv. niskom modu rada na zahtjev (eng. *low demand mode of operation*). Prema standardu Međunarodne elektrotehničke komisije, IEC 61508 (eng. *International Electrotechnical Commission*; kratica *IEC*), taj mod rada znači kako se procesni ventil za zatvaranje u slučaju

nužde drži u otvorenom položaju duži vremenski period, a da se drži zatvorenim u slučaju kada se dogodi zahtjev procesa. Standardima IEC 61508 i IEC 61511, dati su zahtjevi za životni ciklus SIS sustava kojima je potrebno osigurati obavljanje njegove funkcije na zahtjev. To znači kako Standardi IEC-a kao mjeru pouzdanosti SIS sustava koriste vjerojatnost kvara na zahtjev (eng. *Probability of Failure on Demand*; kratica *PF*).

Shema prikazana na slici 7-a prikazuje stanje kada je ventil otvoren, a slika 7-b kada je ventil zatvoren. Pretpostavlja se kako se ventil zatvara kada jedan od dva senzora detektira visoki tlak u cjevovodu. Aktuator ventila upravljan je s predupravljanim elektrohidrauličkim 3/2 razvodnim ventilom, normalno zatvorenim (A→T). Ovaj razvodni ventil sastoji se od pilot ventila (elektromagnetski direktno aktiviranog 3/2 razvodni ventil, povrat oprugom) koji upravlja preklapanjem glavnog ventila (tlačno aktivirani 3/2 razvodni ventil, povrat oprugom). Upravljačka jedinica kontinuirano očitava i uspoređuje električne signale dvaju senzora tlaka s zadanom vrijednošću najvišeg tlaka. Kada je razina tlaka ispod zadane vrijednosti, upravljačka jedinica svojom logikom, tj. električnim signalom drži predupravljeni 3/2 razvodni ventil aktiviranim (P→A). Time se zasun drži otvorenim, jer na klip jednoradnog cilindra djeluje sila tlaka hidrauličkog sustava. Kada se detektira visoki tlak od strane senzora, upravljačka jedinica realizira upravljačku logiku koja pomoću sklopke prekida električni signal koji djeluje na elektromagnet pilot 3/2 razvodnog ventila. Prekidom električnog signala, pilot razvodni ventil se deaktivira, tj. sila povratne opruge vraća razvodni ventil u drugi (početni) razvodni položaj. Time se prekida tlačni signal koji djeluje glavni 3/2 razvodni ventil i koji se djelovanjem povratne opruge deaktivira. Pošto se drugim razvodnim položajem prednja komora jednoradnog cilindra spaja na spremnik (A→T), dolazi do rasterećenja sile tlaka i sila povratne opruge uvlači klipnjaču što dovodi do zatvaranja ventila. Ova promjena funkcionalnog stanja ventila alarmira se svjetlosnim i zvučnim signalom. U stvarnosti za detektiranje visokog tlaka mogu biti ugrađena više od dva senzora tlaka i više ventila za zatvaranje protoka u slučaju nužde. U slučaju aktiviranja SIS sustava, ventili se radi sprječavanja naglog porasta tlaka moraju zatvaraju zatvarati postepeno, tj. unutar određenog vremenskog perioda, npr. 10 sekundi. Međutim, težište ovog rada je prepoznavanje potencijalnih kvarova i sprječavanje pojave tih kvarova kao glavnom interesu inženjerstva pouzdanosti, a ne struktura HIPPS sustava.

Funkcionalni blok dijagram SIS sustava u prikazan je na slici 8.



Slika 8. Funkcijski blok dijagram SIS sustava.

Kao što je vidljivo iz slika 7 i 8, SIS sustav se sastoji od tri pod-sustava. Prvi pod-sustav sačinjavaju ulazni (signalni) elementi, tj. dva senzora tlaka koji detektiraju tlak u cjevovodu. U SIS sustavima najčešće se koriste "pametni", tj. smart piezoelektrični senzori tlaka. Ovi senzori spadaju u grupu pasivnih senzora, jer djelovanjem sile tlaka, senzor generira vlastiti izlazni električni (naponski) signal bez potrebe za vanjskim izvorom napona ili struje. Korištenje smart izvedbe senzora proizlazi iz zahtjeva IEC standarda za SIS sustave

koji kao mjeru pouzdanosti koriste razinu sigurnosnog integriteta (eng. *Safety Integrity Level*; kratica *SIL*). Kako bi se zadovoljili zahtjevi SIL-a, potrebno je između ostalog primijeniti razna mjerenja radi otkrivanja, izbjegavanja i kontrole kvarova, a koja mogu biti uvedena tijekom životnog ciklusa SIS sustava, počevši od početne specifikacije, dizajna, uvođenja, rada, održavanja, promjena i konačno do povlačenja iz uporabe. Naime, smart senzori su senzori s integriranom elektronikom koja pored automatske kompenzacije točnosti mjerenja, kompenzacije utjecaja opterećenja na mjerenje, podešavanja linearnosti izlaza omogućuje i samo-dijagnozu kvarova. Od svih funkcije smart senzora razmatrati će se samo namjena senzora, a to je "Mjeriti tlak".

Drugi pod-sustav je upravljačka jedinica za koju se pretpostavlja kako je zasnovana na relejnoj logici prema kojoj ulazni elementi direktno djeluju na završne elemente preko releja koji aktivira ili deaktivira pripadajuću sklopku. U svrhu realizacije upravljačke logike, potrebno je osigurati vanjsko električno napajanje. Radi jednostavnosti analize ovaj podsustav se neće raščlanjivati na niže razine elemenata.

Treći pod-sustav sačinjavaju završni elementi odnosno sklopka koja djelovanjem upravljačke jedinice zatvara i prekida strujni krug kojim se napaja elektromagnet drugog elementa, tj. predupravljanog elektrohidrauličkog 3/2 razvodnog ventila. Time se isti drži aktiviranim ili deaktiviranim, a što se manifestira odgovarajućim hidrauličkim signalom koji djeluje na treći element, odnosno aktuator, tj. jednoradni cilindar s normalno izvučenom klipnjačom koji ventil drži otvorenim ili zatvorenim. Bilo kakva promjena funkcionalnog stanja ventila, alarmira se u upravljačkom sustavu procesa.

U ovom primjeru funkcionalna analiza će se ograničiti na mod rada kada SIS sustav djeluje. Koristeći formalizam funkcionalnog stabla, struktura funkcionalne raščlambe ovog sustava prikazana je na slici 9.



Slika 9. Funkcionalno stablo SIS sustava za zatvaranje ventila u slučaju nužde.

Osnovna funkcija sustava je "Prekinuti protok u slučaju prevelikog tlaka". Budući da se ova osnovna funkcija koristi povremeno, može se razvrstati i u neaktivnu (*off-line*) funkcije. Za izvršenje osnovne funkcije sustava potrebne su sljedeće funkcije niže razine:

- "Mjeriti tlak",
- "Odlučiti ukoliko je visok"
- "Zatvoriti ventil".

Prva funkcija spada u informacijske funkcije, a druge dvije u pomoćne.

Funkciju "*Mjeriti tlak*" obavljaju dva senzora tlaka. Općenito, senzor se definira kao uređaj koji prima i reagira na signal ili podražaj (u ovom slučaju tlak) na način da taj ulazni signal pretvara u izlazni električni signal. Taj signal mora biti kompatibilan elektroničkim krugu. Dakle, izvršenje funkcije senzora realizira se sljedećim funkcijama: "*Osjetiti tlak*", "*Pretvoriti u električni signal*" i "*Prenijeti električni signal*".

Funkciju "*Odlučiti ukoliko je visok*" obavlja upravljačka jedinica. U slučaju prekoračenja maksimalno dopuštene razine tlaka, upravljačka jedinica na osnovu signala dobivenog od senzora tlaka mora realizirati upravljačku logiku, tj. upravljački (električni) signal koji preko releja elektromagnetski djeluje na sklopku. Prema tome funkcije upravljačke jedinice realizira se s funkcijama niže razine "*Realizirati upravljačku logiku*" i "*Pretvoriti električni signal u elektromagnetski*".

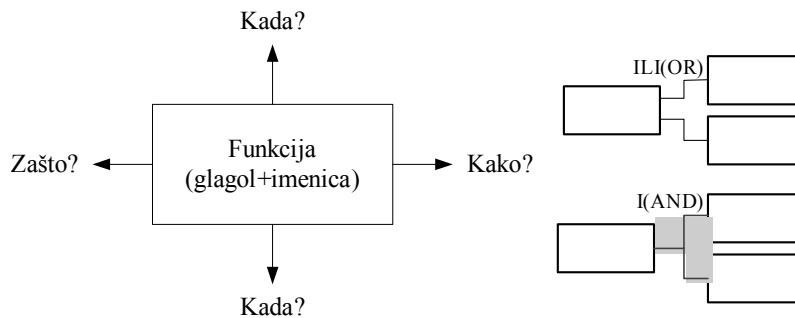
Funkcija "*Zatvoriti ventil*" izvršava se pomoću sklopke i energetskog sklopa koji se sastoji od hidrauličkog jednoradnog cilindra i 3/2 razvodnog ventila.

Sklopka izvršava funkciju "*Prekinuti električki upravljački signal*", dok funkciju "*Rasteretiti od djelovanja tlaka*" realizira 3/2 razvodni ventil. Funkciju "*Promijeniti funkcionalno stanje*" izvršava aktuator (jednoradni cilindar) ventila.

Kada se analizira postojeći sustav, često je podesnije koristiti fizičku raščlambu sustava umjesto funkcionalne. Raščlamba prema fizičkoj strukturi je jednaka funkcionalnom stablu, ali svaka kućica prikazuje fizički element umjesto funkcije. Fizički element može biti tehnički element, operator, pa čak i postupak. Kada se svaka funkcija obavlja samo s jednim elementom, ova dva pristupa daju slične rezultate. U slučaju da sustav ima redundantnost, stablo se razlikuje. U funkcionalnom stablu redundantnost je prikazana kao jedna funkcija, dok je kod raščlambe prema fizičkoj strukturi to prikazano kao dva elementa.

5.1.2.2 *FAST metoda*

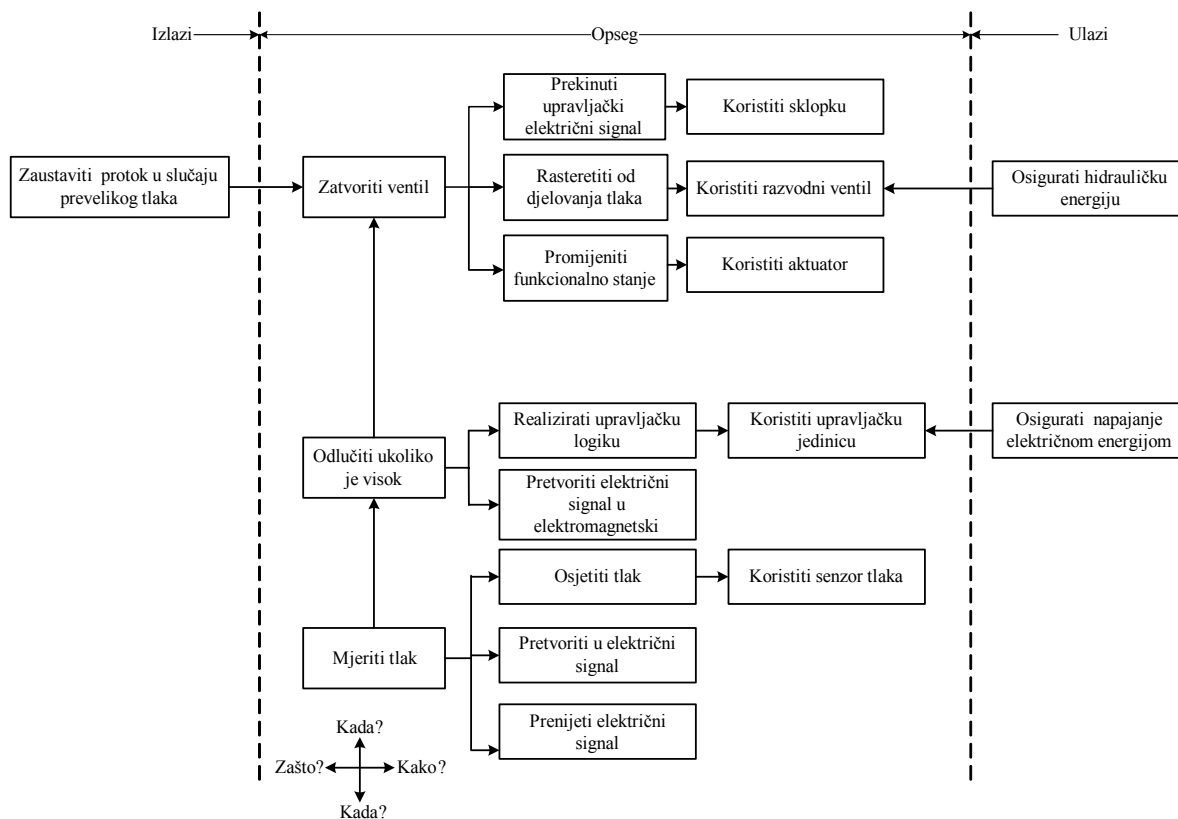
Tehnika funkcionalne analize sustava, FAST, zamišljena od Bithenaya krajem 1960. godine, pripada familiji funkcionalnog stabla, a dolazi od metode analize vrijednosti kojoj je cilj dizajn novog sustava, ali se može koristiti i za proučavanje postojećih sustava, Lambert i dr. (1999). FAST metoda sastoji se od grafičkog prikaza veza između funkcija tehničkog sustava. U tu svrhu je potrebno dobiti niz funkcija sustava sljedećim pitanjima "*kako se ta funkcija realizira*", "*zašto*" i "*kada*". Tim pitanjima određuju se uzlazne i silazne funkcije. Formalizam FAST metode je jednostavan (slika 10).



Slika 10. FAST formalizam i logički operatori.

Dijagram se crta od lijevo prema desno. Prvo je potrebno odrediti glavnu funkciju sustava, a zatim se crta kučica koja sadrži funkciju sustava opisanu glagolom i imenicom. Potom se postavlja pitanje "kako" se ta funkcija izvršava. Na taj način identificira se funkcija na prvoj razini koja se potom unosi u dijagram. Pitanje "kako" postavlja se dok se ne postigne željena razina detalja po horizontalnoj osi FAST dijagrama. Dijagram se može dobiti u suprotnom smjeru postavljanjem pitanja "zašto" je funkcija potrebna, pri čemu se na taj način identificira funkcija više razine nego početna. Zbog toga je FAST metoda hijerarhijske strukture.

Uzduž vertikalne osi FAST dijagrama, funkcije se određuju pitanjem "kada". Ovo pitanje se dobiva se odgovorom koji započinje "ukoliko, istovremeno" i tako odgovara potrebnim uvjetima, odnosno funkcijama koje se moraju izvoditi u isto vrijeme. Funkcije niže razine mogu se povezati logičkim operatorima kao što su "I(AND)" ili "ILI(OR)", a kojim se prikazuje redundantnost i paralelni rad. FAST dijagram SIS sustava prikazan je na slici 11.



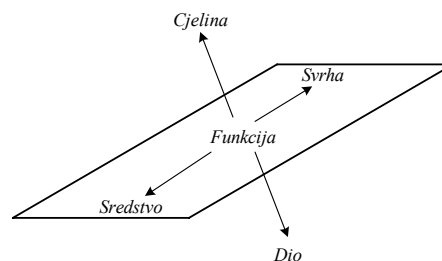
Slika 11. FAST dijagram SIS sustava.

Dijagram između dvije poprečne isprekidane linije određuje područje funkcionalne analize. Lijevo od određenog područja definiraju se izlazi, a desno ulazi.

5.1.2.3 SADT metoda

Široko korišten pristup funkcionalnog modeliranja u raznim tehničkim poljima je SADT metoda. Ovu metodu je uveo Ross 1973.godine, koja je prvotno je bila namijenjena za područje računalnog inženjerstva, tj. razvoja računalnih programa, ali je vrlo brzo pronašla primjenu u drugim tehničkim poljima, kao što su zrakoplovstvo, automatizacija, upravljanje proizvodnjom, itd.

Prema Lindu (1994), prikaz sustava može se napraviti na različitim razinama apstrakcije (slika 12) u odnosu na dvije glavne osi: *cjelina-dio* i *sredstvo-svrha*.

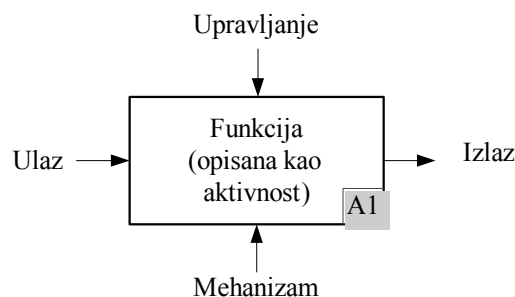


Slika 12. Dvije osi za modeliranje sustava.

Os cjelina-dio odgovara hijerarhijskoj raščlambi sustava gore-dole na nekoliko podsustava manje složenosti sve do osnovne razine. Os sredstvo-svrha odgovara, za jednu razinu raščlambe sustava, zahtjevima za postizavanje cilja. Upravo ovakva raščlamba sustava je prednost SADT metode. Stoga je ova metoda je zasnovana na hijerarhijskom i modularnom opisu sustava u odnosu na funkcije. U SADT dijagramu, svaki funkcijski blok se modelira prema istoj strukturi i sa pet glavnih elemenata:

- *funkcijom*: definicija funkcije koja se obavlja,
- *ulazima*: energija, materijali i informacije koju su potrebne za obavljanje funkcije,
- *upravljanjem*: upravljački i drugi elementi koji ograničavaju ili upravljaju načinom izvršenja funkcije,
- *mehanizmom*: ljudi, sustavi, postrojenja ili oprema potrebna za izvođenje funkcije,
- *izlazima*: rezultat funkcije koji se može podijeliti na željene i neželjene.

Grafički prikaz SADT modela, tj. dijagram sastoji od kućica međusobno povezanih strjelicama. Prikaz funkcionalnog bloka u SADT dijagramu prikazan je na slici 13.



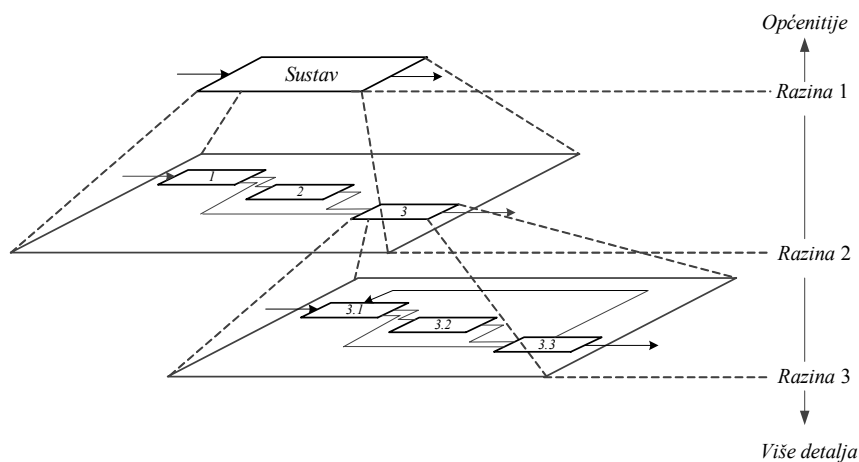
Slika 13. Grafički prikaz funkcionalnog bloka u SADT dijagramu.

Kučicom je prikazana funkcija, tj. aktivnost opisana glagolom, a strjelicama ulazi, izlazi, upravljanje i mehanizam, a koji su obično definirani podacima. Ulazi se unose strjelicama na lijevu stranu kučice, izlazi na desnu stranu, upravljanje s gornje strane, a mehanizmi s donje strane.

Aktivnost transformira ulaze u izlaze pomoću mehanizama ili podupirućih podataka. Tako aktivnost daje dodatnu veličinu ulaznim podacima. Upravljački podaci su uvjeti koji vode ili podešavaju aktivnost. Razlika između ulaznih podataka i upravljačkih podataka jest da se upravljački podaci nikad ne mijenjaju aktivnostima. Upravljački podaci uključuju ograničenja i utjecaj na transformaciju ulaznih podataka. Mehanizam određuju resurse koji izvode aktivnosti. Oni se obično izražavaju kao pitanja "kako" i "tko". Izlaz funkcionalnog bloka može biti ulaz u drugi funkcionalni blok ili može djelovati kao upravljanje na drugi funkcionalni blok. Na ovaj način se funkcionalni blokovi povezuju i time formiraju dijagram.

SADT metoda pored gore opisanog modela aktivnosti (aktigram) koristiti i drugi tip dijagrama kojim se prikazuje model podataka (datagram). U ovom slučaju kučice predstavljaju podatke, a strjelice aktivnosti. Ovaj tip dijagrama uglavnom se koristi se kod procesa obrade podataka.

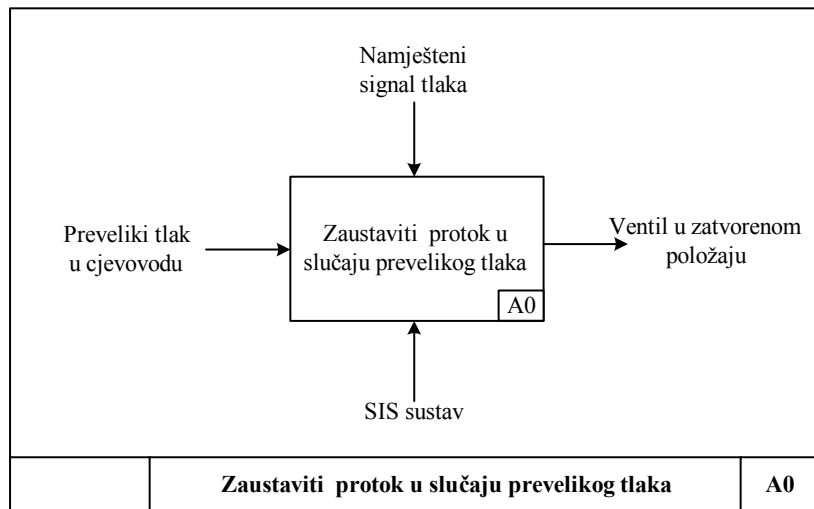
Kod izrade SADT modela, koristi se pristup gore-dole (slika 14). Pri tome se model organizira na hijerarhijski i modularni način.



Slika 14. Hijerarhijska i modularna raščlamba SADT modela.

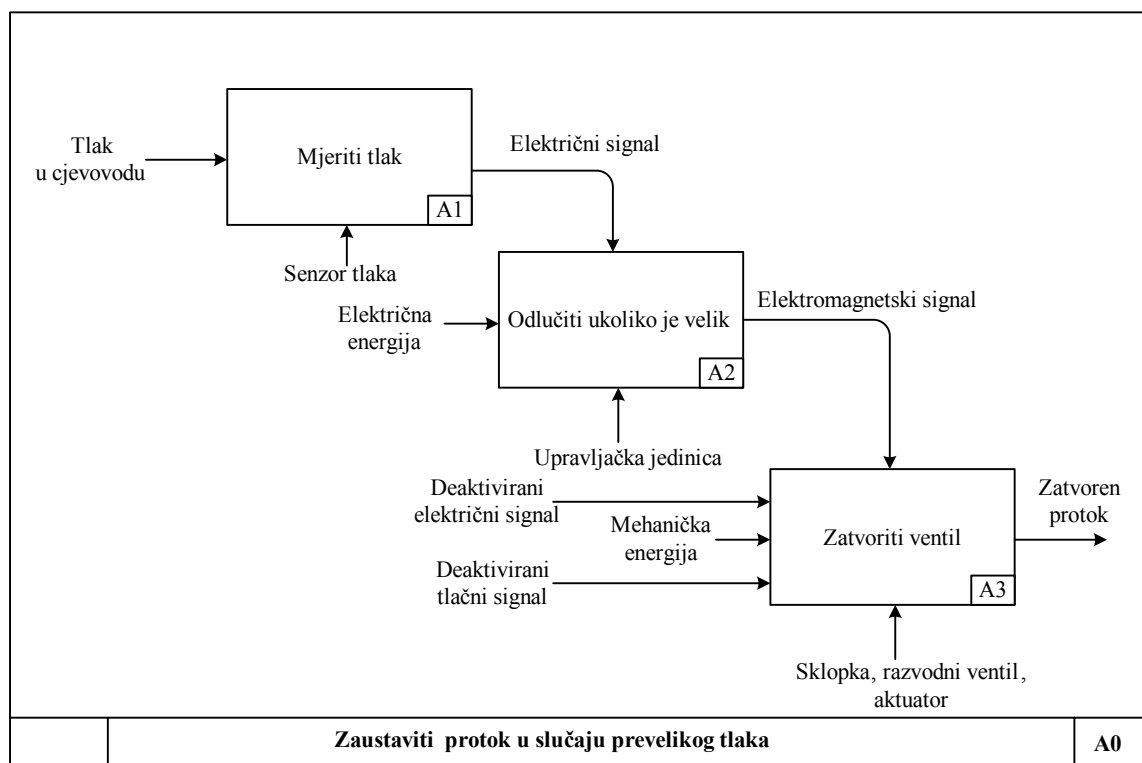
Na najvišoj razine počinje se s zahtijevanom funkcijom sustava. Funkcije potrebne za izvršavanje funkcije sustava formiraju SADT dijagram na sljedećoj nižoj razini. Zatim se svaka funkcija na ovoj razini raščlanjuje na nižu razinu funkcija i tako sve dok se postigne zahtijevana razina. Dijagram prikazuje serijske, paralelne i povratne veze. Hijerarhija se održava numeriranjem sustava.

Na slici 15., prikazana je aktigram najviše funkcionalne razine (A0) SIS sustava koja daje opći pogled na sustav.



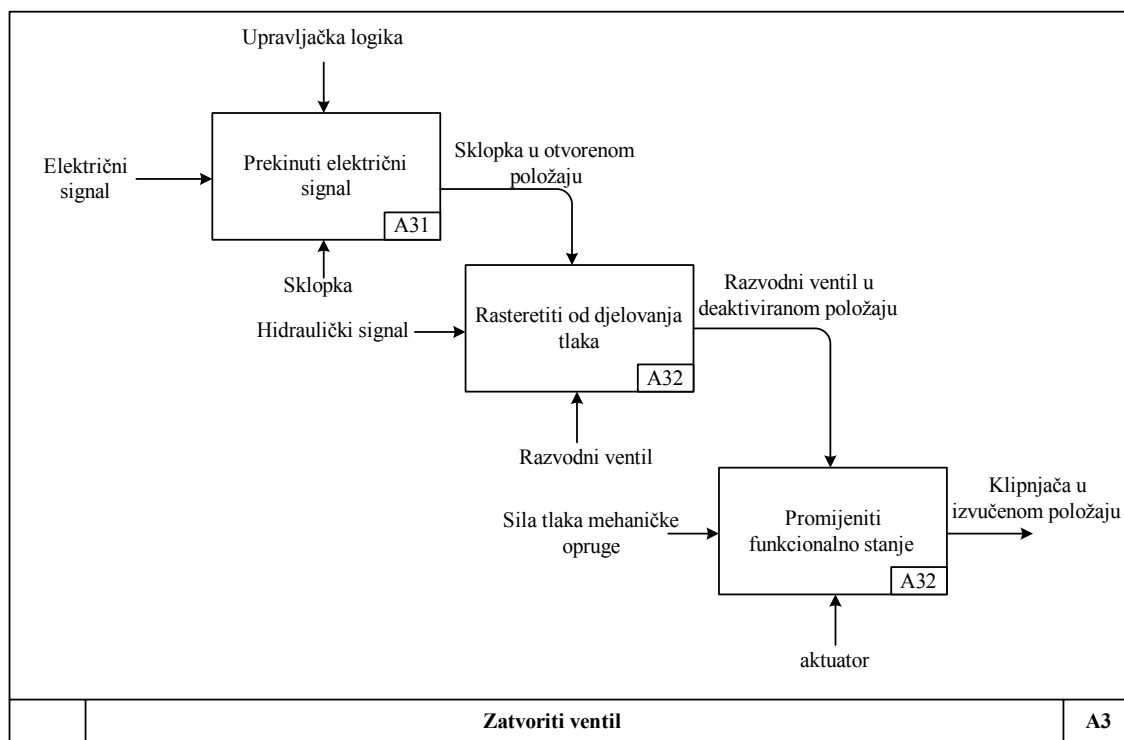
Slika 15. A0 razina SADT modela SIS sustava.

Aktigram prikazan na slici 16., daje mnogo detaljniji prikaz funkcionalne razine A0 SADT modela SIS sustava.



Slika 16. Detaljni SADT model A0 razine SIS sustava.

Na slici 17., prikazan je aktigram A3 razine SADT modela SIS sustava.



Slika 17. Aktigram A3 razine SADT modela SIS sustava.

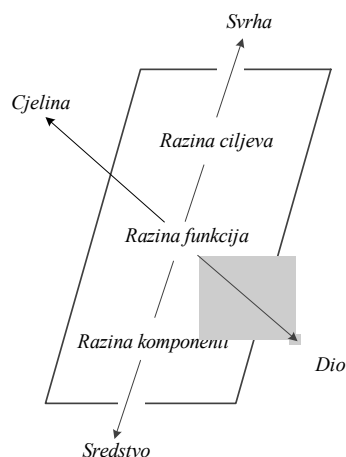
Prema tome, SADT model može se sastojati od nekoliko dijagrama za razliku od FAST modela, koji omogućuje da se samo jednim dijagramom izvrši funkcionalna raščlamba sustava.

Primjena SADT i FAST tehnika funkcionalne analize na realnom primjeru, regulacijskog sustava procesa dobave vode, a u svrhu dizajna sustava nadzora (prikaz dijagnostike i praćenja, definiranje alarma i dr.), opisana je u radu Lamberta i dr. (1999). U radu je izvršena usporedba ovih dviju tehnika, te je analizom utvrđeno kako je na tom primjeru FAST model primjereniji za određivanje svih funkcija koje ispunjava sustav. S druge strane, za opis podataka, SADT model je više iscrpniji i precizniji nego FAST model.

5.1.2.4 MFM metoda

Tehnika višerazinskog modeliranja toka, tj. MFM metoda, razvijena je od strane Linda 1990. godine, a sa svrhom prikaza ciljeva i funkcija složenog procesnog postrojenja. Ova metoda također raščlanjuje sustav na dvije glavne osi: *cjelina-dio* i *sredstvo-svrha*. Ovakva raščlamba omogućuje ukupni prikaz sustava i detaljni pogled na njegove dijelove, Benard i dr. (2008). MFM metoda obično se koristi za sustave koji se mogu okarakterizirati tokovima energije, materijala i informacija.

Prema ovoj metodi, os sredstvo/svrha može se raščlaniti u tri razine i to: razinu ciljeva, funkcija i dijelova (slika 18).



Slika 18. Rasčlamba u MFM modelu.

Ciljevi su svrha ili namjena koja se zahtijeva od sustava. Primjeri ciljeva su npr. "održati razinu vode u prihvatljivim granicama", "proizvesti električnu energiju", "hladiti pumpu". Bez poznavanja točnih ciljeva nije moguće izraditi dobar MFM model iz razloga što je i svrha sustava ispuniti ciljeve.

Pored ciljeva koji opisuju namjenu sustava, ciljevi mogu biti i sigurnosni ili ekonomski. Sigurnosni ciljevi koriste se iz razloga sigurnog rada sustava. U praksi to znači kako neke varijable procesa treba držati unutar sigurnosnog područja kao npr. da maksimalni tlak u hidrauličkom sustavu ne smije preći vrijednost od 300 bar.

Ekonomski ciljevi koriste se za iskazivanje optimalnog procesa tehničkog sustava i to najčešće preko složene funkcije koja ovisi o radnim ograničenima i ekonomskom učinkovitosti procesa sustava.

Dijelovi su fizičke komponente koje tvore sustav. One mogu biti npr. cijev, ventil, pumpa, spremnik, akumulator i itd. Komponente se obično ne prikazuju u MFM modelu.

Funkcije su sredstva kojim se postiže cilj, odnosno funkcije u MFM modelu prikazuju sposobnosti sustava kao što je npr., "transfer vode", "napajanje električnom energijom" ili pak "sprječavanje prijelaza topline". Općenito, funkcija sustava može se dati sljedećom definicijom: "Funkcija je uloga koja sustav ima za postizavanje cilja", Larsson (1996.). U MFM metodi funkcija je uvijek pridružene cilju i sukladno tome ciljevi su uvijek povezani s funkcijama. Funkcije mogu i ne moraju biti pridružene na fizičke komponente u sustavu. Komponente mogu također biti pridružene na više funkcija. Tako elektromotorna pumpa može imati funkciju transfera vode i funkciju ponora energije, tj. potrošača električne energije.

Ove tri razine tvore hijerarhiju koja napreduje iz opće u mnogo detaljniju. Određena razina modela ima cilj i taj cilj postaje svrha za razinu ispod. Os cjelina/dio raščlanjuje os sredstvo/svrha. Na taj način se sustav bliže cilju može sagledati kao cjelina, a bliže sredstvima kao niz komponenti.

U MFM modelu postoji nekoliko vrsta funkcija i to:

- Funkcije toka mase i energije u koje spadaju funkcije izvora, ponora, prijenosa, barijera, skladišta, ravnoteže. Ove funkcije mogu se koristiti i za opisivanje toka informacija.
- Funkcije toka informacija u koje spadaju funkcije promatranja, odlučivanja i izvršenja.
- Funkcije podrške i upravljanja odnose se na organizacijske funkcije, a u koje spadaju mrežne funkcije i funkcije upravljanja. Mrežne funkcije koriste se za grupiranje strukture toka na cilj, dok funkcije upravljanja opisuju sustave nadzora i upravljanja uključujući ljude kao operatere.

Funkcije u MFM modelu su prikazane kao struktura toka mase, energije, aktivnosti i informacija na nekoliko razina apstrakcija. Stoga je struktura toka dijagram spojenih funkcija toka. Razine su međuzavisne i formiraju strukturu sredstvo-cilj. Struktura toka mase i energije koristi se za modeliranje funkcija sustava, dok se struktura toka aktivnosti i informacija koristi za model funkcija operatora i upravljačkog sustava.

Za prikazivanje odnosa i međusobnih veza u sustavu, MFM metoda uključuje koncept veza koje se odnose na ostvarivanje, uvjete i realizaciju.

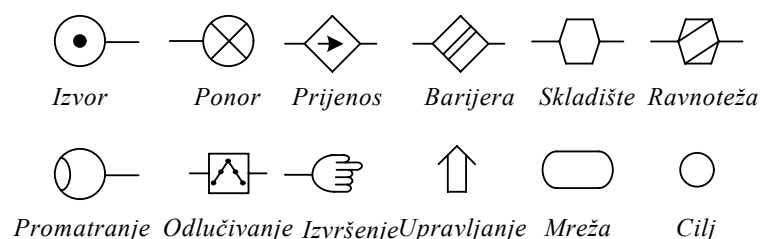
Veza ostvarivanja spaja niz funkcija na cilj čime se označava kako se te funkcije koriste za ostvarivanja cilja. Na primjer, funkcija transfera vode u spremnik može se koristiti radi ostvarivanja cilja očuvanja najviše razine vode u spremniku.

Veza uvjeta koristi se za objašnjenje ovisnosti funkcija o postojećim ciljevima ili postojećih drugih funkcija. Tom vezom se spajaju cilj i funkcija čime se označava kako se cilj mora ispuniti za raspoloživu funkciju. Na primjer, ukoliko je funkcija transfer mase tekućine pomoću pumpe, tada pod-cilj koji se definira kao napajanje električnom energijom elektromotora, kao primarnog pokretača pumpe, mora biti ispunjen kako bi pumpa mogla ostvariti maseni protok.

Veza realizacije povezuje fizičku komponentu na funkciju i označava da se komponenta koristi za realizaciju ili primjenu funkcije. Na primjer, pumpa se koristi za realizaciju funkcije transfera mase tekućine.

Prema tome, MFM dijagram opisuje funkcionalnu strukturu sustava kao niz povezanih struktura toka na različitim razinama apstrakcije. Razine su spojene preko veza ostvarenja i uvjeta, a struktura toka se sastoji od spojenih funkcija toka.

U MFM dijagramu je za vizualizaciju funkcionalnih uvjeta i ostvarenih ciljeva definiran specijalni skup simbola. Na ovaj način MFM model predstavlja grafički model ciljeva i funkcija tehničkog sustava. Pri tomu ciljevi opisuju namjenu sustava, a funkcije opisuju sposobnosti sustava u odnosu na tokove mase, energije, aktivnosti i informacija, Larsson (1996.). Većina grafičkih simbola koji se koriste za izgradnju MFM modela prikazani su na slici 19.



Slika 19. Simboli različitih objekata u MFM modelu.

Izvor je funkcija sposobna dobavljati neograničenu količinu mase, energije ili informacija. Primjeri ovih funkcija mogu se ostvariti pomoću spremnika, skladišta, dobave snage, davača informacija i sl. Ova funkcija naznačene je izlaznim tokom F i može imati ograničenja sposobnosti koje maksimiziraju F . Ona ima jedan izlazni priključak koji može biti spojen na drugu funkciju toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Ponor je funkcija koja djeluje kao potrošač mase, energije ili informacija. Primjeri funkcija ponora ostvaruju se pomoću spremnika, skladišta, rasipanje energije, primača informacija itd. Ove funkcije označene su ulaznim tokom F i mogu imati granična ograničenja koja maksimiziraju funkciju toka F . Funkcije ponora imaju jedan ulazni priključak koji može biti spojen na drugu funkciju toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Prijenos je funkcija koja je sposobna prenijeti, tj. transportirati masu, energiju ili informaciju. Primjeri funkcije prijenosa mogu se ostvariti pomoću pumpi, cijevima, izmjenjivačima topline, informacijskim kanalima itd. Ove funkcije naznačene su propuštanjem toka F i mogu imati ograničenja sposobnosti, tj. intervale u kojima se tok F ostvaruje. Funkcije prijenosa imaju jedan ulaz i jedan izlazni priključak i mogu biti spojene na druge funkcije toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Barijera je funkcija koje je sposobna spriječiti prijenos mase energije ili informacije. Primjeri funkcija barijera ostvaruju se zaklopkama, izolacijskim materijalima opremom za šifriranje itd. Ove funkcije označene su propuštanjem toka F koji može biti zatvoren ili jednak nuli. Funkcije barijere imaju jedan ulazni i izlazni priključak koji može biti spojen na funkciju toka ili pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Skladište je funkcija koja je sposobna pohraniti masu ili energiju ili informaciju. Primjeri funkcija skladišta ostvaruju se pomoću spremnika, vode u sustavu centralnog grijanja, memorije u računalima itd. Ove funkcije naznačene su varijablama stanja V , koja predstavljaju količinu akumulirane mase ili energije, jednim ulaznim tokom F_i , te izlaznim tokom F_o . Ova svojstva moraju ispuniti nejednažbu:

$$\left| \frac{dV}{dt} - F_i + F_o \right| \leq \varepsilon_1 \quad (1)$$

ukoliko se ista može odrediti. Funkcija skladišta može imati najmanje jedan ulazni i izlazni priključak koji se mogu spojiti na druge funkcije toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Ravnoteža je funkcija koja spaja jedan ili više ulaznih tokova na jedan ili više izlaznih tokova. Primjeri funkcija ravnoteže ostvaruju se račvama cijevi, ubrizgavanjem goriva u cilindrima dizel motora, biračima kanala itd. Ova funkcija je naznačena nizom tokova ulaza i izlaza pri čemu. tokovi moraju ispuniti nejednakost:

$$\left| F_1 + F_2 + \dots + F_n \right| \leq \varepsilon_1 \quad (2)$$

Funkcija ravnoteže ima nekoliko ulaznih i izlaznih priključaka koji mogu biti spojeni na druge funkcije toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Promatranje je funkcija koja prevodi signal senzora u informaciju. Funkcija promatranja ostvaruje se mjernom opremom, ali također može biti obavljena od strane

čovjeka kao operatora. Ova funkcija ima jedan izlazni priključak koji može biti spojen na druge funkcije toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

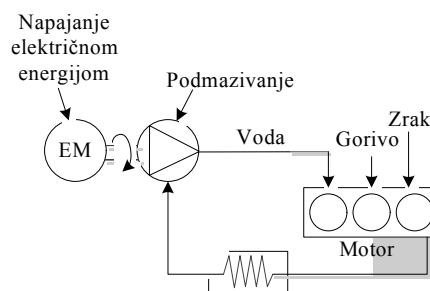
Odlučivanje je funkcija koja prikazuje upravljačke radnje od strane čovjeka ili automatskog upravljanja. Ova funkcija ima jedan izlazni i jedan ulazni priključak koji može biti spojen na druge funkcije toka

Izvršenje je funkcija koja pretvara informaciju u fizičku radnju. Primjeri funkcija izvršenja ostvaruju se ventilima i motorima, ali također može biti obavljena od strane operatora. Ova funkcija ima jedan ulazni priključak koji može biti spojen na druge funkcije toka ili na pod-ciljeve preko veza uvjeta.

Funkcija *mreže* prikazuje svojstvo sustava da pruža potrebne uvjete koji dopuštaju drugom sustavu obavljanje njegove funkcije. Ova funkcija se koristi na način koji grupira nekoliko povezanih funkcija u strukturu toka. Funkcija mreže može se spojiti na ciljeve preko veza ostvarivanja.

Upravljanje je funkcija koja se koristi za prikaz upravljanja sustavom. Uobičajeni primjer ove funkcije može biti opis upravljačkog sustava (npr. PID regulator), ali ne kao tok informacija već kao sustav namijenjen upravljanju određenim zadatkom sustava. Funkcija upravljanja ima jedan priključak koji može biti spojen na vezu postizavanje pomoću upravljanja, a može sadržavati i mrežu toka funkcija opisujući tok informacija.

Primjer korištenja MFM modela na jednostavnom tehničkom sustavu, prikazan na slici 20, opisan je u radu Öhmanna (1999). Sustav se sastoji od benzinskog motora i rashladnog sustava. Pumpa cirkulira rashladno sredstvo (voda) kroz rashladni sustav i za njen ispravan rad potrebno je osigurati njeno podmazivanje i napajanje električnom energijom elektromotora kao primarnog pokretača pumpe. Za rad motora potrebno je benzinsko gorivo i zrak, tj. kisik iz zraka. U slučaju kvara rashladnog sustava, motor će se pregrijati i prestati funkcionirati.

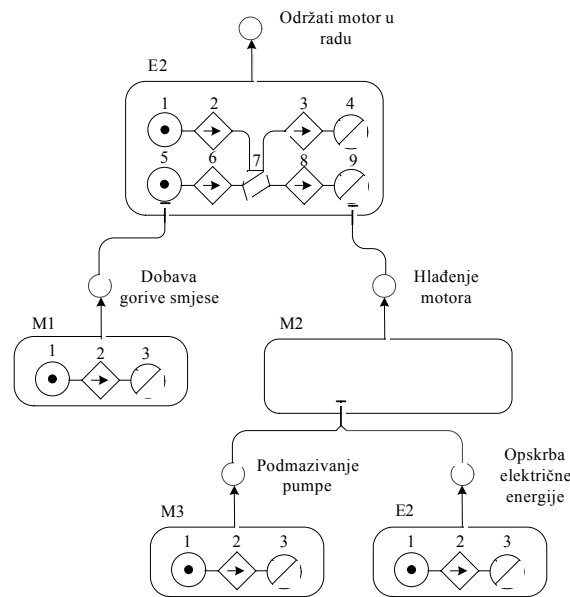


Slika 20. Benzinski motor i njegov rashladni sustav.

Kako bi se izradio MFM model sustava potrebno je postaviti glavne ciljeve sustava, te funkcije raspoložive u sustavu. Iako se u ovom sustavu može izdvojiti više ciljeva, radi jednostavnosti prikaza definirani su sljedeći:

- *Održati motor u radu.* To je glavni cilj sustava.
- *Opskrba gorive smjese (smjesa goriva i zraka).* Goriva smjesa je potrebna za rad motora.
- *Hlađenje motora.* Motor zahtijeva hlađenje radi ispravnog rada.
- *Opskrba električnom energijom elektromotora pumpe.*

Funkcije koje se mogu definirati u ovom sustavu su npr., "opskrba goriva", "transfer goriva", "transfer vode" i "izvor ulja". MFM model ovog sustav prikazan je na slici 21.



Slika 21. MFM model benzinskog motora i njegovog rashladnog sustava.

Mreža označena s E1 je model ravnoteže energije. U mreži postoje dva izvora energije i to opskrba zraka (kisika) 1 i opskrba goriva 5. U sredini mreže je ravnoteža 7 gdje se kemijska energija sadržana u gorivu i kisik iz zraka transformira u kinetičku i toplinsku energiju. Kinetička energija se apsorbira ponorom 4, a toplinska energija ponorom 9. Ukoliko sve funkcije rade, glavni cilj je postignut. Postoje dva uvjeta u mreži 1. Prvi uvjet je da kemijska energija goriva mora biti raspoloživa i da transfer goriva iz spremnika u motor mora raditi. Drugi uvjet je da ponor topline ne može raditi ukoliko ne radi rashladni sistem. Mreža označena s M1 je model fizičkog transfera goriva 2 iz spremnika kao izvora 1 u motor kao ponor 3. Mreža označena s M3 je model fizičkog transfera ulja 2 iz spremnika kao izvora 1 u pumpu kao ponora 3. Mreža označena s E2 je model transfera električne snage 2 iz mreže kao izvora 1 u elektromotor pumpe kao ponora 3. Konačno, mreža označena s M2 je model cirkulacije vode 2 pomoću pumpe kao izvora 1 kroz izmjenjivač topline kao skladište 3. U izmjenjivaču topline dolazi do hlađenja rashladne vode, tj. transfera topline 4 na rashladno medij (okolni zrak) koje je modelirano kao ponor 5. Nadalje, i u mreži M2 postoje dva uvjeta cirkulacije vode, a to je raspoloživost električne energije i podmazivanje pumpe.

MFM model ima tri glavne osobine, Jalashgar (1997). On pruža dobar opći pogled u slučaju složenog sustava iz razloga što model nije ograničen na hijerarhijski strukturu i stoga omogućuje prikaz međuodnosa i međuveza između različitih dijelova sustava. Ovaj prikaz je postignut odnosima sredstvo-cilj koji pokazuju tok funkcija kroz sustav, te važnost i redoslijed funkcija. Ovi odnosi također odražavaju dinamičku prirodu sustava, a što je druga važna osobina MFM modela. Treća važna osobina MFM modela je njegova dvoznačnost omogućuje višestruki prikaz istog sustava na različitim razinama apstrakcije, a što je naročito važno kod složenih tehničkih sustava.

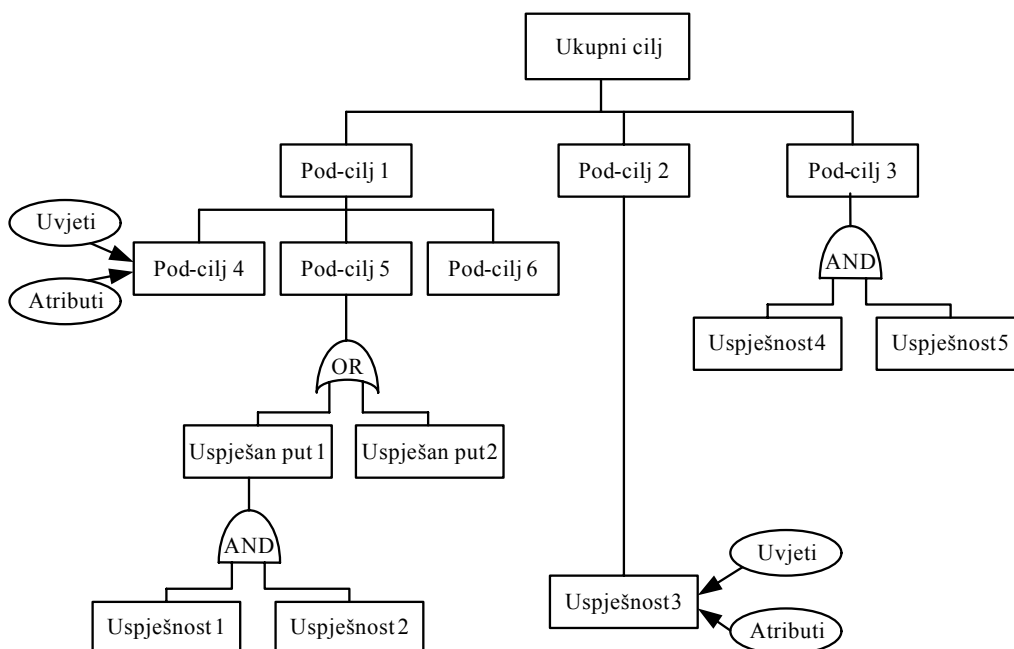
Međutim razmatrajući MFM model kojim se sustav može opisati, ova metoda ima nedostatak koji se odnose na nedostatnu homogenu semantiku i rječnik. Nedostatna semantika očituje se u tome što ne postoje pravila kako koristiti pojedine funkcije toka ili funkcijske

grupe na ujednačen način ili kako koristiti različitosti i sličnosti među funkcijama u različitim funkcijskim grupama. Na primjer, nije jasno kako se funkcija digitalnog regulatora tlaka može pridružiti mreži energije, informacija ili aktivnosti ili pak kako razvrstati i povezati te funkcije ukoliko se prikazane sve tri mreže. Pošto je rječnik relativno mali, u MFM modelu teško je izraziti različitosti među funkcijama sustava. Posljedica toga jest što jednako teško razumjeti detalje u MFM modelu kada je sustav velik i složen. S druge strane dodavanjem nekoliko mreža dolazi do degradacije općeg pogleda na sustav tako da model postaje manje općenit i stoga manje primjenjiv.

Razumijevanje osnovnog koncepta MFM metode uz detaljni opis njenog formalizma može se vidjeti u radovima Linda (1994), Larssona (1996, 2000, 2002). Pored preporučene primjene kao alata za prikaz ciljeva i funkcija složenog industrijskog postrojenja, za ovu metodu je dokazano kako može biti i učinkovit alat za zaključivanje u svezi kvarova postrojenja, upravljačke strategije, dijagnostike i analize alarma, Öhman (1999.), Lind (2005 i 2011) i Larsson (2000). MFM metoda također se koristila u istraživanjima sigurnosti nuklearnih postrojenja, te nadzora i dijagnostike bolesnika nakon operacija, Larsson (2002).

5.1.2.5 GTST metoda

Metoda funkcionalne analize stablo ciljeva-stablo uspješnosti, tj. GTST metoda razvijena je od strane Kima i Modaressa 1987. godine, a sa svrhom prikaza hijerarhijskog dubinskog poznavanja različitih aspekata (značajki) tehničkog sustava, Jalashgar (1997). Model se sastoji od dva dijela (slika 22). Prvi dio je stablo ciljeva kojim se prikazuje poznavanje razina sustava. Drugi dio modelira se kao stablo uspješnosti kojim se prikazuje poznavanje komponenata.



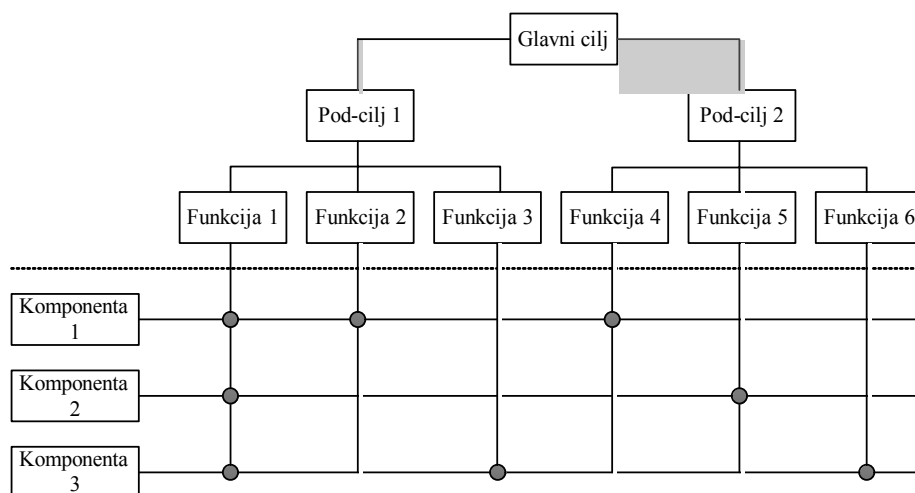
Slika 22. Primjer GTST modela.

Stablo ciljeva izrađuje se raščlanjivanjem ukupnog cilja sustava u niz potrebnih i dovoljnih pod-ciljeva, pod-ciljeva u funkcije i konačno spajanjem funkcija na komponente, po potrebi i s računalnim programom, odnosno s fizičkom strukturom potrebnom za zadovoljenje

pod-cilja. U toj točki, započinje formiranje stabla uspješnosti za određeni pod-cilj. Kako bi se izradilo stablo uspješnosti, svi različiti putovi na koje se pod-cilj može postići moraju biti prikazani. Razlika između stabla uspješnosti i stabla ciljeva je jedino u tome što putovi uspješnosti moraju biti zadovoljeni za postizavanje pod-cilja. Stablo uspješnosti može se prikazati kao stablo gdje su pojedine komponente spojene na najnižu razinu funkcija koje ostvaruju. Više razine hijerarhije nastavljaju se nadalje. Svaki blok GTST modela može imati *uvjete* i *svojstva (atributi)*. Uvjeti se koriste za prikazivanje kako se različiti aspekti sustava mijenjaju u skladu s novim uvjetima. Značajke omogućuju daljnji opis svakog bloka kao što je njegov prioritet ili redoslijed po kojem se mora razmatrati. Proturječnost između blokova i redoslijeda se stoga može izraziti dodavanjem uvjeta i atributa. Slika 22, opisuje GTST model u kojem su uvjeti i atributi prikazani samo za put uspješnosti 4 i uspješnost 5.

Uključivanje uvjeta i atributa za svaki pojedini cilj ili uspješan element u GTST modelu sustava, omogućava prikaz promjena pojedinih informacija u svezi sustava, te red i važnost uvjeta i atributa koji odražavaju dinamiku sustava.

Kada je potrebno izričito predočiti ovisnost svake niže razine funkcije od strane komponenti, za crtanje stabla uspješnosti može se koristiti metoda glavnog plana logičkog dijagrama (*MPLD-Master Plan Logic Diagram*). U ovom dijagramu komponente su smještene vertikalno, a matrica direktno prikazuje veze s funkcijama. Na slici 23, prikazan je primjer GTST-MPLD modela.



Slika 23. Primjer GTST-MPLD modela.

U principu, GTST model u odnosu na prepoznavanje znanja i prikaza znanja ima iste osobine kao MFM model. Glavne prednosti GTST metode jest što omogućuje različiti prikaz aspekata sustava, što se modelira u tekstualnom obliku koristeći prirodni jezik čime se omogućuje bolje razumijevanje sustava. Nedostatak je što se u slučaju složenije strukture sustava ovom metodom dobije složen model čime se gubi opći pogled na sustav. U tom slučaju dinamiku sustava nije moguće jednostavno prikazati, pa je razvijena metoda koja kombinira prednosti MFM i GTST metoda, nazvana hibridna MFM-GSTS ili HMG metoda. Opis i primjenu ove metode u svrhu prepoznavanja i prikaza kvarova u tehničkom sustavu prikazana je u radu Jalashgara (1997).

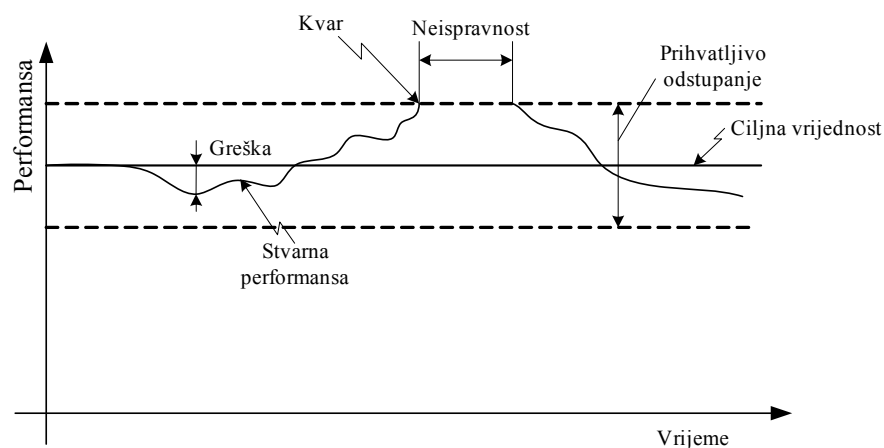
5.2 Osnovni koncept analize kvarova

Pouzdanost ima dvije konotacije. Jedna je probabilistička, a druga deterministička. Najviše prihvaćena definicija pouzdanosti je sposobnost funkcionalnog bloka da obavi zahtijevanu funkciju, pod zadanim okolišnim i radnim uvjetima i za utvrđeni period vremena ili broj ciklusa, Modarres i dr. (1999.). Sposobnost funkcionalnog objekta može biti određena preko vjerojatnosti ili pak može biti određena deterministički. Deterministički pristup zasniva se na razumijevanju kako i zašto se kvar pojavljuje na funkcionalnom bloku, te kako isti mora biti dizajniran i ispitivan kako bi se spriječilo, tj. minimiziralo pojavljivanje i ponavljanje kvarova. To uključuje takve analize kao determinističke analize i pregled izvještaja o kvarovima, razumijevanju fizike kvarova, ulogu i stupanj testiranja i ispitivanja, izvođenje redizajna ili rekonfiguracije. U praksi je to važan aspekt u analizi pouzdanosti.

Kvar je događaj koji se pojavljuje u određenom vremenu koji se može ili ne mora biti uočen i predstavlja osnovni pojam u svakoj analizi pouzdanosti. Pomoću njega promatraju se stohastički odnosi ponašanja funkcionalnog bloka. Naime, zbog prirode mnogih faktora koji mogu biti uključeni, vrijeme pojave kvara je nepredvidivo, tj. slučajno. Sukladno tomu, predviđanje kvarova je probabilistički problem pa je i analiza pouzdanosti probabilistički proces kojim se procjenjuje i predviđa vjerojatnost kvara, pri čemu korištene metode kvantificiraju pouzdanost koristeći vjerojatnost i statistiku za predviđanje, mjerenje i analizu podataka pouzdanosti.

Prema Rausandu i Høylandu (2004), kvaliteta analize pouzdanosti strogo ovisi o sposobnosti analitičara da prepozna sve zahtijevane funkcije i sve kvarove funkcionalnog bloka koji je predmet analize. Kako bi se mogli razmotriti problemi vezani za prepoznavanje i razvrstavanje kvarova, potrebno je razjasniti pojmove i definicije koje se koriste kod analize kvarova, a koje se odnose na performanse funkcionalnog bloka, kvar, neispravnost, grešku, te mod kvara, uzrok kvara, efekt kvara i posljedica kvara. Naime, ovi pojmovi se često koriste na različite načine dovodeći do konfuzije i nejasnoća. Koristeći ove pojmove, analiza kvara funkcionalnog bloka bazira se na konceptu "*Što, kako i zašto*".

Pojam *kvar* (eng. *failure*) ponekad se brka s pojmovima *neispravnost* (eng. *fault*) i *greška* (eng. *error*). Kod svake analize kvarova bitno je odrediti razliku između kvara ili neispravnosti i greške iz razloga što ta razlika opisuje granicu između toga što je kvar, a što nije. Odnos između ovih pojmova prikazan je na slici 24.



Slika 24. Prikaz razlike između kvara, neispravnosti i greške.

Krivulja prikazuje promatranu razinu varijable performanse nekog funkcionalnog bloka tijekom vremena. Početno, promatрана performansa udovoljava ciljnoj vrijednosti nakon čega počinje postepeno odstupati, tj. javlja se greška koja nije kvar iz razloga što je ista unutar prihvatljivih granica. Kvar je definiran kao događaj u kojem je promatрана performansa prešla granicu prihvatljivog odstupanja nakon kojeg je funkcionalni blok u stanju neispravnosti. Nakon popravka i povrata u funkcionalno stanje, zašto je potrebno određeno vrijeme, promatрана razina varijable performanse funkcionalnog bloka vraća se u prihvatljive granice. Stoga, kako bi se utvrdilo da li je došlo do kvara, moraju se za sve funkcije definirati parametri performansi, kao i njihove ciljane razine i prihvatljive granice.

Performanse funkcionalnog bloka mogu se opisati pomoću četiri elementa, Modarres i dr. (1999.):

- sposobnosti ili mogućnošću funkcionalnog bloka da zadovolji funkcionalne zahtjeve,
- efikasnosti ili mogućnošću funkcionalnog bloka da efikasno i lako ostvari ciljeve,
- pouzdanosti ili mogućnošću funkcionalnog bloka da se starta i kontinuirano radi,
- raspoloživosti ili mogućnošću funkcionalnog bloka da brzo postane operativan nakon kvara.

Očito je kako na sposobnost i efikasnost utječe dizajn i izrada (proizvodnja) funkcionalnog bloka. Naime, dizajneri osiguravaju da je razina dizajna funkcionalnog bloka adekvatna postizavanju njegovih funkcionalnih zahtjeva. Stoga se sposobnost i efikasnost odnosi na razinu na kojoj je funkcionalni blok dizajniran i izrađen. S druge strane, pouzdanost je problem koji se odnosi na operativnost funkcionalnog bloka i koja je pod utjecajem njegovog potencijala da ostane u funkciji. Kod popravljivog funkcionalnog bloka, lakoća s kojom se funkcionalni blok održava, popravlja i vraća u rad, mjeri se njegovom pogodnosti za održavanje (eng. *maintainability*). Na osnovu gornjih definicija moguće je da funkcionalni blok ima visoku pouzdanost, ali da ne može postići visoke performanse, tj. njegove određene dizajnirane ciljeve. Stoga visoka kvaliteta dizajna i izrade dovodi do male učestalosti kvarova, efektivnog održavanja i popravka i konačno do visokih performansi funkcionalnog bloka.

Prema Moubrayu (1997), performanse se mogu opisati na dva načina i to:

- željenim performansama, odnosno što korisnik želi da funkcionalni blok učini,
- performansama ugrađenim u sposobnostima funkcionalnog bloka, odnosno što funkcionalni blok može učiniti.

Pri tome se mjere performansi mogu podijeliti na: višestruke, kvalitativne, kvantitativne, apsolutne, mjere performansi varijabli, te gornjih i donjih granica.

Od ova četiri elemenata kojim se definiraju performanse funkcionalnog, područje interesa ovog rada je samo pouzdanost. Jasno, pouzdanost je važan element u postizavanju visokih performansi funkcionalnog bloka iz razloga što direktno i značajno utječe na njegove performanse i konačno na troškove životnog ciklusa. Naime, loša pouzdanost direktno povećava troškove jamstva, odgovornosti i popravka.

5.2.1 Pojam kvara, greške i neispravnosti

Nekoliko različitih definicija kvara su dostupne u inženjerskoj literaturi, Del Frate (2013) i Tam i Gordon (2009). Navedene definicije određene su međunarodnim i nacionalnim

standardima, standardima stručnih udruženja ili su pak definirane od strane samih autora. Neke od tih definicija se međusobno ne isključuju.

U skladu s opće prihvaćenim standardima Međunarodne elektrotehničke komisije IEC 60050(191):1990, Međunarodne organizacija za standardizaciju (eng. *International Organization for Standardization*; kratica *ISO*), ISO 14224:2006 i britanskim standardom BS 4778:1991, kvar se definira kao: "*prekid sposobnosti objekta da obavlja zahtijevanu funkciju*". Prema rječniku Instituta inženjera elektrike i elektronike (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*; kratica *IEEE*) kvar je definiran kao: "*nesposobnost sustava ili komponente da obavljaju njihovu zahtijevanu funkciju unutar određenih zahtjeva performansi*". Pojam kvara definiran ovim standardima ne primjenjuje se na funkcionalne blokove koji se sastoje samo od softvera. Standardom IEC 60050(191), pojam "*zahtijevana funkcija*" definira se kao funkcija ili kombinacija funkcija objekta koja se smatra potrebna radi pružanja zadane službe. Pojam "*služba*" odnosi se na niz funkcija koje se daju korisniku ili organizaciji. Sličnu definiciju daje i Smith (2001) i to kao: "*nesukladnost nekih određenih mjerila performansi*". Prema tim definicijama, kvar je događaj kada je zahtijevana funkcija funkcionalnog bloka prekinuta, odnosno kada je prešla prihvatljive granice. Stoga su ove definicije kvarova usmjerene na stvarne uočljive performanse funkcionalnog bloka i gubitak funkcionalnosti.

Gore navedene definicije kvara Del Frate (2013), smatra kao tradicionalnu definiciju kvara iz razloga što je prema takvoj definiciji kvara, funkcionalni blok još uvijek sposoban obavljati zahtijevanu funkciju premda na razočaravajućoj razini. Stoga, navodi definicije kvarova drugih autora koji se zalažu za konceptualnu reviziju definicije, kao npr. Birolini (2007), koji daje sljedeću definiciju kvara: "*Kvar se događa kada objekt prekine obavljanje njegove zahtijevane funkcije*". Nadalje, Del Frata u svom radu navodi alternativni pristup definiciji kvara inspiriran pojmom životnog ciklusa proizvoda koji uvodi jasniji pojam kvara i omogućuje razvrstavanje kvarova tako da uzima u obzir uloge zainteresiranih strana uključenih u raznim fazama životnog ciklusa proizvoda. Za razliku od tradicionalne definicije pojma kvara, kvar proizvoda definira se kao: "*Kvar proizvoda je nesposobnost inženjerskog procesa, proizvoda, usluge ili sustava da zadovolji dizajnirane ciljeve tima za koji je razvijen*". U svezi s novom definicijom uveden je i pojam "*trajektorija kvarova*" koje povezuju okolnosti koje uzrokuju kvarove tijekom dizajna, izrade, montaže, korištenja i održavanja.

Prema Rausandu i Høylandu (2004), kvar je uvijek povezan s funkcijom funkcionalnog bloka i događa se kada funkcionalni blok duže vrijeme nije sposoban obavljati svoju funkciju u skladu određenim performansama. Kvar može biti takav da funkcionalni blok obavlja svoju funkciju kada se to od njega ne zahtijeva ili kada kada se se od njega to zahtijeva pri čemu ne prestaje s radom kada se zahtijevana funkcija izvrši. Stoga, pojam kvara pokriva funkcioniranje kada se zahtijeva, kao i kada se ne zahtijeva, Rausand (2011).

Važnost prepoznavanja svih funkcija funkcionalnog bloka zajedno s određenim mjerama performansi, a u u svrhu procesa održavanja usmjerenog na pouzdanosti (eng. *Reliability Centered Maintenance*; kratica *RCM*), navodi i Moubray (1997). Pošto funkcionalni blok može imati više od jedne, a često i nekoliko različitih funkcija, slijedi kako isti može imati niz različitih stanja neispravnosti. To znači da se može javiti situacija prema kojoj je funkcionalni blok u stanju neispravnosti u odnosu na primarnu funkciju, ali ne u odnosu na sekundarnu funkciju. Stoga je i prema Moubrayu puno točnije utvrditi kvar u odnosu na gubitak određene funkcije nego kao kvar funkcionalnog bloka u cjelini. Pri tome je

granica između zadovoljavajuće performanse i kvara pojedine funkcije određena mjerom performanse. Kvar pojedine funkcije definira se kao *funkcionalni kvar*, odnosno kao: "*nesposobnost funkcionalnog bloka da ispuni funkciju mjerama performansi prihvatljivim za korisnika*".

Prema Rausandu (2011), kvar je događaj koji se pojavljuje u određenom vremenu koji može ili ne mora biti uočen. Kada je kvar prisutan, funkcionalni blok ima neispravnost. Stoga je neispravnost stanje koje je rezultat kvara kao događaja. Sukladno tomu, a prema standardima IEC 60050(191) i ISO 14224, neispravnost se definira kao: "*stanje objekta okarakterizirano nesposobnošću obavljanja zahtijevane funkcije, isključujući nesposobnost za vrijeme preventivnog održavanja ili drugih planiranih radnji ili zbog nedostatka vanjskih resursa*".

Standardima IEC 60050(191) i ISO 14224 greška se definira kao: "*odstupanje između izračunate, promatrane ili mjerene veličine ili stanja i stvarne, određene ili teoretski ispravne veličine ili stanja*". Greška još nije kvar iz razloga što je ista unutar prihvatljivih granica. U pojedinoj literaturi, greška se ponekad odnosi na početni kvar. U primjeru procesnog ventila za zatvaranje protoka u slučaju nužde, isti je obično dizajniran sa određenim vremenom zatvaranja, npr. 10 sekundi. Ukoliko je njegovo zatvaranje suviše sporo, ventil neće imati funkciju sigurnosne barijere. S druge strane, ako se ventil zatvara suviše brzo, može doći do pojave tlačnog udara i mogućeg oštećenja ventila ili njegovih prirubnica. Vrijeme zatvaranja između 6 ili 14 sekundi može se npr. smatrati kao prihvatljivo. Sve dok je vrijeme zatvaranja unutar tog intervala, ventil je u funkciji. Kada dođe do značajnog povećanja odstupanja od ciljane vrijednosti, tada se takav događaj smatra kvarom, a što rezultira neispravnnošću ventila.

5.2.2 Mod kvara

Mod kvara je opis neispravnosti, odnosno način na koji se može zapaziti da je funkcionalni blok u neispravnom stanju. Ponekad se pojam mod neispravnosti koristi umjesto moda kvara, a što preporučuje i standard IEC 60050(191). Naime, prema ovom standardu mod neispravnosti se definira kao jedno od mogućih stanja neispravnog funkcionalnog bloka, za zadanu zahtijevanu funkciju, te se pojam moda kvara u tom smislu odbacuje. Ipak, u literaturi iz ovog područja većinom se koristi pojam mod kvara.

Standardima ISO-14224 i BS 5760-5:1991 (zamijenjen s BS EN 60812:2006), mod kvara se definira kao: "*efekt s kojim je kvar uočen na neispravnom objektu*". Prema Moubrayu (1997), mod kvara je svaki događaj koji uzrokuje funkcionalni kvar.

Radi utvrđivanja modova kvarova moraju se proučiti izlazi različitih funkcija funkcionalnog bloka. Neke funkcije mogu imati nekoliko izlaza. Neki izlazi mogu biti vrlo određeno definirani, tako da je lako odrediti dali je izlazni zahtjev ispunjen ili ne. U drugom slučaju izlazi mogu biti određeni kao ciljna vrijednost s prihvatljivim odstupanjem, a kao što je prikazano na slici 24. Sukladno tomu, Moubray (1997) klasificira modove kvara u jednu od tri grupa:

- kada sposobnost padne ispod zahtijevane performanse,
- kada željena performansa naraste iznad početne sposobnosti,
- kada sredstvo (funkcionalni blok) nije sposoban učiniti što se početno želi.

Pošto se kod funkcionalne analize sustava funkcije obično dijele u pod-funkcije, modovi kvara na jednoj hijerarhijskoj razini često su uzrokovani modovima kvara na sljedećoj nižoj razini. Stoga je potrebno povezati modove kvara na nižim razinama s reakcijom najviše razine. Stoga, identificiranje svih mogućih modova kvara funkcionalnog bloka može biti čak teža nego prepoznavanje njegovih funkcija iz razloga što svaka svih njegovih funkcija može imati nekoliko modova kvara. Kvarovi koji dovode do prekida jedne ili više funkcija (npr. procesnu i zaštitnu) opisuju se modom kvara za svaku funkciju.

Kod električnih komponenti primjeri modova kvara su npr. kratki spoj, odstupanje i dr., a kod mehaničkih komponenti krhki lom, puknuće, puzanje, zamor i dr. U primjeru procesnog ventila za zatvaranje protoka u slučaju nužde, njegove funkcije mogu biti "*zatvoriti unutar 10 sekundi*" i "*držati nepropusno u zatvorenom položaju*". Mogući modovi kvara ventila s obzirom na njegove funkcije su: neuspješno zatvaranje, kašnjenje funkcioniranja, preuranjeno zatvaranje, propuštanje u zatvorenom položaju, propuštanje u okolinu itd.

U praksi izgleda kako ne postoje formalni postupci koji se mogu koristiti za identificiranje i razvrstavanje modova kvara, Rausand i Høyland (2004). Kao glavne izvore informacija o modovima kvara, Moubray (1997) navodi proizvođače i prodavatelje opreme, generičke liste moda kvarova, drugi korisnici iste opreme, povijesni tehnički zapisi, te ljudi koji rade i održavaju opremu.

5.2.3 *Uzrok i mehanizam kvara*

Prema standardu IEC 60050(191), uzrok kvara definira se kao: "*okolnosti za vrijeme dizajna, izrade i korištenja koje dovode do kvara*". Standard ISO-14224 ovu definiciju nadopunjuje okolnostima za vrijeme instalacije (montaže) i održavanja. Identifikacija potencijalnih uzroka kvarova funkcionalnog bloka važna je radi izvođenja njegovog odgovarajućeg popravka u svrhu izbjegavanja kvarova ili ponovnog pojavljivanja kvarova.

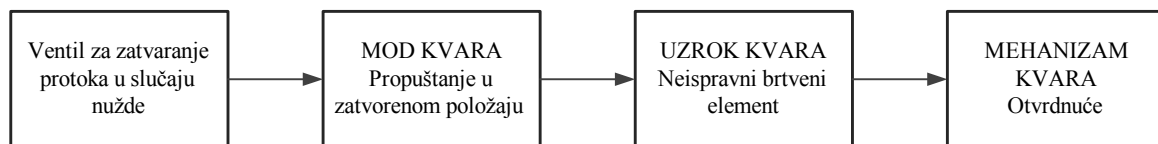
Pošto se kod funkcionalne analize sustava funkcije obično dijele u pod-funkcije, modovi kvara na jednoj hijerarhijskoj razini često su uzrokovani modovima kvara na sljedećoj nižoj razini. Stoga je potrebno povezati modove kvara na nižim razinama s reakcijom najviše razine. Na ovaj način, modovi kvara mogu se pratiti unatrag do njihov korijenskog uzroka.

Mehanizmi kvara su prema standardima IEC 60050(191) i ISO-14224 definirani kao: "*fizički, kemijski ili drugi procesi koji su doveli do kvara*". Pod ovim pojmom obično se podrazumijevaju procesi koji uzrokuju habanje, otvrdnuće, rupičavost i oksidaciju. Ova razina opisa uzroka kvara međutim nije dovoljna za procjenu mogućeg popravka. Tako npr., habanje može biti posljedica pogrešne specifikacije materijala, korištenja iznad određenih granica, nedovoljnog održavanja, neadekvatnog podmazivanja i dr. Ovi temeljni uzroci ponekad se navode kao korijenski uzroci (eng. *root causes*), a koji mogu zahtijevati donošenje odluke o korektivnim radnjama otklanjanja kvara. Tako Modares i dr (1999) korijenske uzroke definira kao većinu osnovnih uzroka koji se mogu opravdano identificirati od eksperata, te mogu biti popravljivi kako bi se minimiziralo njihovo pojavljivanje. Proces identificiranja korijenskih uzroka općenito se izvodi od strane grupe eksperata. Analiza korijenskog uzroka uključuje tri koraka:

1. Određivanje događaja i uzročnih faktora.
2. Označavanje i dokumentiranje korijenskih uzroka.
3. Generiranje preporuka (korektivne radnje).

Prema Modarresu i dr. (1999), mehanizmi kvara su fizikalni procesi čiji nastanak bilo dovodi do naprezanja ili je uzrokovano naprežanjem, a može smanjiti i sposobnosti funkcionalnog bloka da se opire djelovanju tih naprezanja, npr. smanjenje čvrstoće ili izdržljivosti funkcionalnog bloka. Pošto su mehanizmi kvara za mehaničke i elektroničke/električke sustave ponekad različiti, Modarresu i dr., dijele ih na mehaničke i električne. Mehaničke mehanizme kvara pak dijele na inducirane naprežanjima (npr. elastična deformacija, izvijanje i dr.), mehanizme smanjenja čvrstoće (habanje, korozija, struganje i dr.) i mehanizme povećanja naprezanja (npr. zamor, radijacija, termalni šok, udar i dr.). Za električne mehanizme kvarova navode kako imaju tendenciju biti puno više kompliciraniji nego kod mehaničkih sustava, a iz razloga što su uzrokovani složenošću samih električkih komponenti. Dijele ih na tri vrste i to: električna naprežanja, unutrašnje i vanjske mehanizme kvarova. Kvarovi uzrokovani električnim naprežanjima obično su posljedica djelovanja više razine napona ili jakosti struje. Unutrašnji mehanizmi kvarova posljedica su loše izrade ili dizajna. Vanjski mehanizmi kvarova posljedica su pakiranja ili spajanja električkih komponenti.

U gore opisanom konceptu kvara, odnos između kvara, moda kvara, uzroka kvara i mehanizma kvara prikazuje primjer na slici 25.



Slika 25. Odnos između moda kvara, uzroka kvara i mehanizma kvara.

Važnost analize kvarova u smislu uzroka i mehanizma kvara navode u svojim radovima, Espadafor i dr. (2009) i Atxaga i Irisarri (2009). U svom prvom radu Espadafor i dr., gdje analiziraju lom koljenčastog vratila kao uzrok kvara na jednom tipu dizel generatora snage 1,5 MW, navode kako je najčešći osnovni mehanizam kvara kod loma koljenčaste osovine zamor materijala. Nadalje, nakon izrade simulacijskog modela i provedene analize rezultata simulacije, zaključuju kako se mjesto kvara može predvidjeti, te kako se simulacijski model može smatrati kao alat za odabir površina koljenčastog vratila gdje se posebne kontrole kvalitete moraju uzeti u obzir kako bi se spriječili kvarovi uslijed zamora, a time prekid rada i troškovi popravka. U svom drugom radu Espadafor i dr., gdje analiziraju puknuće košuljice cilindra i klipa kao uzroka kvara na jednom tipu dizel generatora snage 7,5 MW, navode kako su kod kod kvarova dijelova cilindra i klipnog mehanizma najčešći mehanizmi kvara uzrokovani kombinacijom zamora i drugih izvora. Ti izvori mogu biti korozija, korozijski zamor, stresni zamor na mjestima utora, šupljine koje zaostaju za vrijeme procesa izrade i loš dizajn. Pri analizi nisu ustanovljeni znakovi zamora na košuljici cilindra i klipu, dok je model konačnih elemenata košuljice pokazao kao područja najvećeg opterećenja odgovaraju mjestu puknuća. U svom radu Atxaga i Irisarri analiziraju korijenski uzrok preuranjenog loma kao uzroka kvara krajnjeg dijela osovine jednog dizel motora. Opservacijom metalgrafskog uzorka, uzrok kvara pripisuju sumi različitih faktora kao što je nedostatak čvrstoće, nepravilnog dizajna i provedbe prijašnjeg popravka. Ovim primjerom naglašavaju kako u slučaju kvara induciranim sinergijskim djelovanjem različitih faktora zahtijevaju od analitičara koncentriranost na sve faktore koji su doveli do kvara, bez okrivljavanja samo jednog faktora kao odgovornog za kvar.

Važnost analiza korijenskog uzroka kvara (eng. *Root Cause Analysis*; kratica *RCA*) kao bitnog elementa održavanja usmjerenog na pouzdanosti i upravljanja integritetom imovine (eng. *Asset Integrity Management*) navodi Tronskar (2013). RCA analiza kvara je strukturni proces koji razokrija fizičke, ljudske i druge latentne (skriveno) uzroke bilo kojih nepoželjnih događaja na radnom mjestu. RCA analiza je prijeko potreban dio proaktivnog održavanja usmjerenog na pouzdanosti, a koja koristi napredne tehnike održavanja kako bi se primijenile korektivne radnje, eliminirali prijašnji kvarovi i produžio životni vijek opreme, te minimizirali troškovi održavanja.

5.2.4 Efekt i posljedica kvara

Efekt kvara je opis što se događa kada se pojavi mod kvara, Moubray (1997). Ovaj pojam se ponekad u literaturi zamjenjuje s pojmom posljedice kvara. Također mnogi standardi ove pojmove i rad s njima definiraju različito. Pri tome treba naglasiti kako efekt kvara odgovara na pitanje "što se događa?", dok posljedice kvara odgovara na pitanje "kakav je utjecaj kvara". Prema standardu američke vojske MIL-STD-1629A, kojim se opisuje postupak izvođenja tehnike *FMECA*, efekt kvara definira se kao: "Posljedica moda kvara na rad, funkciju ili stanje objekta. Efekti kvarova klasificiraju se kao lokalni efekt, sljedeće više razine i krajnji efekt." Lokalni efekt odnosi se na posljedice kvara na određenu komponentu funkcionalnog bloka. Efekt sljedeće više razine odnosi se na posljedice kvara sljedeće više razine složenosti funkcionalnog bloka, a krajnji efekt na najvišu razinu složenosti. Dakle, odnos između uzroka i efekta kvara je takav da svaki mod kvara može biti uzrokovan sa nekoliko uzroka dovodeći do nekoliko različitih efekata kvarova. Iako je standard MIL STD-1629A opozvan 1998. godine, njegov koncept se i danas široko koristi u vojsci i industriji.

Svaki put kada se pojavi kvar, korisnik funkcionalnog bloka je pogođen na neki način. Posljedica kvara je način ili načini na koji mod kvara ili multipliciranje kvara utječe ovisno o operacijskom kontekstu funkcionalnog bloka, standardima performansi koje se primjenjuju za svaku funkciju i na fizičke efekte svakog moda kvara, Moubray (1997). Stoga, svaki kvar ima posljedice koje su mu pridružene, a koje osim u operativnom kontekstu mogu imati i posljedice na sigurnost ljudi i okoliš. Pojam posljedica kvara osim u RCM pristupu uspostavljen i u disciplini upravljanja rizikom, te se opisuje takvim mjerama kao što je financijski gubitak, ozljede ljudi i drugim neželjenim posljedicama.

U svom radu, za terminologiju kvarova kod upravljanja sredstvima postrojenja (eng. *Plant asset management*), Tam i Gordon (2009) definiraju posljedice kvara kao: "djelovanje koje događaj kvara ima na neispravnost postrojenja u operativnom kontekstu, uključujući i poslovanje, ljude i okoliš". U osnovi, posljedica kvara odnosi se na djelovanje na vanjski svijet, dok se efekt kvara odnosi na kvar funkcije opreme. Preferiranu terminologiju za proces razvoja kvara na primjeru centrifugalne pumpe prema Tamu i Gordonu, prikazuje tablica 1.

Na osnovu koncepta prikazanog u tablici 1, prije događaja kvara pojavljuju se simptomi kvara. Oni mogu biti vidljivi ili izmjereni kao znak upozorenja kvara za pogoršanje fizičkih uvjeta rada postrojenja ili ako je postrojenje izloženo štetnim djelovanjem. Događaj kvara je pojava prekida sposobnosti postrojenja da obavi zahtijevanu funkciju, a koji je rezultat veze uzroka i efekta kvara. Može biti rezultat ili pogoršanje fizičkih uvjeta rada opreme i radnji djelovanja ili pak dobrih fizičkih uvjeta rada opreme i neadekvatnih radnji

djelovanja. Pogoršanje uvjeta rada često su uočavaju ljudskim osjetila ili se zamjećuju pomoću instrumenata.

Tablica 1. Terminologija za koncept kvarova kod postrojenja, Tam i Gordon (2009).

| | Prije događaja kvara | Nakon događaja kvara | | | | |
|------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| | ŠTO? (znak) | ŠTO? (efekt) | Kako? | Zašto | Kakav je učinak na? | Koliko je stupanj težine kvara uspoređujući sa drugim? |
| Preferirana terminologija za fizičko sredstvo | Upozorenje kvara | Efekt kvara | Mehanizam kvara | Uzrok kvara | Posljedica kvara | Rangiranje posljedica ili rangiranje rizika |
| Primjer: Centrifugalna pumpa | Smanjenje protoka | Kvar upućivanja na zahtjev Ne pumpa | Kvar osovine Kvar sklopke Električki kvar Kavitacija | Zakrivljena osovina Oštećenja sklopke Progoreni kabeli zbog grijanja | Prekid proizvodnje za 1 dan | Rangirano 20 od 30 (1 ima najveći stupanj težine) |

U tom slučaju, postrojenje može otposlati signal ili simptom, tj. znak upozorenja prije stvarnog kvara. Nakon događaja kvara, simptomi mogu biti uočeni ili prepoznati kao efekti kvara. Efekt kvara je izravna posljedica koju događaj kvara ima na rad, funkciju ili stanje postrojenja. Nakon događaja kvara, analiziraju se pridružene posljedice kvara u odnosu operativnost postrojenja. Ukoliko se zahtijeva rangiranje ili stupnjevanje težine posljedice kvara tada se preporučuje koristiti pojam "*rangiranje posljedica*" koji se primjenjuje za koncept rangiranja magnitude posljedica. U slučaju da se zahtijeva rangiranje posljedica radi identifikacije opasnosti i procjene rizika na pojedince, imovinu i okoliš preporučuje se koristi pojam "*rangiranje rizika*".

Efekti kvara mogu biti razvrstani i zapisani tijekom cijelog vremena kako bi se omogućio povijesni prikaz ponašanja postrojenja i kao izvor informacija za povijesnu i/ili statističku analizu. Prilikom istraživanja kvara na postrojenju uzimaju se u obzir i upozorenja i efekti kvara kako bi se ustanovili mehanizmi kvara (na koji način, tj. kako se kvar dogodio) i uzrok kvara (zašto se kvar dogodio). Na osnovu dobivenih rezultata istraživanja može se razviti strategija, a koja se može sastojati od preventivnih radnji i proaktivnih radnji. Preventivne radnje odnose se na ciljeve dizajnirane za održavanja uvjeta rada postrojenja i njegove okoline unutar željenih specifikacija, kao i sprječavanja nepravilnog korištenja. Proaktivne radnje odnose se na odabir i instalaciju instrumenata koja su sposobna detektirati i djelovati po raspoloživim upozorenjima kvara. U tom smislu potrebno je odrediti mjerljive parametre, terminološki nazvane "*Indikatori zdravlja*", tj. fizičkih uvjeta rada ili performansi kako bi se prepoznala razlika između normalnih (ili povoljnih) i abnormalnih uvjeta rada.

5.3 Razvrstavanje kvarova

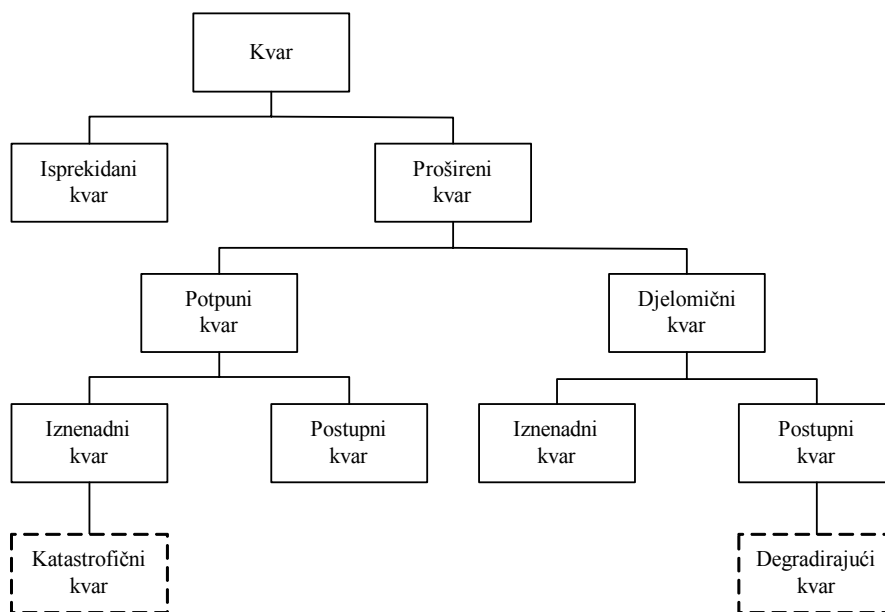
Kvarovi se mogu razvrstati na različite načine. U literaturi, njihova podjela se uglavnom zasniva na gore opisanom konceptu kvarova.

5.3.1 Razvrstavanje kvarova prema modovima kvara

Kvarovi se često klasificiraju u modove kvara. Mod kvara je opis neispravnosti, odnosno način na koji se može zapaziti da je funkcionalni blok u neispravnom stanju. Modovi kvara identificiraju se izučavanjem funkcija i performansi funkcionalnog bloka. Britanski standard BS 5760-5 definira općenite modove kvara i to za:

- kvarove za vrijeme rada,
- kvarove za rad u propisanom vremenu,
- kvarove za prestanak rada u propisanom vremenu,
- prijevremeni rad.

Moguća klasifikacijska shema kvarova prema modovima kvara prikazana je na slici 26, Rausand i Høyland (2004).



Slika 26. Klasifikacija kvarova prema modovima kvara.

Prema slici 26, kvarovi se dijele na:

- *Isprekidane kvarove* (eng. *intermittent failures*): To su kvarovi funkcionalnog bloka koji rezultiraju gubitkom neke njegove funkcije u vrlo kratkom periodu vremena. Nakon ovog kvara, funkcionalni blok se vraća u njegovo puno standardno radno stanje.
- *Proširene kvarovi* (eng. *extended failures*): To su kvarovi koji rezultiraju gubitkom neke funkcije funkcionalnog bloka i koji traju sve dok se neki njegov dio ne popravi ili zamijeni. Ovi kvarovi se nadalje dijele na:
 - a) *Potpune kvarovi* (eng. *complete failures*): to su kvarovi koji uzrokuju potpuni gubitak zahtijevane funkcije funkcionalnog bloka.
 - b) *Djelomične kvarovi* (eng. *partial failures*): To su kvarovi koji dovode do gubitke neke funkcije funkcionalnog bloka, ali ne i do potpunog gubitka njegove zahtijevane funkcije.

Potpuni i djelomični kvarovi mogu se nadalje podijeliti na:

- a) *Iznenadne kvarove* (eng. *sudden failures*): To su kvarovi koji se ne mogu predvidjeti bez prethodnog testiranja ili ispitivanja.
- b) *Postupni kvarovi* (eng. *gradual failures*): To su kvarovi koji se mogu predvidjeti testiranjem ili ispitivanjem. Postupni kvar može se prikazati kao postupno odstupanje

od određenog raspona vrijednosti performanse funkcionalnog bloka. Prepoznavanje postupnih kvarova zahtijeva usporedbu stvarnih performansi sa specificiranim performansama funkcionalnog bloka.

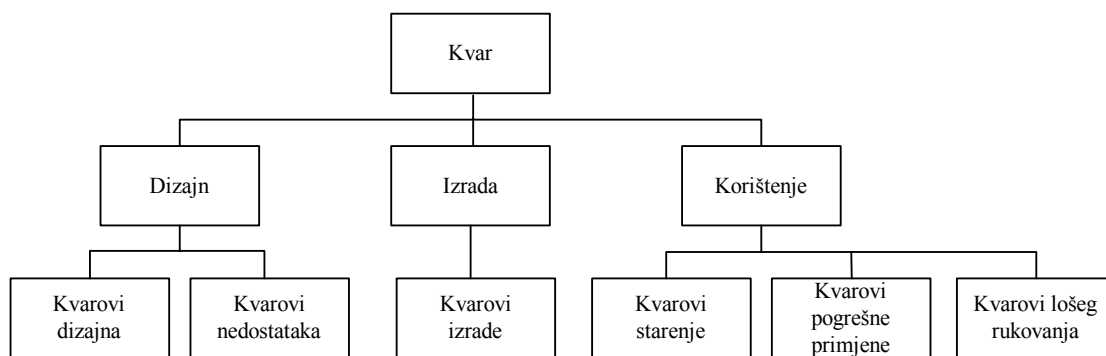
Prošireni kvarovi se još dijele na:

- a) *Katastrofične kvarove* (eng. *catastrophic failures*): To je kvar koji je istovremeno iznenadni i potpuni.
- b) *Degradirajuće kvarove* (eng. *degraded failure*): To je kvar koji je istovremeno djelomični i postupni (kao trošenje guma na automobilu).

U primjeru ventila za zatvaranje protoka u slučaju nužde, ako ventil ne zatvori u potpunosti protok to se može sagledavati kao djelomični kvar. Međutim, ukoliko ventil zataji kada se pojavi visoki tlak u cjevovodu (npr. zbog toga što opruga aktuatora ne funkcionira ispravno), tada je kvar potpun. Ventil se obično istroši korištenjem, što odgovara postupnom kvaru.

5.3.2 Razvrstavanje kvarova prema uzroku kvara

Kada se analiziraju modovi kvara funkcionalnog bloka, obično je korisno istražiti i njihov uzrok. Kvarovi se, sukladno standardu IEC 60050(191), prema uzrocima kvara mogu podijeliti u odnosu na životni ciklus funkcionalnog bloka, a što je prikazano na slici 27, Rausand i Høyland (2004.).



Slika 27. Podjela kvarova prema uzrocima u skladu s IEC 60050(191).

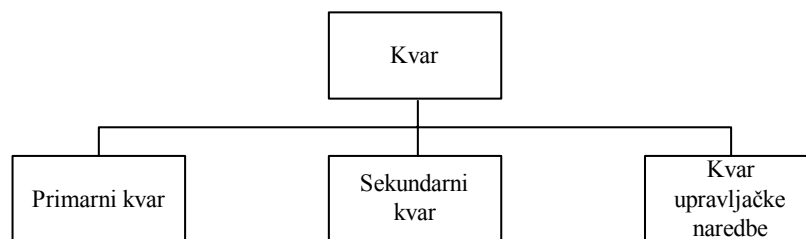
Prema slici 27, kvarovi se prema uzrocima kvara definiraju kao:

- *Kvarovi dizajna* (eng. *design failure*): To su kvarovi koji se događaju zbog neadekvatnog dizajna funkcionalnog bloka.
- *Kvarovi nedostataka* (eng. *weakness failure*): To su kvarovi zbog nedostataka samog funkcionalnog bloka kada je izložen opterećenjima unutar naznačenih sposobnosti funkcionalnog bloka. Nedostaci mogu biti inherentni ili inducirani u funkcionalnom bloku tako da isti ne može podnijeti opterećenje u normalnom okruženju.
- *Kvarovi izrade* (eng. *manufacturing failure*): To su kvarovi zbog nesukladnosti tijekom izrade radi dizajna funkcionalnog bloka ili određenim proizvodnim procesima. O ove kvarove spadaju svi kvarovi prouzročeni greškom proizvodnog procesa, neadekvatnom izradom ili greškom napravljenom tijekom kontrole procesa tijekom izrade, testiranja ili popravka.
- *Kvarovi starenja* (eng. *ageing failure*): To su kvarovi čija se vjerojatnost pojavljivanja povećava protekom vremena kao rezultat svojstvenog procesa u funkcionalnom bloku, tj. njegovog korištenja i starenja.

- *Kvarovi pogrešne primjene* (eng. *misuse failure*): To su kvarovi tijekom korištenja zbog primjene opterećenja koja premašuju naznačene sposobnosti funkcionalnog bloka.
- *Kvarovi lošeg rukovanja* (eng. *mishandling failure*): To su kvarovi prouzročeni nepravilnim rukovanjem funkcionalnim blokom ili nedostatkom brige oko njega.

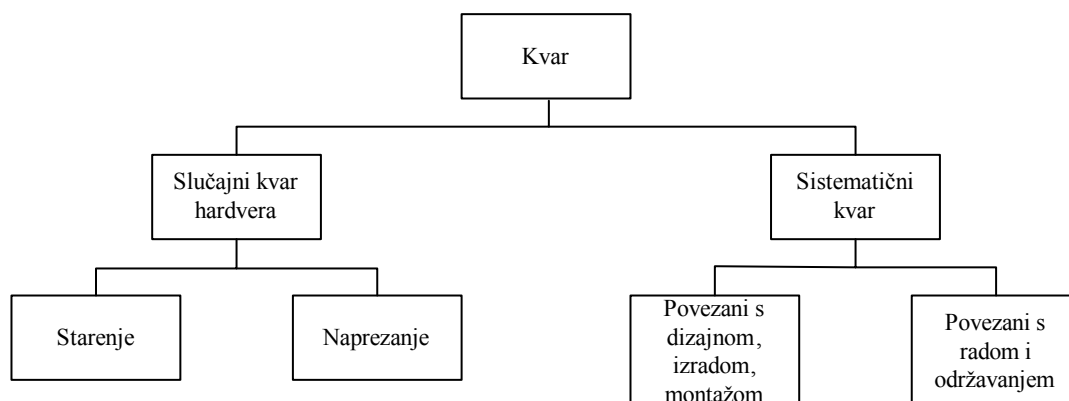
Različiti uzroci kvarova se nužno ne isključuju, kao što npr. očito preklapanje kvarova nedostataka, dizajna i izrade.

U nekim slučajevima korisna je podjela kvarova na *primarne*, *sekundarne* i na *kvarove upravljačkih naredbi* (slika 28), Rausand (2011). Primarni kvar je kvar uzrokovan prirodnim starenjem funkcionalnog bloka koji se događa pod uvjetima unutar dizajniranog okvira funkcionalnog bloka. Sekundarni kvar je uzrokovan prekomjernim naprežanjem izvan dizajniranog okvira funkcionalnog bloka. Takva naprežanja mogu biti šokovi uzrokovani djelovanjem izvora toplinske, mehaničke, električne, kemijske ili radioaktivne energije. Naprežanja mogu biti uzrokovana od strane obližnjih komponenti, okoline i rukovaocima sustava ili osobljem postrojenja. U slučaju primarnog ili sekundarnog kvara, za povratak funkcionalnog bloka u funkcionalno stanje potrebna je izvršiti radnju popravka. Kvar upravljačke naredbe je kvar uzrokovan nepravilnim upravljačkim signalom ili smetnjama. Obično nije potrebno izvršiti radnju popravka za povrat funkcionalnog bloka u funkcionalno stanje. Ovi kvarovi se ponekad odnose na prijelazne kvarove.



Slika 28. Podjela kvarova prema uzrocima.

Prema standardu IEC 61508:2000, a koji se odnosi funkcionalnu sigurnost električnih, elektroničkih i programirajućih elektroničkih sigurnosnih sustava, kvarovi se prema uzroku dijele kao što je prikazano na slici 29.



Slika 29. Podjela kvarova prema uzrocima u skladu s IEC 61508.

Standard IEC 61508, razlikuje dvije glavne vrste kvarova prema njihovom uzroku i to: *slučajni kvar hardvera* i *sistematični kvar*. Slučajni kvarovi hardvera posljedica su prirodnih

mehanizama propadanja hardvera. Ovi kvarovi se dalje se dijele na kvarove uslijed starenja i kvarove uslijed naprezanja. Kvarovi starenja su kvarovi koji se pojavljuju unutar dizajniranog okvira sustava. Kvarovi naprezanja pojavljuju se pod djelovanjem prekomjernog naprezanja, tj. naprezanja iznad dizajniranog okvira. Sistematični kvar definira se kao: "kvar povezan na deterministički način prema određenom uzroku, koji se može otkloniti samo modifikacijom dizajna ili procesa izrade, radnih postupaka i drugih relevantnih faktora". Dakle, to su kvarovi koji nisu fizičke prirode i koji se manifestiraju odstupanjem performansi od zahtijevane, bez bilo kojeg fizičkog propadanja funkcionalnog bloka. Sistematični kvarovi se nadalje dijele na *kvarove povezane (inicirani) dizajnom, izradom ili montažom* i na *kvarove povezane s održavanjem*. Prvi mogu biti latentni (skriveni) od prvog dana rada. Primjeri su skriveni kvarovi softvera, senzora (kriva očitavanja) ili pak ukoliko je neki dio opreme ugrađen na krivom mjestu. Kvarovi rada i montaže inicirani su ljudskim greškama za vrijeme rada, održavanja ili testiranja.

Obično se u većini slučajeva pretpostavlja kako su svi elementi nekog funkcionalnog bloka nezavisni. Međutim, u praksi to nije uvijek slučaj. Sigurnosni sustavi često imaju visoki stupanj redundantnosti, pa stoga pouzdanost sustava strogo ovisi od potencijalnih kvarova zajedničkog uzroka (eng. *common cause failure*; kratica *CCF*). Stoga je vrlo važno prepoznati *CCF* kvarove i poduzeti potrebne mjere opreza za sprječavanje tih kvarova, Rausand i Høyland (2004). Nekoliko definicija događaja *CCF*-a može se pronaći u literaturi. Standard ISO 14224 definira kvarove zajedničkog uzroka kao: "kvarove različitih objekata koji su rezultat istog direktnog uzroka i koji se pojavljuju unutar relativno kratkog vremena u kojem ovi kvarovi nisu posljedice drugih kvarova". Standard IEC 60050(191) iste definira kao: "kvarove različitih objekata, koji su rezultat jednog događaja i gdje ovi kvarovi nisu posljedica svakog drugog". Na ovaj način kvarovi zajedničkog uzroka mogu se sagledavati kao primjer zavisnih kvarova više objekata zbog jednog uzroka, Dhillon (1999). Američka nuklearna regulatorna komisija u standardu za bazu podataka za *CCF* kvarove i analizu sustava NUREG/CR-6268:2007, *CCF* kvarove usko vezuje s razumijevanjem prirode i značaja zavisnih događaja, pa događaj ovog kvara definira kao: "zavisni kvar u kojem dvije ili više komponenti egzistiraju istovremeno u stanju neispravnosti ili unutar kratkog vremenskog intervala i koji su direktni rezultat zajedničkog uzroka". Modarres i dr. (1999), zavisne kvarove definira kao događaje u kojem je vjerojatnost svakog kvara zavisna o pojavi drugih kvarova. Prema Rausandu i Høylandu (2004), *CCF* kvarovi mogu se podijeliti na dvije vrste:

1. Višestruki kvarovi koji se pojavljuju u istom vremenu zbog zajedničkog uzroka.
2. Višestruki kvarovi koji se pojavljuju zbog zajedničkog uzroka, ali ne nužno u istom vremenu.

Postoji mnogo uzroka pojave *CCF* kvarova. Neki od njih su, Dhillon (1999):

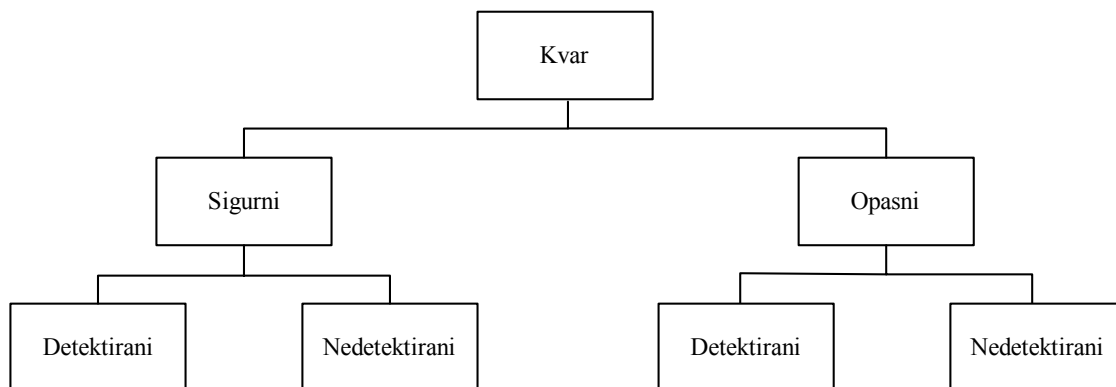
- *Zajednički vanjski okoliš*: To uključuje temperaturu, vlažnost zraka, vibracije, prašinu i vlagu.
- *Greške rada i održavanja*: To uključuje faktore kao što su nepažnja, nepravilno održavanje, pogrešno podešavanje ili kalibracija.
- *Nedostaci u dizajnu opreme*: To je rezultat propusta za vrijeme faze dizajna.
- *Vanjski katastrofični događaji*: Pojava prirodnih događaja kao potres, tornado ili poplava. Pojava ovih prirodnih događaja može izazvati istovremeni kvar redundantnog uređaja.
- *Funkcionalni nedostatak*: Ovo može biti rezultat lošeg dizajnirane zaštitne radnje ili neadekvatnih instrumenata.
- *Zajednički vanjski izvor snage*: Redundantna jedinica koja se napaja iz istog izvora snage (direktno ili indirektno) može istovremeno zatajiti u slučaju kvara izvora snage.

- *Zajednički proizvođač*: Redundantna jedinica nabavljena od istog proizvođača može imati isti tvornički ili drugi defekt.

Kvarovi zajedničkog uzroka vrlo su važni u analizi pouzdanosti i mora im se dati primjeren tretman kako bi se minimiziralo precjenjivanje pouzdanosti. Ovi kvarovi prikazani i razmatrani su u mnogim studijama pouzdanosti radi prikazivanja ukupne nepouzdanosti i neraspoloživosti složenih sustava, Modarres i dr. (1999). Nadalje, analiza CCF kvarova tvore bitni dio studija visoko pouzdanih kompleksnih sustava, Rausand i Høyland (2004). Pri tome je potreban sistematski pristup, a generalni pristup za postupanje s CCF kvarovima u studijama pouzdanosti i sigurnosti je prikazana u standardu NUREG-4780:1988. Isto tako, veći broj postupaka i lista provjere se su razvijene kao pomoć inženjerima u stvaranju dizajna sustava koji je izdrživ prema kvarovima zajedničkih uzroka.

5.3.3 Razvrstavanje kvarova prema efektu i posljedicama kvara

Neki kvarovi (modovi kvara) su više kritični nego drugi bilo u operativnom smislu ili na njihov utjecaj na vanjsku okolinu. U tom smislu standard IEC 61508 razlikuje dvije vrste kvarova (slika 30) prema modovima kvara i to: *opasne kvarove* i *sigurne kvarove*.



Slika 30. Podjela modova kvara prema efektu kvara u skladu s IEC 61508.

Opasan kvar je kvar koji ima potencijal staviti sigurnosno povezan sustav u opasno stanje ili stanje funkcionalne neispravnosti, dok sigurni kvarovi to nemaju. Obje vrste kvarova dalje se dijele na nedetektirane i detektirane. U tom smislu detektirani kvar tumači kvar koji se detektira trenutno kada se pojavi, npr. automatskim samo-testiranjem. Nedetektirani kvar može se zapaziti jedino funkcionalnim testiranjem ili kada se zahtjeva rad sustava.

Prema RCM pristupu s obzirom na posljedice kvarovi se mogu podijeliti u sljedeće kategorije, Moubray (1997):

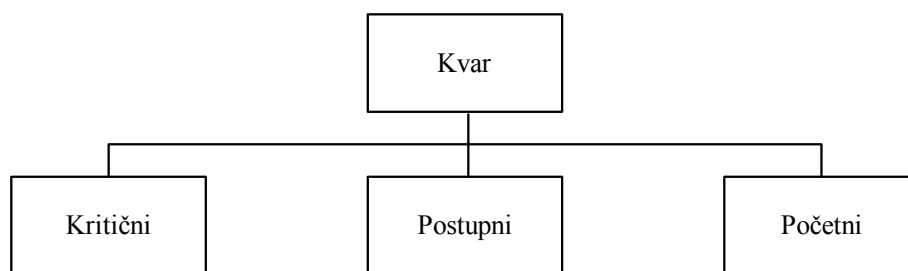
- kvarove s sigurnosnim posljedicama,
- kvarove s posljedicama na okoliš
- kvarove s operativnim posljedicama,
- kvarove neoperativnim posljedicama

Kvarovi se mogu razvrstati i s obzirom na stupanj težine (eng. *severity*) moda kvara, a koji označava utjecaj moda kvara na na sustav u cjelini kao i na vanjsku okolinu. Pojam "*severity*", standard MIL-STD 882E definira kao: "*veličinu (magnitudu) potencijalnih posljedica nesreća uključujući: smrt, ozljede, profesionalne bolesti, oštećenje ili gubitak*

opreme ili imovine, oštećenje okoliša ili novčani gubitak". Pri tome klasificira kvarove prema stupnju težine na:

1. *Katastrofične*: kvarovi koji uzrokuju smrt ili potpuni gubitak sustava, te značajni nepovratni učinak na okoliš ili novčani gubitak.
2. *Kritične*: Kvarovi koji uzrokuju ozbiljne ozljede ili oštećenja sustava, te značajni povratni učinak na okoliš i novčani gubitak .
3. *Marginalne*: Kvarovi koji uzrokuju manje ozljede ili oštećenja sustava, te umjereni povratni učinak na okoliš ili novčani gubitak.
4. *Zanemarive*: Kvarovi koji rezultiraju vrlo male ozljede ili oštećenja sustava, te minimalni učina na okoliš ili novčani gubitak.

Standard ISO 14224 razvrstava modove kvara prema stupnju težine u *kritične, postupne i početne* (slika 31).



Slika 30. Podjela kvarova stupnju težine kvara u skladu s ISO 14224

U grupu kritičnih kvarova spadaju kvarovi koji uzrokuju trenutačni i ukupni gubitak sposobnosti funkcionalnog bloka da osigura izlaz. Grupu postupnih kvarova čine kvarovi koji nisu kritični, ali koji sprječavaju funkcionalnom bloku izlaze unutar specificiranih granica. Ovi kvarovi mogu se obično, ali ne nužno, razviti u kritične. Početni kvarovi su oni kvarovi koji ne uzrokuju trenutni gubitak sposobnosti funkcionalnog bloka da daje zahtijevane izlaze. Međutim, ukoliko se u bliskoj budućnosti ovi kvarovi ne otklone mogu rezultirati postupnim ili kritičnim kvarom.

5.3.4 Zavisni kvarovi

Kod analiza pouzdanosti, u praksi mogu se razmatrati situacije kada komponente sustava mogu zakazati nezavisno jedna od druge ili pak da njihova neispravnost nije nužno nezavisna jedna od druge. U drugom slučaju govori se o zavisnim kvarovima, pri čemu se razlikuju dvije vrste zavisnosti: pozitivna i negativna, Rausand i Høyland (2004). *Pozitivna zavisnost* podrazumijeva se ukoliko kvar jedne komponente dovodi do povećanja tendencije neispravnosti (zakazivanja) druge komponente. S druge strane, ako kvar jedne komponente dovodi do smanjenja tendencije neispravnosti (zakazivanja) druge komponente, tada se govori o *negativnoj zavisnosti*. Zavisni kvarovi mogu se podijeliti na: *kvarove zajedničkih uzroka, kaskadne kvarovi* i *kvarove s negativnom zavisnosti*. Kaskadni kvarovi su višestruki kvarovi inicirani od kvara jedne komponente u sustavu, a koji rezultira lančanom reakcijom ili domino efektu. U kvarovi s negativnom zavisnosti, spadaju jednostruki kvarovi koji smanjuju vjerojatnost kvarova na drugim komponentama.

5.4 Analiza pouzdanosti

Osnovni cilj analize pouzdanosti je analiza kvarova, njihovog uzroka i posljedica. Obično se analizama pouzdanosti ugrađuju posebne mjere performansi pouzdanosti, a kako bi se provjerilo dali je pouzdanost funkcionalnog bloka ispod određene razine. Stoga, analiza pouzdanosti funkcionalnog bloka usmjerena je na dodjeljivanju mjerljivih karakteristika izraženih pomoću vjerojatnosti da će isti obaviti zahtijevanu funkciju pod zadanim okolišnim i radnim uvjetima za utvrđeni period vremena. To podrazumijeva izradu modela koji mora biti logičan i matematički prikazan, a koji je zasnovan na distribucijama kvarova komponenti od kojih je funkcionalni blok sastavljen.

Analiza pouzdanosti sustava podrazumijeva pojam za nekoliko metoda, zasnovanih na modelu, koje omogućuju kvantificiranje mjera pouzdanosti. Pošto se pouzdanost odnosi na vjerojatnost, relevantni aspekti vjerojatnosti uvode se u samom početku analize pouzdanosti. Na temelju toga, matematički opis karakteristika (mjera) koje kvantificiraju pouzdanost i glavne metode koje se koriste u analizama pouzdanosti biti će opisani u daljnjem tekstu.

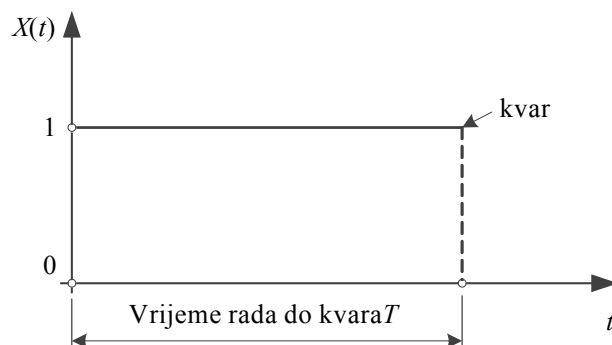
5.4.1 Temeljne matematičke definicije

Pouzdanost se može matematički definirati kao vjerojatnost da će funkcionalni blok raditi u nekom vremenskom periodu t . Prema toj definiciji pouzdanosti vidljivo je kako analiza pouzdanosti uključuje analizu binarnih ishoda (tj. podaci ispravan/neispravan). Međutim u praksi je često vrlo važno analizirati vremenski period u kojem će komponenta ili sustav funkcionirati. Takva analiza se naziva analiza životnog vijeka ili analiza vremena kvara. Analiza životnog vijeka uključuje analizu pozitivne kontinuirane slučajne varijable i zahtijeva drukčije statističke modele nego analize zasnovane na podacima uspješan/neuspješan.

Dakle, analiza pouzdanosti uključuje dvije osnovne slučajne varijable, a koja je definirana kao funkcija koja preslikava rezultate nekog eksperimenta x_i u realni broj. Prostor uzorka Ω je niz svih mogućih rezultata eksperimenta x_i , tj. $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Ukoliko se npr. testira prekidač u jednom ciklusu, prostor uzorka sadrži niz događaja "ispravan" i "neispravan". Slučajna varijabla ovog eksperimenta može se odrediti kao 0 ukoliko je prekidač neispravan i 1 ukoliko je prekidač ispravan. Umjesto toga može se provesti eksperiment tako da se prekidač testira dok ne otkáže. Prostor uzorka ovakvog eksperimenta je bilo koje pozitivno vrijeme koje se definira kao slučajna varijabla T koja se može desiti u domeni $0 < T < \infty$. Stoga se stanje funkcionalnog bloka u vremenu t može opisati varijablom stanja $X(t)$:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{ukoliko je objekt ispravan u vremenu } t \\ 0 & \text{ukoliko je objekt neispravan u vremenu } t \end{cases} \quad (3)$$

Dakle, stanje funkcionalnog bloka X može biti ispravno i neispravno pa je to diskretna slučajna varijabla koja može imati vrijednosti 0 za neispravno stanje i 1 za ispravno stanje. Trenutak kvara nije poznat unaprijed pa je to kontinuirana slučajna varijabla T . Veza između varijable stanja $X(t)$ i vremena kvara T je prikazana na slici 32.



Slika 32. Varijabla stanja i vrijeme kvara objekta.

Vrijeme rada koje je objekt proveo u pogonu t može se mjeriti prema različitim skalama: kalendarsko vrijeme, vrijeme provedeno u pogonu, broj radnih ciklusa, broj prijeđenih kilometara, broj uključivanja/isključivanja, broj okretaja kod ležaja i itd. Prema ovim primjerima vrijeme rada t , a isto tako i vrijeme kvara T može često biti nenegativna cijelobrojna vrijednost, tj. diskretna varijabla, koja se međutim može aproksimirati kontinuiranom varijablom, tj. realnim brojem.

Većina analiza pouzdanosti fokusira se na modeliranje distribucije vremena kvara elementa, odnosno modeliranje svojstava kontinuirane slučajne varijable T . Svojstva kontinuirane slučajne varijable T mogu se opisati koristeći funkciju gustoće vjerojatnosti $f(t)$ ili funkciju kumulativne gustoće vjerojatnosti $F(t)$, funkciju pouzdanosti $R(t)$, funkciju učestalosti kvarova $\lambda(t)$ i srednje vrijeme do kvara (eng. *Mean Time to Failure*; kratica *MTTF*). Postoji više distribucija vjerojatnosti kojima se modeliraju kvarovi. Jedne od najviše korištenih u pouzdanosti su: Beta, Eksponencijalna, Gamma, Log-normalna, Normalna, Rayleighova i Weibullova. O njihovim značajkama ovisi područje i širina primjene. Tako npr. normalna distribucija koristi se uglavnom za modeliranje mehaničkih kvarova koje su posljedice zamora ili trošenja, Ebling (1997). S druge strane, eksponencijalna distribucija je široko korištena u pouzdanosti iz razloga što se pomoću nje modeliraju potpuno slučajni kvarovi nepopravljivih funkcionalnih elemenata (model konstantne učestalosti kvarova), a što je često stvarna situacija.

Matematički opis i značajke najčešće korištenih distribucija vjerojatnosti kvara i mjera pouzdanosti mogu se pronaći u raznim izvorima (Meeker i Escobar (1998), Dhillon (1999, 2006), Ebling (1997), Modarres i dr. (1999), Rausand i Høyland (2004), Zio (2007), Hamada i dr. (2008), Kaminskiy (2013))

5.4.1.1 Funkcija pouzdanosti

Funkcija pouzdanosti funkcionalnog bloka $R(t)$, definira se kao vjerojatnost da se kvar funkcionalnog bloka neće pojaviti u intervalu $(0, t]$ ili drugim riječima da će isti preživjeti utvrđeni vremenski interval $(0, t]$ i da će još uvijek funkcionirati u vremenu t . Ukoliko je T slučajna varijabla koja prikazuje vrijeme pojave kvara, tada se pouzdanost funkcionalnog bloka može izraziti kao:

$$R(t) = P(T > t) \text{ za } t > 0 \quad (4)$$

U trenutku $t=0$ (funkcionalni blok nije nikad radio), pouzdanost je $R(t=0)=1$. Kako $t \rightarrow \infty$ tada i $R(t) \rightarrow 0$. Pošto su u nekom vremenu t moguća dva diskretna stanja, ispravan i neispravan, a koja se međusobno isključuju, tada se može napisati jednažba pouzdanosti kao:

$$\begin{aligned} R(t) + Q(t) &= 1 \text{ za } t > 0 \\ R(t) &= 1 - Q(t) \end{aligned} \quad (5)$$

gdje je $Q(t)$ funkcija nepouzdanosti. Ova funkcija je u stvari funkcija kumulativne gustoće vjerojatnosti kvara $F(t)=P(T \leq t)$, a koja daje vjerojatnost kvara u periodu $(0, t]$. Drugim riječima, za neki vremenski trenutak t , vrijednost funkcija $F(t)$ je vjerojatnost pojave slučajne varijable T . Prema tomu, funkcija pouzdanosti, uz funkciju $Q(t)=F(t)$ distribucije kvara, može se prema (5) definirati kao:

$$R(t) = 1 - Q(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau$$

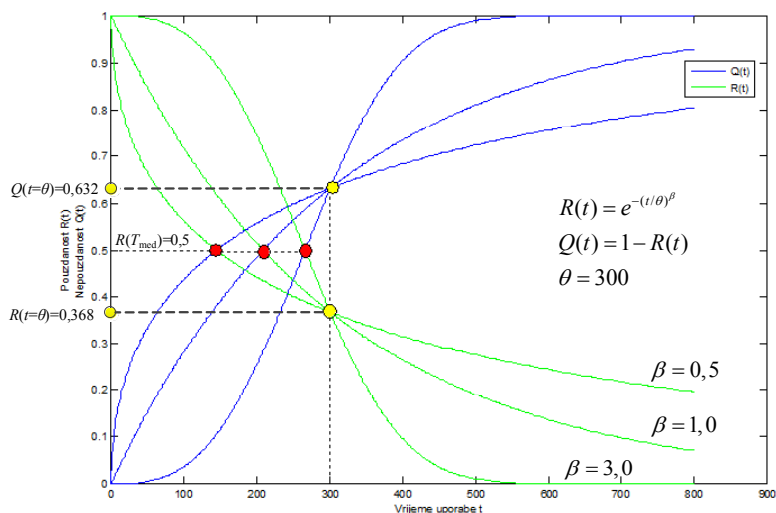
(6)

gdje je funkcija $f(\tau)$ funkcija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable T , a koja je prema (5) i (6) može prikazati jednažbom:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (7)$$

Dakle, pomoću funkcija $f(t)$ i $F(t)$ modelira se slučajna varijabla T , tj. vrijeme pojave kvara.

Grafički primjer funkcije pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanost $Q(t)$ prikazan je na slici 33, na primjeru funkcionalnog bloka, kod kojeg je vrijeme kvara T opisano dvoparametarskom Weibullovom razdiobom sa parametrom skale $\theta=300$ i za parametre oblika $\beta=0,5$, $\beta=1,0$ i $\beta=3,0$.



Slika 33. Funkcija pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanosti $Q(t)$ za Weibullovu razdiobu kvarova.

Weibullova razdioba je nedvojbeno najpopularnija statistička distribucija u inženjerstvu pouzdanosti koja se koristi kod opisivanja i ranih kvarova (opadajuće učestalosti kvarova) i istrošenja (rastuće učestalosti kvarova). Pripadajuća funkcija pouzdanosti je:

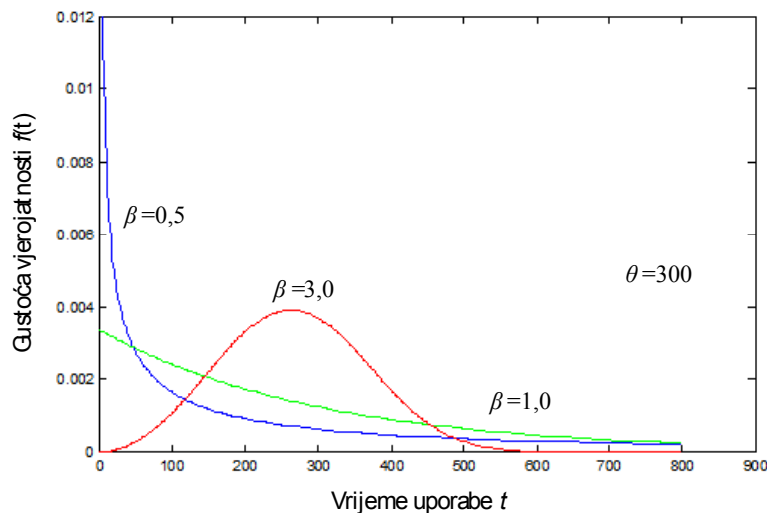
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \quad (8)$$

gdje je β parametar oblika, a θ parametar skale ili karakteristični projektni životni vijek elementa koji ima istu jedinicu kao vrijeme kvara T . To vijek u kojem će 63,2 % populacije otkazati do trenutka $t=\theta$, bez obzira na parametar oblika β . Naime, kao što je vidljivo iz slike 33, svaka krivulja pouzdanosti prolazi kroz istu točku $t=\theta$, pa prema izrazu (9) slijedi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{\theta}{\theta}\right)^\beta} = e^{-1} = 0,368 \quad (9)$$

Parametar skale θ ujedno utječe na širinu raspodjele i srednju vrijednost, odnosno rasipanje razdiobe.

Grafički primjer funkcije gustoće vjerojatnosti $f(t)$ prikazan je na slici 34, na primjeru funkcionalnog bloka, kod kojeg je vrijeme kvara T opisano dvoparametarskom Weibullovom razdiobom sa parametrom skale $\theta=300$ i za parametre oblika $\beta=0,5$, $\beta=1,0$ i $\beta=3,0$.



Slika 34. Funkcija gustoće vjerojatnosti $f(t)$ za Weibullovu razdiobu kvarova.

Funkcija gustoća vjerojatnosti slučajne varijable T koja se ravna po Weibullovoj razdiobi može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{\beta}{\theta} \cdot \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} & \text{za } t \geq 0, \lambda > 0, \theta > 0 \\ 0 & \text{za } t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Iz slike 34, vidljiv je utjecaj parametara oblika β na $f(t)$ dvoparametarske Weibullove razdiobe. Kada je $\beta=1$, $f(t)$ ima oblik sličan eksponencijalnoj razdiobi, dok je oblik za veću vrijednost β (npr. $\beta \geq 3$) nešto simetričniji, slično normalnoj razdiobi. U rasponu od $1 < \beta < 3$ oblik $f(x)$ je izrazito nesimetričan.

5.4.1.2 Funkcija učestalosti kvarova

Još jedan način prikazivanja distribucije kvarova kao kontinuirane slučajne varijable T je pomoću funkcije učestalosti (intenziteta) kvarova (eng. *Failure Rate Function*), također nazivana i funkcija učestalosti hazarda (eng. *hazard rate function*). Funkcija učestalosti kvarova je vrlo važna u analizi pouzdanosti zbog toga što određuje mjeru starenja funkcionalnog bloka.

Ukoliko je kod analize pouzdanosti potrebno odrediti vjerojatnost da će element, koji je uspješno radio neko vrijeme t , otkazati u narednom intervalu vremena $[t, t+\Delta t]$, tada se taj problem rješava funkcijom uvjetne pouzdanosti $R(\Delta t|t)$. Ova funkcija se često koristi kod davanja garancija, kod procjene uspješnosti narednog perioda rada nakon nekog ciklusa ili nakon periodičkih pregleda, odnosno funkcionalnosti elementa u vremenskom periodu Δt koji je započeo nakon uspješnog rada u trenutku vremena t .

Prema teoriji vjerojatnosti uvjetnu vjerovatnost dvaju događaja uključuje Bayes-ova formula. Ukoliko A označava događaj da će element biti funkcionalan u periodu vremenu $t+\Delta t$, dok B označava događaj funkcionalnosti elementa u vremenu t , tada je uvjetna vjerojatnost da A daje B prema Bayes-ovoj formuli jednaka:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \text{ za } P(B) > 0 \quad (12)$$

odnosno uvjetnoj pouzdanosti:

$$R(\Delta t|t) = \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (13)$$

Prema (30) i (31) može se dobiti izraz za vjerojatnost da će funkcionalni blok zakazati u intervalu $[t, t+\Delta t]$, ako je poznato da je isti bio funkcionalan u trenutku t :

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} = \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t)}{R(t)} \quad (14)$$

gdje je:

$Q(t)$ - funkcija nepouzdanosti elementa u vremenu t ,

$Q(t + \Delta t)$ - funkcija nepouzdanosti u narednom periodu vremena $t + \Delta t$,

$R(t)$ - funkcija pouzdanosti elementa u vremenu t .

Ukoliko se izraz (14) podijeli s Δt , te ako $\Delta t \rightarrow 0$, dobiva se funkcija učestalosti intenziteta kvarova koja uobičajeno se označava kao $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t + \Delta t) - Q(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (15)$$

Prema (15), $\lambda(t)$ prikazuje vjerojatnost da će funkcionalni blok starosti t zakazati u malom vremenskom intervalu od vremena t do $t + \Delta t$.

Za male intervale vremena Δt slijedi:

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx \lambda \cdot \Delta t$$

$$P(t < T \leq t + \Delta t) \approx f \cdot \Delta t$$

(16)

Prvi izraz u (16) daje približnu vjerojatnost da će element zakazati u intervalu vremena Δt gledano od trenutka t . Drugi izraz u (16) daje približnu vjerojatnost da će element zakazati u intervalu vremena Δt gledano od trenutka $t=0$ (npr. pustili u pogon novu komponentu/sustav ili popravljivu komponentu/sustav koja je nakon popravka "dobra kao nova").

Prema (6), pouzdanost ovisi o razmatranom periodu vremena $(0, t]$ i određene funkcije distribucije kvara $F(t)$ ili $f(t)$, dok učestalost kvarova $\lambda(t)$ opisuje promjenu pouzdanosti s vremenom.

Prema (7) i (15), $\lambda(t)$ može se izraziti i kao:

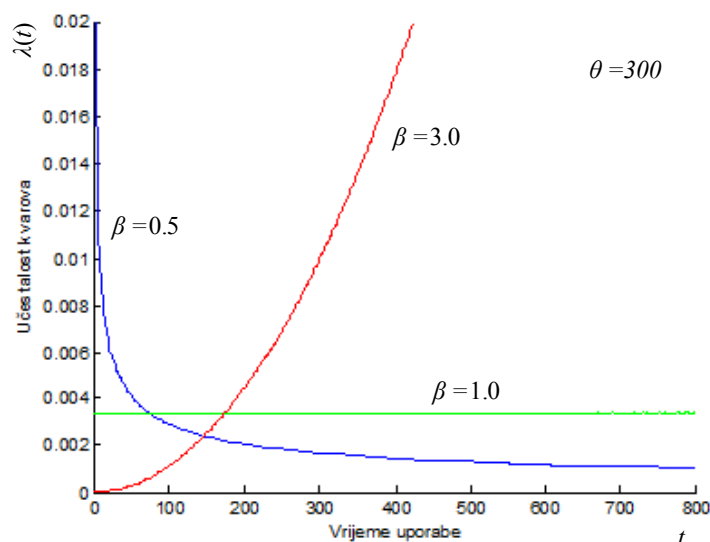
$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt \cdot R(t)} = -\frac{d}{dt} \ln R(t)$$

(17)

Slijedom toga, pouzdanost $R(t)$ se može izračunati pomoću jednadžbe:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (18)$$

Na slici 35, prikazan je grafički primjer funkcije učestalosti kvarova $\lambda(t)$ za Weibullovo model sa parametrom skale $\theta=300$ i parametrima oblika $\beta=0,5$, $\beta=1,0$ i $\beta=3,0$, a koja je dana jednadžbom:



Slika 35. Funkcija učestalosti kvarova $\lambda(t)$ Weibull-ovog modela kvarova.

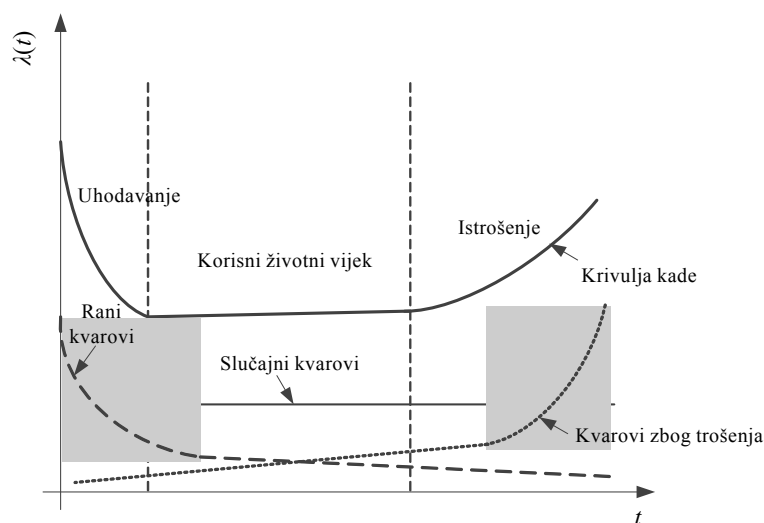
$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{\beta}{\theta} \cdot \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}}{e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}} = \frac{\beta}{\theta} \cdot \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad \text{uz } \theta > 0, \beta > 0, t \geq 0$$

(19)

Iz slike 35, vidljivi su osnovni oblici funkcije učestalosti kvarova $\lambda(t)$ u funkciji vremena i to:

- padajuća učestalost kvarova (*DFR- Decreasing Failure Rate*) kada je $\beta=0,5$,
- rastuća učestalost kvarova (*IFR- Increasing Failure Rate*) kada je $\beta=3,0$,
- konstantna učestalost kvarova (*CFR-Constant Failure Rate*) kada je $\beta=1,0$,
- učestalost kvarova s krivuljom u obliku kade (*BFR- Bathtub Failure Rate*).

Funkcija učestalosti kvarova je važna u analizi pouzdanosti pošto prikazuje promjene vjerojatnosti kvara tijekom cijelog životnog vijeka funkcionalnog bloka. U praksi $\lambda(t)$ često ispoljava oblik kade, pa se stoga se i naziva krivulja kade (eng. *bathtub curve*), Modarres i dr. (1999). Nadalje, Dhillon (2006) također navodi kako je koncept krivulje kade dobro poznat koncept koji se koristi za prikaz ponašanja kvarova raznih inženjerskih funkcionalnih blokova iz razloga što je njihova učestalost kvarova funkcija vremena, tj. mijenja se s vremenom. Na slici 36 prikazana je krivulja kade.



Slika 36. Funkcija učestalosti kvarova u obliku kade.

Kao što je vidljivo iz toka krivulje na slici 36, tijekom promatranja učestalosti kvarova funkcionalnog bloka u vremenskom periodu t , u početku, tj. periodu uhadavanja (eng. *burn-in*) pojavljuju se rani (početni kvarovi). Uzroci ranih kvarova mogu biti loš proizvodni proces, loša kontrola kvalitete, ljudska greška, podstandardni materijali i dr. Broj ranih kvarova tijekom perioda uhadavanja naglo opada. Stoga je u tom periodu funkcija učestalosti kvarova padajuća (*DFR*). Nakon perioda uhadavanja nastupa period tzv. korisnog vijeka trajanja (eng. *useful life*), a u kojem se pojavljuju samo slučajni kvarovi. Njihovo učestalost je konstantna (*CFR*, $\lambda=1/m$). Uzroci tih kvarova mogu biti viša slučajna naprezanja od očekivanih, ljudska greška, zlouporaba, neprimjetni nedostaci i dr. Nakon toga perioda vremena nastupa period dotrajalosti (eng. *wearout*) i od tog trenutka slučajnim kvarovima pridružuju se i kvarovi zbog dotrajalosti, a zbog čega učestalost kvarova raste (*IFR*). Uzroci ovih kvarova mogu biti habanje uzrokovano trenjem, loše održavanje, nepravilno izvršen remont (obnova), korozija i

puzanje, kratki dizajnirani životni vijek, istrošenje uslijed starenja i dr. Matematički se ova krivulja može dobiti kombinacijom nekoliko distribucija kvarova ili pak kao funkcija dijelova linearnih i konstantnih učestalosti kvarova, Ebling (1997).

Neispravnost kompleksnih funkcionalnih blokova može biti rezultat različitih modova kvara, koji opet mogu biti uzrokovani različitim mehanizmima kvara. Koristan pristup kod analiza u inženjerstvu pouzdanosti jest odvajanje svakog takvog moda kvara, Ebling (1997). Stoga, ukoliko je $R_i(t)$ funkcija pouzdanosti za i mod kvara, tada se, pretpostavljajući nezavisnost između modova kvara, pouzdanost funkcionalnog bloka dobiva kao:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (20)$$

gdje je pouzdanost $R(t)$ određena kao umnožak vjerojatnosti $R_i(t)$, odnosno kao vjerojatnosti da se nijedan od n modova kvara ne pojavi u vremenu t . Funkcija učestalosti kvarova $\lambda(t)$ može se dobiti direktno zbrajanjem funkcija učestalosti kvarova $\lambda_i(t)$ svakog moda kvara, odnosno kao:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (21)$$

5.4.1.3 Srednje vrijeme do kvara-MTTF

Obično je u analizama pouzdanosti od interesa očekivano vrijeme do kvara, a koje se naziva srednje vrijeme do kvara (*MTTF*). Srednje vrijeme do kvara funkcionalnog bloka je očekivano vrijeme do pojave (prvog) kvara. Ukoliko je T slučajna varijabla koja prikazuje vrijeme pojave kvara, tada je srednje vrijeme do kvara jednako matematičkom očekivanju slučajne varijable T , tj. $MTTF=E(T)$.

Pretpostavljajući kako je funkcija pouzdanosti funkcionalnog bloka dana s $R(t)$, *MTTF* može se izračunati kao:

$$MTTF = E(T) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (20)$$

Ukoliko je vrijeme potrebno za popravak ili zamjenu neispravnog vrlo kratko uspoređujući ga s *MTTF*, *MTTF* također prikazuje i srednje vrijeme između kvara (eng. *Mean Time Between Failures*; kratica *MTBF*). Ukoliko se vrijeme popravka ne može zanemariti, *MTBF* također uključuje srednje vrijeme popravka (eng. *Mean Time To Repair*; kratica *MTTR*).

MTTF samo jedna od nekoliko mjera lokacije raspodjele. Druga mjera lokacije je medijan T_{med} , definiran kao:

$$R(T_{med}) = 0,5 \quad (22)$$

Medijan dijeli razdiobu na dvije polovine. U grafičkom primjeru za Weibullovu razdiobu (slike 32), vidljivo je kako se krivulje funkcija pouzdanosti i nepouzdanosti sijeku u točkama u kojima je pouzdanost 50%, tj. u točkama koje označavaju medijan i u kojoj je očekivanje

da će se 50% kvarova desiti prije te točke, a ostalih 50% poslije. U primjeru Weibullovog modela kvarova, T_{med} može se izračunati kao:

$$\begin{aligned}
 R(t = T_{med}) &= e^{-\left(\frac{T_{med}}{\theta}\right)^\beta} = 0,5 \\
 -\left(\frac{T_{med}}{\theta}\right)^\beta &= \ln 0,5 \cdot (-1) \\
 T_{med} &= -(\theta \cdot \ln 0,5)^{\frac{1}{\beta}}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

Treća mjera lokacije raspodjele je mod T_{mod} , a koja je vrlo slična vremenu kvara. To je vrijeme gdje funkcija gustoće vjerojatnosti $f(t)$ postiže njen maksimum:

$$f(T_{mod}) = \max_{0 \leq t < \infty} f(t) \tag{24}$$

Mod predstavlja vrijeme s najvećim očekivanjem kvara. U primjeru Weibullove razdiobe, mod T_{mod} , može se izračunati kao:

$$T_{mod} = \begin{cases} \theta \left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} & \text{za } \beta \geq 1 \\ 0 & \text{za } \beta < 0 \end{cases}$$

(25)

Još jedan parametar koji se koristi u analizi pouzdanosti je projektni životni vijek elementa (eng. *Design Life*), t_R , definiran kao trenutak vremena u kojem element ima razinu pouzdanosti jednaku:

$$R(t_R) = 100 - X\% \tag{26}$$

gdje je X postotak populacije elemenata koji su zakazali. Tako npr. pouzdanost od $R=0,99$ znači 1% kvarova u populaciji elemenata, te se naziva kao "B₁ life", a označava $t_{0,99}$. Iz Weibullovog modela kvarova, projektni životni element izračunava se kao:

$$\begin{aligned}
 R(t_R) &= e^{-\left(\frac{t_R}{\theta}\right)^\beta} = R \\
 t_R &= -(\theta \cdot \ln R)^{\frac{1}{\beta}}
 \end{aligned}$$

(27)

5.4.2 Metode i tehnike analize pouzdanosti

Obično, analiza pouzdanosti započinje s modelom funkcionalnog bloka koji se sastoji od njegovih odgovarajućih funkcijskih elemenata (komponenti). Potom, svakom funkcijskom

elementu dodjeljuje se procijenjena pojedinačna distribucija kvara, odnosno odgovarajuće gore opisane mjere pouzdanosti. Nakon toga se pomoću odgovarajućih raspoloživih metoda ili tehnika vrši procjena pouzdanosti, trenutna ili buduća, funkcionalnog bloka.

Tijekom posljednja četiri desetljeća, za procjenu pouzdanosti tehničkog sustava razvijene su i primijenjene u praksi mnoge metode analize pouzdanosti. Pri tome, njihova učinkovitost, prednosti i nedostaci mogu vrlo značajno varirati. Ne postoji općenito pravilo za odabir najbolje metode primjenjive za procjenu pouzdanosti određenog funkcionalnog bloka, Bernardi i dr. (2013). Korištenje ovih metoda za pojedine primjene, ovisi o raznim faktorima uključujući specifične zahtjeve i potrebe, tip funkcionalnog bloka i sklonosti osoba uključenih u provedu analize. Lakoća korištenja i zahtjevi za određeno iskustvo analitičara mogu varirati od metode do metode, Dhillon (2006). Međutim, međunarodni i nacionalni standardi, te standardi stručnih udruženja daju nekoliko smjernica za podršku inženjerima kod odabira adekvatne tehničke metode. Popis osnovnih metoda, propisanih ili preporučenih od strane raznih standarda koji imaju široku primjenu u raznim industrijskim granama, prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Osnovne metode analize pouzdanosti prema raznim standardima.

| <i>Metode</i> | <i>Standardi</i> |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Analiza moda kvara i efekta (FMEA) | SAE ARP 5580:2001; SAE J1739:2002; IMO-HSC Code:1994; SEMATEC:1992; Marine Contractors Association-IMCA:2002; IEC-60812:2006, DNV-RP-D102:2012; |
| Analiza moda, efekta i kritičnosti kvara (FMECA) | MIL-STD-1629A:1980; ANSI/IEEE STD 352:1987; IEC 60812:2006; Realibility Analysis Center:1993; The International; ABS-RCM:2004 |
| Analiza stabla kvarova (FTA) | NUREG-751014(App.2):1975; NUREG-0492:1981; ANSI/IEEE STD 352:1987; SAE ARP 4761:1996; NASA:2002; EN 61025:2006; |
| Analiza Markova | ANSI/IEEE STD 352:1987; IEC-61165:2006; |
| Analiza stabla događaja (ETA) | NUREG-75/014(App.1):1975; IEC-62502:2010 |
| Analiza Petrijevih mreža (PN) | ISO/IEC-15909-1:2004 |
| Blok dijagrami pouzdanosti (RBD) | ANSI/IEEE-STD-352:1987; ISO 17359:2003; IEC 61078:2006 |
| Bayesova metoda (BA) | NUREG/CR-6823:1999; |

Osnovne metode navedene u tablici 2, s obzirom na dostupne podatke mogu biti korištene tijekom ranijih, kasnijih ili tijekom svih faza životnog ciklusa funkcionalnog bloka.

Općenita podjela metoda analiza pouzdanosti, koja se navodi u literaturi, je na kvalitativne i kvantitativne, te induktivne i deduktivne. Podjela na kvalitativne i kvantitativne metode zasniva se s obzirom na cilj analize pouzdanosti. Razlika između induktivnih i deduktivnih metoda je u načinu istraživanja odnosa između uzroka i efekta kvara.

Metode analize pouzdanosti mogu se još podijeliti i u zavisnosti prema početnoj točki analize na: metode dno-gore (eng. *botton-up methods*) i metode vrh-dolje (eng. *top-down metode*).

U zavisnosti od prirode elemenata funkcionalnog bloka (sustava), metode analize pouzdanosti dijele na metode koji se zasnivaju na modelima prostora stanja (eng. *state space model*) i na modele koji to nisu (eng. *non state space model*), Mupalla i dr (2000). Ova podjela zasniva se sposobnosti modela pouzdanosti da prikaže zavisnost višestrukih stanja koje može imati funkcionalni blok nakon kvara (npr. nakon kvara, sustav radi u niskom modu

rada) ili rednu zavisnost kvarova funkcionalnog bloka (npr. sustav će zakazati ako događaju A prethodi događaj B), Bernardi i dr. (2013).

U tablici 3, prikazane su karakteristike osnovnih metoda analize pouzdanosti.

Tablica 3. Karakteristike osnovnih metoda analize pouzdanosti.

| Metoda | Životni ciklus | Cilj | Dno-gore Vrh-dolje | Istraživanje odnosa uzrok-efekt | Modeliranje zavisnosti |
|---------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| FMEA | Tijekom cijelog | Kvalitativna | Dno-gore | Induktivna | Ne |
| FMECA | Tijekom cijelog | Kvantitativna | Dno-gore | Induktivna | Ne |
| FTA | Tijekom cijelog | Kvalitativna /Kvantitativna | Vrh-dolje | Deduktivna | Djelomično |
| Markov | Kasnije faze | Kvantitativna | Vrh-dolje | / | Da |
| ETA | Tijekom cijelog | Kvalitativna/ Kvantitativna | Dno-gore | Induktivna | Da |
| PN | Kasnije faze | Kvalitativna /Kvantitativna | Vrh-dolje | / | Da |
| RBD | Tijekom cijelog | Kvantitativna/Kvalitativna | Vrh-dolje | / | Djelomično |
| Bayes | Kasnije faze | Kvantitativna/Kvalitativna | / | / | / |
| Stohastički procesi | Kasnije faze | Kvantitativna | / | / | Da |

U daljnjem tekstu dati će kratki opis osnovnih metoda navedenim u tablicama 2 i 3.

FMEA/FMECA

Analiza modova i efekata kvara (FMEA) je razvijena 1950 godine, od strane američkog mornaričkog ureda za aeronautiku (*U.S. Navy's Bureau of Aeronautics*), kao prva sistematska metoda za analizu kvarova u inženjerskim sustavima, Rausand i Høyland (2004), Dhillon (1999). To je jednostavna kvalitativna, induktivna, analitička metoda s pristupom dno-vrh, a koja se koristi za identificiranje mogućih kvarova na svakom funkcionalnom bloku (komponenti ili podsustavu) sustava, kao i za proučavanje efekata koji ti kvarova mogu imati na sustav. Postupak FMEA sastoji se o niza koraka počevši sa analizom na jednoj razini ili kombinacijama razina apstrakcije, kao što su funkcije sustava, podsustavi ili komponente. Nakon toga, određuje se efekt kvara, kao i uzrok, tj. mehanizam kvara. Efekt kvara može se odrediti na raznim razina apstrakcije počevši od razine komponenti. Za svaku komponentu, modovi kvara, mehanizam kvara i njihov rezultirajući efekt na ostatak sustava bilježi se u specifičnu FMEA tablicu. Nakon završetka analize, mogu se otkriti bitni modovi kvara i važni efekti na performanse sustava. Nedostatak FMEA metode jest što nije prikladna za pronalaženje kritične kombinacije kvarova. Ukoliko se FMEA proširi na podjelu svakog kvara prema njegovom stupnju težine (eng. *severity*), tada se dobiva metoda poznata kao analiza modova, efekata i kritičnosti kvara (FMECA), čime se na neki način dobiva kvantitativna metoda. Metode FMEA/FMECA su primarno alati za dizajnere, kao i osnova za mnoge detaljnije analize pouzdanosti, ali se učestalo koriste za planiranje održavanja, Rausand i Høyland (2004). Puno više informacija kako se provodi FMEA/FMECA može se pronaći u standardima MIL STD 1629A i IMCA:2002.

FTA

Analiza stablo kvarova (FTA) razvijena je 1962. godine, od strane kompanije Bell Telephone Laboratories radi izvođenja sigurnosne procjene kontrolnog sustava lansiranja interkontinentalne misije *Minuteman*, Rausand i Høyland (2004). Kasnije, kompanija *Boing* je dalje razvila ovu tehniku, te napravila računalni program za izvođenje kvalitativne i kvantitativne analize. U današnje vrijeme, FTA je jedna od najčešće korištenih tehnika za studije rizika i pouzdanosti u većini industrijskih grana. Posebno uspješno se koristi kod

analize sigurnosnih sustava u nuklearnim elektranama, kao što je studija sigurnosti reaktora (NUREG-0492). Stabla kvarova koriste deduktivni pristup vrh-dolje, a izrađuju se definiranjem događaja (kvara) na vrhu (eng. *top event*), a zatim se koristi povratna logika za definiranje njegovog uzroka. Na taj način FTA prikazuje odnose između kvara sustava (događaja na vrhu) i kvarova komponenti (osnovni događaji). Osnovni događaj nije striktno ograničen samo na komponentu, već može isto prikazivati ljudsku grešku ili vanjska opterećenja. Nakon što se izradi dijagram, isti poprima oblika stabla, pa odatle slijedi naziv ove metode. Analiza stabla kvarova može biti kvalitativna, kvantitativna ili oboje, a što ovisi ciljevima analize, Rausand i Høyland (2004). Općenito se provodi u dvije faze. Prva faza je kvalitativna, a druga kvantitativna analiza. Kvalitativna analiza uključuje dobivanje raznih kombinacija kvarova komponenti (događaja) koji uzrokuju kvar sustava, a što podrazumijeva određivanja minimalnog reduciranog skupa (eng. *minimal cut sets*). Za prikaz kombinacija kvarova komponenti sustava koji uzrokuju kvarove sustava, koriste se Boolean logičke funkcije. Zatim se kvantitativnom analizom izračunava vjerojatnost ili frekvencija pojave kvara u sustavu, Sinnamon i Andrews (1997). Drugim riječima, FTA metoda zasnovana je na Boolean algebri i teoriji vjerojatnosti, pri čemu dijagram stabla kvarova prikazuje koje se kombinacije kvarova komponenti mogu pojaviti u cijelom sustavu. Puno više informacija kako se provodi FTA, može se pronaći u standardu NUREG-75/014 (app.I):1975 i priručnicima (NUREG-0492:1981), Vesely i dr. (1981) i američke agencije NASA, Stamatelatos i Vesely (2002).

ETA

Analiza stabla događaja (ETA) je induktivna metoda s pristupom dole gore, koja prikazuje sve moguće ishode početnog događaja. Pri tome, dobiveni grafički logički model stabla događaja identificira i kvantificira (vjerojatnost) moguće ishode počevši od početnog događaja. Analiza stabla kvarova koristi se u analizama rizika i pouzdanosti u širokom spektru velikom rasponu inženjerskih sustava. Metoda ETA može biti kvalitativna, kvantitativna ili oboje, a što ovisi ciljevima analize. Analiza stabla događaja i analiza stabla usko povezane. Tako npr., kod primjene za kvantitativne procjene rizika (eng. *Quantitative Risk Assessment*; kratica *QRA*), FTA često se koristi za kvantificiranje događaja sustava koji su dijelovi niza događaja u stablu. Puno više informacija kako se provodi ETA, može se pronaći u standardu američke nuklearne regulatorne komisije NUREG-75/014:1975 (app.I).

RBD

Blok dijagrami pouzdanosti (RBD) koriste se analizu pouzdanosti i raspoloživosti složenih sustava, a predstavljaju grafički prikaz komponenti sustava i njihovih međusobnih veza. Dijagrami se sastoje od blokova i linija. Blokovi predstavljaju komponente sustava, a linije opisuju veze između komponenti. Takva struktura prikazuje logičke veze komponenti potrebne za ispunjavanje zahtijevane funkcije sustava, a što omogućuje i definiranje međudjelovanje kvarova unutar sustava. Ukoliko sustav ima više od jedne funkcije, svaka funkcija mora se razmatrati pojedinačno, pa se stoga i moraju uspostaviti i odvojeni blok dijagrami pouzdanosti za svaku funkciju sustava, Rausand i Høyland (2004). Kada se blok dijagram ispravno konfigurira i osiguraju podaci za komponente (npr. $\lambda(t)$ ili *MTTF*), izračunava se, učestalost kvara, srednje vrijeme do kvara, pouzdanost ili raspoloživost sustava. Blok dijagrami pouzdanosti obično odgovaraju fizičkom rasporedu komponenti u sustavu. Pri tome struktura blok dijagrama može biti serijska ili paralelna. Serijska i paralelna struktura su posebni slučajevi k od n sustava. Kod serijske strukture, sustav će funkcionirati ukoliko sve komponente funkcioniraju ($k=n$). Paralelna struktura prikazuje redundantnost, tj.

takvu strukturu u kojoj će sustav funkcionirati ako najmanje jedna od n komponenti u paralelnoj vezi funkcionira ($k=1$). Redundantnost može biti aktivna i pripravna (eng. *stand by*). Kod aktivne redundantnosti, sve od n komponenti su aktivne dok sustav radi, ali samo k komponenti su potrebne da grupa paralelnih komponenti bude funkcionalna. Kod "stand by" redundantnosti, zahtjeva se samo da su k komponenti u aktivnom stanju, dok je ostatak ($n-k$) u pasivnom stanju. Kada se aktivna komponenta otkáže tada jedna od pasivnih komponenti se uključuje umjesto nje, Modarres (1999), Bernardi (2013). Drugi način na koji se može prikazati odnos između komponenti sustava su strukturne funkcije. Blok dijagrami su kvalitativna i kvantitativna tehnika koja je prikladna za sustave s nepopravljivim komponentama i gdje redoslijed u kojem se nezavisni kvarovi pojavljuju nije bitan. Kada je sustav popravljiv i kada je bitan redoslijed kvarova (zavisni kvarovi), tada su za analizu pouzdanosti obično prikladne Markovljeve metode. Puno više informacija kako se provodi analiza RBD, može se pronaći u knjigama Ebling (1997), Modarres i dr. (1999), Rausand i Høyland (2004), Dhillon (2006).

Procesi brojenja

Kod analiza pouzdanosti važno je razlikovati popravljive i nepopravljive elemente. Nepopravljivi elementi su elementi koji se nakon zakazivanja odbacuju i zamjenjuju s novim. Pouzdanost nepopravljivih elemenata se izražava u odnosu na njihovu distribuciju vremena kvara. Popravljivi elementi, općeniti govoreći, ne zamjenjuju se nakon pojave kvara već se popravljaju i potom puštaju u ponovno u rad. S druge strane, ukoliko je nepopravljivi element komponenta popravljivog sustava, procjena distribucije broja zamijenjenih komponenti tijekom zadanog intervala vremena je problem koji se razmatra u okviru popravljivih sustava, Modarres (1999). Stoga, problemi pouzdanosti popravljivih sustava razmatraju se koristeći različite modele stohastičkih procesa, tzv. procesa brojenja, a koji također spadaju u analitičke metode. Procesi brojenja mogu se razmatrati kao model za slučajno distribuirane događaje koji imaju zanemarivo trajanje, Modarres (1999). Obično se proces brojenja odnosi na jedan funkcionalni blok (npr. sustav), ali se može koristiti za proučavanje grupe identičnih funkcionalnih blokova, ukoliko je broj funkcionalnih blokova u grupi konstantan. Procesa brojenja je stohastički proces realizacije brojanja uzastopnih vremena kvarova funkcionalnog bloka: $T_1, T_2, \dots, T_k, \dots$. Realizacija procesa brojanja izražava se u odnosu na funkciju brojanja $N(t)$, koja se predstavlja kao broj kvarova u intervalu $(0, t]$, tj. za $t \geq 0$, Modarres (1999):

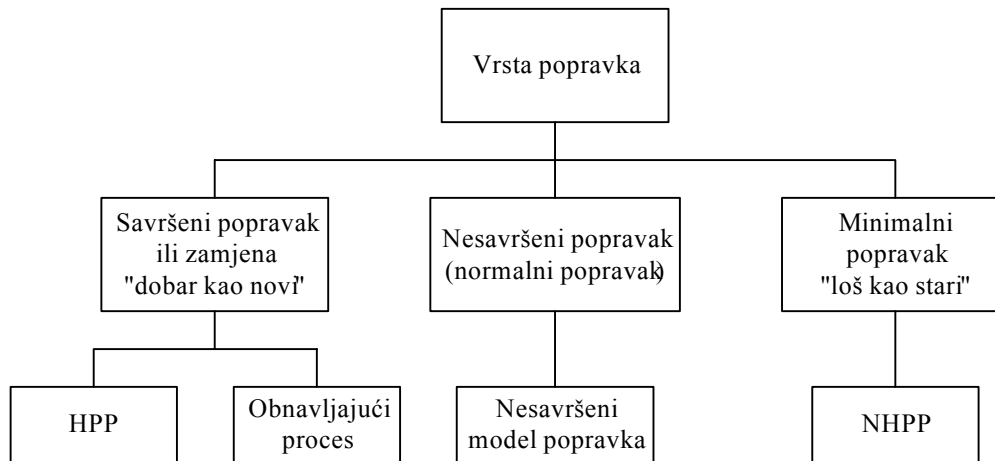
$$N(t) = \max(k | T_k \leq t) \quad (28)$$

Funkcija $N(t)$ je slučajna funkcija. Zamjenom srednje vrijednosti $N(t)$ sa $\Lambda(t)$, tj. $E[N(t)] = \Lambda(t)$, tada matematičko očekivanje kvantificira učestalost pojave kvarova (eng. *rate of occurrence of Failures*; kratica *ROCOF*), a koja se najčešće koristi kao mjera pouzdanosti popravljivih funkcionalnih blokova. To znači kako sljedeći kvar ne ovisi o starosti funkcionalnog bloka nakon vremena zadnjeg kvara. Obično, *ROCOF* se kao mjera pouzdanosti u literaturu obično označava kao $\lambda(t)$ ili ponekad s $v(t)$, Modarres (1999). Pri tome, kod analiza treba napraviti jasno razliku između funkcije učestalosti kvarova ili funkcije učestalosti hazarda $\lambda(t)$ i *ROCOF*-a kao $\lambda(t)$.

Sljedeći procesi brojenja se uglavnom koriste za probabilističke modele procesa kvarova: homogeni Poissonovi procesi (eng. *homogeneous Poisson process*; kratica *HPP*), nehomogeni Poissonovi procesi (eng. *non-homogeneous Poisson process*; kratica *NHPP*), procesi obnavljanja (eng. *renewal process*; kratica *RP*), procesi nesavršenih popravaka.

Matematički opis i značajke stohastičkih procesa brojenja mogu se pronaći u raznim izvorima (Ross (1992); Ebling (1997), Hamada i dr. (2008), Kaminskiy (2013), Modarres i dr. (1999), Rausand i Høyland (2004)).

Odabir modela ovisi o tome kako se sagledava efikasnost popravaka (slika 37) i da li je *ROCOF* konstantan ili ne.



Slika 37. Vrste popravka i stohastički procesi brojenja.

Kada se neispravni funkcionalni blok popravi i vrati u puni rad, proizlazi pitanje u svezi efikasnosti popravka na pouzdanost funkcionalnog bloka, posebno ukoliko se ukupno vrijeme rada povećava, Hamada i dr. (2008). Dva moguća krajnja opisa efikasnosti popravka su "dobar kao novi" (eng. *good-as-new*) i "loš kao stari" (eng. *bad-as-old*). Prvi znači kako se funkcionalni blok povratio u stanje kao nov, tako da sljedeći kvar ima istu distribuciju kao i prvi kvar funkcionalnog bloka. To znači kako sljedeći kvar ne ovisi o starosti funkcionalnog bloka nakon vremena zadnjeg kvara. Suprotno tomu, "loš kao star" znači kako popravak vraća funkcionalni blok u stanje koje je imao prije zadnjeg kvara. To znači kako sljedeći kvar ovisi o vremenu zadnjeg kvara. Tu su moguća dva scenarija s obzirom na pouzdanost funkcionalnog bloka. Kod nekih može doći do rasta pouzdanosti (kvarovi se pojavljuju rjeđe nego prije vremena zadnjeg kvara) ili do pada pouzdanosti (kvarovi se pojavljuju češće nego prije vremena zadnjeg kvara). Pad pouzdanosti podrazumijeva kako funkcionalni blok stari otkazuje vrlo često nego prije. Međutim, mnogi kvarovi su negdje između ovih ekstrema i vrlo često se nazivaju nesavršeni popravci ili uobičajeni popravci, Rausand i Høyland (2004). Nesavršeni popravci se prema efikasnosti mogu podijeliti dijele na "bolji nego stari" (eng. *better-than-old*) i "gori nego novi" (eng. *worse-than-new*), Hamada i dr. (2008),

Obnavljajući i HPP procesi karakterizirani su konstantnim *ROCOF*-om. Kod HPP procesa, to podrazumijeva kako je vrijeme između pojavljivanja kvarova nezavisno s eksponencijalnim modelom učestalosti pojave kvarova (konstantni $\lambda(t)$). Kod obnavljajućeg procesa podrazumijeva se kako su vremena između kvarova identično distribuirana, pri čemu mogu slijediti bilo koju kontinuiranu funkciju distribucije kvarova. Dakle, ova dva tipa procesa brojenja opisuju situaciju kada je postignuta efikasnost popravka "dobar kao nov". Međutim, obnavljajući proces nema primjenu u slučaju popravljivog funkcionalnog bloka koji se sastoji od nekoliko komponenti i ukoliko se samo neispravna komponenta zamijeni nakon kvara.

Kod nehomogenog Poissonovog procesa, *ROCOF*, $\lambda(t)$, nije konstantan. To znači kako NHPP proces zadržava nezavisna svojstva povećanja funkcije brojanja $N(t)$, ali vremena

između kvarova općenito nisu niti nezavisna (eksponencijalno distribuirana) niti identično distribuirana. Osnovni parametar NHPP procesa je ROCOF funkcija $w(t)$, a koja se još naziva stopa hazarda, Rausand i Høyland (2004) ili funkcija intenziteta, Modarres (1999). Za razliku od obnavljajućeg i HPP procesa, NHPP proces je sposoban modelirati poboljšavanje i pogoršanje funkcionalnog bloka. To znači kako povećanje ROCOF funkcije podrazumijeva poboljšanje ili "sretne" sustave. Padajuća ROCOF funkcija podrazumijeva pogoršanje ili "tužne" sustave. Nadalje, NHPP proces se često koristi za modeliranje popravljivog sustava koji je predmet strategije minimalnog popravka s zanemarivim vremenom popravka, Rausand i Høyland (2004), a što podrazumijeva efikasnost popravka "loš kao stari".

Svi gore navedeni procesi baziraju se na pretpostavci kako popravljivi funkcionalni blokovi (komponente i sustavi) mogu biti u jednom od dva stanja: stanju funkcioniranja i stanju neispravnosti, Rausand i Høyland (2004). U slučaju kada je potrebno modelirati popravljivi funkcionalni blok koji ima višestruka stanja, npr. u radu, neispravnosti i spremnosti za rad, tada se koristi posebna vrsta stohastičkog procesa, nazvan Markovljevi lanci. Kod Markovljevih modela, prijelaz između raznih stanja su karakterizirana konstantnim stopama prijelaza, koji općenito govoreći ne moraju biti u praksi konstantni, Modarres (1999).

Markovljeva analiza

U slučaju kada je potrebno modelirati popravljivi funkcionalni blok koji ima višestruka stanja, npr. u radu, neispravnosti i spremnosti za rad, tada se koristi posebna vrsta stohastičkog procesa, nazvan Markovljevi lanci. Dakle, ovom metodom omogućuje se modeliranje sustava s nekoliko stanja i tranzicija između tih stanja, a time i određivanja zavisnosti kvarova ili karakteristika popravka pojedinačnih komponenti na stanje sustava.

Markovljevi lanci mogu biti definirani za diskretni niz vremena gdje vrijeme poprima vrijednosti $\{0, 1, 2, \dots\}$ ili za kontinuirani niz vremena gdje vrijeme poprima nenegativn realne vrijednosti. Kada je vrijeme kontinuirano tada se radi o Markovljevom lancu kontinuiranog vremena, a kod diskretnog vremena o Markovljevom lancu diskretnog vremena, Rausand i Høyland (2004), Bernardi (2013). Osobito prikladan probabilistički model kod analize pouzdanosti je Markovljev lanac kontinuiranog vremena, nazivan i Markovljev proces, koji je u biti Markovljev lanac diskretnog vremena u bilo kojem trenutku vremena. Stoga, Markovljev proces za analizu pouzdanosti inženjerskih sustava zasnovan je na probabilističkim modelima okarakterizirani sa, Kwang i dr. (1987):

1. Sustav može biti u cjelini opisan u bilo kojem vremenu određivanjem njegovog stanja u tom vremenu.
2. Vrijeme, dok se događa promjena stanja iz jednog u drugo, je eksponencijalno distribuirana slučajna varijabla.

Markovljev proces je okarakteriziran sa pojmovima kao što je stanje i tranzicija. Stanje sustava je određeno pomoću stanja njegovih komponenti. Stoga, stanja sustava prikazuju da li je cijeli razmatrani sustav u operativnom (radnom) stanju ili u stanju neispravnosti. Tranzicije se događaju kada komponenta ili/i sustav mijenjaju stanja. Budući da se sustav sastoji od komponenti, tranzicije sustava i komponenti događaju se zbog promjene stanja komponenti. Tranzicija stanja komponente može biti uzrokovana kvarom ili popravkom komponente. Kod Markovljevih modela, prijelaz između raznih stanja su karakterizirana konstantnim učestalostima prijelaza, koji općenito govoreći ne moraju biti u praksi konstantni, Modarres (1999). Stohastički proces koji bilježi stanje komponente ili/i sustava bilo kojoj točki vremena, naziva se polu-Markovljev proces, dok proces brojanja koji

čuva trag o broju postizavanja svakog stanja komponente ili/i sustava, naziva se Markovljevi obnovljivi proces, Ross (1972).

Matematička svojstva Markovljevih modela mogu se pronaći literaturi i to pogotovo u knjigama Ross (1970 i 2007). U manjem opsegu je to opisano u Ebling (1997), Modarres i dr. (1999), Rausand i Høyland (2004), Epstein i Weissman (2008), a koji ujedno opisuju i formalizam Markovljeve metode analize pouzdanosti.

Analiza pouzdanosti Markovljevim modelom prije svega je kvantitativna metoda prikladna za analiziranje pouzdanosti i raspoloživosti sustava s kompliciranom politikom održavanja i mogućih zavisnosti između komponenti sustava kao npr., serijska i paralelna struktura sustava s nezavisnim komponentama, serijska struktura sustava gdje kvar jedne komponente sprječava kvar druge komponente, sustava s zavisnim komponentama (kvarovi zajedničkog uzroka, djeljenje opterećenja) i sustavi u pričuvi. Međutim, korištenje dijagrama tranzicija i stanja mogu se prikupiti i kvalitativne informacije o sustavu.

PN

Analiza pouzdanosti metodom Petrijeve mreže koristi formalizam definiran 1962. godine, od strane Carl Adam Petrija. Petrijeva mreža je grafički i matematički alat primjenjiv za modeliranje mnogih sustava koji su okarakterizirani kao konkurentni, paralelni, asinkroni, raspodijeljeni i nedeterministički i/ili stohastički, Murata (1987). Kao grafički alat, Petrijeva mreža može se koristiti kao pomoć za vizualnu komunikaciju, slično dijagramima toka, blok dijagramima, mrežama. Kao matematički alat, može ukoliko je moguće, izraditi jednadžbe stanja, algebarske jednadžbe i druge matematičke modele koje opisuju ponašanje sustava, Sadou i Demmou (2009). Općenito, Petrijeva mreža opisuje se kao bipartitni graf sastavljen od mjesta (eng. *places*) koja su grafički predstavljena krugovima, tranzicija (eng. *transitions*), tj. prijelaza predstavljenim pravokutnicima, te direktnim granama (eng. *directed arcs*) koje povezuju mjesta i tranzicije. U stvari, Petrijeva mreža predstavlja mrežu mjesta i prijelaza u kojoj mjesta imaju značenje uvjeta, a prijelazi događaja u smislu koncepta uvjeta i događaja. Tranzicije imaju određen broj mjesta ulaza i izlaza koja predstavljaju stanje prije i poslije događaja. Mjesta mogu sadržavati oznake, označene s crnim točkama. Prisustvo oznake interpretira da su podaci komponente ili resursa raspoloživi. Ponašanje PN vođeno je pomoću aktivirane tranzicije i pravila paljenja. Tranzicija je aktivna za zadane oznake kada sva njena ulazna mjesta sadrže najmanje jednu oznaku. Svako paljenje mreže uklanja jednu oznaku iz svakog njenog ulaza i dodaje jednu oznaku u njena izlazna mjesta, uzrokujući time promjenu stanja. Za zadane početne oznake PN, moguće je izračunati niz svih oznaka dostupnih od početnih za jedno paljenje tranzicije. Svojstva, analiza i primjena Petrijevih mreža može se vidjeti u radu Murata (1987).

Na osnovu predloženog originalnog PN modela, u literaturi su predložene mnoge vrste PN u svrhu poboljšanja njihovog modeliranja i sposobnosti analiza. Posebno su u području analize pouzdanosti i rizika od interesa stohastičke Petrijeve mreže, definirane kao proširene vremenske mreže, kod kojih se svaka tranzicija karakterizira kao eksponencijalno distribuirana slučajna varijabla koja modelira vrijeme paljenja, Bernardi (2013). Druge vrste, kao što je primjena obojenih Petrijevih mreža može se vidjeti u primjeru, Robidoux i Xu (2010). U svom radu Volovoi (2004), opisuju koncept PN s oznakama starenja.

Analize pouzdanosti pomoću PN modela omogućuje kvantitativnu analizu i kvalitativnu analizu, S aspekta kvantitativne analize, to se odnosi na kvantificiranje mjera

pouzdanosti u prijelaznom (*MTTF*) i stabilnom ($\lambda(t)$) stanju. Ova metoda ima vrlo široku primjenu kod analiza pouzdanosti, raspoloživosti i pogodnosti održavanja (RAM parametara) kod informacijskih sustava i to u. U literaturi, kod analiza pouzdanosti i probabilističke procjene rizika inženjerskih sustava, razne vrste PN modela koriste se u kombinaciji s drugim klasičnim kombinatornim metodama (npr. FTA, RBD) i to za modeliranja višestrukih stanja u kojima se može nalaziti sustav. Ipak, njena primjena u tom području ostala je uglavnom na hipotezama autora, a što znači kako nije moguće procijeniti pouzdanost njihovih rezultata.

Bayesova metoda

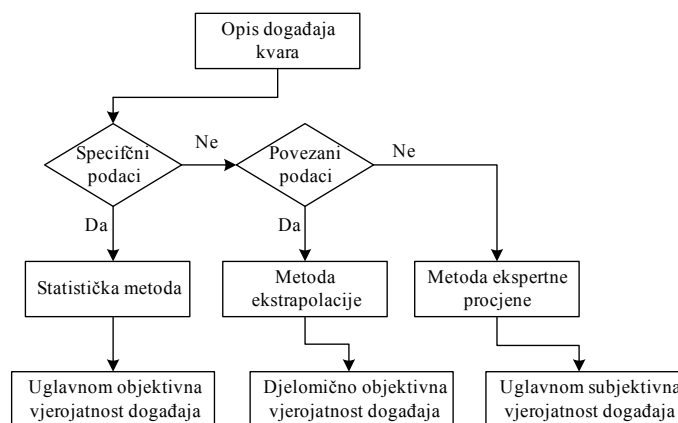
Kada je model pouzdanosti ograničen nedostatkom odgovarajućih podataka za procjenu parametara funkcionalnog bloka, tada se pored konvencionalnih statističkih metoda može koristiti i statistička metoda koja se bazira na Bayesovom okviru. U inženjerstvu pouzdanosti, *Bayesova metoda* za modeliranje pouzdanosti funkcionalnog bloka daje mogućnost uzimanja u obzir prethodnog znanja (npr. baze podataka) i realnih dostupnih podataka pouzdanosti o funkcionalnom bloku dobivenih tijekom njenog rada. Na osnovi tih informacija izračunava se odgovarajuća nesigurnost pouzdanosti komponente, a koja se zatim može modificirati koristeći ekspertno mišljenje. Na taj način razvoj modela pouzdanosti funkcionalnog bloka postaje proces učenja, a znanje se kontinuirano nadograđuju kako sve više informacija postaje dostupno, Barle i Ban (2010). Prikaz i matematički opis Bayesove metode može se pronaći u raznim izvorima (Colombo (1988), Meeker i Escobar (1998), Modarres i dr. (1999), Bedford i Cooke (2001), Rausand i Høyland (2004), Singpurwalla (2006), Hamada i dr. (2008), Percy (2008)), te priručniku NUREG/CR-6823: 2002 i radu Barle i Ban (2010).

U daljem tekstu sumarizirati će se podjela metoda, a što se mora razmotriti kod njihovog odabira.

5.4.2.1 Kvalitativne i kvantitativne metode

Podjela na kvalitativne i kvantitativne zasniva se s obzirom na način kako se određuje vjerojatnost kvara. Pretežno se tri metode koriste za određivanje vjerojatnosti pojave događaja kvara, a u zavisnosti o dostupnim podacima (slika 38), Pillay i Wang (2003):

1. Statistička metoda.
2. Metoda ekstrapolacije.
3. Metoda ekspertne procjene.



Slika 38. Metode određivanja vjerojatnosti pojave događaja kvara u zavisnosti o dostupnim podacima.

Statistička metoda uključuju direktno postupanje s odgovarajućim podacima o kvarovima i izračun vjerojatnosti događaja kvara. Metoda ekstrapolacije koristi se kada dostupni podaci o kvarovima nisu dostatni i odgovarajući, a uključuje korištenje modela predviđanja, razmatranja sličnosti s drugim sličnim sustavima i komponentama i Bayesov koncept. Pri tome se dijelom koristi i ograničeno ekspertno mišljenje, a radi procjene nepoznatih veličina kao ulaza u ekstrapolacijski model. Metoda ekspertnog mišljenja uključuje direktnu procjenu vjerojatnosti od eksperta iz predmetnog područja. Ove metode mogu se koristiti zajedno radi što učinkovitije i razumnije procjene vjerojatnosti događaja kvara.

Osnovni cilj *kvalitativne analize pouzdanosti* je prepoznavanje potencijalnih kvarova funkcionalnog bloka koji se razmatra, njihovih posljedica na razini istog i veza uzroka i efekta kvarova, kao i određivanja mogućih strategija popravaka, Bernardi (2013). Kod kvalitativnih metoda, veličine vjerojatnosti kvara procjenjuju se subjektivnom procjenom analitičara ili ekspertnim mišljenjem. Dakle, kvantitativne metode ciljaju na generiranje liste potencijalnih kvarova, pri čemu se podaci o kvarovima u velikoj mjeri oslanjaju na prijašnjem iskustvu ili ekspertnom mišljenju. Primjeri kvalitativnih metoda su npr., FFA i FMEA.

Kvantitativna analiza pouzdanosti cilja na određivanje numeričkih referentnih podataka, tj. poznatih mjera pouzdanosti svake pojedine komponente sustava (npr. $MTTF$, $\lambda(t)$), radi korištenja istih kao ulaznih podataka u model pouzdanosti, procjene pouzdanosti sustava, pod probabilističkim i stohastičkim pretpostavkama, Bernardi (2013). Dakle, *kvantitativne metode* oslanjaju se na numeričkoj procjeni vjerojatnosti događaja kvara, (ili magnitude mogućih posljedica kod procjene rizika), pri čemu se ovi parametri (mjere pouzdanosti) kvantificiraju pomoću statističkih metoda i baza podataka. Kvantitativnim metodama smatraju se FEMCA, ETA, RBD, FTA, PN i metode Markova.

Da li će se odabrati kvantitativna ili kvalitativna metoda ovisi o dostupnosti podataka za procjenu pouzdanosti i razine analize potrebnoj za donošenje pouzdane odluke. Kvalitativne metode daju analize bez zahtijevanih detaljnih podataka, ali intuitivni i subjektivni procesi korišteni u ovim metoda mogu dovesti do odstupanja u sličnim analizama. Kvantitativne metode omogućuju ujednačenije analize, ali zahtijevaju kvalitetne podatke za točne rezultate. Stoga, ovisno o situaciji može biti potrebno koristiti kombinaciju kvalitativne i kvantitativne analize, ili pak koristiti metode kao npr., ETA, RBD, FTA, PN i, koje su kvalitativne ali se mogu razmatrati kao i kvantitativne.

Kvalitativne, za razliku od kvantitativnih metoda ne zahtijevaju puno intenzivnog rada i stoga je logički što su favorizirane u mnogim industrijskim grana i standardima. Kvalitativne metode su vrlo korisne kao početna točka u analizi pouzdanosti sustava, jer se pomoću njih identificiraju svi potencijalni kvarovi, te njihovi modovi i efekti.

U svim slučajevima važno je odabrati najprikladniju tehniku kao podršku kod donošenja odluke sa dovoljno povjerenja. Stoga, vrlo je važno jasno odrediti opseg i ciljeve svake analize pouzdanosti kako bi se odabrala prikladna metoda, kako s aspekta problema koji se razmatra tako i s aspekta efikasnosti resursa kojim se raspolaže.

5.4.2.2 Induktivne i deduktivne metode

S obzirom kako se istražuje odnos između uzroka i efekta kvara, metode pouzdanosti mogu se podijeliti na analitičke induktivne i deduktivne metode.

Kod induktivnih metoda (npr. ETA, FMEA, FMECA), proces analize započinje od poznatih uzroka prema predviđanju nepoznatih efekta. Stoga, u induktivnom pristupu prvo je potrebno pretpostaviti specifične kvarove ili stanja funkcionalnog bloka (sustava i njegovih komponenti), a zatim pokušati odrediti koji su odgovarajući efekti svakog kvara ili stanja na rad cjelokupnog funkcionalnog bloka. Induktivni pristupi također se nazivaju i pristupi dno-gore jer započinju od dna, tj. od početka kvara, a zatim nastavlja prema gore radi određivanja efekata pojedinog kvara na sustav, Stamatelatos i Vesely (2002).

Deduktivni proces analize započinje od poznatih efekata prema nepoznatim uzrocima. Stoga, kod deduktivnih metoda (npr. FTA, FFA), osnovno polazište je da funkcionalni blok sam po sebi na određeni način ima neispravnost, a zatim se pokušava pronaći koji modovi ponašanja funkcionalnog bloka (sustava i njegovih komponenti) pridonose kvaru koji uzrokuje njegovu neispravnost, Stamatelatos i Vesely (2002).

Sumirajući, induktivne metode primjenjuju se za određivanje koja su stanja neispravnosti funkcionalnog bloka moguća, dok se deduktivne metode primjenjuju za određivanje kako se zadana stanja neispravnosti funkcionalnog bloka mogu pojaviti, Vesely i dr. (2002).

5.4.2.3 Modeliranje zavisnosti

S aspekta pouzdanosti, moguće je da komponenta ili podsustav imaju neki utjecaj na druge podsustave, a što karakterizira dinamiku pouzdanosti sustava, Distefano i Puliafito (2009). Osnovni primjeri takvih zavisnih odnosa su: dijeljenje snage, kaskadni rad, redundantnost u pripravnosti (eng. standby redundancy), interferencija, rad na zahtjev, slijedno zavisni događaji kvara, kvarovi zajedničkog uzroka i dr. Nadalje, konfiguracija sustava s aspekta pouzdanosti (i raspoloživosti) može varirati. Tako npr. neispravna komponenta ili podsustav, sukladno politici održavanja, biti može popravljena s različitom efikasnošću. Drugi primjeri su primjena modela rasta pouzdanosti, a koji se većinom vezani za popravljive sustave ili pak da sustav radi u faznim misijama. Stoga, vrlo važan kriterij koji treba uzeti u obzir kad odabira metode analize pouzdanosti je sposobnost modeliranja zavisnosti, svojstvenih sustavu koji se razmatra.

U situacijama kada se kod analiza pouzdanosti, zasnovanim na opravdanim pretpostavkama o nezavisnim kvarovima, moraju uzeti u obzir kaskadni kvarovi i negativna zavisnost, tada se ove zavisnosti mogu jasno modelirati pomoću FTA, RBD i modelom Markova. Nadalje, za svaku analizu pouzdanosti, FMECA također daje osnovni okvir za prepoznavanje i istraživanje zavisnih kvarova. Standard IEEE Std. 352, daje dva dodatka za FMECA, koji opisuju kako u analizi obuhvatiti potencijalne međuzavisnosti između komponenti sustava i to za kvarove zajedničkog uzroka i kaskadne kvarove. Međutim, u većem broju slučajeva analiza zasnovana na pretpostavci o nezavisnosti kvarova dovodi do nerealnih rezultata i ograničene vrijednosti za praktične namjene. U zadnja tri desetljeća napravili se veliki naponi se za razvoj prikladnih modela koji uzimaju u obzir razne vrste zavisnosti. Tako, Rausand i Høyland (2004), daju prikaz tri modela zavisnih kvarova i to: *metoda korjena kvadrata* (eng. *square-root method*), *β -faktor model* i *binomialni model učestalosti kvara*. Svi ovi modeli uglavnom se koriste za modeliranje kvarova zajedničkih uzroka, s tim kako najširu primjenu ima *β -faktor model*.

Metode analize pouzdanosti FMEA, FMECA, FFA, ETA, FTA i RBD zasnivaju se na pristupu događaju kvara, pri čemu iskazuju funkcionalnost sustava i pojave kvarova preko kombinacije događaja, a što je prikazano odgovarajućom strukturom. Modeli pouzdanosti izrađeni tim metodama zasnivaju se na pretpostavci kako komponente ili sustavi mogu biti u jednom od dva moguća stanja: u funkcionalnom (ispravnom) stanju i stanju neispravnosti. Nadalje, ovi modeli su prilično statični i nisu dovoljno prikladni za analizu popravljivih sustava, Rausand i Høyland (2004), pa se kod tih problema za modeliranje koriste procesi brojenja. S druge strane, metode zasnovane na stanjima, kao analiza Markova ili PN, su više obuhvatne i omogućuju jasno modeliranje složenih odnosa u sustavu, a time i modeliranje dinamike pouzdanosti sustava, Bernardi (2013).

Sukladno tomu, Chiacchio i dr. (2011), dijele analitičke stohastičke modele koji se koriste za kvalitativnu procjenu u dvije glavne kategorije i to:

- kombinatorne modele, kojima nije moguće u potpunosti opisati dinamičku zavisnost između komponenti i sustava,
- modele stanja prostora, uglavnom zasnovanim na Markovljevim lancima (*Markovljev lanac diskretnog vremena*, *Markovljev lanac kontinuiranog vremena*, *Markovljev regenerativni proces*, *Markovljev proces dobitka*, *polu-Markovljev proces*), koji svladavaju sva ograničenja kombinatornih modela, ali mogu postati suviše veliki i teški za postupanje.

U svom radu Marseguerra i dr. (1998), metodologije za dinamiku pouzdanosti dijeli u tri kategorije: tranzicije stanja ili Markovljevi modeli, kontinuirana dinamička stabla događaja i direktne simulacije sustava (npr. Monte Karlo simulacija, diskretne simulacije događaja i dr.). Nadalje, navodi kako je svrha ovih metoda dopuna klasičnoj metodologiji i to tada kada je dinamičko ponašanje složenih sustava potrebno uzeti u obzir.

Stohastički procesi i metode simulacije moćni su alati za analizu pouzdanosti, ali se oni teško mogu smatrati laganim za uporabu u slučaju složenog sustava. Zbog ove činjenice je na formalizmu metoda FTA i RBD, koje svojim strukturnim dijagramom daju bliži pogled na sustav, više istraživača predložilo FTA i RBD metode za rješavanje dinamike pouzdanosti složenih sustava.

U svom radu Vaurio (2001) opisuje FTA metodu za modeliranje sustava koji se sastoji od popravljivih i nepopravljivih komponenti i koji radi u faznim misijama tijekom kojih se mijenja logika sustava. U radu Hurdlea i dr. (2009), prikazana je FTA metoda za prepoznavanje potencijalnih kvarova komponenti sustava koja uzima u obzir dinamiku sustava.

Alternativni pristup analize stabla kvarova nezavisnih popravljivih komponenti, zasnovanim na binarnim dijagramima odluke (eng. *Binary Decision Diagram*; kratica *BDD*), opisuju Rauzy (1992), Sinnamon i Andrews (1997) i Dutuit i Rauzy (2005). Metoda BDD nastala je kao alternativa konvencionalnim FTA i ETA tehnikama za provedbu kvalitativne i kvantitativne analize, pri čemu ova metoda ne analizira direktno stablo kvarova, već pretvara stablo u binarni dijagram odluke, Reay i Andrews (2002). Naime, FTA model je grafički prikaz logičkih odnosa između događaja, obično događaja kvara ili stanja neispravnosti. Kod vrlo kompleksnih sustava, FTA rezultira mnogim logičkim funkcijama (npr. AND ili OR) u kojima se generiraju mnogi minimalni reducirani skupovi. Time se povećava mogućnost greške kod postupka skraćivanja minimalnih reduciranih skupova koji imaju malu vjerojatnost pojavljivanja, a koje se izvodi u svrhu smanjenja vremena izračuna događaja na

vrhu (kvara sustava). Određivanje velikog broja minimalnih reduciranih skupova može uzrokovati preveliko trošenje vremena čak i kod modernih brzih računala. Isto tako, određivanje vjerojatnosti događaja zahtijeva poduže računanje ukoliko ima veliki broj kombinacija događaja. Kod alternativnog BDD pristupa, radi se direktno s logičkim izrazima umjesto s minimalnim reduciranim skupovima. Stoga, BDD metoda ne analizira stablo kvarova direktno, već pretvara stablo u dijagram koji se može shvatiti kao grafički prikaz Boolean algebarskog izraza za glavni događaj u pristupu dno-vrh. Ključno kod pretvorbe jest odabir i određivanje redoslijeda varijabli stabla kvarova, jer isto utječe na veličinu dijagrama. U svojim radovima Reay i Andrews (2002) i Contini i Matuzas (2011) predlažu tehnike za dobivanje jednostavnijih BDD dijagrama kompleksnih sustava. Nadalje, Choi i Cho (2006) navode kako BDD algoritam zahtijeva veliku memoriju, te kako nije primjenjiv za velika stabla kvarova. Stoga, predlažu metodu za smanjenje greške kod postupka skraćivanja minimalnih reduciranih skupova koji imaju malu vjerojatnost pojavljivanja, kao greške pri aproksimiranju kvantificiranja odbačenih minimalnih reduciranih skupova. Metoda je zasnovana na Monte Karlo simulaciji. Prednosti i nedostatkne FTA i BDD metoda opisuju Stamatelatos i Vesely (2002). Ovdje je potrebno naglasiti kako primjena mnogih dostupnih računalnih programa, uz primjenu brzih računala omogućuje generiranje dovoljnih i više nego potrebnih minimalnih reduciranih skupova, čime to obično ne predstavlja veliki problem. Opis primjene BDD kod ETA metode opisuje Andrews i Dunnett (2000)

Polazeći od činjenice kako se primjenom održavanja usmjerenog na pouzdanosti općenito mijenja pouzdanost sustava, Shalev i Tirann (2007) predlažu novu metodu za preračunavanje učestalosti kvarova, koju nazivaju analizu stabla kvarova zasnovanu na stanju (eng. *condition-based fault tree analysis*; kratica *CBFTA*). Ovu metodu objašnjavaju kao proširenje korištenja FTA metode nakon faze dizajna sustava, a što čini upotrebljivom tijekom preostalih faza životnog ciklusa sustava. Pri tome, CBFTA metoda kombinira statističke podatke o kvarovima korištenim tijekom dizajna i podatke praćenja stanja sustava (npr. analiza vibracija, analiza ulja, praćenje stanja ležajeva i elektromotora i dr.). Dobiveni podaci se potom koriste za nadogradnju vrijednosti intenziteta kvarova osjetljivih komponenti.

Posljednjih godina, za procjenu pouzdanosti i rizika, istraživači su predložili i nekoliko novih metoda koji kombiniraju dobre osobine kombinatornih metoda i metoda prostora stanja, Chiacchio i dr. (2011). Ovi novi alati za modeliranje uveli su pojam "dinamika" i u polje pouzdanosti, a pomoću metoda kao što su dinamički blok dijagrami pouzdanosti (eng. *Dynamic Reliability Block Diagram*; kratica *DRBD*), dinamička stabla kvarova (eng. *Dynamic Fault Tree*; kratica *DFT*), Markovljev proces pokretan Booleanovom logikom (eng. *Boolean logic Driven Markov Process*; kratica *BDMP*) i stohastičke Petrijeve mreže (eng. *Stochastic Petri Net*; kratica *SPN*).

Metodologija DFT kombinira FTA i Markovljevu analizu, Stamatelatos i Vesely (2002). Metoda dinamičkog stabla kvarova proširuje standardnu FTA metodu definiranjem dodatnih logičkih funkcije, tzv. dinamičkih vrata. Ova vrata omogućuju modeliranje kompleksnih ponašanja komponenti složenih sustava i njihovih interakcija, kao što su situacije slijednih događaja, funkcionalna zavisnost, redundantnost, kvarovi zajedničkog uzroka i dr. Stoga, DFT je stohastički model za procjenu pouzdanosti koji sintetizira načine kako se neželjeni i vremenski zavisni događaj (kvar) može pojaviti, Chiacchio i dr. (2011). Pri tome se kao kvantitativna metoda za modeliranje procesa kvara i procjenu pouzdanosti koristi Markovljev model. Formalizam DFT metode prvi opisuju Kwang i dr. (1987), a sa svrhom modeliranja dinamičkih osobina postojećeg stabla kvarova i postupanja s

zavisnostima stanja u sustavu. Za opisivanje stohastičkih karakteristika komponenti sustava, koje ovise o stanjima sustava, koriste Markovljevu analizu pouzdanosti, uz primjenu vremenski kontinuiranog modela diskretnog stanja. Algebarski okvir koji omogućuje algebarsko modeliranje dinamičkih vrata i funkciju strukture svakog DFT modela prikazuju u svom radu Merle i dr. (2011). Drugu alternativu za analizu DFT modela daju Zio i dr.(2007), Rao i dr.(2009), Chiacchio i dr. (2011), a koja rješavanje dinamičkih vrata bazira na Monte Karlo simulaciji. Rješenje DFT modela njegovom pretvorbom u Bayesovu mrežu opisuju Boudali i Dugan (2005) i Montani i dr. (2009). Novi formalizam koji proširuje koncept DFT metode s Markovljevom analizom, a koji se naziva Markovljev proces pokretan Booleanovom logikom (BDMP) opisuju Bouissou i dr.(2003).

Na osnovu DFT i DET pristupa, Distefano i Puliafito (2007, 2009), Distefano (2009), predlažu novu metodologiju za modeliranje zavisnosti kod analize pouzdanosti složenih sustava, a koja je zasnovana na blok dijagramima pouzdanosti. Metodu nazivaju dinamički blok dijagrami pouzdanosti ili DRBD, a pomoću koje su na dva primjera studija pouzdanosti dinamički zavisnih sustava iz literature, prikazali njenu primjenu i usporedili je s drugim metodologijama. Osnovna prednost DRBD modela je sposobnost modeliranja zavisnosti između podsustava i komponenti s obzirom na njihov utjecaj na pouzdanost. Kvantitativna analiza DRBD modela može se izvršiti postojećim tehnikama prostora stanja kao. npr. Markovljevim lancima i Petrijevim mrežama, te simulacijskim metodama. Formalnu definiciju DRBD modela u svojoj doktorskoj disertaciji daje Distefano (2001).

Pregledom dostupne literaturu u svezi gore opisanih dinamičkih modela pouzdanosti može se zaključiti kako iste predstavljaju snažne alate prije svega za informacijske sustave i računalnu tehnologiju. Međutim, pored velikog napora istraživača, njihova moguća primjena kod analize pouzdanosti i rizika tehničkih sustava u raznim industrijskim granama za sada ostaje na njihovim vlastitim hipotezama. Naime, rezultati njihovih istraživanja za sada nisu uspoređeni s rezultatima klasičnih metoda preporučenim standardima, pa je stoga vrlo teško procijeniti njihovu pouzdanost.

5.5 Izvori podataka pouzdanosti

Stručnjaci koji izvode analize pouzdanosti tehničkog sustava često se suočavaju s brojnim izazovima, kao što su koje podatke koristiti, kako prikazati tehnički sustav u modelu i kako prikazati ovisnost između komponenti. Kao što je već rečeno u uvodnom dijelu, za model i analizu pouzdanosti komponenti ili sustava potrebno je nekoliko vrsta podataka kao što su tehnički i pogonski podaci, podaci okoline, podaci o održavanju i različite vrste podataka pouzdanosti. Pri tome se podaci pouzdanosti odnose na podatke o kvarovima/modovima kvarova i vremena distribucije kvarova. Raspoloživost i prepoznavanje relevantnih podataka o kvarovima je najbitniji dio svake kvalitativne analize pouzdanosti. Dakle, za analizu pouzdanosti osnovna je raspoloživost takvih podataka, koji bi trebali biti Stapelberg (2009):

- trenutačni,
- specifični,
- revizorski,
- veliki (veliki uzorak s mnogo zabilježenih kvarova),
- primjenjivi na okruženje,
- prikladni s obzirom na životni trend.

Postoji puno izvora prikupljanja podataka o kvarovima tijekom životnog ciklusa funkcionalnog bloka, Dhillon (1999). Ti izvori mogu biti: garantne reklamacije, prijašnja iskustva od sličnih ili identičnih funkcionalnih blokova, testiranja, zapisi generirani tijekom faze razvoja, sustav izvještavanja o kvarovima korisnika funkcionalnog bloka, zapisi o pregledima generirani od strane kontrole kvalitete proizvođača ili korisnika.

Prema, Rausandu i Høylandu (2004), dostupni podaci pouzdanosti uglavnom dolaze iz baza podataka koje se mogu klasificirati u tri tipa i to:

- baza podataka događaja kvara elementa,
- baza podataka nesreća ili incidenata,
- baze podataka pouzdanosti komponenti.

Podaci koji su uključeni u baze podataka pouzdanosti obično su prikupljeni iz različitih izvora. Točna pouzdanost komponenti može varirati od izvora do izvora i to zbog većeg broja vanjskih i unutrašnjih faktora kao što su različiti proizvođači, dizajn, dimenzije, materijala, te radnih uvjeta i uvjeta okoline. Kvaliteta podataka može varirati zbog nepotpunosti i razine detalja, te zbog jednog ili više razloga kao što su metoda prikupljanja, specifikacije granica od strane kompanije, opisa efekata kvara, subjektivnosti i iskustava osobe koja prikuplja podatke, te vremena od trenutka kvara.

5.5.1 Baza podataka događaja kvara funkcionalnog bloka

Mnoge kompanije u svrhu upravljanja održavanjem koriste računalni sustav i adekvatni program. Pri tome se zapisi o kvarovima različitih komponenti, izvedenim preventivnim i korektivnim radnje kontinuirano unose pomoću programa, čime se održava baza podataka događaja kvara komponenti (eng. *component failure event database*) i radnje održavanja. Podaci se koriste za planiranje održavanja i optimizacije troškova održavanja i nabave rezervnih dijelova. Primjer takvog računalnog sustava održavanje u brodarstvu je "AMOS Maintenance", proizveden od strane kompanije SPECTEC, a koji je implementiran na više od 7.000 brodova. Drugi primjer je američki državni program izmjene podataka u industriji (eng. *Government Industry Data Exchange Program*; kratica *GIDEP*) preko kojeg razne kompanije iz pojedinih sektora razmjenjuju informacije o kvarovima komponenti zabilježene u njihovim bazama podataka. Neke kompanije imaju implementiranu sustav analize izvješća o kvarovima i korektivnih radnji (eng. *Failure Reporting Analysis and Corrective Action System*; kratica *FRACAS*), razvijen je od američke vlade osamdesetih godina prošlog stoljeća. Kod ovog pristupa kvarovi se formalno analiziraju i klasificiraju prije nego što se izvješća o kvarovima pohrane u bazu podataka.

5.5.2 Baza podataka nesreća ili incidenata

Baze podataka nesreća i incidenata (eng. *accident and incident databases*) sadrže informacije o istima unutar određenih kategorija, a upravljana je od strane različitih organizacija, konzultantskih kompanija i službenih tijela. Neke od baza podataka su vrlo detaljne, dok druge sadrže samo kratki opis nesreće ili incidenta. Podaci o kvarovima komponenti se mogu ponekad iščitati iz opisa nesreća ili incidenata. Primjeri ovih detaljnih baza podataka su:

- sustav MARS (eng. *Major Accident Reporting System*) upravljana od strane *Joint Research Centre*, Ispra, Italija i koji sakuplja podatke o većim industrijskim nesrećama koje uključuju opasne tvari u zemljama EU.
- baza podataka PSID (eng. *Process Safety Incident Database*) upravljana od strane Centra za sigurnost kemijskih procesa (*Center for Chemical Process Safety*) Američkog Instituta kemijskih inženjera (*American Institute of Chemical Engineers*),
- baza podataka WOAD (*World Offshore Accident Database*) upravljana od strane Det Norske Veritas i
- baza podataka o nekontroliranim ispuštanjima nafte i prirodnog plina u odobalnoj (eng. *blowout*) industriji upravljana od strane Norveškog odbora za znanstveno i industrijsko istraživanje SINTEF (nor. *Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning*).

U brodarstvu, jedna od glavnih briga brodograditelja i brodara jest sigurnost broda na moru. Naime, zbog velikih kazni u slučaju gubitka života, onečišćenja i uništenja okoliša, te gubitka tereta, posebna se pažnja daje sljedećem:

- aktivnostima pri dizajnu i izradi broda,
- operacijama tijekom eksploatacije broda i
- naobrazbi i obuci svih osoba uključenih u upravljanje brodom kako na moru tako i na kopnu.

Još osamdesetih godina prošlog stoljeća, klasifikacijska društva, komercijalne institucije i drugi odgovorni shvatili su važnost prikupljanja podataka o kvarovima ili popravcima i nesrećama, a radi korištenja istih kod procjena pouzdanosti i rizika. U početku, podaci se nisu prikupljali sistematski, tako da isti nisu bili konzistentni. Kasnije su se neke komercijalne institucije usmjerile na razvoj baze podataka pomorskih nesreća u kojima su informacije o nesrećama prikazane sistematski, pa je u nekim slučajevima korelacija moguća. Ipak, ovi podaci daju općenite trendove i nisu direktno primjenjivi za kvantitativnu procjenu pouzdanosti ili rizika.

Jedna od najstarijih baza podataka koja je često osnova za mnoge studije pouzdanosti i rizika je opća statistika upravljana od klasifikacijskog društva *Lloyd's Register*, Soares i Teixeira (2001). Ona pokriva sljedeće kategorije nesreća za brodove iznad 100 BRT-a: nasukanje, požar i eksplozija, sudari, potonuća broda, te oštećenja trupa i postrojenja. Pri tome su izostavljeni ribarski brodovi.

Usporedbom zapisa o nesrećama iz industrije ulova i prerade ribe sa drugim industrijskim granama, uočeno je kako ista dalje biva opasna u značajnim granicama, Pillay i Wang (2003). Podaci o pomorskim nesrećama na ribarskim brodovima dostupni su uglavnom iz podataka Podružnice za istraživanje pomorskih nesreća (eng. *Marine Accident Investigation Branch*; kratica *MAIB*), odjela za transport, s sjedištem u Southampton, UK. Podružnica ispituje i istražuje sve vrste pomorskih nesreća na brodovima s zastavom Ujedinjenog Kraljevstva u čitavom svijetu, kao i svih drugih brodova u njihovom teritorijalnom moru.

Od 1981. godine, i Američka obalna straža (eng. *United States Coast Guard*; kratica *USCG*), održava računalnu bazu podataka, koja sumarizira uzroke istraživanja pomorskih nesreća s pogibeljnim posljedicama. Tijekom 1992. godine uvodi i poseban Pomorski istraživački modul (eng. *Marine Investigations Module*; kratica *MINMOD*). Ovaj sustav omogućuje analizu lanca događaja uzroka nesreća i daje kompletan opis svih događaja koji se odnose na nesreće i njihove povezane uzroke. Metodologija prikupljanja podataka može se detaljnije vidjeti u izvješću USCG -Report No. CG-D-13-1995.

Također, korisne podatke daju i statistički podaci prikazani u publikacijama britanskih klubova P&I osiguravatelja.

5.5.3 Baze podataka pouzdanosti komponenti

Dostupnost i prikladnost podataka je uvijek izazov u svim industrijama, Ballesio i Diettrich (2001).

Baze podataka pouzdanosti komponenti daju procjenu učestalosti kvarova za pojedinačne elemente. Neke također daju opis efekta kvarova i vremena popravka. Baze podataka koje sadrže podatke u svezi proizvođača i izrade mnogih komponenti su obično tajne za ljude izvan kompanija koje u njima participiraju.

Komercijalno dostupne baze podataka pouzdanosti komponenti baziraju se na generičkim podacima koje su rezultat analize izvedene na osnovu stvarnih podataka o događajima kvarova i održavanja. Generičke baze podataka su baze podataka u kojima su komponente svrstane u grupe bez podataka o proizvođaču, izradi ili detaljnog opisa karakteristika komponenti. Ove baze podataka obično sadrže podatke o učestalosti kvarova čija se procjena može bazirati na zabilježenim događajima kvara, ekspertnom mišljenju i laboratorijskom testiranju. Postoje brojne generičke baze podataka u različitim industrijama, a najvažnije su prikazane u *tablici 4*.

Tablica 4. Primjeri generičkih baza podataka.

| <i>Izvor podataka</i> | <i>Oprema</i> | <i>Dostupno od</i> |
|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| OREDA Handbooks | procesna oprema (odobalna industrija) | Det Norske Veritas Norveška |
| MIL-HDBK-217F-Reliability Prediction of Electronic Equipment | elektroničke komponente | US Military Handbook |
| EPRD - Electronic Parts Reliability Data | elektroničke komponente | Reliability Analysis Center (RAC) SAD |
| NPRD-Non Electronic Parts Reliability Data | mehaničke i elektromehaničke komponente | |
| NOOP-NonOperating Parts Reliability Databook | elektroničke, mehaničke i elektromehaničke komponente koje nisu u radu ili su uskladištene | |
| FMD-Failure Mode/Mechanism Distributions | elektroničke, mehaničke i elektromehaničke komponente | |
| PDS Data Handbook | senzori, detektori, ventili i upravljačka logika | SINTEF Norveška |
| FARADIP-FAilure RAte Data In Perspective | elektronička, mehanička i pneumatska oprema | TECHNIS |
| Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment | mehanička oprema (hidraulička i pneumatska) | Naval Surface Warfare Center Carderock Division |
| IEEE 493-1997-Institute of Electrical and Electronics Engineers | proizvodnja i distribucija električne energije | ISBN1-55937-066-1 |
| STF18 A83002, Reliability of Surface Controlled Subsurface Safety Valves | površinska kontrola ispod površinskih sigurnosnih ventila | Exprosoft Norveška |
| STF75 A89054, Subsea BOP (BIOwout Preventer) Systems, Reliability and Testing. Phase V | podvodni BOP uređaji | |

Exprosoft
Norveška

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| STF75 A92026, Reliability of Surface Blowout Preventers (BOPs) | podvodni BOP uređaji | |
| STF38 A99426, Reliability of Subsea BOP Systems for Deepwater Application, Phase II DW | podvodni BOP uređaji za duboka podmorja | |
| SubseaMaster & WellMaster | komponente u izvorima nafte | |
| EIREDA Database -European Industry Reliability Data Handbook, Electrical Power Plants | Ventili, senzori i upravljačka logika (podaci o nuklearnim elektranama) | EUORSTAT Francuska |

Važno je napomenuti kako se generičke baze podataka uvijek razvijaju i nadopunjuju zbog povećanja broja komponenti, novih metoda i tehnika i primjene računala.

Pomorska i u odobalna (eng. *offshore*) industrija, isto tako nije izuzeto od problema dostupnosti i adekvatnosti podataka. Sa strane odobalne industrije, situacija je promijenjena uspostavom projekta OREDA (*Offshore REliability Data*), radi prikupljanja podataka pouzdanosti za sigurnosnu opremu. OREDA je glavni izvor podataka koji se koristi za procjenu pouzdanosti i rizika u odobalnoj industriji. Ovi podaci dobivaju se na osnovu stvarnog operativnog iskustva na određenom broju odobalnih platformi i to za različita geografska područja, instalacija, tipova opreme i radnih uvjeta. Više o ovoj bazi podataka biti će govora u daljnjem tekstu.

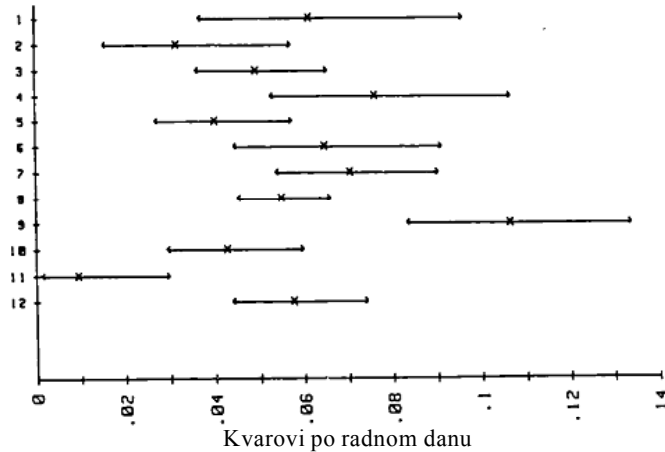
U području brodarstva, prvi potpuni napor za prikupljanje podataka o pouzdanosti komponenti poduzet je od strane Japanskog Ministarstva Transporta i Japanske zaklade za unaprjeđenje brodogradnje. Formirani komitet, nazvan Komitet za istraživanje pouzdanosti broda (eng. *Ship Reliability Investigation Committee*; kratica *SRIC*), u periodu od 1982 do 1992 godine prikupljao je i analizirao podatke u svezi s pojavom kvarova i alarma na brodskoj opremi na brodovima u vlasništvu japanskih kompanija. Nažalost, ti podaci su ostali vlasništvo brodarka i nisu bili dostupni u većoj mjeri u ostalim granama industrije.

Počevši 1993. godine, Kooperativni program brodskih operacija (eng. *Ship Operations Cooperative Program*; kratica *SOCP*), sponzoriran od strane naprednih pomorskih organizacija iz čitavog svijeta, prikuplja podatke pouzdanosti komponenti pod nazivom RAM/SHIPNET, a radi podrške optimizaciji sigurnosti, pouzdanosti i troškova brodskih operacija. Misija RAM/SHIPMENT je formiranje efikasne informacijske mreže za brodare i druge sudionike u pomorstvu radi prikupljanje i dijeljenje podataka o performansama brodske opreme. Podaci se sakupljaju na različitim razinama povezujući upravitelje stroja, operatore broda, regulatorne agencije, proizvođače opreme i brodogradilišta. Na osnovu podataka formirala se baza podataka pouzdanosti, raspoloživosti i pogodnosti održavanja, a koja se komercijalno nudi pod nazivom "*Wave Software System*". Međutim, prikupljeni podaci vlasništvo su svake kompanije i u svakom slučaju količina trenutnih podataka još nije statistički adekvatna za korištenje kao reprezentativna za pomorsku industriju, Ballesio i Dietrich (2001). Osim OREDA baze podataka, valjanost podataka za slične komponente iz drugih industrijskih je upitna radi uvjeta morske okoline, tj. vibracija, vlažnosti i korozije.

5.5.4 Analiza podataka i kvaliteta podataka

U analizi pouzdanosti obično je potrebno procijeniti učestalost kvara svake komponente i interval povjerenja za tu procjenu. Jednostavan pristup, ujedno i neizvjestan, je

ujediniti sve podatke u jedan u jedan uzorak i procijeniti interval povjerenja u skladu sa općenitim izrazima za eksponencijalni/Poisson-ov model. Ovaj pristup ne uzima u obzir promjenjivost uzoraka. Stoga će procjena učestalosti kvara obično biti neobjektivna, a procijenjeni interval povjerenja nerealistično uzak. Na slici 39, Flamm i Luisi (1992), prikazana je promjenjivost učestalosti kvarova određene opreme za bušenje i procjena za 90% intervala povjerenja.



Slika 39. Učestalost kvarova i 90% interval povjerenja za opremu za bušenje na 12 različitih platformi za bušenje. [11]

Kao što je vidljivo iz slike, učestalost kvarova pokazuje značajnu promjenjivost između uzoraka. Procjenu učestalosti kvara koja se bazira na podacima iz različitih okruženja i promjenjive kvalitete može se naći u Lindsen i Rausand, Flamm i Luisi (1992).

Kvaliteta podataka prikazanih bazama ovisi o načinu na koji su sakupljeni i analizirani. Pored velikog napora koji je zadnjih godina uloženo u što kvalitetniji proces prikupljanja i obrade podataka, njihova kvaliteta još nije dovoljno dobra. U tu svrhu je izdano nekoliko smjernica i standarda kako bi se postigla visoka kvaliteta analize prikupljenih podataka, Rausand i Høyland (2004)

Dostupni podaci su obično broj kvarova n za ukupno vrijeme rada t . Učestalost kvarova λ i se procjenjuje kao:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{t} \quad (28)$$

gdje $\hat{\lambda}$ predstavlja prosječnu, tj. konstantnu učestalost kvarova.

Srednje vrijeme do kvara MTTF se izračunava kao:

$$MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} \quad (29)$$

Podaci o kvarovima se obično sakupljanju u kraćem ograničenom vremenskom periodu koji se naziva *opservacijski prozor* (eng. *observation window*)

Neka se pretpostavi da se komponenta pusti u rad u vremenu $t=0$. Neka $N(t)$ označava broj puta zbivanja događaja A za vrijeme intervala $(0, t]$. Kada se komponenta pokvari ($N(t_1)$), popravljiva se s efikasnošću popravka da je "*dobra kao nova*". Pretpostavlja se da je vrijeme popravka kratko pa se stoga može zanemariti kao i da su uvjeti okoline i korištenja konstantni. Kada se dogodi drugi kvar ($N(t_2)$), komponenta se ponovo popravi i tako dalje ($N(t_i)$). U nekom opservacijskom prozoru promatra se određeni broj nezavisnih i istih komponenti s konstantnim intenzitetom kvara λ . U tom periodu bilježe se samo broj kvarova n i akumulirano vrijeme u radu t . Budući da se broji broj kvarova u vremenskom intervalu $[t, t+\Delta t]$ radi o procesu brojanja slučajne varijable n koji se opisuje homogenim Poisson-ovim procesom (HPP). Prema tome broj kvarova n koji su uočeni tijekom tog perioda imati će Poisson-ovu distribuciju s parametrima λt :

$$P(N(t) = n) = \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \text{ za } n = 0, 1, \dots \quad (30)$$

Srednja vrijednost n je $E(n) = \lambda \cdot t$, a varijanca $V(n) = \lambda \cdot t$. Učestalost kvarova λ , koja u ovom slučaju predstavlja učestalost pojave kvara (ROCOF-Rate Of oCurrence Of Failures), objektivno se procjenjuje prema izrazu:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{n}{t} \quad (31)$$

Prema izrazu (31) određuje se nepoznati parametar, tj. $\hat{\lambda}$, koji maksimizira vjerojatnost da sakupljeni uzorak slijedi razdiobu broja kvarova. Kada se razmatra konstantna učestalost kvarova, χ^2 distribucija se može koristiti za izračun intervala povjerenja oko $\hat{\lambda}$ čime se prikazuje pouzdanost. Gornji i donji interval povjerenja $1-\varepsilon$ za $\hat{\lambda}$ koja je rezultat HPP može se izračunati pomoću izraza:

$$\left(\frac{1}{2t} z_{1-\varepsilon/2, 2n}, \frac{1}{2t} z_{\varepsilon/2, 2(n+1)} \right) \quad (32)$$

gdje $z_{\varepsilon, v}$ označava gornji $100\varepsilon\%$ interval povjerenja χ^2 distribucije sa v stupnja slobode.

Ukoliko se radi o više homogenih uzoraka m podataka kvarova n_i u kojima se pretpostavlja konstantna učestalost kvarova komponenti λ_i za $i=1, 2, 3, \dots, m$, Učestalost kvarova λ_i može se procijeniti kao:

$$\hat{\lambda}_i = \frac{n_i}{t_i} \quad (33)$$

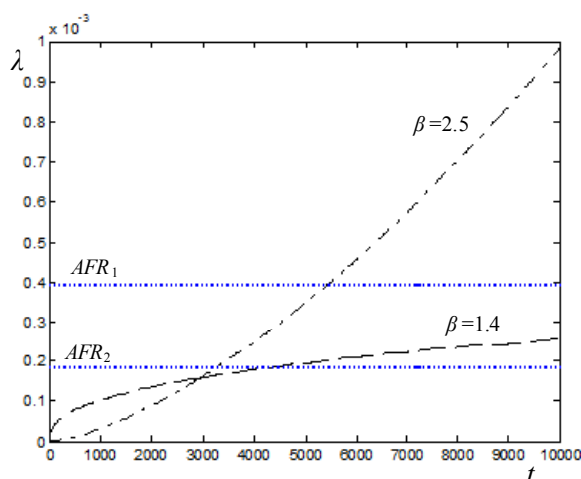
sa intervalom povjerenja:

$$\left(\frac{1}{2t_i} z_{1-\varepsilon/2, 2n_i}, \frac{1}{2t_i} z_{\varepsilon/2, 2(n_i+1)} \right) \quad (34)$$

Budući da su dostupni podaci za analizu pouzdanosti u pravilu broj kvarova n za vrijeme opservacijskog perioda u radu $\Delta t = t_2 - t_1$, učestalost kvarova procjenjuje kao prosječan broj kvarova u intervalu vremena $[t_1, t_2]$, koji se često označava sa AFR (eng. *Average Failure Rate*). Isti se može izračunati pomoću izraza:

$$\begin{aligned} AFR(t_1, t_2) &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(u) du = \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} = \frac{-\ln R(t_2) - (-\ln R(t_1))}{t_2 - t_1} = \\ &= \frac{\ln R(t_1) - \ln R(t_2)}{t_2 - t_1} \end{aligned} \quad (35)$$

Ukoliko npr., stvarna funkcija distribucije vremena kvara slijedi Weibullovu razdiobu s rastućom funkcijom učestalosti kvarova $\lambda(t)$, tada se javlja situacija u kojoj se procjenjuje učestalost kvarova u ranoj fazi životnog vijeka komponente, dok se učestalost kvarova podcjenjuje u posljednjem dijelu njenog životnog vijeka. Ovo je prikazano na slici 40.



Slika 40. AFR Weibull-ovog modela vremena kvara s β parametrom.

Ovaj opći zaključak naročito se odnosi na kvarove mehaničkih komponenti koji su jasno uzrokovani zamorom ili habanjem materijala. To rezultira manjim intenzitetom kvarova u ranoj fazi, a većim u kasnijoj fazi životnog vijeka. U ovim slučajevima razumnije je koristiti Weibull-ov model s parametrom oblika β u rasponu od 1,0÷2,0, Barle i Ban (2010).

Niz vremena između kvarova T_1, T_2, \dots, T_{i-1} u slučaju HPP procesa brojenja kvarova i popravka komponente "dobra kao nova", te konstantnih radnih uvjeta i uvjeta okoline tijekom cijelog vremena, je isto nezavisan i identično distribuiran kao i proizvoljna distribucija kvarova. Međutim, općenito vremena između kvarova T nisu nezavisna i nisu isto distribuirana. Razlog tome leži u upravo u činjenici da stvarni radni uvjeti i uvjeti okoline općenito nisu konstantni, tj. kontrolirani, već se mijenjaju s vremenom. Samim tim mogu nastati situacije u kojima vrijeme između kvara postaje zavisno o iznimno velikih promjena tih uvjeta. Primjer toga se jesu podaci iz više projekta prikupljanja podataka pouzdanosti komponenti u odobalnoj industriji. Tako npr., sigurnosni ventil podvodne bušotine se nakon kvara zamijeni s istim ventilom, a čime se ispunjava uvjet obnove komponente, Rausand (2004). Uvjeti jakog mora zbog lošeg vremena dovode do takvih radnih uvjeta koje utječu na vrijeme između kvara zavisno upravo o tim uvjetima okoline. Pri korištenju takvih podataka o

kvarovima javlja se situacija da je u opservacijskom prozoru u ranoj fazi životnog vijeka ventila prosječna učestalost kvarova često drukčija nego u kasnijem opservacijskom prozoru. To indicira kako populacija nije homogena. Ovaj problem je naročito izražen ukoliko se generičke baze podataka zasnivaju na priključuju podataka više istih komponenti na različitim instalacijama, a koje se nalaze u različitim geografskim područjima. Dakle, radi se o više uzoraka istih komponenti. U generičkim podacima te su pojedinačne komponente obično svrstane unutar iste generičke komponente ne uzimajući u obzir njihovu različitost i uvjete okoline. Kako radni uvjeti i uvjeti okoline mogu varirati unutar svake populacije, prikupljeni podaci u tom slučaju neće biti homogeni. Stoga treba pažljivo provjeriti da li je uzorak homogen prije nego se podaci sjedine. U mnogim bazama podataka uzorci su sjedinjeni bez ikakve provjere.

Dakle, većina komercijalno dostupnih baza podataka pouzdanosti daju samo konstantnu učestalost kvarova pa čak i u slučaju mehaničke opreme koja je izložena oštećenju uslijed erozije, korozije i zamornog loma. Poznavanjem mehanizma propadanja uslijed tih oštećenja, učestalost kvarova mora se povećati. Tako npr., kod vojnog priručnika američke vojske za procjenu pouzdanosti elektroničkih komponenti MIL-HDBK 217F:1996, koristi se metoda zasnovana na detaljnoj analizi naprezanja, a koja su posljedica djelovanja okoline, kvalitetne primjene, temperature, složenosti, konstrukcije i dr. Stoga, učestalost kvarova prema ovoj metodi, koja se naziva tehnika procjene analize naprezanja dijela (eng. *part stress analysis prediction technique*), procjenjuje se kao:

$$\lambda = \lambda_B \cdot \pi_Q \cdot \pi_E \cdot \pi_A \cdot \dots \quad (36)$$

gdje je λ_B osnovni intenzitet otkaza koji se procjenjuje prema testu pouzdanosti izvedenim pod standardnim uvjetima okoline (npr. napon i vlažnost zraka), tj. standardnim naprezanjem i temperaturnim uvjetima. Parametri π_Q , π_E , π_A nazivaju se faktori djelovanja koji uzimaju u obzir kvalitetu dijela, utjecaj okoline na opremu, naprezanja primjene i dr. Nadalje, priručnik MIL-HDBK217F opisuje posebnu metodu za procjenu su sve komponente sustava u radu, a što podrazumijeva serijsku konfiguraciju sustava. Stoga se učestalost kvarova sustava λ_S koji se sastoji od n komponenti izračunava kao:

$$\lambda_S = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (37)$$

U OREDA priručniku korišten je alternativni pristup u kojem se prihvaća kako prikupljeni podaci nisu homogeni uzorak. Učestalost kvara λ pretpostavlja se kao slučajna varijabla kako bi mogla poprimiti različite vrijednosti za različite uzorke. Kako bi se ti nehomogeni podaci združili u jedan multi uzorak procijenjen s prosječnom učestalosti kvara (*AFR*), korištena je posebno metoda procjene koja je nazvana "*OREDA-Estimator*". Ova metoda se bazira Bayes-ovoj točki gledišta problema vjerojatnosti i u stvari predstavlja jedan polu-Bayesov pristup. Pomoću "*OREDA-Estimatora*" izračunata je procjena srednje vrijednosti λ za svaki mod kvara komponente uz pripadajući donji i gornji interval povjerenja za λ . Uz to izračunata je i procjena standardne devijacije distribucije λ , a čija velika vrijednost ukazuje na nehomogenost. Ovaj pristup je opisan detaljno u OREDA (2002) i radu Lydersena i Rausanda (1992). Jedan drugi pristup za postupanje sa nehomogenim uzorcima na primjeru sigurnosnog ventila izvora nafte koji se zasniva na fizičkom modeliranju razlike između uzoraka navodi Rausand i Høylandu (2004).

Izvorno inicirana od Norveške uprave za naftu (*Norwegian Petroleum Directorate*) 1981 godine, radi prikupljanja podataka pouzdanosti za sigurnosnu opremu, OREDA (*Offshore REliability Data*) je projektna organizacija koju sponzorira osam naftnih kompanija u svijetu. Njena glavna uloga je sakupljanje i izmjena podataka pouzdanosti između kompanija koje u njoj participiraju i da djeluju kao forum za koordinaciju i upravljanje podacima pouzdanosti.

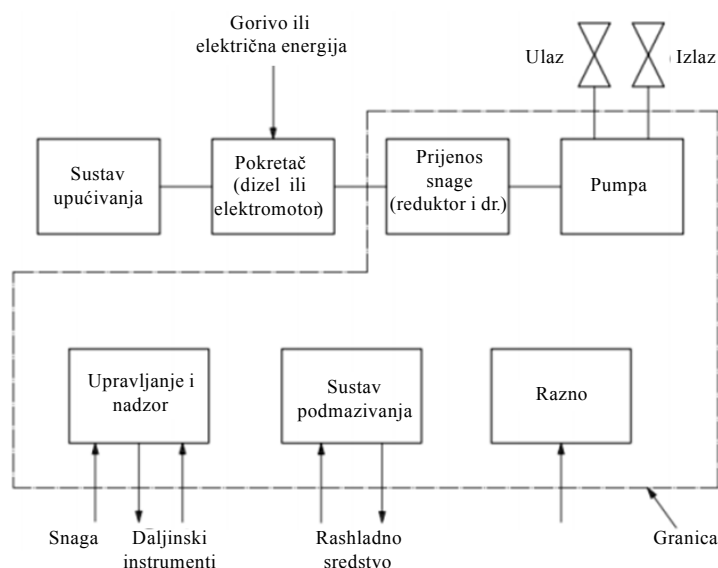
OREDA je uspostavila opsežnu bazu podataka pouzdanosti i održavanja za odobalnu (eng.*offshore*) opremu za istraživanje i proizvodnju nafte i plina i to za različita geografska područja, instalacija, tipova opreme i radnih uvjeta. Podaci su pohranjeni u bazama podataka, a specijalizirani računalni program razvijen je za prikupljanje, pronalaženje i analizu informacija. Pristup elektroničkoj bazi podataka ograničen je samo na sudionike programa OREDA. Komercijalno dostupne baze podataka pouzdanosti publicirane su u OREDA priručnicima (*OREDA Reliability Data Handbook*). Izdano je pet izdanja (1984, 1992, 1997, 2002, i 2009) koja su prodana u više od 50 zemalja u svijetu. OREDA priručnik (2002) sadrži podatke za razdoblje 1993-2002 godine. U izdanju OREDA (2009) novi podaci su pripojeni izdanju iz 2002 (slika 41).

| System | Equipment class | Data from 2002 edition included in 2009 edition | | New data in 2009 edition | Total 2009 edition |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------------------------|--------------|--------------------------|--------------------|
| | | Phase IV | Phase V | Phases VI+VII | |
| | | No. of units | No. of units | No. of units | No. of units |
| 1 Machinery | 1.1 Compressors | 75 | 56 | | 131 |
| | 1.2 Gas Turbines | 56 | 32 | | 88 |
| | 1.3 Pumps | | 160 | 52 | 212 |
| | 1.4 Comb. Engines | | 75 | 23 | 98 |
| | 1.5 Turbo expanders | | 8 | 2 | 10 |
| 2 Electric Equipment | 2.1 El. Generators | | 26 | 6 | 32 |
| | 2.2 El. Motors | | 128 | 15 | 143 |
| 3 Mechanical Equipment | 3.1 Heat exchangers | | 17 | 4 | 21 |
| | 3.2 Vessels | 148 | 50 | | 198 |
| | 3.3 Heaters & boilers | 11 | 1 | | 12 |
| 4 Other Topside Equipment | 4.1 F&G Detectors | | 779 | 139 | 918 |
| | 4.2 Process sensors | | 69 | | 69 |
| | 4.3 Contr. Logic Units | | | 10 | 10 |
| | 4.4-4.5 Valves | | 331 | 576 | 907 |
| Sum Topside | | 290 | 1732 | 827 | 2849 |

Slika 41. Tablica populacije opreme u OREDA priručniku 2009. [27]

Kao što je vidljivo iz slike 41, Vestvik (2012), OREDA priručnik pokriva širok raspon opreme koja je podijeljena u četiri glavne grupe i to: strojevi, električka oprema, strojarska oprema i druga važna oprema (detektori požara i plina, procesni senzori, upravljačke logičke jedinice ventili).

Važna osobina priručnika OREDA jest što sadrži karakteristike i crteže fizičkih granica komponenti/sustava. Definiranja granica na primjeru pumpe prikazuje slika 42.



Slika 42. Definicija granice pumpe u OREDA priručniku

Prema slici 42, pumpa je prikazana strukturnim blok dijagramom sa sljedećim elementima:

- funkcijom svakog funkcijskog bloka,
- upravljanjem i nadzorom koji upravlja i ograničava odvijanje funkcija,
- mehanizam potreban za realizaciju funkcija,
- željenim ulazima koji predstavljaju materijale i energiju za obavljanje zahtijevanih funkcija,
- željenim izlazima koji predstavljaju željene rezultate zahtijevanih funkcija (materijali, energija i informacije),
- granicom koja definira koja se oprema i sustavi smatraju dijelovima pumpe, a koji su izvan.

U primjeru pumpe, primarni pokretač i njegov sustav upućivanja se smatraju nezavisnim elementima i stoga nisu uključeni u pumpu. Kvarovi u vezi (spojci) između pokretača i pumpe su uključeni u pumpu. Dakle, granicom je definirani samo ona oprema i sustavi koji su bitni za funkciju pumpe.

Najniža razina elemenata u hijerarhiji komponente ili sustava na kojima se izvode radnje preventivnog održavanje nazivaju se održavani elementi. Održavani elementi pumpe u slici 43, prikazani su tablično, Rausand (2009).

| Pump | | | | |
|-------------------------|----------------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| Power Transmission | Pump | Control/Monitoring | Lubrication | Miscellaneous |
| Gearbox/var. drive | Support | Instruments | Instruments | Purge air |
| Bearing | Casing | Cabling and boxes | Reservoir w/heating syst. | Cooling/heating system |
| Seals | Impeller | Control unit | Pump w/motor | Filter, cyclone |
| Lubrication | Shaft | Actuating device | Filter | Pulsation damper |
| Coupling to driver | Radial bearing | Monitoring | Cooler | |
| Coupling to driven unit | Thrust bearing | Internal power supply | Valves/piping | |
| Instruments | Cylinder liner | Valves | Oil | |
| | Piston | | Seals | |
| | Diaphragm | | | |
| | Instruments | | | |

Slika 43. Tablica pumpe kao podvrste održavanog elementa u priručniku OREDA. [51]

Podaci o kvarovima su uglavnom sakupljeni preko zapisa od održavanja. Primjer kako su podaci prikazani u OREDA priručniku prikazano je na slici 44, Vestvik (2012).

| Taxonomy no | | Item | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------|--------------------------------------------|------|-------|--------------------|-------------|-------------------|-----|-----------|-----|
| 1.3.1 | | Machinery Pumps Centrifugal | | | | | | | | |
| Population | Installations | Aggregated time in service (10^6 hours) | | | | | No of demands | | | |
| | | Calendar time * | | | Operational time † | | | | | |
| 156 | 19 | 3.2412 | | | 2.1290 | | 5018 | | | |
| Failure mode | No of failures | Failure rates per 10^6 | | | | | Active rep. hours | | Man hours | |
| | | Lower | Mean | Upper | SD | η/τ | Mean | Max | Mean | Max |
| Critical | | | | | | | | | | |
| External leakage- Process | 47* | - | 4.93 | 26.48 | 17.09 | 14.05 | 25 | 96 | 28 | 96 |
| Medium | 47† | - | 8.89 | 48.13 | 22.36 | 22.08 | | | | |
| Degraded | | | | | | | | | | |
| External leakage- Process | 9* | 0.02 | 2.35 | 7.84 | 2.87 | 2.78 | 9.9 | 33 | 25 | 99 |
| Medium | 9† | 0.08 | 3.79 | 11.71 | 4.13 | 4.23 | | | | |
| Incipient | | | | | | | | | | |
| External leakage- Process | 22* | - | 3.63 | 17.31 | 7.11 | 6.79 | 10 | 44 | 23 | 206 |
| Medium | 22† | 0.03 | 6.68 | 24.73 | 9.13 | 10.33 | | | | |
| Comments | | | | | | | | | | |

Slika 44. Format tablice podataka pouzdanosti u OREDA priručniku. [27]

Tablica na slici 44, prikazuje podatke za populaciju od 156 centrifugalnih pumpi koje su instalirane na 19 različitih odobalnih platformi (instalacija) i to za jedan mod kvara (vanjsko propuštanje-procesni medij), a za kalendarsko vrijeme od $3.2412 \cdot 10^6$ sati, odnosno 370,00 sati po pumpi godišnje. Kalendarsko vrijeme je u stvari akumulirano vrijeme prikupljanja podataka tijekom kojeg su pumpe izvršavale svoju funkciju. Ovo vrijeme je dato s velikom točnošću.

Akumulirano vrijeme rada pumpi je $2.1290 \cdot 10^6$ sati, a što znači kako su pumpe prosječno radile oko 66% kalendarskog vremena. Ovo vrijeme je obično manje točno jer se većinom zasniva na procjeni osobe koja prikuplja podatke o radu elementa opreme. Tijekom ovih vremena pumpe su se startale 5018 puta ("No. of demands").

Stupac "Mod kvara" (eng. *Failure Mode*) prikazuje zabilježene modove kvara pumpi koje se prema težini, sukladno standardu ISO 14224, podijeljeni u tri grupe i to na:

- kritični (eng. *critical*),
- postupni (eng. *degraded*),
- početni (eng. *incipient*).

Podaci o kvarovima su uglavnom sakupljeni preko zapisa od održavanja. Sve učestalosti kvarova prikazane kao broj kvarova na 10^6 sati. Za svaki mod kvara prikazani su

sljedeći podaci (izračunati u odnosu na akumulirano kalendarsko vrijeme i vrijeme rada pumpi):

- srednja vrijednost učestalosti kvara ("*Mean*"), tj. procjenjena prosječna učestalost kvara izračunata koristeći "OREDA-estimator",
- donji ("*Lower*") i gornji ("*Upper*") interval povjerenja za srednju vrijednost učestalosti kvara koji pokriva 90% varijacija između različitih uzoraka ,
- standardna devijacija ("*SD*") koja određuje varijacije između više uzoraka,
- omjer η/τ , tj. ukupni broj kvarova podijeljen s ukupnim vremenom pretpostavljajući homogeni uzorak.

Za svaki mod kvara prikazani su i podaci vremena popravka i to kao srednji i maksimalni broj sati po čovjek, te prosječno vrijeme prekida rada (*active repair hours*).

Podaci u OREDA priručniku su prvenstveno podaci pouzdanosti koji se koriste u analizi raspoloživosti. Međutim, u početnoj fazi primjene sustava održavanja povijesni podaci mogu biti nedostadni, pa u tom slučaju OREDA pruža najbolji raspoloživi izvor podataka za određivanje *MTTF* modova kvara.

6 PRIMJER KVALITATIVNE ANALIZE TEHNIČKOG SUSTAVA

Kvalitativna analiza tehničkog sustava u svrhu procjene pouzdanosti, prikazati će se na jednom od radnih sustava broda- samohodno usisno jaružalo. U prvom koraku potrebno je izvršiti funkcionalnu analizu sustava kojoj je svrha identificirati i opisati sve funkcije sustava. Prethodno je potrebno izvršiti familijarizaciju sa sustavom koja predstavlja prvi korak kvalitativne analize sustava s ciljem izgradnje znanja o tome kako sustav funkcionira.

6.1 Tehnički opis sustava

Općenito, samohodno usisno jaružalo je brod na vlastiti pogon opremljen s skladištem (usipni prostor) i opremom za jaružanje koja puni i/ili prazni skladište Na slici 45, prikazana je fotografija broda.



Slika 45. Fotografija samohodnog usisnog jaružalo.

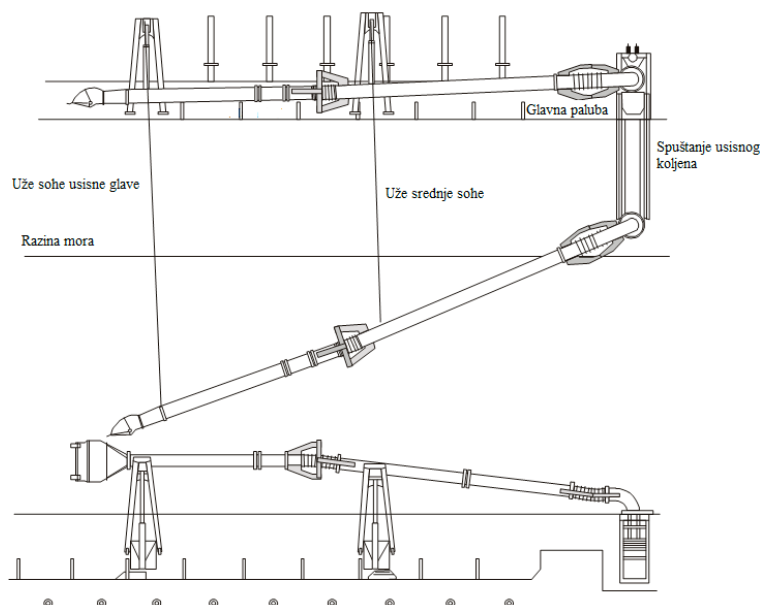
Osnovne karakteristike broda su:

- dužina preko svega: 97,2 m,
- dužina između okomica (perpendikulara): 86,62 m,
- širina: 17,15 m,
- gaz: 6,2 m,
- istisnina: 4730 t,
- bruto registarskih tona: 3574 BRT
- broj porivnih motora: 2,
- tip motora: Deutz MWM - SBV 16M628 - četverotaktni - 16 cilindara ,
- ukupna snaga: 2x1955 kW,
- ukupna instalirana snaga dizel generatora 5190 kW,
- brzina: 12,5 NM,
- smještaj: 21 osoba,
- izgrađen: 1985 godine,
- volumen skladišta: 3500 m³,
- dubina jaružanja: 30 m,
- broj cijevi za jaružanje: 1

Osnovnu opremu za jaružanje čine:

- jedna usisna cijev s usisnom glavom, promjera 900 mm koje se za vrijeme jaružanja puze po morskom dnu,
- dvije centrifugalne pumpe za usisavanje materijala s morskog dna, snage 1240 kW,
- dvije centrifugalne pumpe za nasipavanje materijala vodenim mlazom, snage 3000 kW,
- razdvojivo skladište u koje se odlaže usisani materijal,
- sustav za prelijevanje viška vode,
- tri sohe s pripadajućim vitlima za spuštanje i podizanje usisne cijevi,
- uređaj za kompenzaciju vertikalnog gibanja broda u odnosu na morsko dno.

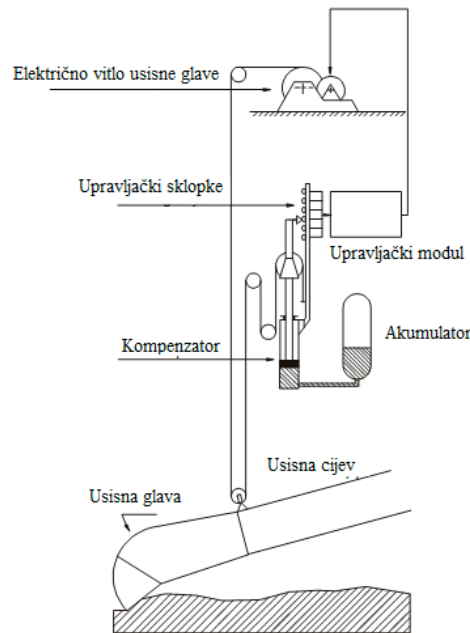
Dolaskom na poziciju jaružanja, brzina broda se smanjuje na otprilike 3 NM i usisna cijev se sohama postavi izvan broda (slika 46).



Slika 46. Spuštanje usisne cijevi van broda.

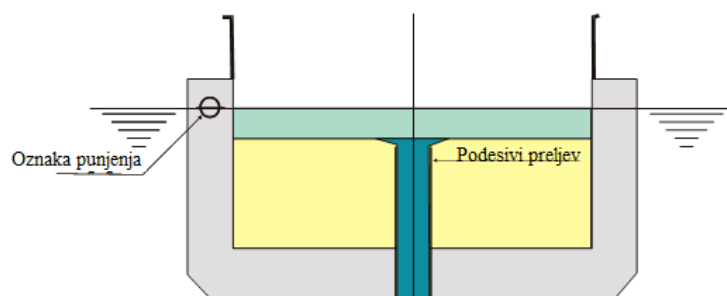
Za postavljanje usisne cijevi izvan broda i na brod koristi se soha usisne glave, srednja soha i soha usisnog koljena. Sohe su izrađene od čeličnog A-okvira. Pomak soha, tj. usisne cijeve izvan ili na brod obavlja se s hidrauličkim cilindrima. Usisna cijev najprije se spušta horizontalno do razine mora. Spuštanje se obavlja pomoću čeličnih užadi i električki pogonjenim vitlima. Potom se usisna cijev preko vitla srednje sohe i sohe usisnih usta spušta do morskog dna pazeći da se ima cijevi zadrži oblik ravne linije.

Kada usisna glava dođe nekoliko metara iznad morskog dna uključuje se centrifugalna pumpa za usisavanje. Uređaj za kompenzaciju (slika 47) vertikalnog gibanja broda u odnosu na morsko dno sprječava nekontrolirano otpuštanje i ponovo zatezanje čeličnog užeta vitla usisne glave i ujedno održava skoro konstantni pritisak usisne glave na morsko dno.



Slika 47. Uređaj za kompenzaciju.

Usisavanje materijala s morskog dna obavlja pri brzini broda od 2-3 NM. Materijal se preko iskrajne cijevi odlaže u skladište. Brod je opremljen podesivim sustavom preljeva (slika 48). Ovaj sustav omogućava prelijevanje vode iz smjese u skladištu, sve dok postoji razlika hidrostatskog tlaka, odnosno dok se ne postigne oznaka jaružanja (eng. *dredging mark*) na trupu broda. Na taj način, ukupna težina punog skladišta, koju čine voda i kruta tvar, ostaje konstantna, pa se ovaj sustav naziva sustav konstantne tonaže (eng. *Constant Tonnage System*; kratica *CTS*).



Slika 48. Podesivi sustav preljeva.

Punjenje skladišta prekida se kada je:

- skladište puno i preljev nije moguć,
- postignut maksimalni gaz i kada se spuštanje preljeva nije korisno,
- postignuta ekonomska razina punjenja.

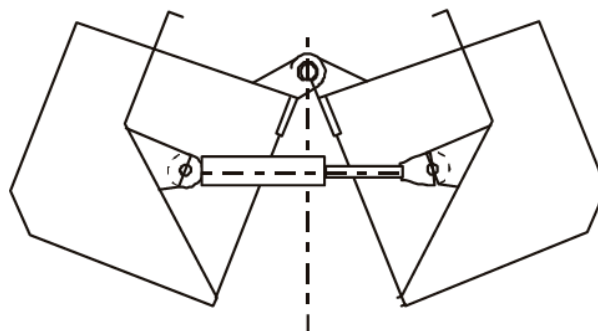
Skladište tereta puni se pomoću uzduž skladišta centralno postavljenog iskrcajnog cjevovoda koji povezuje tlačnu stranu pumpe za usisavanje i brodsko skladište (slika 49). Smjesa vode i krute tvari, raspoređuje se uzduž skladišta pomoću mlaznice na kraju cjevovoda i ventila za distribuciju smjese. Iskrcajni cjevovod je opremljen s tri hidraulički upravljana ventila za distribuciju. Ventili omogućuju iskrcaj smjese na po sredini, te na pramčanom i krmenom dijelu skladišta. Primarno punjenje skladište je preko mlaznice, tj. otvaranjem prednjeg ventila. Srednji i stražnji ventil otvaraju se po potrebi. Na taj način postiže se ravnomjernije punjenje skladišta, a time i ravnomjernija distribucija težine tereta u skladištu, te trimovanje broda.



Slika 49. Fotografija skladišta broda i opreme za iskrcaj usisane smjese.

Upravljanje ventilima za distribuciju smjese, odnosno njihovo pojedinačno otvaranje i zatvaranje obavlja se daljinski iz upravljačke sobe, pomoću elektrohidrauličkog sustava.

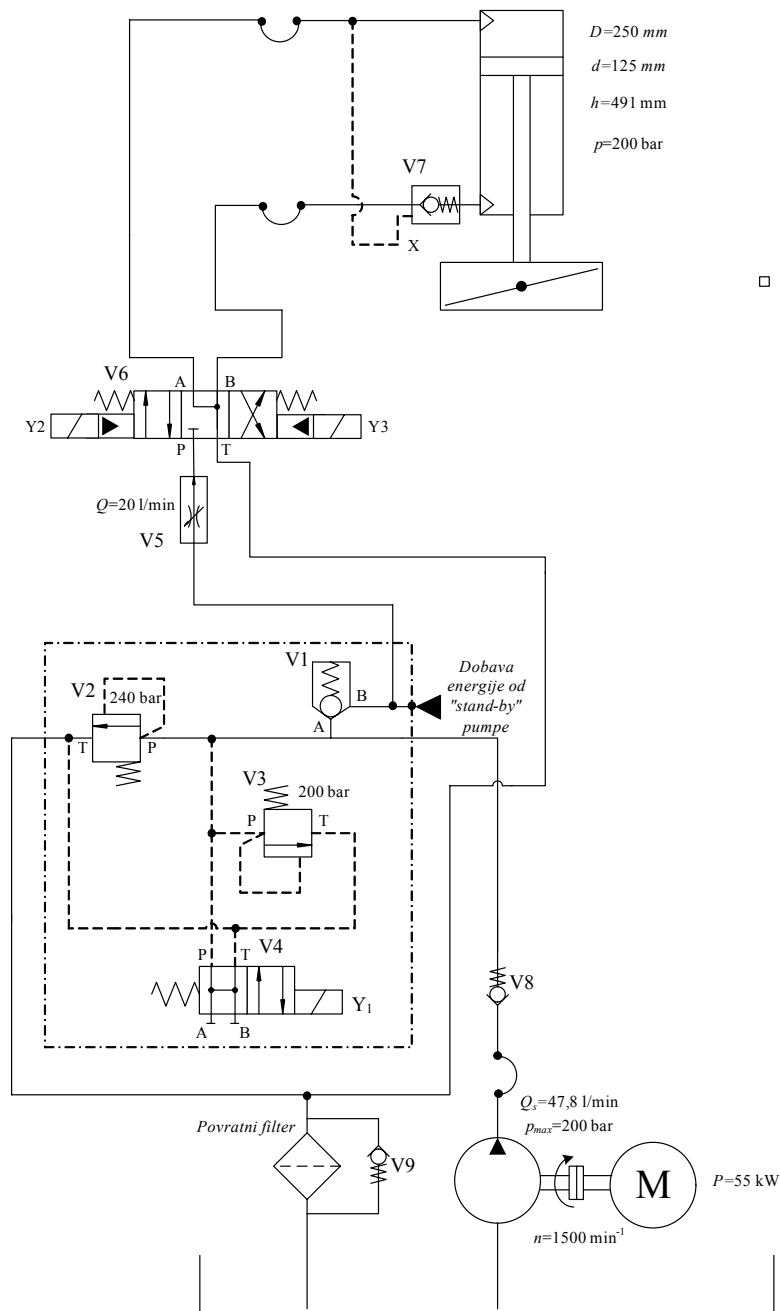
Pražnjenje materijala u skladištu obavlja se uzdužnim razdvajanjem skladišta na dvije polovice (slika 50).



Slika 50. Mehanizam razdvajanja skladišta.

Ove dvije polovice spojene su dvama (pramčanim i krmenim) hidrauličkim cilindrima i zglobovima. Maksimalni kut razdvajanja je $2 \times 17^\circ$. Tijekom razdvajanja, nadgrađe ostaje uspravno zbog toga što je s glavnom palubom spojene zglobovima i zaticima. Upravljanje hidrauličkim cilindrima obavlja se daljinski iz upravljačke sobe, pomoću elektrohidrauličkog sustava.

U daljnjem tekstu, kao primjer jednog od radnih sustava jaružala opisati će elektrohidraulički sustav upravljanja ventilima za distribuciju (raspodjelu) usisanog materijala iz iskrcajne cijevi u brodsko skladište. Ventili su izvedeni su kao klapne, koja se otvara i zatvara pojedinačnim aktiviranjem dvoradnog hidrauličkog cilindra. Promjer klipa je $D=250$ mm, a klipnjače $d=125$ mm. Hod klipa je $h=491$ mm, a maksimalna sila $F=907,7$ kN. Na slici 51, prikazana je hidraulička shema upravljanja ventilom.



Slika 51. Hidraulička shema upravljanja ventilima.

Hidraulički pupni agregat instaliran je na lijevoj krmenoj strani međupalublja. Sastoji se od spremnika ulja volumena 2500 litara i sljedećih dijelova: povratni filter, pokazivač razine ulja, senzora razine, termometra, pipka za ispuštanje kondenzata, otplinjača, cijevi za punjenje s filterom. Svi potrebni upravljački elementi sustava, osim glavnog elektromagnetskog razvodnika montirani su s prednje strane spremnika. Za potrebe svih radnih hidrauličkih sustava ugrađene su četiri hidrauličke pumpe, radijalno klipne izvedbe i konstantnog volumena dobave. Dvije od četiri pumpe konstrukcijski su izvedene s četiri jednaka nezavisna protoka, a druge dvije s po jednim protokom.

Za napajanje hidrauličkom energijom hidrauličkog sustava ventila za raspodjelu u iskrcajnoj cijevi, koristi se pumpa br.2, sljedećih tehničkih karakteristika:

- tip: Poclain Hydraulic L4 H18-33,
- specifični protok pumpe: $q_p=132 \text{ cm}^3/\text{rad}$,
- broj okretaja: $n=1500 \text{ min}^{-1}$,
- stvarni protok: $Q_s=191,4 \text{ l/min}$,
- maksimalni radni tlak: $p_{max}=200 \text{ bar}$,
- električna snaga elektromotora: $P=55 \text{ kW}$.

Pumpa je konstrukcijski izvedena s četiri nezavisna protoka od $Q_s=47,8 \text{ l/min}$, od kojih se treći koristi za prijenos, upravljanje i pretvorbu energije u hidrauličkom sustavu ventila za raspodjelu. U hidrauličkim shemama ovaj nezavisni protok označen je slovom "C".

Uključenjem, pumpa usisava ulje iz spremnika i potiskuje ga u sigurnosni ventilski blok koji se sastoji od: nepovratnog ventila s oprugom (V1), ventila za ograničenja tlaka (V2) i (V3), elektromagnetskog 4/2 razvodnog ventila, povrat oprugom (V4). Budući da je razvodni ventil V4 s početnim položajem u kojem su svi priključci spojeni, dok su radni priključci A i B zatvoreni, protok ulja vraća se u spremnik. Na taj način pumpa radi u rasterećenom modu rada.

Dovođenjem električnog signala na elektromagnet Y1, razvodnika V4, dolazi do njegovog aktiviranja i promjene razvodnog položaja u kojem se spajaju priključci P→A i B→T. Pošto je priključak A zatvoren, dolazi do porasta tlaka. Kada njegova vrijednost poraste na 200 bar, dolazi do otvaranja ventila za ograničenje tlaka V3, preko kojeg se protok protok ulja usmjerava u spremnik. Istovremeno, tlak u sustavu otvara nepovratni ventil V1, preko kojeg ulje protječe do priključka P opružno centriranog elektromagnetskog predupravljanog 4/3 razvodnika V6. Ovim međudjelovanjem komponenti u sigurnosnom ventilskom bloku postiže se normalni mod rada pumpe, tj. njen rad pod opterećenjem.

Dovođenjem električnog signala na elektromagnet Y2 razvodnika V6, dolazi do njegovog aktiviranja i promjene razvodnog položaja u kojem se spajaju priključci P→A i B→T. Time se ulje dovodi na stranu klipa, pri čemu sila tlaka djeluje na klip što dovodi do izvlačenja klipnjače i otvaranje klapne ventila. Istovremeno, ulje s strane klipa se preko deblokirajućeg nepovratnog ventila V7, spojenih priključaka B→T na razvodniku V6, povratnog voda i filtera vraća u spremnik. Nepovratni ventil V7 deblokira (otvara) upravljački tlačni signal protoka pumpe na priključku X. Tijekom rada, razvodnik V7 drži se aktiviranim sve dok je ventil za distribuciju potrebno držati otvorenim.

Kada se djelovanjem električnog signala magnetizira zavojnica elektromagneta Y3 razvodnika V6, dolazi do njegovog aktiviranja i promjene razvodnog položaja u kojem se spajaju priključci P→B i A→T. Time se klapna ventila zatvara jer se protok pumpe preko

deblokirajućeg nepovratnog ventila V7 usmjerava na stranu klipnjače. Ulje s strane klipa se preko spojenih priključaka A→T na razvodniku V6, povratnog voda i filtera vraća u spremnik.

Pri otvaranju ili zatvaranju ventila, tlak u sustavu poprima vrijednost potrebnu za savladavanje suprostavljajućih vanjskih i unutrašnjih otpora. U normalnom radu, tlak u sustavu treba biti niži od 200 bar. Na takvoj razini tlaka, ventil za ograničenje tlaka V3 se zatvara, pa se cijeli protok pumpe usmjerava prema cilindru. Brzina uvlačenja i izvlačenja cilindra regulira se podesivim dvogranim regulatorom protoka V5. Nepovratni ventil s oprugom V8 ima funkciju sprječavanja povratka ulja u pumpu. U srednjem položaju razvodnika V6, radni priključci A i B spojeni su na spremnik (A, B→T). S takvim srednjim položajem koji omogućuje se potpuno nalijeganje zapornog elementa rasterećenje voda od djelovanje i pomoću deblokirajućeg nepovratnog ventila V7, realiziran je hidraulički sklop za blokiranje položaja cilindra, a sa svrhom sprječavanja otvaranja ventila kada se to od njega ne zahtijeva. Nepovratni ventil s oprugom V9 ima funkciju zaobilaženja protoka ulja kada pad tlaka na filteru, uslijed zaprljanosti, postigne takvu razinu koja savladava silu opruge nepovratnog ventila.

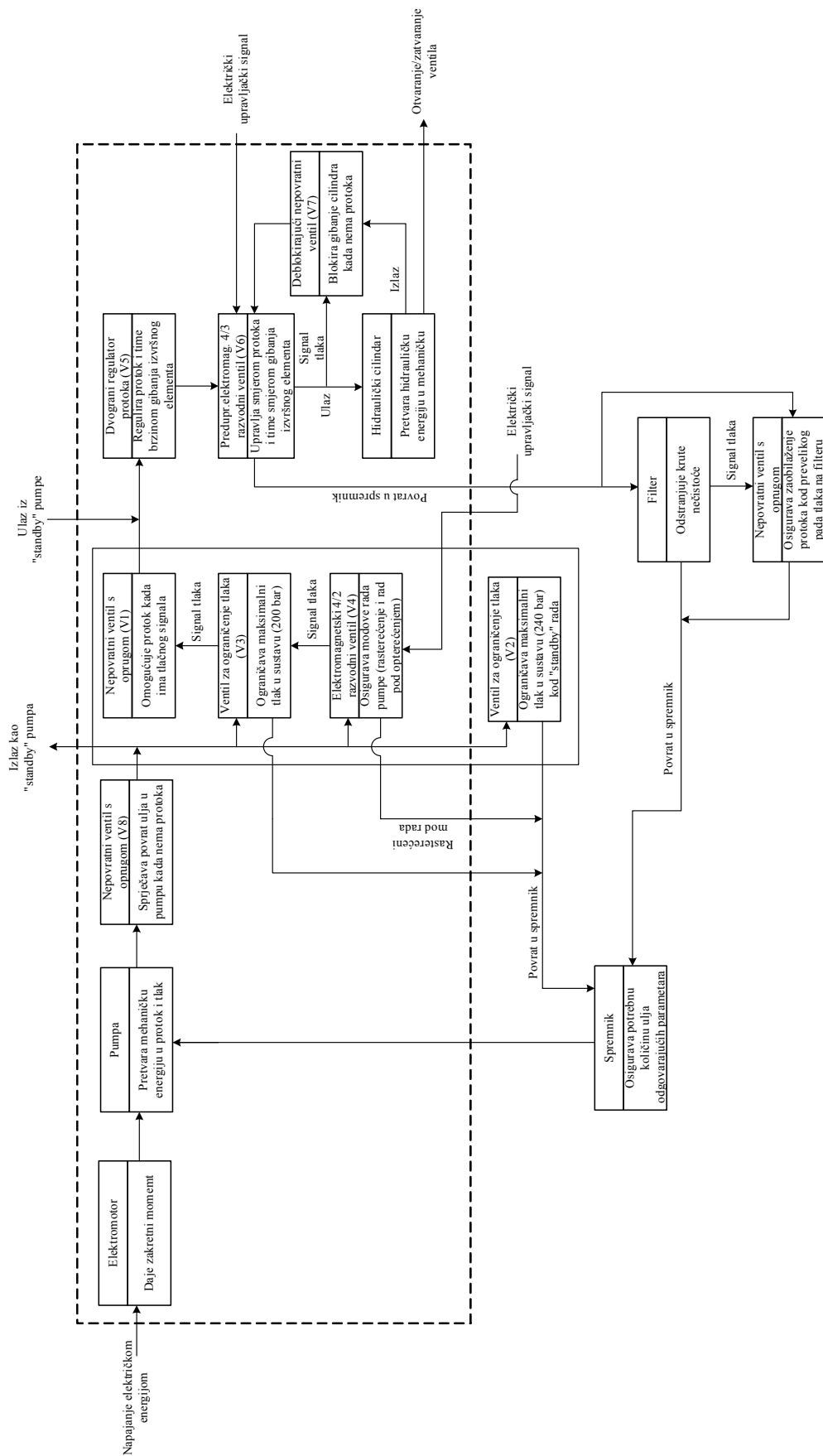
Pumpa br.4, istih je tehničkih karakteristika kao i pumpa br.2, te služi kao pumpa u pripravnosti ("stand by") za pumpu br.2. Naime, pumpa br.4 i njen nezavisni protok označen slovom "F" ima ugrađen isti sigurnosni ventilski blok kao nezavisni protok "C" pumpe br. 2. Na taj način, koristiti se kao izvor hidrauličke snage u slučaju neispravnosti pumpe br.2 ili sigurnosnog ventilskog bloka koji pripada nezavisnom protoku "C" pumpe br.2. Isto tako, pumpa br.2 i njen nezavisni protok "C", koristi se kao kao pumpa u pripravnosti pumpe br.4. U normalnom radu, nezavisni protok "F" koristi se u hidrauličkom sustavu za razdvajanje skladišta.

Budući da se nezavisni protok druge pumpe koristi i u hidrauličkom sustavu za razdvajanje skladišta, ventil za ograničenje tlaka V2 ima funkciju da pri toj funkciji ograniči maksimalnu razinu tlaka na 240 bar.

6.2 Funkcionalna analiza sustava

Na osnovu tehničkog opisa sustava i elektrohidrauličkog upravljanja, slika 52 prikazuje funkcijski blok dijagram sustava. Isprekidanom linijom određena je granica sustava. Kao što je vidljivo iz slike 52, kod analize sustava u svrhu procjene pouzdanosti neće se razmatrati funkcija ventila za ograničenje tlaka V2 u sigurnosnom ventilskom bloku, te funkcija filtera i nepovratnog ventila V9 kao elmenata hidrauličkog pumpnog agregata.

Elektrohidraulički sustav ima dva moda rada, rasterećeni i normalni mod rada, tj. rad pod opterećenjem. Rasterećeni mod rada podrazumijeva rad pumpe bez opterećenja, odnosno kada se još uvijek ne zahtijeva rad sustava. Pri tom modu rada, tlak u hidrauličkom sustavu ima vrlo malu vrijednost koja je jednaka suprostavljajućim unutrašnjim otporima cjevovoda. U normalnom modu rada maksimalni tlak u sustavu je ograničen na 200 bar. Bitne funkcije sustava je otvaranje i zatvaranje ventila za distribuciju kada se to od njega zahtijeva i sprječavanje otvaranja ventila kada se ne zahtijeva rad sustava. Prva funkcija zahtijeva ispravno funkcioniranje svih komponenti sustava, a druga funkcija ispravno funkcioniranje deblokirajućeg nepovratnog ventila V7.



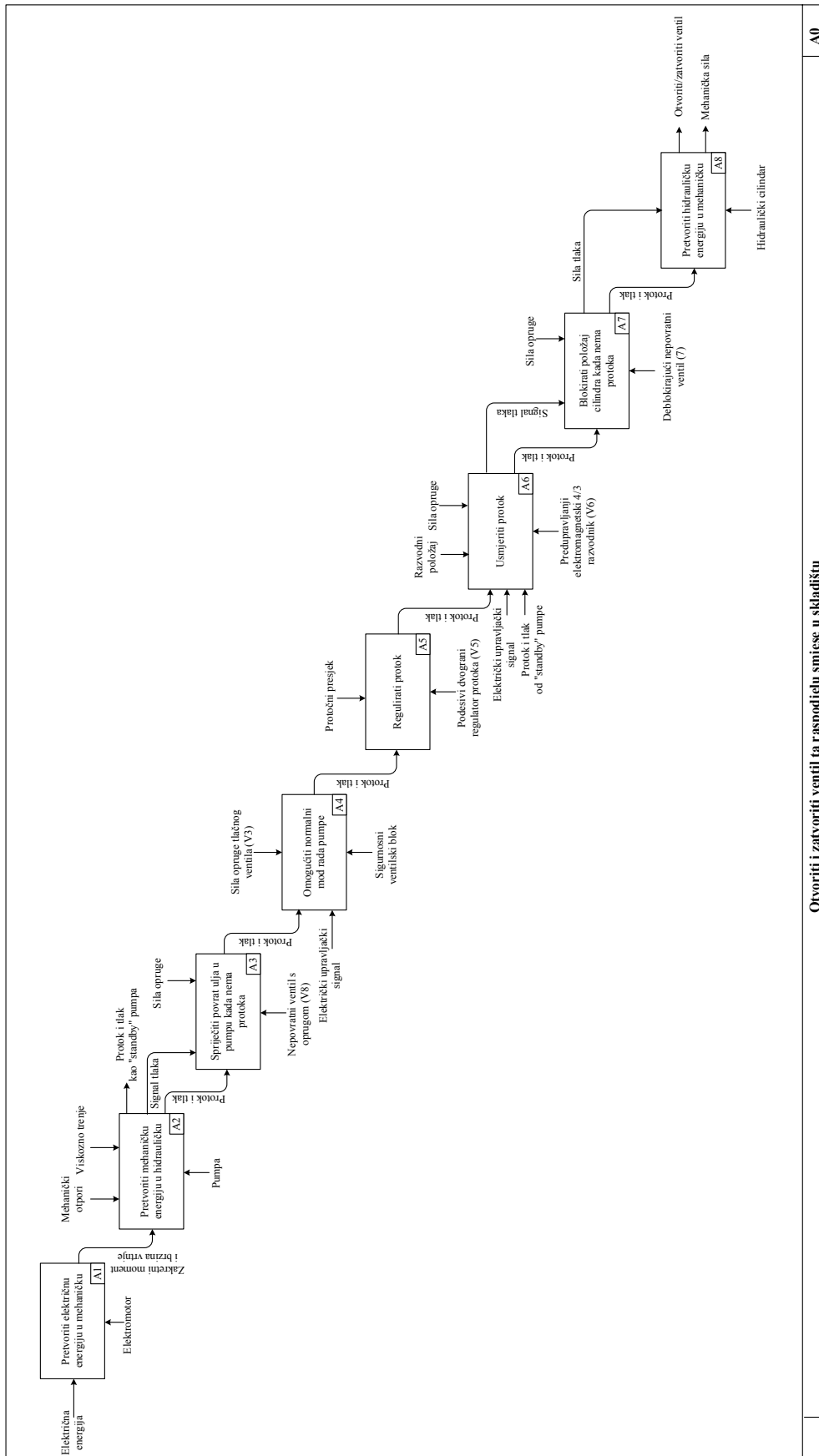
Slika 52. Funkcijski blok dijagram elektrohidrauličkog sustava ventila za raspodjelu usisane smjese u brodsko skladište.

Analizirajući funkcije komponenti elektrohidrauličkog sustava ventila za distribuciju, uočavaju se sljedeće vrste funkcija:

- *Bitne funkcije* koje su potrebne da se ispuni namjena svake komponente u sustavu. Sustav ima dvije bitne funkcije i to: "*otvaranje i zatvaranje ventila*", te "*sprječavanje otvaranje ventila*" kada se ne zahtijeva rad sustava. Kod prve funkcije zahtijeva se ispravan rad svih komponenti sustava u skladu s njihovim performansama, a kod druge funkcije nepropusno zatvaranje deblokirajućeg nepovratnog ventila V7, ispravnost brtve klipa hidrauličkog cilindra i ispravno funkcioniranje elektromagnetskog predupravljanog 4/3 razvodnika V6.
- *Funkcije međudjelovanja* koje omogućuju međudjelovanje između elemenata sigurnosnog ventilskog bloka, kao i međudjelovanja elektromagnetskog predupravljanog 4/3 razvodnika V6 i deblokirajućeg nepovratnog ventila s oprugom V7.
- *Sekundarne funkcije* nepovratnog ventila s oprugom V8, ventila za ograničenje tlaka V3 i deblokirajućeg nepovratnog ventila s oprugom V7. Naime, bitna funkcija ventila V8 jest sprječavanje povratka ulja u pumpu, dok je njegova sekundarna funkcija da pod djelovanje protoka svojim ispravnim djelovanjem (otvaranjem u punom protočnom presjeku) omogući protok ulja. Bitna funkcija ventila V3 jest da ograničava maksimalnu razinu tlaka u sustavu na 200 bar. Njegova sekundarna funkcija pri aktiviranju sustava je svojim djelovanjem omogući normalni mod rada pumpe, a time protok ulja prema spremniku ili kroz sustav. Bitna funkcija ventila V7 jest blokiranje položaja cilindra, a sa svrhom sprječavanja otvaranja ventila. Njegova sekundarna funkcija jest da kod uvlačenje i izvlačenja klipnjače svojim ispravnim djelovanjem (otvaranjem u punom protočnom presjeku) omogući protok ulja.
- Bitna funkcija ventila za ograničenje tlaka V3 je ujedno i *zaštitna, tj. sigurnosna funkcija*. Naime, njegova osnovna namjena je zaštita sustava od djelovanja prekomjernog tlaka.

Funkcionalna analiza elektrohidrauličkog sustava ventila za distribucije usisane smjese u skladištu izvršena je SADT metodom. Naime, ova metoda je odabrana iz razloga što je namjena hidrauličkog sustava pretvorba, prijenos energije i odgovarajuće upravljanje. To kod funkcionalne analize zahtijeva prikaz ulaza, upravljanja, mehanizama i izlaza, a što upravo omogućuje SADT model.

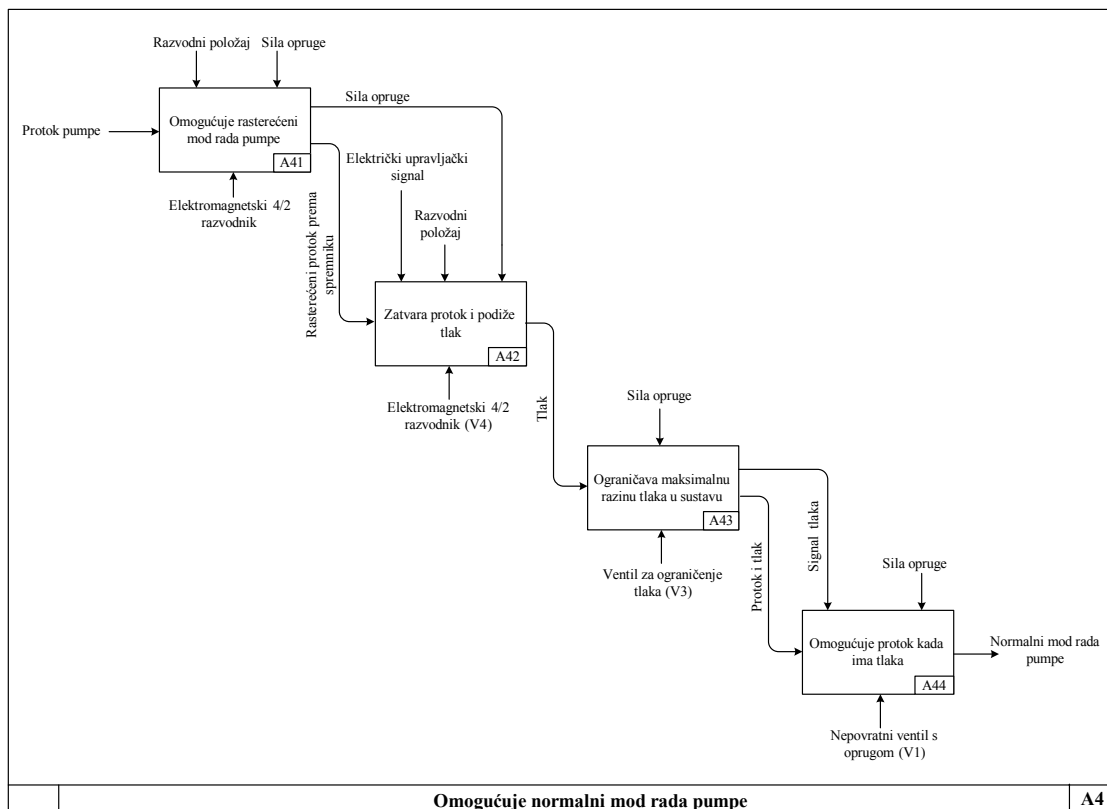
Aktigram prikazan na slici 53, daje detaljni prikaz funkcionalne razine A0 SADT modela sustava kod realizacije bitne funkcije sustava na vrhu, a to je "*otvoriti i zatvoriti ventil*". Na ovoj razini nije bilo moguće detaljnije prikazati djelovanje razine A4, tj. sigurnosnog ventilskog bloka, a što je napravljeno aktigramom prikazanim na slici 54.



Otvoriti i zatvoriti ventil ta raspodjelu snijese u skladištu

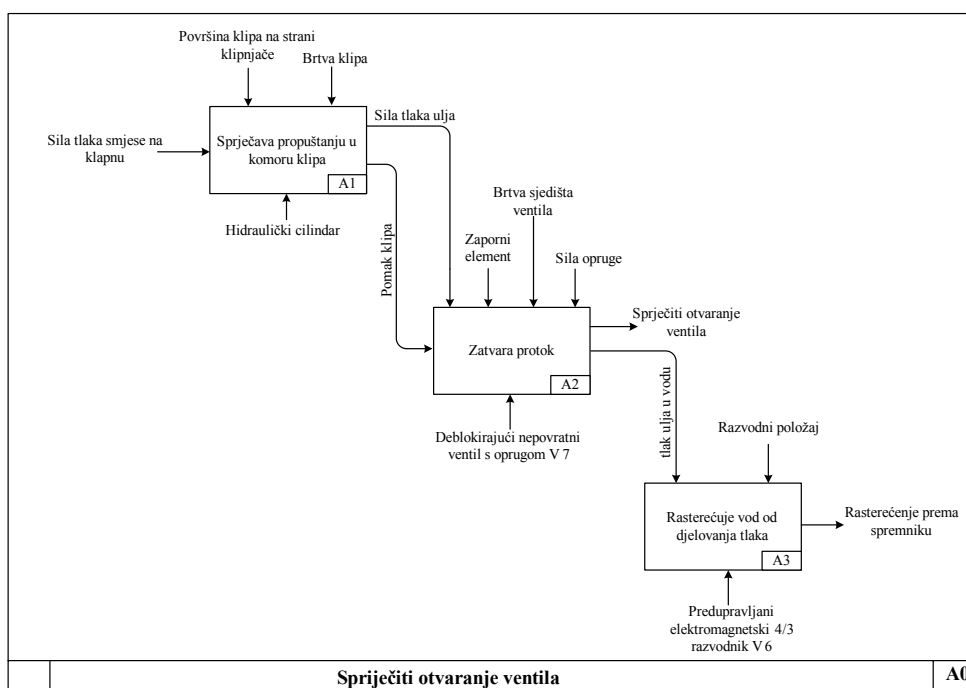
A0

Slika 53. Aktigram razine A0 funkcije sustava "otvaranje i zatvaranje ventila".



Slika 54. Aktigram razine A4 funkcije funkcije sustava "otvaranje i zatvaranje ventila".

Na slici 55, prikazan je aktigram razine koji daje detaljni prikaz funkcionalne razine A0 SADT modela sustava kod realizacije bitne funkcije sustava na vrhu, a to je "spriječiti otvaranje ventila".



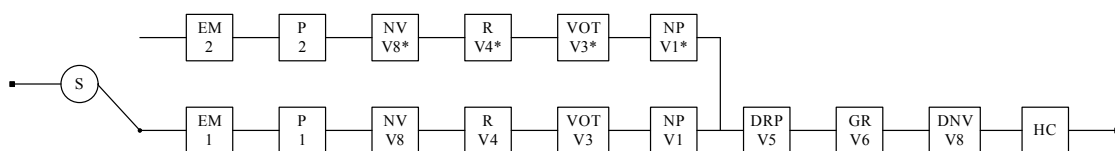
Slika 55. Aktigram razine A0 funkcije funkcije sustava "spriječavanje otvaranje ventila".

Iz aktigramama na slici 55, vidljivo je kako u realizaciji funkcije sustava "sprječavanje otvaranje ventila" sudjeluju hidraulički cilindar, deblokirajući nepovratni ventil s oprugom V7 i predupravljanji elektromagnetski 4/3 razvodnik, opružno centiran. Djelovanje težine smjese na klapnu stvara silu koja djeluje na površinu klipa s strane klipnjače, djelujući u smjeru otvaranja ventila. Pri tome se stvara sila tlaka ulja u vodu koja djeluje na zaporni element ventila V7, u smjeru njegovog zatvaranja. Na taj način se blokira protok, a time i pomicanje klipa u smjeru otvaranja. Razvodnik V6, s svojim srednjim razvodnim položajem omogućuje potpuno nalijeganje zapornog elementa ventila V7 na njegovo sjedište iz razloga što se vod rasterećuje od djelovanja tlaka u trenutku deaktiviranja razvodnika V6. Dakle, za zadržavanje položaja klipa cilindra u uvučenom položaju, a što odgovara zatvorenom položaju klapne, ventil V7 mora nepropusno zatvarati i ne smije biti propuštanja ulja na brtvi klipa cilindra. Razvodnika V6 se u trenutku prestanka djelovanja električnog aktivirajućeg signala mora uz djelovanje mehaničkih sila opruge vratiti u srednji razvodni položaj.

Aktigramima na slikama 50, 51 i 52 određene se sve funkcije komponenti neophodne za realizaciju bitne funkcija sustava "otvaranje i zatvaranje ventila" i "sprječavanje otvaranje ventila", pa se stoga zaključuje kako je odabir SADT tehnike funkcionalne analize primjeren za ovaj slučaj.

6.3 Analiza pouzdanosti

Kao što je navedeno u poglavlju 5, analiza pouzdanosti započinje s modelom pouzdanosti sustava koji se sastoji od njegovih odgovarajućih funkcijskih elemenata (komponenti). Kao model koristiti će se blok dijagrami pouzdanosti (RBD). Ova metoda je odabrana iz razloga što se prikazom logičkih veza između komponenti sustava može na jednostavan i prirodan način opisati funkcioniranje sustava. Na slici 56, prikazan je RBD model sustava za realizaciju funkcije "otvaranje i zatvaranje ventila".



Slika 56. RBD model za funkciju sustava "otvaranje i zatvaranje ventila".

Blokovi u dijagramu na slici 56, predstavljaju komponente sustava, a linije opisuju veze između komponenti. Pri tome oznake u blokovima označavaju sljedeće komponente: elektromotor (EM), pumpa (P), nepovratni ventil s oprugom V8(NV), elektromagnetski 4/2 razvodnik V4 (R), ventil za ograničenje tlaka V3 (VOT), nepovratni ventil s oprugom V1 (NV), dvograni regulator protoka V5 (DRP), predupravljanji elektromagnetski 4/3 razvodnik V6 (GR), deblokirajući nepovratni ventil s oprugom V8 (DNV) i hidraulički cilindar (HC). Krug s oznakom "S" označava pripravnost ("standby") kojom se definira pripravnost pumpe br. 4 i njenog sigurnosnog ventilskeg bloka. Redundantnost je pasivna iz razloga što pumpa u pripravnosti i njen sigurnosni ventilske blok nije pod djelovanjem opterećenja u vremenu čekanja prije nego se uključe u rad. Stoga, za te komponente smatra se kako ne mogu otkazati u tom periodu. U periodu čekanja, takve komponente su u tzv. hladnoj pripravnosti (eng. *cold standby*). Budući da su sve komponente u sustavu značajne, jer imaju direktnu ulogu na funkcionalnu sposobnost sustava, radi se o koherentnom, tj. povezanom sustavu.

Drugim riječima, ukoliko su sve komponente u koherentnom sustavu ispravne, tada je i sustav ispravan.

Na slici 57, prikazan je RBD za funkciju sustava "sprječavanje otvaranje ventila".



Slika 57. RBD model za funkciju sustava "sprječavanje otvaranje ventila".

Oznake u blokovima na slici 57, označavaju sljedeće komponente: hidraulički cilindar (HC), deblokirajući nepovratni ventil s oprugom V7(NV), predupravljeni elektromagnetski 4/3 razvodnik V6 (GR). Također, i u ovom slučaju radi se o koherentnom sustavu.

6.3.1 Analiza kvarova komponenti

Nakon izrade modela potrebno je svakoj komponenti modela dodijeliti procijenjenu pojedinačnu distribucija kvara u obliku neke od mjera pouzdanosti. Pri tome je potrebno odrediti moguće modove kvara svake komponente. Naime, ukoliko se sagledava funkcija svake komponente i njenih sastavnih dijelova potrebnih za realizaciju zahtijevane funkcije, očito je kako njihova neispravnost može biti rezultat različitih modova kvara.

Kako bi se odredili mogući modovi kvara komponenti potrebno je izvršiti pregled dostupne tehničke dokumentacije dobivenih od dobavljača komponenti, kao što su tehnički podaci i nacrti, opisi neispravnosti ili/i kvarova komponenti, načini otklanjanja neispravnosti i/ili kvarova, upute za održavanje komponenti itd.

U dostupnoj tehničkoj dokumentaciji komponenti navedeni su najčešći modovi kvara, uzroci kvarova koji mogu dovesti do prekida rada, tj. neispravnosti komponenti i korektivne radnje za vraćanje komponenti u funkcionalno stanje.

U tablici 5, prikazani podaci o najčešćim modovima kvara za hidrauličku pumpu.

Tablica 5. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidrauličku pumpu.

| Mod kvara | Uzroci kvarovi | Korektivna radnje |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Radni tlak prenizak | Neispravan manometar Ventil za ograničenje tlaka podešen na prenisku razinu Pumpa istrošena Propuštanje ulja | Popravak ili zamjena Podešavanje ili zamjena Remont ili zamjena pumpe Provjera i popravak |
| Pjenjenje ulja | Korištenje pogrešnog ulja Preniska razina ulja Propuštanje zraka u usisnom vodu pumpe | Ispuštanje kompletnog ulja i zamjena Nadopuna ulja do potrebne razine Provjeriti priključke |
| Pumpa je bučna | Usisni ventil je zatvoren Preniska razina ulja Preveliki viskozitet ulja Usisni filter je nečist Oštećenje brtve vratila pumpe Fleksibilna spojka istrošena Pumpa istrošena | Otvoriti ventil Nadopuna ulja do potrebne razine Ispuštanje kompletnog ulja i zamjena Zamijeniti filter Montirati novu brtvu Zamijeniti fleksibilni dio Remont ili zamjena pumpe |

| | | |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Prevelika temperatura ulja | <p>Preniska razina ulja Ventil za ograničenje tlaka podešen na prenisu razinu i propušta</p> <p>Pumpa istrošena Ugrađeni rashladnik začepljen Preveliki gubici energije: - podešenost ventila za ograničenje tlaka - premali presjek cjevovoda - protočni ventil previše zatvoren</p> | <p>Nadopuna ulja do potrebne razine Opterećenje preveliko, povećati razinu podešenosti ventila ukoliko je radni tlak niži Remont ili zamjena pumpe Očistiti hladnjak</p> <p>Podesiti ventil za ograničenje tlaka Provjeriti i izmijeniti cjevovod Podesiti protočni ventil</p> |
| Propuštanje ulja | <p>Propuštanje brtve vratila pumpe Druga propuštanja</p> | <p>Promijeniti brtvu vratila pumpe Provjeriti vijke kućišta ili promijeniti brtve poklopaca</p> |

Iz tablice 4, vidljivo je kako pojedini uzroci kvarova mogu biti modovi kvara na nižoj razini funkcionalne raščlambe sustava. Primjeri su propuštanje ulja za mod kvara "radni tlak prenizak" ili propuštanje zraka u usisnom vodu pumpe za mod kvara "pjenjenje ulja". Nadalje, pojedini uzroci kvara za jedan mod kvara su istodobno uzroci kvara drugog moda kvara (npr. propuštanje brtve vratila pumpe je uzrok moda kvara propuštanje ulja)

U tablici 6 prikazani podaci za hidraulički cilindar.

Tablica 6. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidraulički cilindar.

| Mod kvara | Uzroci kvarovi | Korektivna radnje |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Brzina cilindra je premala | <p>Regulator protoka je suviše zatvoren Glavni razvodnik ne radi ispravno Prenizak viskozitet ulja Pumpa istrošena Propuštanje brtve klipa</p> | <p>Podesiti protočni presjek Provjeriti ili zamijeniti Provjeriti hlađenje ulja ili izbor ulja Remont ili zamjena pumpe Zamijeniti brtvu</p> |
| Cilindar se ne giba ispravno | <p>Prisutnost zraka Cilindar istrošen</p> | <p>Ispustiti zrak Remont ili zamjena cilindra</p> |
| Sila cilindra je premala | <p>Istrošena brtva klipa Radni tlak prenizak</p> <p>Prenizak viskozitet ulja</p> | <p>Zamijeniti brtvu klipa Povećati razinu podešenosti ventila ukoliko je radni tlak niži Provjeriti hlađenje ulja ili izbor ulja</p> |
| Propuštanje cilindra | <p>Propuštanje brtve klipnjače Propuštanje brtve poklopaca cilindra</p> | <p>Zamijeniti brtvu Zamijeniti brtve</p> |

Prema podacima iz tablice 6, isto tako je vidljivo kako pojedini uzroci kvarova za modove kvara hidrauličke pumpe (tablica 5) mogu biti uzroci kvara za modove kvara hidrauličkog cilindra (npr. pumpa istrošena ili prenizak viskozitet ulja).

Podaci o najčešćim modovima kvara za hidrauličke ventile prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidrauličke ventile.

| Mod kvara | Uzroci kvarovi | Korektivna radnje |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Predupravljeni elektromagnetski 4/3 razvodnik, opružno centriran</i> | | |
| Razvodnik ne mijenja jedan ili oba razvodna položaja | <p>Neispravni elektromagneti Slijepljenost klipa Puknuta opruga u glavnom ili pilot ventilu Deformacija kućišta zbog prezategnutosi ili neadekvarnog pritezanja vijaka</p> | <p>Provjeriti i po potrebi zamijeniti Očistiti ventil Zamijeniti oprugu Provjeriti zategnutost kućišta</p> |
| <i>Elektromagnetski 4/2 razvodnik, povrat oprugom</i> | | |
| Razvodnik ne mijenja jedan ili oba razvodna | <p>Neispravni elektromagneti Slijepljenost klipa</p> | <p>Provjeriti i po potrebi zamijeniti Očistiti ventil</p> |

| | | |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| položaja | Puknuta povratna opruga Deformacija kućišta zbog prezategnutosi ili neadekvarnog pritezanja vijaka | Zamijeniti oprugu Provjeriti zategnutost vijaka |
| <i>Deblokirajući nepovratni ventil oprugom (izvedba s čaurom)</i> | | |
| Ventil ne zatvara ili otvara protok Propuštanje ventila | Puknuta opruga Slijepljen klip Oštećen klip Oštećeno sjedište Oštećene brtve (O-prsteni) | Zamijeniti oprugu Očistiti ventil Zamijeniti ventil Zamijeniti ventil Zamijeniti O-prstenove |
| <i>Nepovratni ventil s oprugom (izvedba s čaurom)</i> | | |
| Ventil ne zatvara ili otvara protok Propuštanje ventila | Puknuta opruga Slijepljen klip Oštećen klip Oštećeno sjedište Oštećene brtve (O-prsteni) | Zamijeniti oprugu Očistiti ventil Zamijeniti ventil Zamijeniti ventil Zamijeniti O-prstenove |
| <i>Ventil za ograničenje tlaka (klipne izvedbe)</i> | | |
| Ventil na otvara ili zatvara protok Propuštanje ventila | Puknuta opruga Slijepljen klip Prezategnutosi ili neadekvarno pritezanje vijaka Oštećen klip Oštećeno sjedište | Zamijeniti oprugu Očistiti ventil Provjeriti zategnutost kućišta Zamijeniti ventil Zamijeniti ventil |

Pored podataka o kvarovima prikazanim u gornjim primjerima, u tehničkoj dokumentaciji navedene su preporuke kod izvođenja preventivnih i korektivnih radnji održavanja, kao i preporuke za zalihe rezervnih dijelova.

Ovdje je potrebno naglasiti kako dio komponenti hidrauličkog sustava za distribuciju smjese u skladište jaružala, sukladno pravilima za klasifikaciju brodova moraju imati potvrdu o tipno odobrenom proizvodu. Naime, klasifikacijski zavodi u svojim Pravilima za klasifikaciju brodova između ostalog propisuju i Pravila kojim se od proizvođača strojnih sustava, opreme, uređaja i materijala (definirani kao proizvodi), koji su prema zahtjevima pravila predmet nadzora, njihovo odobrenje od strane klasifikacijskog zavoda. Cilj odobrenje je potvrda da je proizvođač je u stanju napraviti i isporučiti proizvode koji ispunjavaju zahtjeva pravila glede identifikacije kvalitete i dokumentacije. Potvrdom o odobrenju proizvoda potvrđuje se kako je postupkom odobrenja proizvoda izvršena procjena njegovog dizajna, materijala, izrade i ispitivanja. Tako npr., klasifikacijsko društvo *Nippon Kaiji Kyokai*, poznat kao s *ClassNK* ili *NK*, u svojem *Pravilu br.28-Pravila o odobrenju proizvođača i uslužnih tvrtki* (eng. *Rules for approval of manufactures and service suppliers-2012*), *Odjeljak 4.4*, definira zahtjeve za odobrenje hidrauličkih pumpi i motora koji svoju primjenu imaju kod brodskih pomoćnih uređaja i strojeva. Zahtjevi za odobrenje hidrauličkih cilindara navedeni su u *Standardu za odobrenje br. 2.9 (program odobrenja br. 5-778.93)*, norveškog klasifikacijskog društva *DET NORSKE VERITAS (DNV)*.

Kao što je već rečeno u poglavlju 5.2.2, mod kvara je opis neispravnosti, odnosno način na koji se može zapaziti da je funkcionalni blok u neispravnom stanju. U sljedećem koraku potrebno je, prema gore navedenim podacima o kvarovima komponenti, izvršiti klasifikaciju kvarova iz razloga što se pojedini modovi kvara mogu sagledavati kao potpuni ili postupni gubitak zahtijevane funkcije. To se pogotovo odnosi na hidrauličku pumpu, cilindar i hidrauličke ventile. Naime, ove komponente imaju granice prihvatljivog odstupanja performansi koje se odnose na sposobnost ili mogućnost komponente da zadovolji funkcionalne zahtjeve. Tako npr., za hidrauličku pumpa mjera performanse je stvarni protok, a za hidraulički cilindar maksimalna sila tlaka na klip cilindra. Tijekom njihovog rada dolazi

do habanja i starenja elementa njihove strukture. Habanje tijekom normalnog rada pumpe uzrokovano je trenjem radnih elemenata ili pak abrazivnim djelovanjem mogućih krutih nečistoća u ulju. Ovi procesi dovode do postupnog smanjenja početno određenih mjera performansi. Kod hidrauličke pumpe habanjem radnih elemenata povećavaju se konstruktivne zračnosti, a time i volumetrički gubici, što dovodi do smanjenja stvarnog protoka pumpe, a time i njene snage. Proces habanja i povećanje volumetričkih gubitaka odnose se i na hidrauličke ventile klipne izvedbe. Isto se događa i habanjem košuljice cilindra ili brtve klipa, kao i starenjem brtve klipa što dovodi do smanjenja maksimalne sile klipa cilindra. Dakle, sve ove komponente imaju prihvatljiva odstupanja volumetričkih gubitaka protoka, a što utječe na odstupanja njihovih mjera performansi i time sagledavanje modova kvara. Odstupanja se određuju mjerenjem i obično je iskustveno određena razina odstupanja pri kojoj se smatra da je komponenta istrošena i kako ju je potrebno zamijeniti. Iz toga razloga za razvrstavanje kvarova odbrana je klasifikacijska shema prema Standard ISO 14224 koji razvrstava modove kvara prema stupnju težine u *kritične*, *postupne* i *početne*. Tablica 8, prikazuje takvu podjelu kvarova prema podacima u gornjim tablicama.

Tablica 8. Razvrstavanje modova kvara prema stupnju težine za komponente hidrauličkog sustava.

| <i>Kritični kvar</i> | <i>Postupni kvar</i> | <i>Početni kvar</i> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <i>Hidraulička pumpa (radijalno klipne izvedbe)</i> | | |
| Radni tlak prenizak Pjenjenje ulja Pumpa je bučna Prevelika temperatura ulja Propuštanje ulja | Pjenjenje ulja Pumpa je bučna Propuštanje ulja | Pjenjenje ulja Pumpa je bučna Propuštanje ulja |
| <i>Hidraulički cilindar</i> | | |
| Brzina cilindra je premala Cilindar se ne giba ispravno Sila cilindra je premala Propuštanje cilindra | Cilindar se ne giba ispravno Propuštanje cilindra | Cilindar se ne giba ispravno Propuštanje cilindra |
| <i>Predupravljeni elektromagnetski 4/3 razvodnik, opružno centriran</i> | | |
| Razvodnik ne mijenja jedan ili oba razvodna položaja | | |
| <i>Elektromagnetski 4/2 razvodnik, povrat oprugom</i> | | |
| Razvodnik ne mijenja jedan ili oba razvodna položaja | | |
| <i>Deblokirajući nepovratni ventil oprugom (izvedba s klipom)</i> | | |
| Ventil ne zatvara ili otvara protok Propuštanje ventila | Propuštanje ventila | Propuštanje ventila |
| <i>Nepovratni ventil s oprugom (izvedba s klipom)</i> | | |
| Ventil ne zatvara ili otvara protok Propuštanje ventila | Propuštanje ventila | Propuštanje ventila |
| <i>Ventil za ograničenje tlaka (klipne izvedbe)</i> | | |
| Ventil na otvara ili zatvara protok Propuštanje ventila | Propuštanje ventila | Propuštanje ventila |

Nadalje, na brodu se u svrhu upravljanja održavanjem koristi računalni sustav održavanja "AMOS Maintenance" u koji odgovorne osobe na brodu unose zapise o kvarovima i izvedenim pripadnim korektivnim radnjama za otklanjanje neispravnosti na brodskim energetske i radnim sustavima. Način na koji su ti podaci zapisani i uneseni u program, u primjeru komponenti elektrohidrauličkog sustava upravljanja stražnjim ventilom za distribuciju usisanog materijala iz iskrcajne cijevi u skladište, prikazuje tablica 9.

Tablica 9. Podaci o kvarovima elektrohidrauličkog sustava upravljanja stražnjim ventilom za distribuciju usisanog materijala iz iskrcajne cijevi u brodsko skladište.

| Datum | Opis radnje | Komponenta | Vrijeme otklanjanja kvara (sati) | Zastoj |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------|
| 01.04.1996. | Zamijenjen hidraulički cilindar rezervnim. Propuštanje na brtvi klipa. Stari popravljen i stavljen u rezervu. | Hidraulički cilindar | | |
| 13.05.1996. | Zamijenjen hidraulički cilindar rezervnim. Stari popravljen i stavljen u rezervu. | Hidraulički cilindar | | |
| 25.01.2003. | Zbog kvara tijekom rada, ispitan sustav i pronađeno kako deblokirajući nepovratni ventil ne funkcionira. Ventil je zamijenjen novim. Nakon popravka, izvršena je provjera otvaranja i zatvaranja klapne koja opet radi normalno. | Deblokirajući nepovratni ventil (A) | 1 | Da |
| 29.07.2003. | Usljed radova oštećen hidraulički cilindar i isti zamijenjen novim. | Hidraulički cilindar | 2 | Da |
| 27.10.2003. | Hidraulički cilindar rastavljen zbog mjerenja istrošenosti kliznog ležaja klipnjače i kraja klipnjače. U isto vrijeme, zbog propuštanja zamijenjen deblokirajući nepovratni ventil (A). | Deblokirajući nepovratni ventil (A) | | |
| 29.02.2004. | Ponovno montiran hidraulički cilindar nakon rada zavarivanja na klapni. | Hidraulički cilindar | | |
| 17.06.2005. | Zbog većeg propuštanja ulja na brtvi klipa, promijenjen hidraulički cilindar s rezervnim. | Hidraulički cilindar | 2 | Da |
| 01.08.2005. | Zbog puknuća, zamijenjeno hidrauličko fleksibilno crijevo s novim. Svi spojevi i spojke zaštićene s mazivom trakom. Klapna testirana i radi ispravno. | Fleksibilno hidrauličko crijevo | 0,5 | Da |
| 07.08.2005. | Zbog samootvaranja klapne tijekom rada s dizalicom cijevi za punjenje, zamijenjen 4/3 razvodni ventil. Klapna testirana i radi ispravno. | Predupravljeni 4/3 elektromagnetski hidraulički razvodnik (52W881) | 0,5 | Da |
| 13.11.2005. | Zbog propuštanja brtve klipnjače, zamijenjen hidraulički cilindar. | Hidraulički Cilindar | 2 | Da |
| 26.10.2006. | Zbog samootvaranja klapne tijekom rada s ventilom protiv polucije, zamijenjen 4/3 razvodni ventil. Klapna testirana i radi ispravno. | Predupravljeni 4/3 elektromagnetski hidraulički razvodnik (52W881) | | |
| 01.11.2006. | Testirana dva rezervna deblokirajuća nepovratna ventila. Nepovratna strana testirana na 250 bar (ispravna). Upravljačka (pilot) linija testirana na 250 bara i uočeno malo propuštanje što znači kako cilindar ima zračnost. Ovo malo propuštanje nije uzrokovano neispravnošću ventila. | Deblokirajući nepovratni ventil (A) | | |
| 06.11.2006. | Drugi rezervni deblokirajući nepovratni ventil koji je propuštao, rastavljen i pronađeno kako unutrašnji element nema maticu koja drži nepovratni ventil pomoću opruge u ispravnom položaju. To je bio razlog što je ventil propuštao na oko 170 bar. Ovo ispitivanje izvršeno je na upravljačkoj liniji. Ventil se vratio u skladište. Nije se izvršilo popravak ventila, zbog nedostatka dijelova. | Deblokirajući nepovratni ventil (A) | | |
| 25.01.2007. | Zamijenjen 4/3 razvodni ventil koji nije imao tlačni upravljački signal što je uzrokovalo problem kod otvaranja klapne i u isto vrijeme otvaranje druge. Ugrađen je ispravan 4/3 razvodni ventil. Nakon ugradnje, klapna testirana i radi ispravno. | Predupravljeni 4/3 elektromagnetski hidraulički razvodnik (52W881) | | |
| 23.03.2007. | Zbog nemogućnosti otvaranje klapne zbog gubitka tlaka u cijevi, zamijenjen deblokirajući nepovratni ventil. Nakon ugradnje, klapna testirana i radi ispravno. | Deblokirajući nepovratni ventil (A) | 2 | Da |
| 27.05.2008. | Zamijenjen hidraulički cilindar zbog propuštanja ulja. Nakon ugradnje, klapna testirana i radi ispravno. | Hidraulički cilindar | | |
| 30.12.2008. | Zamijenjen hidraulički cilindar zbog propuštanja ulja. Nakon ugradnje, klapna testirana i radi ispravno. | Hidraulički cilindar | | |
| 26.01.2009. | Zbog lošeg stanja zamijenjena dva fleksibilna hidraulička crijeva hidrauličkog cilindra. | Fleksibilna hidraulička crijeva | | |
| 10.01.2009. | Popravljen hidraulički cilindar za rezervu. | Hidraulički cilindar | | |
| 26.01.2010. | Zbog lošeg stanja, zamijenjena dva fleksibilna hidraulička crijeva | Fleksibilno hidrauličko crijevo | | |

Iz tablice 9, vidljivo je kako iz podataka mogu isčitati pojedini modovi i uzroci kvara komponenti, izvedene korektivne radnje, te u nekim slučajevima podaci o vremenu popravka i

zastoji u radu. Podaci se isključivo odnose na kalendarsko vrijeme, tj. akumulirano vrijeme prikupljanja podataka, dok akumulirano vrijeme rada sustava nije poznato. Prema podacima, najveći udio, 9 zapisa ili 45% odnosi se na hidraulički cilindar. Zatim slijedi deblokirajući nepovratni ventil sa 5 zapisa ili 25% udjela, te predupravljeni 4/3 elektromagnetski razvodnik i fleksibilna crijeva sa po 3 zapisa, odnosno po 15 % udjela. Nadalje, iz podataka koji se odnose na unutrašnja i vanjska propuštanja protoka na komponentama, kao moda kvara, vidljivo je da se nakon dijagnostičiranja uzroka kvara komponenta smatra neispravnom i kao takva zamjenjuje se s rezervnom. Podaci o tim modovima kvara ne ukazuju na stupanj težine kvara, odnosno o tome da li se radi o kritičnom, postupnom ili početnom kvaru. Podaci također ukazuju na činjenicu kako se samo fleksibilna crijeva mogu smatrati nepopravljivim elementima koji se nakon kvara odbacuju i zamjenjuju novim. Ostale komponente se nakon kvara i zamjene nastoje popraviti na način da se zamjenjuju neispravni elementi (npr. brtva klipa), a kako bi se mogle koristiti kao rezervne (doknadne) komponente. U većini slučajeva se nakon popravka ne obavlja ispitivanje i provjera funkcionalnosti popravljene komponente radi sagledavanja kvalitete popravka.

Na osnovu podataka uz tablice 8, potrebno je svakom modu kvara dodijeliti pojedinačnu distribucija kvara u obliku neke od mjera pouzdanosti. Ukoliko se kao mjera pouzdanosti odredi funkcija učestalosti kvarova $\lambda(t)$, ista se može se dobiti direktno zbrajanjem funkcija učestalosti kvarova svakog moda kvara (prema stupnju težine), a kao prema izrazu (21). Podaci iz tablice 8, koristiti će se kod procjene pouzdanosti.

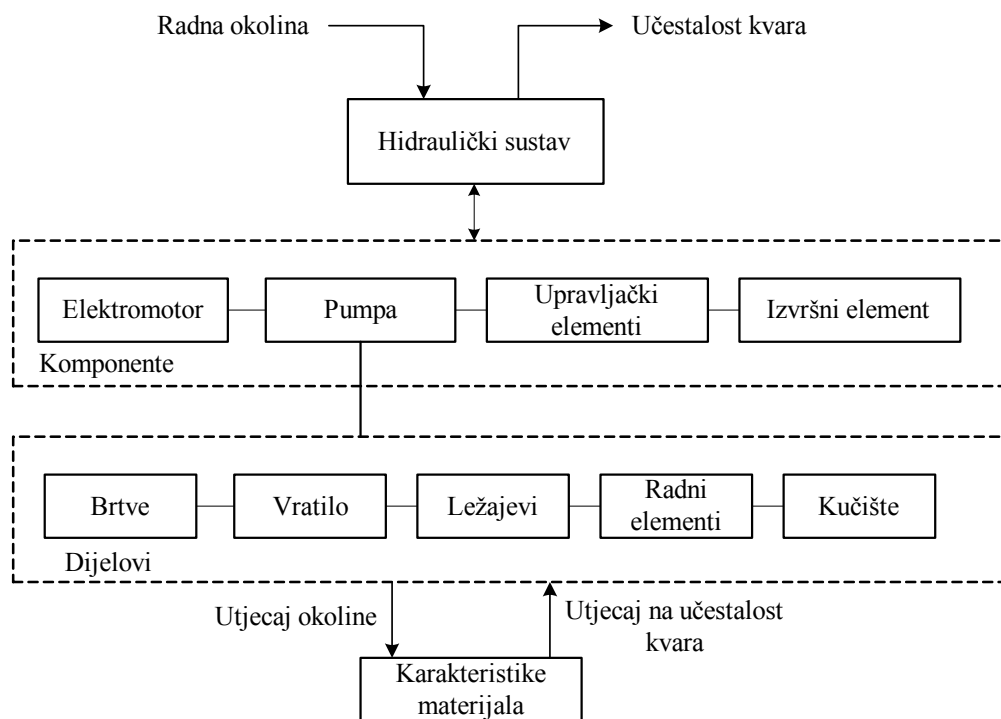
Pošto u dostupnih podataka iz tehničke dokumentacije proizvođača opreme nisu vidljivi podaci o učestalosti kvarova svakog moda kvara, a niti same komponente, tada ih je potrebno procijeniti korištenjem dostupnih generičkih baza podataka pouzdanosti sličnih komponenti. Pri tome je moguće koristiti i ograničeno ekspertno mišljenje, a radi procjene učestalosti kvarova svakog moda kvara ili komponente.

U ovom radu koristiti će se generički podaci sličnih komponenti iz OREDA priručnika, izdanje iz 2002 godine, te *Priručnik za postupke procjene pouzdanosti mehaničkih komponenti* (eng. *Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*). američke ratne mornarice, a koji je izdan od njihovog *Mornaričkog kopnenog ratnog centra* (eng. *Naval Surface Warfare Center*; kratica *NSWC*) iz 2010 godine.

Koncept priručnika OREDA objašnjen je u poglavlju 5.5.5 ovog rada.

Priručnik NSWC prikazuje novi pristup za određivanje karakteristika pouzdanosti i pogodnosti održavanja mehaničke opreme. Ovaj priručnik je razvijen je radi pomoći korisniku pri prepoznavanju modova kvara opreme i potencijalnih uzroka nepouzdanosti u ranoj fazi razvoja dizajna opreme, a kako bi se kvantitativno procijenio dizajn u pogledu pouzdanosti i pogodnosti održavanja, te odredili zahtjevi logističke podrške. Pristup korišten u ovom priručniku zasniva se na postavci kako je problem procjene pouzdanosti mehaničkih komponenti lakši na nižoj razini raščlambe komponente, jer su jasniji detalji dizajna koji utječu na pouzdanost. Nadalje, procjena životnog vijeka komponente može se izvršiti i razmatranjem specifičnog trošenja, erozije, zamora i drugih mehanizama kvara, načina podmazivanja, mogućih prisutnih nečistoća, opterećenja između površina u kontaktu, brzini klizanja, površina u kontaktu, tvrdoće površine i svojstva materijala. Vrlo često je teško sve te varijable zapisati u bazama podataka o učestalostima kvarova komponenti. Stoga, kod ovog priručnika koncept procjene pouzdanosti mehaničke opreme zasniva se na razmatranju njene izloženosti okolini i utjecaju raznih nivo naprezanja pod djelovanjem opterećenja. Dakle,

matematički izrazi pouzdanosti u ovom priručniku razmatraju parametre dizajna, ekstreme okoline i radna naprezanja kod procjene parametara pouzdanosti. Pri tome se razmatraju i svojstva materijala od kojih su dijelovi napravljeni. Kombinacija tih faktora omogućuje korištenje inženjerskih parametara dizajna za određivanje dizajniranog životnog vijeka komponente, te učestalosti (kao odabrane mjere pouzdanosti) i model kvarova za to vrijeme. Model kvarova zasnovan je ne prepoznavanju modova kvara i njihovih uzroka. Za svaki mod kvara određen je matematički izraz na osnovu podataka dizajna i eksperimentalnih podataka sadržanih u publiciranim tehničkim izvještajima i časopisima. Ovi izrazi su pojednostavljeni s faktorima koje utječu na pouzdanost, a na koje ukazuju eksperimentalni podaci. Na taj način utjecaj svakog faktora kvantitativno utječe na učestalost kvara svakog pojedinog dijela komponente. Ukupna učestalost kvara komponente je suma učestalosti svakog njezinog dijela, a koja je kvantitativno prikazana kao broj kvarova na sat ili broj kvarova po ciklusu. Postupci i izrazi su potvrđeni ili laboratorijskim ispitivanjem u kojima su točno poznate razine opterećenja ili inženjerskom analizom. Pod inženjerskom analizom podrazumijeva se korištenje inženjerskih izraza za modificiranje učestalosti kvara s obzirom za odgovarajuće naprezanje/čvrstoću i radnu okolinu kojima je izložena komponenta. Za svaki model učestalosti kvara komponente navedena su i njegova ograničenja. Koncept NSWC priručnika na primjeru hidrauličkog sustava prikazan je na slici 58.



Slika 58. Komponente i dijelovi hidrauličkog sustava.

Postupci u priručniku zajedno s izrazima, tablicama i dijagramima koriste se za procjenu učestalosti kvara osnovnih dijelova od kojih sastavljene komponente hidrauličkog sustava. Tako npr., za hidrauličku pumpu to se odnosi na procjenu učestalosti kvara svakog njezinog osnovnog dijela kao što su brtve, ležajevi, vratilo, radni elementi (klipovi, zupčanici itd.) i kučište. Izrazi uključuju i parametre za karakteristike materijala, radne uvjete i razine opterećenja osnovnih dijelova komponenti. Ova primjena na dijelove se zatim proširuje na komponente i konačno na cijeli sustav.

6.3.2 Ekspertno mišljenje

Procjena pouzdanosti je jedan od najvažnijih zadataka u inženjerstvu pouzdanosti i održavanja. Ta procjenjena veličina ima važnu ulogu u planiranju održavanja i logističke podrške za aktivnosti kao što planiranje rezervnih dijelova, zaliha, ocjenu osoblja i odabir proizvođača ili dobavljača.

Procjena pouzdanosti zahtijeva pouzdane i dostatne podatke o kvarovima opreme u radu. Naime, uzimajući činjenicu kako kvarovi koji se susreću tijekom rada opreme nesumnjivo utječu na utjecajne faktore pouzdanosti, inženjerstvo pouzdanosti je orijentirano na kvarove. S druge strane, osnovni cilj inženjerstva održavanja je smanjenje broja kvarova, Barle i Ban (2010). Kada su podaci dovoljno dobri tada se mogu koristiti grafičke metode ili standardne statističke tehnike (npr. regresija) kojima se dobivaju parametri distribucije kvarova.

Međutim, vrlo česti problem koji se susreće u praksi jest da je model pouzdanosti ograničen nedostatkom odgovarajućih podataka na temelju kojih se zasniva. Nedostatak odgovarajućih podataka nije samo svojstven novim komponentama ili sustavima već i onim koji su u radu. Kako bi se riješio taj problem i napravio model pouzdanosti mogu se koristiti podaci sakupljeni za slične komponente/sustave. S obzirom na činjenicu kako radni uvjeti obično nisu isti, procjena pouzdanosti komponenti/sustava koja se temelji samo na prethodnom iskustvu nije uvijek primjenjiva. U takvim situacijama vrlo koristan izvor informacija za procjenu pouzdanosti može biti ekspertno mišljenje (eng. *expert opinion*).

Pojam "*ekspertno mišljenje*" u tom smislu odnosi se na elicitaciju. Ekspertna elicitacija odnosi se na sustavni pristup sinteze subjektivne prosudbe eksperata na predmet kada je prisutna nesigurnost zbog nedostatnih podataka i kada su podaci nedostupni zbog fizičkih ograničenja ili nepostojanja izvora, Slottje, Sluijs, Knol (2009). Drugim riječima, elicitacija je proces formuliranja znanja osobe i vjerovanja u svezi jedne ili više dvojbjenih veličina u (zajedničku) distribuciju vjerojatnosti za te veličine. Obično je to subjektivna prosudba predstavljena kao subjektivna funkcija gustoće vjerojatnosti koja odražava uvjerenje mišljenja eksperta.

Kod procjene pouzdanosti, elicitacija je najčešće usmjerena na dva različita elementa ekspertnog mišljenja:

- *ekspertna prosuda* (eng. *expert judgment*) prethodnih (eng. *prior*) informacija koji se odnose na parametre modela pouzdanosti (npr. podaci o kvarovima ili učestalost kvarova),
- *ekspertno znanje* (eng. *expert knowledge*) u svezi zavisnosti strukture komponente/sustava radi razumijevanja procesa.

Ekspertnu prosudbu Stapelberg (2009) definira kao izraz informativnog mišljenja zasnovano na znanju i iskustvu, dobivenog od eksperta za odgovarajući tehnički problem. Eksperti su pak pojedinci koji imaju stručna znanja u predmetnom području i koji su priznati kao stručnjaci za rješavanje određenih tehničkih problema. Ekspertna prosudba se koristi u mnogim poljima ljudske djelatnosti pa tako i u inženjerstvu pouzdanosti kod analiza pouzdanosti, rizika i sigurnosti komponenti/sustava. Primjeri primjene ekspertne prosudbe kod analiza pouzdanosti su:

- vjerojatnost pojavljivanja događaja (kvarova),
- odluka o tome koje statističku metode koristiti,

- odluka o tome koje varijable i parametre unijeti u statističku analizu,
- odluka o tome koju bazu podataka koristiti,
- pojednostavljena korištena u odabranom modelu pouzdanosti,
- odluku koje su funkcije distribucije odgovarajuće,
- opis izvora informacija u svezi bilo kojih gornjih odgovora.

Ekspertna prosudba može biti izražena kvantitativno u obliku podataka za vjerojatnost, procjenu, težinske faktore, parametre distribucije ili fizikalne veličina. Alternativno, ekspertna prosudba može se izraziti i kvalitativno u obliku tekstualnih opisa varijabli ili izraza za npr. minimalni životni vijek, karakteristični ili korisni životni vijek, uhadavanje itd. Međutim, kvalitativna ekspertna prosudba mora se kvantificirati kako bi se isto mogla razmatrati kao podaci dostupni od testova ili opažanja. Stapelberg (2009) navodi na koje načine se može kvalitativna ekspertna prosudba kvantificirati.

Postupci ekspertne elicitacije moraju biti takve da minimiziraju svojstvenu pristranost u subjektivnoj prosudbi i vezane greške u izlazima elicitacije. Detaljan pregled literature kod korištenja ekspertnog mišljenja proveo je Ouchi (2004) na primjeru korištenje u ekspertnog mišljenja u probabilističkoj analizi rizika. Više autora, a kako navodi Ouchi (2004), dali su formalne protokole, opsežne postupke i smjernice za proces elicitacije i analize nesigurnosti podataka iz tog procesa.

Vrlo često se kod analize pouzdanosti zahtijeva interdisciplinarni pristup u kojem sudjeluju više eksperata, a sve zbog toga kako bi se umanjila greška. Međutim, eksperti posjeduju vrijedno znanje, npr. o pouzdanosti sustava/komponente kao predmeta analize, ali koje i ima određenu razinu nesigurnosti. Stoga, ekspertne individualne procjene su nesigurne veličine izražene kao subjektivne vjerojatnosti. Očito je kako treba koristiti informacije prikupljene od više od jednog eksperta, a sa ciljem smanjenja greške. U literaturi, ovaj proces se naziva agregacija ekspertnog mišljenja (eng. *aggregation of expert opinion*).

Nekoliko metodologija o agregaciji ekspertnog mišljenja opisane su u literaturi. Agregaciju ekspertnog mišljenja na primjeru procjene pouzdanosti za opskrbu rezervnih dijelova i procjenu rizika opisuju Kumar i Hinds (2005). U tom radu oni su koristeći linearni agregacijski model (Cook, 1991) dali procjenu parametara distribucije vremena kvara. Metodologiju ekspertnog mišljenja u pouzdanosti na primjerima elicitacije i agregacije ekspertnog mišljenja za analizu pouzdanosti komponente (željezničkih šina) koristeći Weibull-ovu distribuciju, opisali su Campodonico i Singpurwalla (1992). Metodologija je bazirana na Bayesovom okviru (Lindle, 1983).

Elicitacija i agregacija ekspertnog mišljenja može se podijeliti u dvije grupe (Clemen i Winkler, 1999) i to u behaviorističke i matematičke pristupe.

Behavioristički pristupi (eng. *behavioral approaches*) usmjereni je na stvaranje neke vrste grupnog konsenzusa među ekspertima, a koji obično međusobno komuniciraju i razmjenjuju svoje procjene. Jedna od najpoznatijih metoda ponašajnog pristupa je Delphi tehnika koja je razvijena 1950 godine. Kod ove metode eksperti anonimno prosuđuju procjene izrađene od strane drugih eksperata. Svakom ekspertu se zatim daje prilika da ponovo procijeni njegovu početnu procjenu. Obično se postupak ponavlja nekoliko puta sve dok se ne postigne manji opseg ekspertnog mišljenja. Sljedeća dobro poznata metoda je metoda nominalnih grupa kod koje eksperti međusobno diskutiraju o njihovim procjenama u kontroliranom okruženju (Delbecq, 1975). Iako metoda grupnog konsenzusa može pomoći

identificirati greške eksperata i nesuglasice tijekom procesa, ne postoje formalna pravila koja se mogu primijeniti kada je potrebno uskladiti razlike i postići konsenzus među različitim ekspertima.

U matematičkom pristupu, koje općenito daju točnije rezultate, ekspertne individualne procjene nesigurne veličine su izražene kao subjektivne vjerojatnosti. Procjene se zatim kombiniraju pomoću raznih matematičkih metoda od strane donosioca odluka nakon njihove elicitaracije. U pregledu literature Ouchi (2004) razmatra tri već dobro potvrđena pristupa matematičkog modeliranja agregacije ekspertnog mišljenja i to: neBayesovu aksiomatsku metodu, Bayesov model i model psihološkog stupnjevanja.

Sagledavajući gore navedeno, vrlo fleksibilna tehnika za kombiniranje ekspertnog mišljenja i kvantitativnih podataka, te agregaciju ekspertnog mišljenja je Bayes-ov pristup. Kod ovog pristupa eksperti prvo procjenjuju prethodnu distribuciju za inicijalnu procjenu pouzdanosti. Procjena se obavlja na osnovu prethodnog znanja (npr. podaci o kvarovima iz baza podataka). Nakon što stvarni podaci budu dostupni, ova metoda omogućuje ekspertima i donosiocima odluka nadogradnju njihovih procjena.

6.3.3 Bayesova metoda procjene pouzdanosti

U inženjerstvu pouzdanosti, Bayesova metoda za modeliranje pouzdanosti komponente/sustava daje mogućnost uzimanja u obzir prethodnog znanja (npr. baze podataka) i realnih dostupnih podataka pouzdanosti o komponentama dobivenih tijekom njenog rada. Na osnovi tih informacija izračunava se odgovarajuća nesigurnost pouzdanosti komponente, a koja se zatim može modificirati koristeći ekspertno mišljenje. Na taj način razvoj modela pouzdanosti komponente postaje proces učenja, a znanje se kontinuirano nadograđuju kako sve više informacija postaje dostupno, Barle i Ban (2010).

Bayesov proces logičkog zaključivanja zasniva se na subjektivnom ili osobnom pogledu na vjerojatnost. Primarni cilj Bayesove metode je sumarizacija dostupnih podataka u svezi nepoznatih parametara koje definiraju statističke modele preko opisa funkcija gustoće vjerojatnosti. Kod ove metode analize pouzdanosti, statistički model se sastoji od dva dijela: funkcije parametara statističkog modela (eng. *likelihood function*), $f(x|\varphi)$ i prethodne, tj. *prior* distribucije, $\pi_0(\varphi)$. Pri tome je x veličina slučajne varijable X dobivena kao rezultat nekog zapažanja s funkcijom gustoće vjerojatnosti $f(x, \varphi)$, a φ je veličina slučajne varijable Φ u prostoru Ω s gustoćom vjerojatnosti $\pi_0(\varphi)$. Funkcija gustoće vjerojatnosti $\pi_0(\varphi)$ izražava mišljenje u svezi događaja veličine φ slučajne varijable Φ , prije nego se poduzme bilo kakvo zapažanje. Stoga se ova funkcija gustoće naziva prethodna ili priori gustoća od Φ i predstavlja prethodno znanje o parametrima x i φ . Sukladno tomu zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti slučajnih varijabli $X=x$ i $\Phi=\varphi$ je dana izrazom:

$$f(x, \varphi) = f(x|\varphi) \cdot \pi_0(\varphi) \quad (38)$$

Funkcija $f(x|\varphi)$ obično se izvodi iz distribucije uzorka (eng. *sampling distribution*) od podataka koji se razmatraju i pretpostavlja se kao nepromjenjiva. Kada se pribave podaci, npr. o kvarovima, tada se distribucija uzorka smatra kao funkcija nepoznatih parametara. Kod Bayesove analize, funkcija $f(x|\varphi)$ i priori distribucija $\pi_0(\varphi)$ su osnova za procjenu parametara i zaključak.

Bayesov pristup može se okarakterizirati kao proces nadogradnje informacije za parametar φ . Mehanizam za nadogradnju koji matematički kombinira prijašnje znanje sa podacima je Bayesov teorem koji u ovom slučaju je dat izrazom:

$$\pi_1(\varphi|x) = \frac{f(x, \varphi)}{f(x)} = \frac{f(x|\varphi) \cdot \pi_0(\varphi)}{\int f(x|\varphi)\pi_0(\varphi)d\varphi} \quad (39)$$

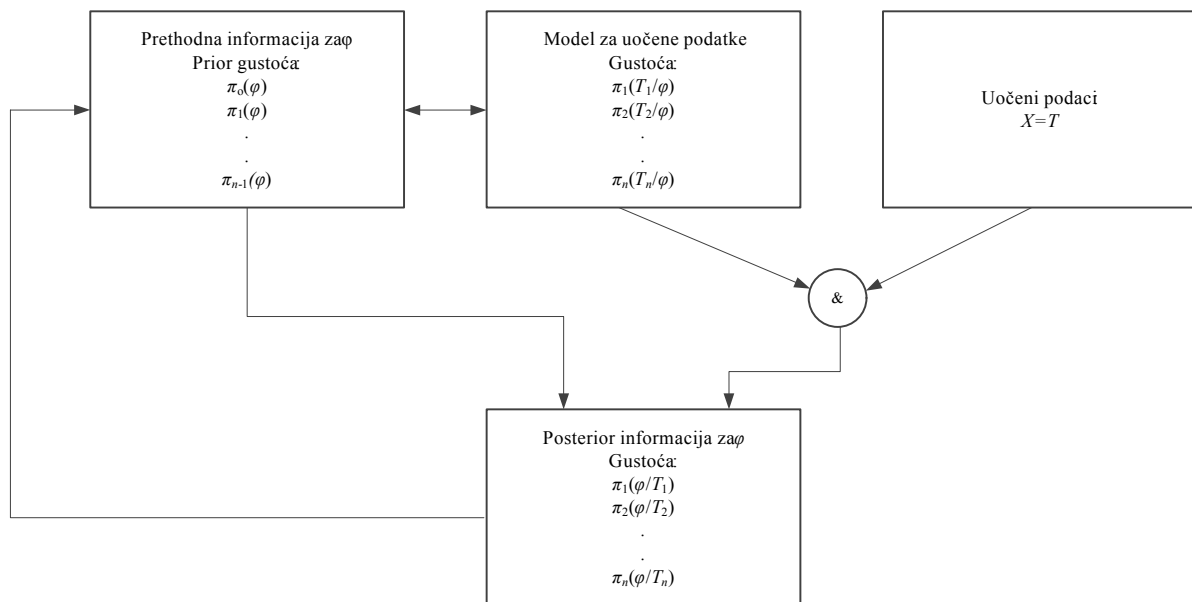
odnosno općenito:

$$p(\text{parametar}|\text{podaci}) = \frac{p(\text{podaci}|\text{parametar}) \cdot p(\text{parametar})}{p(\text{podaci})} \quad (40)$$

gdje je $\pi_1(\varphi|x)$ naknadna ili *posterior* distribucija, a $f(x)$ marginalna distribucija gustoće vjerojatnosti slučajne varijable X , tj., podataka zapažanja. Funkcija $f(x)$ može se prikazati kao normalizirana konstanta, tj. konstanta čije je uloga osigurati da je funkciju $\pi_1(\varphi|x)$ točna funkcija gustoće vjerojatnosti. Prema tomu, za općenitu strategiju nadogradnje, posterior distribucija je uvijek proporcionalna umnošku funkcije gustoće parametara modela $f(x|\varphi)$ i *prior funkciji gustoće* $\pi_0(\varphi)$:

$$\pi_1(\varphi|x) \propto f(x|\varphi) \cdot \pi_0(\varphi) \quad (41)$$

Dakle, kod Bayes-ov procesa nadogradnje (*slika 59*) prvo je potrebno odredi prior distribuciju $\pi_0(\varphi)$ za Φ , prije bilo kojeg zapažanja slučajne varijable X (npr. kvar).



Slika 59. Bayes-ov proces nadogradnje.

Nakon što se uoči prvi kvar, prior distribucija $\pi_0(\varphi)$ se nadogradi u posterior distribuciju $\pi_1(\varphi|x)$ za $X=x$. Na taj način Proces se može ponavljati pri čemu se podaci o kvarovima označavaju po kronološkom redu zapažanja kao T_1, T_2, \dots, T_n . Pri toma posterior distribucija

prijašnjeg kvara postaje prior sljedećeg kvara. Nakon što je zapažen n -ti kvar, prior distribucija $\pi_{n-1}(\varphi)$ se nadograđuje u posterior distribuciju za $\Phi \pi_n(\varphi|T)$.

Iz izraza (39) proizlazi kako je kod procjene nepoznatog parametra φ prvo potrebno riješiti integral u nazivniku. Zajedničko funkcija gustoće vjerojatnosti slučajnih varijabli, dana izrazom (38), u zavisnosti o odabira određene prior distribucije za zadanu distribuciju uzimanja uzorka, posterior distribucija ima isti algebarski oblik kao i prior. Takva prior distribucija naziva se *konjugirani prior*. Kod jednostavnijih problema, konjugirane prior distribucije mogu napraviti posterior analizu jednostavniju zato što se eliminira numeričko određivanje nazivnika u izrazu (52). Konjugirane priore distribucija navodi Barle i Ban (2012) i Hamada i dr. (2008). Ukoliko se prior distribucija ne može odrediti jednostavno ili pak ukoliko se konjugirani prior koji daje adekvatni prikaz informacija prije zapažanja ne može pronaći, tada se umjesto konjugiranog priora mogu koristiti nekonjugirani priori za čije se rješavanje koriste numeričke metode kao što je *MCMC* (Markov Chain Monte Carlo), Hamada i dr (2008) i Barle i Ban (2010).

Prior distribucija sadrži sve poznate informacije za parametar φ . Ukoliko se pretpostavlja kako se ima vrlo malo znanja o parametru φ , odnosno kada prior distribucija za φ nije dostupna, tada se može koristiti neinformativna prior distribucija. Postoje više formalizama za razvoj neinformativne prior distribucije. Jedan od najčešćih korištenih je Jeffrey-jevo pravilo koje rezultira distribucijom zvanom Jeffrey-ijev, Hamada i dr (2008). Drugi pak formalizam opisuje Rausand i Høyland (2004).

Ukoliko se posjeduje dovoljno informacija o parametrima modela prije nego se počnu sakupljati podaci tada se takva prior distribucija naziva informativna prior distribucija. Kod problema pouzdanosti. Kod rješavanja problema pouzdanosti postoje šest opsežnih izvora informacija za konstrukciju prior distribucije, Hamada i dr (2008):

- teorija fizike/kemije o kvarovima,
- računska analiza,
- prijašnji rezultati testiranja,
- generičke baze podataka,
- prijašnje iskustvo s sličnim komponentama/sustavima,
- ekspertno mišljenje.

U mnogim situacijama cilj je analize pouzdanosti predvidjeti veličine budućeg uzorka, npr. budućih kvarova. Tada se zaključak o budućim kvarovima zamjenjuje s nepoznatim parametrima s aproksimiranom srednjom vrijednošću $E(\varphi)$, Barle i Ban (2009):

$$\pi_1(x|\varphi) \approx f(x|\hat{\varphi}) \quad (42)$$

što općenito dovodi do dobre aproksimacije u prisutvu dovoljno podataka. Unutar Bayes-ovog okvira, buduće kvarove je ispravno predvidjeti sa predviđenom prior

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x|\varphi)\pi_0(\varphi)d\varphi \quad (43)$$

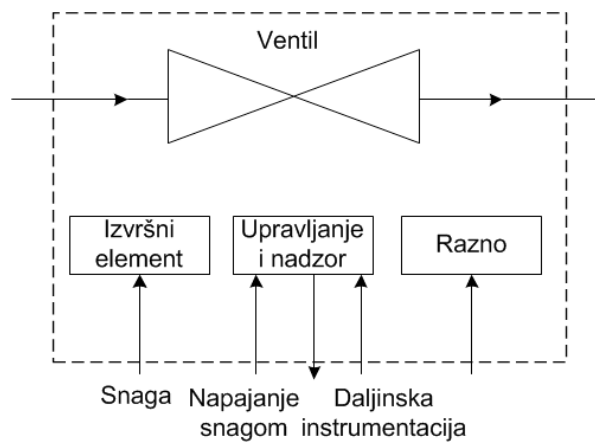
ili posterior distribucijom,

$$f(x|T) = \int_{\Omega} f(x|\varphi)\pi_1(x|T)d\varphi \quad (44)$$

Pošto je jedina razlika između dva modela predviđanja kornološki red, distribucija koja sadrži više podataka (44) koristi se za predviđanje.

6.3.4 Određivanje učestalosti kvarova komponenti

Pregledom podataka u OREDA priručniku očito je kako nema podataka pouzdanosti za hidrauličke komponente, tj. hidrauličke ventile i pumpe i ostalu opremu. Izuzetak je ventil s zasunom čija je određena granica prikazana na slici 60.



Slika 60. Definicija granice ventila u OREDA priručniku.

Prema Oreda priručniku, ventil se sastoji od sljedećih podjedinica: ventila sa kućištem, izvršnog elementa, upravljanja i nadzora, te razno. Svaka podjedinica ima svoju funkciju neophodnu za obavljanja glavne funkcije ventila. Ventil uključuje spojeve na cjevovod (ulazni i izlazni priključak i brtve). Podjedinice se dalje dijele podnizove održavanih elemenata na kojim se obavljaju zahvati preventivnog održavanja (tablica 10).

Tablica 10. Održavani elementi ventila.

| VENTILI | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Ventil | Izvršni element | Upravljanje i nadzor | Razno |
| <ul style="list-style-type: none"> • Poklopac • Zaporni element • Prirubnica • Drugi dijelovi ventila • Brtvenica • Brtve • Sjedište • Tijelo ventila | <ul style="list-style-type: none"> • Kućište • Membrana • Elektromotor • Prijenos • Indikator • Pokazivač položaja • Drugi dijelovi izvršnog elementa • Upravljački razvodni ventil • Klip • Pozicioner • Brtva • Opruga • Vreteno | <ul style="list-style-type: none"> • Izvršni element • Kabeli i priključna kutija • Upravljačka jedinica • Instrumenti • Nadzor • Unutrašnje napajanje • Ventili | <ul style="list-style-type: none"> • Drugo |

Upravljački elektromagnetski razvodni ventil za hidrauličko upravljanje uključen je kao održavani element unutar podjedinice "Izvršni element".

Popis modova kvarova prema OREDA priručniku za ventile su:

- abnormalno očitavanje instrumenata,
- kašnjenje rada,
- vanjsko propuštanje-procesni medij,
- vanjsko propuštanje-radni medij,
- neispravnost kod zatvaranja na zahtijev,
- neispravnost kod otvaranje na zahtijev,
- visoki izlaz,
- unutrašnje propuštanje,
- mali izlaz,
- manje važni problemi u radu,
- drugo,
- začepljenje,
- lažan rad,
- strukturni nedostaci,
- nepoznato,
- propuštanje ventila u zatvorenom položaju.

Iz Oreda priručnika mogu se koristiti podaci za sljedeće komponente elektrohidrauličkog sustava upravljanja ventilom za raspodjelu usisane smjese u brodsko skladište:

- hidraulički cilindar, odnosno za njegove održavane elemente klip, drugi dijelovi izvršnog elementa i brtve (statičke),
- elektrohidraulički 4/3 glavni razvodnik kao održavan element upravljački ventil,
- deblokirajući nepovratni ventil ukoliko se sagledava da je mod kvara "propuštanje ventila u zatvorenom položaju" posljedica propuštanja istog.

Ukoliko se od elementa hidrauličkog cilindra sagledava klip, tada se relativni udio klipa kao održavanog elementa u odnosu na ukupnu učestalost kvara može odrediti iz tablice podataka "Održavani elementi prema modu kvara" (eng. *Maintainable item versus failure mode*) i prema podacima iz tablice podataka pouzdanosti za ventile s zasunom. Klip je odabran iz razloga što se prema podacim o kvarovima s broda (tablica 8) najviše odnose na hidraulički cilindar. Prema podacima iz tablice "Održavani elementi prema modu kvara" ukupni postotak udjela klipa u odnosu na sve modove kvara iznosi 0,83 %. Pri tome se taj postotak odnosi samo mod kvara "neispravnost kod otvaranje na zahtijev. Uzrok ovog moda kvara može biti istrošenost brtve klipa, klipa ili košuljice cilindra. Podaci iz tablice podataka pouzdanosti za ventil s zasunom, a koji se odnose na mod kvara "neispravnost kod otvaranje na zahtijev" (kritični kvar), prikazani su u tablici 11.

Tablica 11. Podaci pouzdanosti za ventil s zasunom.

| Taksonomski broj 4.3.5 | | Komponenta Upravljačka i sigurnosna oprema Ventili zasun | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------|---------|------------------|-------|-------|--------------------------|----------------------------|-------|-------|
| Populacija 177 | Instalacija 77 | Akumulirano vrijeme u radu (10 ⁶ sati) | | | | | Broj zahtijeva | | | |
| | | Kalendarsko vrijeme* | | Vrijeme u radu □ | | | | | | |
| | | 6,6856 | | 3,8523 | | | | | | |
| Mod kvara | Broj kvarova | Učestalost kvara (na 10 ⁶ sati) | | | | | Aktivno vrijeme popravk. | Popravak (sati po čovjeku) | | |
| | | Donji | Srednja | Gornji | SD | n/τ | | Min. | Sred. | Maks. |
| Kritični | 70 | 0,01 | 7,67 | 31,30 | 11,84 | 10,47 | 8,9 | 1,0 | 9,9 | 66,0 |

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|-----|------|------|
| Neispravnost kod otvaranja na zahtijev | 24* | 0,00 | 3,81 | 16,47 | 6,39 | 3,59 | 5,7 | 1,0 | 12,0 | 60,0 |
| | 24□ | 7,51 | 66,05 | 173,11 | 54,53 | 6,23 | | | | |
| Svi modovi | 240* | 7,46 | 32,77 | 72,77 | 20,84 | 35,90 | 5,7 | 1,0 | 7,2 | 80,0 |
| | 240□ | 185,60 | 401,99 | 685,32 | 154,65 | 62,30 | | | | |

Iz tablice 11, vidljivo je kako se taj mod kvara odnosi smo na kritične kvarove, a koji čine 10% ili 24 kvara od ukupno 240 kvarova svih modova kvara. Od ukupno 24 kvara na klip se odnosi 8,3 % ili 2 kvara.

Ukoliko se za pripadajući mod kvara uzme srednja vrijednost učestalosti kvara od $\lambda=3,81 \cdot 10^{-6}$ [sat⁻¹] za kalendarsko vrijeme od $6,6856 \cdot 10^6$ [sat], tada se dobiju podaci pouzdanosti za klip koji su prikazani u tablici 12.

Tablica 12. Podaci pouzdanosti za klip hidrauličkog cilindra.

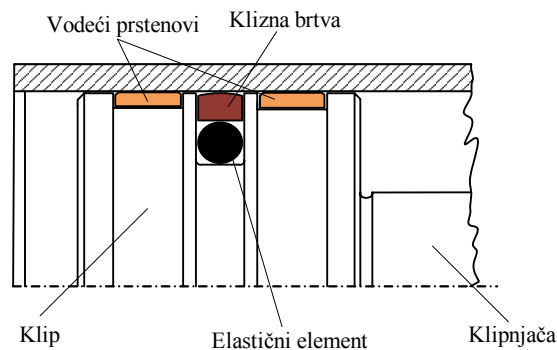
| | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KOMONENTA: Hidraulički cilindar | |
| Održavani element: Klip | |
| MOD KVARA: Neispravnost kod otvaranje na zahtijev | |
| Akumulirano kalendarsko vrijeme u radu | $\tau=6,6856 \cdot 10^6$ [sat] |
| Broj kvarova | 2 |
| Učestalost kvara (srednja vrijednost) | $\hat{\lambda} = 0,316 \cdot 10^{-6}$ [sat ⁻¹] |
| Srednje vrijeme do kvara-MTTF | $MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{0,316 \cdot 10^{-6}} = 3164556,96$ [sat ⁻¹] \Rightarrow $MTTF = 361,25$ [god] |

Dobiveni podaci usporediti će se podacima koji će se izračunati prema konceptu NSW priručnika. Pri tome će se izračunati učestalost kvara za brtvu klipa čija neispravnost može dovesti intezivnog propuštanja i pojave moda kvara ventila "neispravnost kod otvaranje na zahtijev". Prema NSCW priručniku primjeri mogućih uzroka i mehanizmi kvara moda kvara "intezivno curenje" kod dinamičkih brtvi su:

- istrošenje kao uzrok, dok mehanizmi kvara mogu biti loša površinska hrapavost, prisutnost nečistoća na kliznim površinama, neadekvatno podmazivanje, pretjerana brzina itd.,
 - ispucalost kao uzrok, dok mehanizmi kvara mogu biti prisutnost nečistoća, na kliznim površinama, nekompatibilnost materijala brtve i fluida, toplinska degradacija materijala brtve i dugi period nekorištenja,
 - curenje kao uzrok, dok mehanizmi kvara mogu biti nedovoljni stisak brtve i strani materijal na kliznoj površini,
 - deformacija površine brtve kao uzrok, dok mehanizmi kvara mogu biti pretjerani tlak na brtvi, strano tijelo zarobljeno između kliznih površina, nedovoljno podmazivanje, suženje brtve.
- itd.

Dvoradni hidraulički cilindri rade pod tlakom s obje strane cilindra i stoga zahtijevaju brtvljenje na obje njegove strane. Brtva klipa spada u grupu dinamičkih brtvi čija je brtvena površina okomita i u kontaktu sa površinom klipa i klizajućom površinom košuljice cilindra radi postizavanja dinamičkog brtvljenja. Dizajniranje hidrauličkih dinamičkih brtvi zahtijeva pažljivu pozornost na interakciju dinamičke brtve i principe tribologije kako bi se osigurao dugi radni vijek, ispravna funkcija brtvljenja, minimalno trošenje, malo trenje i siguran rad. Profil brtve klipa je simetričan i ima identičnu funkciju brtvljenja u oba smjera gibanja klipa. Obično se brtva klipa dvoradnog cilindra (slika 61) sastoji od klizne brtve (prstena) i elastičnog gumenog elementa. Deformacijom elastičnog elementa osigurava se prikladna sila koja kliznu brtvu drži u dinamičkom brtvenom kontaktu s košuljicom cilindra. Dinamičke

brtve izrađuju se od prirodne ili sintetičke gume, polimera i elastomera, metalnih smjesa i specijalnih materijala.



Slika 61. Brtljenje klipa dvoradnog hidrauličkog cilindra.

Vodeći prstenovi preuzimaju radijalna opterećenja sila koje djeluju na cilindar i vode klip unutar otvora cilindra. Vodeći prstenovi najčešće se izrađuju polimernih materijala čime se sprječava kontakt metal na metal između klipa i košuljice cilindra.

Prema NSWK priručniku, model učestalosti kvara brtve klipa kao dinamičke brtve, određen je izrazom:

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} \cdot C_Q \cdot C_F \cdot C_v \cdot C_T \cdot C_N \quad (45)$$

gdje je:

λ_{SE} – učestalost kvara dinamičke brtve, 10^{-6} sat,

$\lambda_{SE,B}$ – osnovna učestalost kvara dinamičke brtve, $22,8 \cdot 10^{-6}$ sat,

C_Q – faktor koji uzima u obzir utjecaj prihvatljivog propuštanja na učestalost kvara,

C_F – faktor koji uzima u obzir utjecaj površinske hrapavosti na učestalost kvara,

C_v – faktor koji uzima u obzir utjecaj viskoznosti radnog fluida na učestalost kvara,

C_T – faktor koji uzima u obzir utjecaj temperature površine brtve na učestalost kvara,

C_N – faktor koji uzima u obzir utjecaj nečistoća na učestalost kvara,

Kod izračuna faktora u izrazu (45), moraju se koristiti jedinice prema anglosaksonskom sustavu mjera iz razloga što su empirijski izrazi za njihovo izračunavanje prilagođeni tim jedinicama.

Određivanje prihvatljive razine propuštanja (gubitaka) protoka na brtvi klipa obično se mogu dobiti iz tehničkih podataka koje daju proizvođači opreme. Tako npr., proizvođač hidrauličke i pneumatske opreme *Parker Hannifin Corporation* navodi kako se prihvatljiva razina propuštanja kod hidrauličkih cilindara na brtvi klipa kreće u rasponu od 0,0163 do 0,0491 lit/min. Prihvatljiva razina prije svega funkcija radnih uvjeta. U ovom primjeru uzeti će se gornja granica iz razloga što je očito kako se prema podacima s broda zamijena brtve klipa obavlja kada se uoči mod kvara koji ukazuje na veća propuštanja na brtvi klipa. Prema NSWK priručniku, faktor C_Q određuje se pomoću izraza:

$$C_Q = \frac{0,055}{Q_l} = \frac{0,0163 \cdot 0,055}{0,0491} = 0,018 \quad (46)$$

gdje je Q_l prihvatljiva razina gubitka protoka na brtvi klipa u lit/min.

Hrapavost kontaktnih površina ima značajan utjecaj na funkciju i radni vijek dinamički brtvi. Preporuke za mjere i veličinu površinske hrapavosti košuljice hidrauličkih cilindra daju proizvođači opreme i obično se kreće se u rasponu srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a od 0,25 μm do 0,5 μm . U NSWC priručniku je za mjeru površinske hrapavosti korišteno srednje kvadratno odstupanje profila R_q (*RMS; Root-Mean-Square roughness*). Kao referentna veličina pretpostaviti će se $R_q=0,55 \mu\text{m}$. Faktor C_f može se izračunati pomoću izraza:

$$C_f = \frac{1}{2^{((10-R_q)/38)}} = \frac{1}{2^{((10-\frac{0,55}{0,0254})/38)}} = 1,237 \quad (47)$$

Viskozitet fluida ovisi o temperaturi i tlaku. Viskoznost hidrauličnih ulja s porastom temperature naglo pada dok se povećava s rastom tlaka. Zbog minimalnih zračnosti između kontaktnih površina, sukladno Hagen-Poiseuille-ovom zakon protok uslijeg gubitaka istjecanja u svrhu podmazivanja kontaktnih površina je laminaran i obrnuto proporcionalan viskoznosti hidrauličkog ulja. Prema NSWC priručniku, korekcijski faktor C_μ koji uzima u obzir utjecaj viskoznosti radnog fluida na učestalost kvara određuje se pomoću izraza:

$$C_\mu = \frac{\mu_0}{\mu} \quad (48)$$

gdje je:

μ_p - dinamička viskoznost fluida na određenoj temperaturi, Pa·s

μ_0 - dinamička viskoznost, $8,273 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, ($2 \cdot 10^{-8}$ lbf·min/in²)

Kao radni fluid koristi se mineralno hidrauličko ulje Shell Tellus S3 V46 (ISO VG 46). Njegove eksperimentalno utvrđene vrijednosti kinematičke viskoznosti na tri temperature i atmosferskom tlaku, te gustoća na temperaturi od 15°C date su u tablici 12.

Tablica 13. Kinematička viskoznost hidrauličkog ulja Shell Tellus S3 V46 na tri različite temperature i atmosferskom tlaku i gustoća ulja na temperaturi od 15°C.

| Mineralno ulje Shell Tellus S3 V46 | |
|----------------------------------------|------|
| v_{-20} (-20°C) [mm ² /s] | 2200 |
| v_{40} (40°C) [mm ² /s] | 46 |
| v_{100} (100°C) [mm ² /s] | 8,4 |
| ρ (15°C) [kg/m ³] | 870 |
| IV | 162 |

Pri radnoj temperaturi od 65°C, kinematička viskoznost iznosi prema v - T dijagramu iznosi $v_{65}=20 \text{ mm}^2/\text{s}$. Gustoća ulja pri istoj temperaturi i atmosferskom tlaku iznosi:

$$\rho_{65} = \rho_{15}(1 - \alpha_{15} \cdot \Delta T) = 870 \cdot [1 - 0,0007 \cdot (65 - 15)] = 839 \text{ kg/m}^3 \quad (49)$$

gdje je:

ρ - gustoća ulja na određenoj temperaturi, kg/m³

ρ_{15} - gustoća ulja na 15°C, kg/m³

α_{15} - toplinski koeficijent rastezanja, °C⁻¹,

ΔT - razlika temperatura ulja, °C

Dinamička viskoznost ulja na temperaturi od 65°C i atmosferskom tlaku iznosi:

$$\mu_{65} = \nu_{65} \cdot \rho_{65} = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 839 = 0,01678 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (50)$$

Uvrštenjem dobivene dinamičke viskoznosti ulja pri temperaturi od 65°C u izraz (48) dobiva se korekcijski faktor C_μ :

$$C_\mu = \frac{\mu_0}{\mu_{65}} = \frac{8,273 \cdot 10^{-3}}{0,01678} = 0,493 \quad (49)$$

Radna temperatura ima određeni utjecaj na proces starenja brtvi izrađenih od elastomera, polimera i umjetne gume. Povišena temperatura iznad prihvatljive granice dovodi do kontinuiranog procesa vulkanizacije ili stvrdnjavanja materijala. Time se značajno mijenjaju početne karakteristike brtvi. Povišena temperatura može uzrokovati povećanje tvrdoće i lomljivosti, gubitka elastičnosti i intezivnog habanja. Promjena tih karakteristika ima krajnji utjecaj na učestalost kvara komponente te se toga mora uzeti obzir. Prema NSWK priručniku faktor C_T može se odrediti pomoću izraza:

$$C_T = \frac{1}{2^t} \quad (50)$$

gdje je:

$$t = \frac{(T_R - T_0)}{18} \text{ za } (T_R - T_0) \leq 40^\circ \text{F} \quad (51)$$

Ukoliko je $(T_R - T_0) > 4,4^\circ \text{C}$ (40°F) tada je $C_T=0,21$.

U gornjim izrazima temperatura T_R odnosi se na dizajniranu temperaturu materijala brtve, a temperatura T_0 na radnu temperaturu brtve. Ukoliko se kao materijal brtve koristi fluorocarbon (FKM) njegova otpornost na temperaturu je do temperatura od 246°C (475 °F), tada je očito kako će razlika $(T_R - T_0)$ biti veća od 4,4°C (40 °F), te je stoga $C_T=0,21$.

Habanje i efikasnost brtvljenja ovisi od karakteristika okolnog radnog fluida. Prisutnost abrazivnih čestica u radnom fluidu za vrijeme rada ima snažni utjecaj na otpornost brtve na habanje. Stoga, intezitet habanja povećava se s povećavanjem količine abrazivnih čestica kao posljedica onečišćenja radnog fluida bilo iz okoline ili samog sustava. Prema NSWK priručniku, korekcijski faktor C_T može se odrediti pomoću izraza:

$$C_N = \left(\frac{C_O}{C_{10}} \right)^3 \cdot N_{10} \cdot LPM_R \quad (52)$$

gdje je:

C_O – veličina filtriranja u sustavu, μm ,

C_F – standardna veličina filtriranja, 10 μm ,

N_{10} – količina čestica, čestica/sat,

LPM_R – protok, lit/min.

U hidrauličkom sustavu, filter je ugrađen u spremniku u povratnom vodu. Njegova veličina filtiranja je 25 μm . Količina čestica N_{10} može se odrediti prema tablici 3-4 u NSWC priručniku. Faktor C_N zbog teških radnih uvjeta, slanosti, prašine i pijeska mora se prema tablici 3-8 uvećati za 4 puta. Uz poznati protok pumpe od 47,8 l/min, faktor C_N iznosi:

$$C_N = 4 \cdot \left(\frac{25}{10}\right)^3 \cdot 0,0021 \cdot 47,8 = 6,273 \quad (53)$$

Na osnovu izračunatih i izračunatih faktora, učestalost kvara brtve klipa prema (45) iznosi:

$$\lambda_{SE} = 22,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018 \cdot 1,237 \cdot 0,493 \cdot 0,21 \cdot 6,273 = 0,329 \cdot 10^{-6} \quad [\text{sat}^{-1}] \quad (54)$$

odnosno:

$$MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{0,329 \cdot 10^{-6}} = 3039513,68, \quad [\text{sat}^{-1}] \Rightarrow MTTF = 349,97 \quad [\text{god}] \quad (55)$$

Uspoređujući rezultate dobivenim u izrazima (49) i (50) s podacima iz tablice 11, vidljivo je kako učestalost kvara λ i srednje vrijeme do kvara $MTTF$, kao parametri modela pouzdanosti, imaju vrlo male (λ), odnosno velike ($MTTF$) vrijednosti. Takve vrijednosti već na prvi pogled nisu prikladne za analizu pouzdanosti uspoređujući ih s stvarnim podacima o kvarovima iz tablice 8, a koje se odnose na hidraulički cilindar. Iz toga se može zaključiti sljedeće:

- Mala vrijednost λ dobivena prema podacima iz *OREDA* priručnika za mod kvara ventila "neispravnost kod otvaranje na zahtijev" je očigledno posljedica robusnog dizajna hidrauličkog cilindra i provedenih preventivnih radnji održavanja (testiranje, zamjena dijelova itd.), a što se zahtijeva u pravilima i preporukama klasifikacijskih zavoda za odobalne strukture (npr. *OFFSHORE STANDARD: DNV-OS-D101 MARINE AND MACHINERY SYSTEMS AND EQUIPMENT*, 10/2010).
- Mala vrijednost λ dobivena prema konceptu iz *NSWC* priručnika očito ne odgovara stvarnim radnim uvjetima hidrauličkog cilindra kao komponente hidrauličkog sustava.

Time, dobiveni parametri modela prema tim izvorima nisu prikladni za procjenu pouzdanosti.

Kao sljedeći izvor analizirati će se podaci iz generičke baze podataka *NPRD-91 (Nonelectronic Parts Reliability Data)*, izdanje iz 1991 godine. Ovu komercijalno dostupnu bazu podataka pouzdanosti za ne-elektroničke dijelove izdaje *Centar za analizu pouzdanosti* (eng. *Reliability Analysis Center*; kratica *RAC*) koji djeluje kao odjel *Centra za analizu sustava informacija obrane* (eng. *Defense Systems Information Analysis Center*; kratica *DSIAC*) američke vlade. Zadnje komercijalno dostupno izdanje ove baze podataka je iz 2011 godine.

Generička baza podataka *NPRD-91*, sadrži podatke o učestalostima kvarova širokog raspona komponenti uključujući njihove mehaničke, elektromehaničke i elektronske dijelove od kojih su sastavljene. Podaci o učestalosti kvarova sadržani u ovom dokumentu predstavljaju kumulativnu kompilaciju podataka sakupljenih u periodu od 1970-1990 godine, a na osnovu informacija i iskustva korištenja komponenti dobivenih iz njihove vojne,

komercijalne i industrijske primjene. Podaci su dati u tablicama koje pored procjene učestalosti kvara uključuju opis komponenti/dijelova, razinu kvalitete podataka, radnu okolinu primjene izvor podataka, broj kvarova, ukupni broj sati rada i detaljne karakteristike dijelova. Opis komponenti/dijela uključuje njihov osnovni naziv i specifični tip unutar istih. Razina kvalitete komponente/dijela pokazuje da li je određeni tip dijela u skladu s specifikacijama datim vojnim standardom, komercijalne kvalitete ili je pak kvaliteta nepoznata. Radna okolina primjene dijela opisuje uvjete u području primjene (npr. zrakoplovstvo, mornarica, primjena na kopnu kod fiksne ili mobilne opreme, itd. Izvor podataka odnosi se na pojedine izvore korištene kod unosa podataka. Učestalost kvara za pojedine dijelove odnosi se na ukupni broj kvarova podijeljen s ukupnim brojem radnih sati u odnosu na radne uvjete, kvalitetu dijela i izvor podataka. Nadalje, za svaku komponentu je posebnim algoritmom izračunata je sjedinjena učestalost kvara na osnovu svakog izvora podataka. Ukupni broj kvarova odnosi se na broj kvarova uočenih u sakupljenim podacima iz izvora podataka. Ukupni broj sati rada odnosi se na broj sati rada u sakupljenim podacima prikazanih kao 10^6 sat. Detaljne karakteristike dijela sadrže detaljne podatke na osnovu kojih su dobiveni zbirni podaci.

Dakle, učestalost kvara komponenti/dijelova izračunata je kao prosječna, tj. procijenjena vrijednost očekivane učestalosti kvara pa će "točna" vrijednost ležati na nekom intervalu povjerenja oko procjene. Na korisniku je odluka o tome koji će interval povjerenja koristiti.

Nadalje, podaci o kvarovima pojedine populacije dijelova sakupljeni su od nultog vremena ($t=0$). Pri tome vrijeme kvara nije dostupno. Nadalje, podaci se odnose samo na komponente koje su nakon kvara zamijenjene novim. Na taj način pretpostavlja se kako su sve učestalosti kvara eksponencijalno distribuirane. Međutim, prikazane učestalost kvarova mnogih dijelova ne slijede eksponencijalnu razdiobu već pokazuju karakteristike trošenja ili povećanja učestalosti kvara u vremenu. Stoga, ukoliko je stvarna funkcija distribucije kvara Weibullova, NSCW-91 opisuje metodologiju kojom se procjenjuje parametar skale $\theta=\alpha$, tj. karakteristični životni vijek pojedinog dijela za poznati parametar oblika β . Ukoliko je postotak kvara u populaciji pojedinog dijela relativno mali, metodologija ima ograničeni značaj. S druge strane, ukoliko postotak kvara u populaciji značajan, metodologija dovodi do rezultata koji korisniku daje veći stupanj povjerenja.

Generička baze podataka *NPRD-91* sadrži podatke za veliki broj elemenata od kojih je sastavljen hidraulički sustav. Naime, pored podataka za razne vrste hidrauličkih pumpi, motora, izvršnih elemenata, te razvodnih, tlačnih, protočnih i zapornih ventila, ova baza podataka daje podatke i za spremnike ulja, filtere, fleksibilne i krute cijevi i spojnu opremu.

Pregledom podataka u *NPRD-91* za hidraulički cilindar, a s obzirom na radnu okolinu koja bi odgovarala korištenju hidrauličkog cilindra za otvaranje i zatvaranje ventila za distribuciju usisane smjese, tj. primjenu na brodu, mogu se uočiti samo podaci za hidraulički cilindar i radnu okolinu *NS* (Naval Sheltered), a koja odgovara primjeni hidrauličkih cilindra u zaštićenoj okolini ili ispod palube. Za taj slučaj, podaci su prikazani u tablici 14.

Tablica 14. Podaci za hidraulički cilindar u *NPRD-91* za *NS* radnu okolinu.

| Aktuator, hidraulički, linearni | Razina kvalitete dijela, vojni zahtjevi | Učestalost kvara ($\hat{\lambda}$) | Ukupni broj kvarova | Radni sati |
|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| | NPRD-094 | $10,7066 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1}$ | 5 | $0,4670 \cdot 10^6 \text{ sat}$ |

Iz tablice 14, slijedi kako je srednje vrijeme do kvara:

$$MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{10,7066 \cdot 10^{-6}} = 93400,3325 \text{ sat} \Rightarrow MTTF=10,6621 \text{ god} \quad (56)$$

Očito je kako su dobiveni parametri modela pouzdanosti za ovaj primjer preveliki i stoga nisu odgovarajući, a iz razloga neodgovarajuće radne okoline.

Sagledavajući ostale podatke, odabrati će se primjena za radnu okolinu *AUC (Airborne Unihibited Cargo)*, odnosno za opće uvjete primjene u teretnim prostorima aviona, krilima i repu aviona gdje vladaju ekstermni uvjeti cikličke promjene tlaka, temperature i vibracija. Za te radne uvjete podaci su prikazani u tablici 15.

Tablica 15. Podaci za hidraulički cilindar u NPRD-91 za AUC radnu okolinu.

| Aktuator, hidraulički, linearni | Razina kvalitete dijela, komercijalna kvaliteta dijela | Učestalost kvara ($\hat{\lambda}$) | Ukupni broj kvarova | Radni sati |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------|
| | NPRD-093 | $65,8535 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1}$ | 27 | 0,4100 sat |

Iz tablice 15, slijedi kako je srednje vrijeme do kvara:

$$MTTF = \frac{1}{\hat{\lambda}} = \frac{1}{65,8535 \cdot 10^{-6}} = 15185,2217 \text{ sat} \Rightarrow MTTF=1,7334 \text{ god} \quad (57)$$

Na osnovu dobivenih parametara modela pouzdanosti za hidraulički cilindar, može se zaključiti kako ovom slučaju isti više odgovaraju stvarnim podacima o kvarovima hidrauličkog cilindra za otvaranje i zatvaranje ventila za distribuciju usisane smjese s brodaružala. Stoga, u sljedećem koraku, a koja odnosi na analizu pouzdanosti, podaci iz tablice 15, koristiti će se kao parametri modela pouzdanosti za hidraulički cilindar.

Potrebno naglasiti kako podaci iz NPRD-91, kao i u svakoj drugoj generičkoj bazi podataka, sadrže određeni stupanj greške ili netočnosti, a prije svega zbog raznih faktora i ograničenja kod sakupljanja podataka. To podrazumijeva moguće netočnosti kod izvještaja o radnim satima, nepotpunosti izvještaja o zahvatima održavanja, nepoznavanja stvarnih razina optrećenja i naprezanja dijelova. Nadalje, većina podataka je generička i ne sadrže podatke o proizvođačima što ukazuje kako se varijacije u proizvodnom procesu dijelova ne uzimaju u obzir. Također je vrlo je teško odrediti da li se radi o npr., primarnom ili sekundarnom kvaru kvaru zajedničkog uzroka ili je pak riječ o nekom posebnom uzroku.

6.3.5 Model pouzdanosti hidrauličkog cilindra

Kao što je već prije rečeno, analiza pouzdanosti komponenti/sustava podrazumijeva pojam za nekoliko metoda, zasnovanih na modelu, koje omogućuju kvantificiranje mjera pouzdanosti. Kada generički podaci ili pak drugi promatrani podaci nisu dostatni ili potpuno mjerodavni, model pouzdanosti može se izraditi i potvrditi koristeći prikupljene podatke sličnih tehničkih komponenti ili sustava. Pri tome je pored konvencionalnih statističkih metoda moguće koristiti i statističku metodu koja se bazira na Bayesovom okviru.

Bayesov metoda za modeliranje pouzdanosti komponente/sustava daje mogućnost uzimanja u obzir prethodnog znanja i realnih dostupnih podataka pouzdanosti o

komponentama dobivenih tijekom njenog rada. Na osnovi tih informacija izračunava se odgovarajuća nesigurnost pouzdanosti komponente, a koja se zatim može modificirati koristeći ekspertno mišljenje. Na taj način razvoj modela pouzdanosti komponente postaje proces učenja, a znanje se kontinuirano nadograđuju kako sve više informacija postaje dostupno.

Pri opisu koncepta subjektivne ili osobne procjene učestalosti kvara hidrauličkog cilindra na osnovu Bayesove, pretpostavlja se sljedeće:

1. Razmatra se hidraulički cilindar kao popravljiva komponenta koja se se pustila u rad u trenutku $t=0$. Prema podacima iz tablice 8, vidljivo je da se nakon dijagnosticiranja propuštanje brtve klipa, cilindar smatra neispravnim, te se potom zamjenjuje s rezervnim. Vrijeme kvara nije poznato, dok se vrijeme izvan rada zanemaruje. Prema politici održavanja na brodu, neispravni cilindar se popravljiva na način da se rastavlja, te se nakon pregleda mijenjaju sve brtve (statičke i dinamičke), ležaj klipnjače i odstružni prsten. Nakon toga, cilindar se sastavlja, ispituje i potom stavlja u pričuvu. Time se pretpostavlja kako se cilindar vraća u novo stanje, odnosno u stanje "*dobar kao novi*". Stoga, vremena između kvara su nezavisna i identično distribuirana.
2. Pretpostavlja se opservacijski prozor od 14 godina (1996-2010) tijekom kojeg je ustanovljeno 5 kvarova na cilindru koji se odnose na propuštanje brtve klipa kao opisa neispravnosti, odnosno moda kvara.
3. Pretpostavlja se kako je maksimalni mogući broj sati za kalendarsku godinu $24 \cdot 365 = 8760$ sati.

Kao što je već prije navedeno, u NPRD-61 pretpostavlja se kako su sve učestalosti kvara eksponencijalno distribuirane. Eksponencijalna distribucija je prikladna za računanje jer ima samo jedan parametar, ali time i bitno ograničenje u izražavanju prijašnjeg znanja, Barle i Ban (2009). Budući da Bayesov okvir omogućuje odabir drugog oblika prior distribucije, kao prior odabire se gamma razdioba iz razloga što je fleksibilna i stoga sposobna izraziti prijašnje znanje. Takav odair naziva se konjugirani prior. Naziv prior proizlazi iz razloga što se prikazuje infrmaciju koja ne dolazi od trenutnih podataka. Dakle, razmatra se hidraulički cilindar s konstantnom učestalosti pojave kvara λ , gdje λ predstavlja slučajnu varijablu Λ s gamma prior gustoćom:

$$f_{\Lambda}(\lambda) = \frac{\beta_0}{\Gamma(\alpha_0)} (\beta_0 \cdot \lambda)^{\alpha_0 - 1} e^{-\beta_0 \cdot \lambda} \text{ za } \lambda > 0 \quad (58)$$

Budući da se koristi gamma prior, potrebno je znati najmanje dva parametra koja određuju gamma distribuciju. Parametri β_0 i α_0 prior distribucije u pravilu se procjenjuje na osnovu prethodnog znanja u kombinaciji s podacima pouzdanosti iz baza podataka, Rausand (2004). Na osnovu podataka iz tablice 15, slijedi kako je srednja vrijednost učestalosti pojave kvara λ_0 iznosi:

$$\hat{\lambda}_0 = E(\Lambda) = \frac{\alpha_0}{\beta_0} = \frac{27}{0,4100 \cdot 10^6} = 65,8535 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1} \quad (59)$$

odnosno odgovarajuće srednje vrijeme između kvara $MTBF = 1,7334$ [god] i standardna devijaciju od:

$$\sigma(\lambda_0) = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\beta_0^2}} = \sqrt{\frac{27}{(0,4100 \cdot 10^6)^2}} = 8,115 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1} \quad (60)$$

Nadalje, ukoliko λ_0 ima $gamma \sim (\alpha_0, \beta_0)$, tada $2\beta_0\lambda_0$ ima χ^2 distribuciju (2α) koja određuje odnos između tih dviju distribucija. Pošto gamma distribucija i hi-kvadrat distribucija jedine dopuštaju da imaju cijelobrojni broj stupnjeva slobode, gamma distribucija se može smatrati kao interpolacija hi-kvadrat distribucije. Budući da Bayesov okvir daje distribuciju vjerojatnosti potrebno je odrediti interval vjerodostojnost za λ_0 (eng. *credibility interval*) koji je analogan intervalu povjerenja kod frekvencijskog pristupa. Tako npr., 90% interval vjerodostojnosti daje veličine λ_0 od 5% do 95% prema izrazu:

$$P\left(\frac{Z_{1-\varepsilon/2}, 2\alpha}{2\beta} < \Lambda < \frac{Z_{\varepsilon/2}, 2\alpha}{2\beta}\right) = 1 - \varepsilon = 0,90$$

$$P\left(\frac{Z_{1-0,1/2}, 2\alpha}{2\beta} < \Lambda < \frac{Z_{0,1/2}, 2\alpha}{2\beta}\right) = 1 - \varepsilon = 0,90 \quad (61)$$

$$P\left(\frac{Z_{0,95}, 2\alpha}{2\beta} < \Lambda < \frac{Z_{0,05}, 2\alpha}{2\beta}\right) = 1 - \varepsilon = 0,90$$

gdje $Z_{\varepsilon, v}$ označava gornji 100ε% postotak od hi-kvadrat (χ^2) distribucije s $v=2$ stupnja slobode. Prema (61), Matlab programskom skriptom dobiva se:

```

alfa=27;
beta=410000;
lambda=alfa/beta
z_95 = chi2inv(0.05, 54);
z_05 = chi2inv(0.95, 54);
P_D=z_95/(2*beta)
P_U=z_05/(2*(beta))

```

lambda =

6.5854e-005

P_D =

4.6483e-005

P_U =

8.7992e-005

dobiva se interval povjerenja za λ_0

$$P(46,483 \cdot 10^{-6} < \Lambda = \lambda_0 < 87,992 \cdot 10^{-6}) = 1 - \varepsilon = 0,90 \quad (62)$$

Tumačenje izraza (61) je slijedeće: *Najbolje vjerovanje je kako je veličina λ_0 srednja vrijednost, ali isto tako lako može biti nešto veća ili manja.* Dakle, vrijednosti manje ili veće od dobivenih za gornji ili donji interval vjerodostojnost za λ_0 su moguće, ali prelaze granice intervala. Amalitičar procjenjuje koju granicu intervala koristiti. Tako npr., kod analize rizika obično se uzima gornja granica budući da ista daje veću početnu frekvenciju događaja. U ovom slučaju koristi će se srednja vrijednost λ_0 prema (59).

Kao što je već pretpostavljeno, razmatra se hidraulički cilindar kao popravljiva komponenta koja je puštena u rad u vremenu $t=0$. Tijekom akumuliranog kalendarskog vremena od 14 godina zapisano je 5 kvarova koji se odnose na propuštanje brtve klipa kao moda kvara. Neka $N(t)$ označava broj puta zbivanja događaja kvara hidrauličkog cilindra za vrijeme intervala $(0, t]$. Kada je nastupio prvi događaj kvara $N(t_1)$ hidrauličkog cilindra, isti se zamijenio rezervnim istog tipa. Vrijeme zamjene je kratko i stoga se zanemaruje. Kada se dogodio drugi kvar $N(t_2)$, cilindar se ponovo zamijenio i tako dalje do $N(t_5)$. Budući da se broji broj kvarova u vremenskom intervalu $[t, t+\Delta t]$ radi o procesu brojanja slučajne varijable $N(t)$ koji se opisuje homogenim Poissonovim procesom (HPP). Prema tome broj kvarova $N(t)$ koji su uočeni tijekom akumuliranog vremena od $t=14 \cdot 8760=122640$ [sat] imati će *Poissonovu* distribuciju s parametrima λ i t :

$$f(N(t) = n | \Lambda = \lambda) = \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} e^{-\lambda \cdot t} \quad (63)$$

Učestalost kvarova λ u ovom slučaju predstavlja učestalost pojave kvara koja se procjenjuje prema (31). Pri tome međuvremena T_1, T_2, \dots su nezavisna i eksponencijalno distribuirana s učestalosti λ .

Marginalna distribucija broja kvarova $N(t)$ prema (39) postaje:

$$\begin{aligned} f(N(t) = n) &= \int_0^{\infty} f(N(t) = n | \Lambda = \lambda) \cdot f_{\Lambda}(\lambda) d\lambda \\ &= \int_0^{\infty} \frac{(\lambda \cdot t)^n}{n!} e^{-\lambda \cdot t} \cdot \frac{\beta_0^{\alpha_0}}{\Gamma(\alpha_0)} \cdot \lambda^{\alpha_0-1} e^{-\beta_0 \cdot \lambda} d\lambda \\ &= \frac{\beta_0^{\alpha_0} t^n}{\Gamma(\alpha_0) n!} \int_0^{\infty} \lambda^{\alpha_0+n-1} \cdot e^{-(\beta_0+t)\lambda} d\lambda \\ &= \frac{\beta_0^{\alpha_0} t^n}{\Gamma(\alpha_0) n!} \cdot \frac{\Gamma(\alpha_0 + n)}{(\beta_0 + t)^{\alpha_0+n}} \end{aligned} \quad (64)$$

Kombinirajući (39), (58), (63) i (64) dobiva se posterior distribucija koja je također gamma distribucija:

$$f_{\Lambda|N}(\lambda | n) = \frac{(\beta_0 + t)^{\alpha_0+n}}{\Gamma(\alpha_0 + n)} \cdot \lambda^{\alpha_0+n-1} \cdot e^{-(\beta_0+t)\lambda} \quad (65)$$

koja je također gamma razdioba s parametrima

$$\alpha_n = \alpha_0 + n \quad , \quad \beta_n = \beta_0 + \sum_{i=1}^n T_i = \beta_0 + t \quad (66)$$

Ovaj oblik je primjeniv samo ako su parametri α_n i β_n cijeli brojevi.

Iz (65) i (66) slijedi općeniti oblik gamma distribucije:

$$f_{\Lambda|N}(\lambda|n) = \frac{\beta_n^{\alpha_n}}{\Gamma(\alpha_n)} \cdot \lambda^{\alpha_n-1} \cdot e^{-\beta_n \lambda} \quad (67)$$

u kojoj se može koristiti svaki realni i pozitivni broj za izražavanje prior distribucije. Iz svega prije navedenog slijedi kako je gamma distribucija s parametrima α i β konjugirani prior Poissonovoj distribuciji. Očekivana vrijednost učestalosti pojave kvara je:

$$\hat{\lambda}_n = E(f_{\Lambda|N}(\lambda|n)) = \frac{\alpha_n}{\beta_n} = \frac{\alpha_0 + n}{\beta_0 + \sum_{i=1}^n T_i} = \frac{\alpha_0 + n}{\beta_0 + t} \quad (68)$$

dok je varijanca

$$\sigma^2(\lambda_n) = \frac{\alpha_0 + n}{(\beta_0 + t)^2} \quad (69)$$

Uz zabilježenih $N(t)=n=5$ kvarova istog moda kvara, tijekom opservacijskog prozora od $t=122640$ [sat], Bayesova procjena očekivane vrijednosti učestalosti kvara tijekom akumuliranog kalendarskog vremena prema (67) iznosi:

$$\hat{\lambda}_n = \frac{\alpha_0 + n}{\beta_0 + t} = \frac{27 + 5}{410000 + 122640} = \frac{32}{532640} = 60,078 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1} \quad (70)$$

uz standardnu devijaciju

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\alpha_0 + n}{(\beta_0 + t)^2}} = \sqrt{\frac{32}{532640^2}} = 10,62 \cdot 10^{-6} \text{ sat}^{-1} \quad (71)$$

i odgovarajuće srednje vrijeme između kvara

$$MTBF_n = \frac{1}{\hat{\lambda}_n} = \frac{1}{60,078 \cdot 10^{-6}} = 16645,028 \text{ sat} = 1,9 \text{ god} \quad (72)$$

Budući da je učestalost pojave kvara prema (70) procijenjena veličina, potrebno je i za nju odrediti pouzdanost procjene pomoću intervala vjerodostojnosti. Interval vjerodostojnosti $1-\varepsilon$ za λ_n , kada se promatra događaj $N(t)=n$ (kvarovi) za vrijeme intervala vremena t je dat je kao, Rausand i Høyland (2004):

$$P\left(\frac{Z_{1-\varepsilon/2}, 2(\alpha+n)}{2(\beta+n)} < \Lambda = \lambda_n < \frac{Z_{\varepsilon/2}, 2(\alpha+n)}{2(\beta+n)} \mid N(t)=n\right) = 1 - \varepsilon = 0,90 \quad (73)$$

Stoga, gornji i donji interval vjerodostojnosti od 90% za λ_n je:

$$P\left(\frac{Z_{1-0,1/2}, 2 \cdot 32}{2 \cdot 532640} < \Lambda = \lambda_n < \frac{Z_{0,1/2}, 2 \cdot 32}{2 \cdot 532640} \mid N(t) = n\right) = 1 - \varepsilon = 0,90$$

$$P\left(\frac{Z_{0,95}, 64}{2 \cdot 532640} < \Lambda = \lambda_n < \frac{Z_{0,05}, 64}{2 \cdot 532640} \mid N(t) = n\right) = 1 - \varepsilon = 0,90$$
(74)

Matlab programskom skriptom dobiva se interval vjerodostojnosti od:

```

alfa=27;
beta=410000;
n=5;
lambda=alfa/beta;
time=8760*14;
lambda_n=alfa+n/(2*(beta+time));
z_95 = chi2inv(0.05, 64);
z_05 = chi2inv(0.95, 64);
P_D=z_95/(2*(beta+time))
P_U=z_05/(2*(beta+time))

P_D =

    4.3740e-005

P_U =

    7.8548e-005

```

odnosno

$$P(43,740 \cdot 10^{-6} < \Lambda = \lambda_n < 78,548 \cdot 10^{-6} \mid N(t) = n) = 1 - \varepsilon = 0,90$$
(75)

U ovom primjeru se vidi kako je korištenje prior informacija rezultiralo posterior podacima nešto manjih težina nego prior. Naime, prema izrazima (69) i (70) vidljivo je kako bi se težina priora trebala smanjivati kako se povećava veličina uzorka. Drugim riječima, Bayesovim procesom nadogradnje modela podaci bi trebali imati veću težinu nego prior informacije. Razlozi zašto nadogradnjom modela s podacima posterior učestalost kvarova ima manju težinu, dijelom leži u činjenici kako podaci s broda (tablica 8) ne pokrivaju cijeli period eksploatacije broda. Naime, nedostaju podaci o kvarovima za period od njegovog preuzimanja od strane brodovlasnika (1985. godine) do prvog zapisa navedenog u tablici 8 (1996.godina), kao i za period od 1997-2002 godine. To znači kako nedostaje opservacijski prozor od 15 godina tijekom kojeg nema zapisa o kvarovima na razmatranom hidrauličkom sustavu. Drugi razlog može proizlaziti iz subjektivno odabrane prior informacije za učestalost kvara hidrauličkog cilindra, a koja odgovara primjeni za radnu okolinu AUC. Nadalje, podaci o kvarovima iz NPRD-91 ne sadrže klasifikaciju kvarova dijelova prema modovima kvara koje su doveli do njihove zamjene. U primjeru hidrauličkog cilindra, razmatra se samo isti, dok se njegovi dijelovi npr. statičke i dinamičke brtve te klizni ležajevi razmatraju posebno. Također, NPRD-91 ne sadrži podatke o standardnoj devijaciji uzorka ili nekoj drugoj statističkoj informaciji, a što bi omogućilo točniju procjenu parametara β_0 i α_0 prior distribucije. Stoga, ukoliko je moguće i ako se mogu naći odgovarajući podaci za informativni prior. Ovaj problem nije prisutan u OREDA priručniku.

Dakle, u ovom slučaju postoji razlika prior λ_0 i posterior λ_n pa se postavlja pitanje da li su podaci i odabrani prior konzistentni ili su pak pogrešni. Pošto svaki pojedinačni događaj

kvara može imati malu vjerojatnost postavlja se komplicirano pitanje. U tom slučaju potrebno je izračunati vjerojatnost da je prior broj kvarova veći ili manji od promatranih podataka u zavisnosti o problema. To se može napraviti koristeći gamma-Poisson distribuciju, Monte-Carlo simulaciju ili numeričke metode optimizacije, NUREG-0492 i Dezfuli i dr.(2009).

Očito je kako su u ovom primjeru dostupni podaci s broda i generički podaci nisu u potpunosti odgovarajući. Pošto informativne prior distribucije daju većinom težinu priora oko "istinite" vrijednosti procjenjenog parametra, one su prikladne ukoliko je mišljenje da se kod analize pouzdanosti koriste kvalitetne informacije za parametre. Stoga prior model mora biti podržan od strane eksperta, kako bi proces nadogradnje u Bayesovom modelu što brže konvergirao "istinitoj" vrijednosti posterior distribuciji procjenjenih parametara.

U kontekstu Bayesovog okvira, prior distribucija kombinira se s funkcije parametara statističkog modela, tj. "*likelihood*" funkcijom preko Bayesovog teorema, a kako bi se izračunala posterior distribucija. Pri tome se moraju odrediti odgovarajuće veličine kao ulazi u model, da bi se nakon "pokretanja" modela dobili izlazi. Općenito, postoji dvojba u svezi s točnom vrijednošću ulaza. Stoga je važno formulirati nesigurnost i propagirati je kroz model tako da se ta nesigurnost kvantificira u izlazima modela. Iz tog razloga se kod rješavanja problema u inženjerstvu pouzdanosti vrlo često zahtijeva interdisciplinarni pristup u kojem sudjeluju više eksperata, a sve zbog toga kako bi se umanjila greška. Ekspertne individualne procjene nesigurne veličine su izražene kao subjektivne vjerojatnosti pa se proces prikupljanja informacija od više od jednog eksperta naziva agregacija ekspertnog mišljenja.

Jedna od mogućih snažnih tehnika za agregaciju ekspertog mišljenja je isto Bayesov model. Kod ove matematičke metode, donositelj odluke koristi procjene vjerojatnosti od strane eksperata kao podatke za nadgradnju njegovog vlastitog vjerovanje u svezi distribucije nepoznate veličine interesa. Temelje primjene ove metode je uspostavio Morris, u svojim radovima iz 1974 i 1975 godine, Ouchi (2204). On je prezentirao jasnu metodu agregacije za slučaj jednog ili više eksperata.

Općenito, neka se pretpostavi kako donositelj odluke želi zaključak za nepoznati parametar X , a eksperti od $1, \dots, e$ daju njihovu procjenu za X , x_1, \dots, x_e . Ukoliko se s $p(x)$ označi odluka za prior gustoću vjerojatnosti za X , donesenu od strane donositelja odluke, a $p(x_1, \dots, x_e | x)$ njegovo vjerovanje za procjenu X , tj. "*likelihood*" funkcije procijenjene od strane eksperata, tada je primarni cilj donostelja odluke pronaći posterior funkciju gustoće $p(x | x_1, \dots, x_e)$. Morris je pretpostavio kako su eksperti nezavisni i da su njihove funkcije gustoće prikazane normalnom funkcijom distribucije sa srednjom vrijednošću i varijancom. Kada se pretpostavi nezavisnost među ekspertima, "*likelihood*" član je jednostavan umnožak $p(x_i | x)$:

$$p(x_1, \dots, x_e | x) = \prod_{i=1}^e p(x_i | x) \quad , \quad i = 1, \dots, e$$

(73)

Nadograđujući Morrisov model, Mosleh and Apostolakis su u svom radu iz 1986 godine sugeriraju dva praktična modela umnoška u izrazu (67). Ovi modeli izražavaju svaku od procjena eksperata koristeći "točnu" vrijednost za nepoznatu veličinu i grešku. Prvi model je aditivni model. Procjena eksperta i je izražena kao suma "točnih" vrijednosti za X i greške ζ_i kao:

$$x_i = x + \zeta_i \quad (74)$$

gdje je greška ζ_i nezavisna i data normalnom razdiobom $N \sim (\mu_i, \sigma_i^2)$. Srednja vrijednost μ_i

i varijanca σ^2 su određene od strane donosioca odluke kao odraz njegovog vjerovanja za točnost i pristranost. Funkcija $p(x_i|x)$ za dobivanje x_i kada je "točna" vrijednost x je veličina normalne gustoće sa srednjom vrijednošću $x+\mu_i$ i varijancom σ_i^2 . Uz pretpostavku da donosioc odluke postupa kao $e+1$ ekspert s njegovom prior gustoćom $p(x) \sim N(x_{e+1}, \sigma_{e+1}^2)$, tada je posterior funkcija gustoće također normalna gustoća sa srednjom vrijednošću i varijancom:

$$\begin{aligned}
 E(x|x_1, \dots, x_e) &= \sum_{i=1}^{e+1} w_i (x_i - \mu_i) \\
 w_i &= \frac{\sigma_i^{-2}}{\sum_{j=1}^{e+1} \sigma_j^{-2}} \\
 \mu_{e+1} &= 0 \\
 Var(x|x_1, \dots, x_e) &= \frac{1}{\sum_{i=1}^{e+1} \sigma_i^{-2}}
 \end{aligned} \tag{75}$$

Multiplikativan model greške bazira se na umnošku greške ζ_i i "točnih" vrijednosti za X , te na lognormalnoj distribuciji prior i posterior gustoće vjerojatnosti.

Svrha analize pouzdanosti jest da se tumačenjem rezultata dobivenih iz modela u kontekstu stvarnog problema donese odluka. Ona se u ovom primjeru može odnositi na donošenje odluke o učestalost preventivnih radnji održavanja u odnosu na intervale zamjene npr. brtve klipa, preglede ili ispitivanja funkcionalnosti hidrauličkog cilindra, planiranja zaliha rezervnih dijelova itd.

Nadalje, svrha analize pouzdanosti može biti i procjena rizika, a koji *Međunarodna pomorska organizacija (International Maritime Organization; kratica IMO)* definira kao frekvenciju događaja i stupanj težina mogućih posljedica na radne operacije broda, sam brod, ljude i okoliš. Naime, sukladno međunarodnom kodeksu upravljanja sigurnošću (*International Safety Management; kratica ISM-Code*), koji predstavlja međunarodni standard za sigurno upravljanje i siguran rad broda i sprječavanje zagađenja, između ostalog zahtijeva se provođenje praoaktivnih i reaktivnih mjera kod prepoznavanje kritične opreme i sustava čiji kvar i stanje neispravnosti može dovesti do katastrofalnih posljedica. U tom smislu podrazumijeva se i donošenje odluke za planirane zahvate održavanja na toj opremi/sustavima ili pak ugradnju dodatne opreme/sustava radi redundantnosti, a u svrhu sigurnog upravljanja i sigurnog rada broda. Budući da procjena rizika između ostalog zahtijeva prepoznavanje i procjenu opasnosti kod događaja kvara i stanja neispravnosti kritične opreme i sustava, jasno je kako analiza pouzdanosti kritične opreme/sustava na brodu čini sastavni dio svake analize rizika. Stoga, u tu svrhu potrebno je provesti kvalitativnu analizu sustava sa svrhom prepoznavanja i sprječavanje pojave potencijalnih kvarova na istim.

Daljnja istraživanja išla bi upravo u prilogu procjeni pouzdanosti pomoćnih brodskih sustava, a radi evaluacije i donošenje mjera za smanjenje rizika na prihvatljivu razinu.

7 ZAKLJUČAK

Svaka stvar neovisno o tome kako je dizajnirana, proizvedena ili održavana će se prije ili kasnije pokvariti. Stoga, pouzdanost se smatra jednim od najvažnijih kvalitativnih karakteristika tehničkih proizvoda.

Tehnički sustav obično se sastoji od većeg broja podsustava i komponenti povezanih na takav način da je sustav sposoban obaviti niz zahtijevanih funkcija. Stoga, u inženjerstvu pouzdanosti potrebno je prepoznati sve značajne funkcije i kriterije uspješnosti koje se odnose na svaku funkciju tehničkog sustava. Kako bi to moglo izvršiti, potrebno je sprovesti niz aktivnosti kojima bi se dobili odgovori na pitanja kako sustav radi, kako se može pokvariti i koje su posljedice kvara. Ove aktivnosti podrazumijevaju familijarizaciju sa sustavom, funkcionalnu analizu, klasifikaciju kvarova i odabir metode procjene pouzdanosti, odnosno izvođenje kvalitativne analize sustava.

Upravo je pojam kvalitativna analiza sustava, koji u svojoj knjizi navodi Rausand i Høyland (2004), bila polazna točka za izradu ovog rada. Naime, pri istraživanju područja inženjerstva pouzdanosti uočeno je kako pojedini autori u svojim radovima samo dijelom koriste opisanu metodologiju i kako se pojedini bitni pojmovi iz ovog područja često zamjenjuju ili krivo tumače. Stoga, u svrhu daljnjeg istraživanja bilo je nepohodno sagledati pojmovne definicije navedene u standardima i od strane drugih autora, istražiti metode funkcionalne analize i procjene pouzdanosti koje se koriste u praksi i literaturi, te istražiti raspoloživost i prepoznavanje relevantnih podataka o kvarovima, što predstavlja najbitniji dio svake analize pouzdanosti.

Primjer elektrohidrauličkog sustava upravljanja ventilima za distribuciju usisane smjese u brodsko skladište, kao pomoćnog brodskeg sustava broda broda- samohodno usisno jaružalo, upravo ukazuje na činjenicu kako je dostupnost i prikladnost podataka pouzdanosti uvijek izazov u svim industrijama. U primjeru u radu, za određivanje informativnog priora kod Bayesove metode procjene pouzdanosti učestalosti pojave kvara hidrauličkog cilindra kao komponente razmatranog pomoćnog brodskeg sustava, korištene su generičke baze podataka OREDA-2002, NPRD-91 i priručnik NSWC-2010. Njihovim korištenjem potvrđeno je kako iste, kao i sve druge generičke baze podataka, sadrže određeni stupanj greške, nedostatak odgovarajućih statističkih informacija, te moguće neprikladnosti za određenu primjenu. Isto tako i podaci iz računalne baze podataka kvara komponenti s broda jasno ukazuju na njihovu manjkavost u kvaliteti budući da ne sadrže podatke o vremenu kvara ili radne sate, sate izvan rada, tj. popravka i klasifikaciju kvara. Dakle, sve to potvrđuje praksu kojom se u većini slučajeva podaci o kvarovima sakupljaju u brodarstvu. Stoga, analitičar koji provodi analizu pouzdanosti mora biti sposoban, pored odabira prikladne metode za modeliranje pouzdanosti, procijeniti i kvalitetu podataka, te potvrditi konzistentnost podataka za konkretnu primjenu ili ih u protivnom odbaciti. U slučajevima kada podaci o kvarovima nisu odgovarajući, vrlo koristan izvor informacija za procjenu pouzdanosti može biti ekspertno mišljenje.

Daljnja istraživanja išla bi upravo u prilogu procjeni pouzdanosti pomoćnih brodskeg sustava, a radi evaluacije rizika i donošenje mjera za smanjenje rizika na prihvatljivu razinu.

Naime, prepoznavanje i analiza pouzdanosti kritične opreme/sustava na brodu čini sastavni dio svake analize rizika, a koja se kao proaktivna mjera provodi sukladno ISM sustavu na brodu. U tu svrhu biti će potrebno dodatno istražiti napredne tehnike modeliranja pouzdanosti popravljivih sustava kao što je Markovljeva analiza i fazne distribucije. Nadalje, budući rad trebao bi ukazati na sve probleme i nedostatke kod prikupljanja podataka o kvarovima komponenti/sustava na brodu i predložiti mjere za povećanje njihove kvalitete.

LITERATURA

- [1] T.Bedford, R.Cooke: "*Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*", Cambridge University Press, Oxford, 2001.
- [2] A.Birolini : "*Reliability Engineering Theory and Practice*", Fifth edition, Springer-Verlag Berlin, 2007.
- [3] W.R.Blische, D.N. Prabhakar Murty: "*Case Studies in Reliability and Maintenance*", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003.
- [4] A. G. Colombo, A. Z. Kelle: "*Reliability Modelling and Application*", Proceedings of the ISPRA Course held at the Joint Research Centre, Ispra, Italy, November 25-29, 1985.
- [5] G. Colombo: "*Safety and reliability in Europe*", Pre-launching Meeting of the European Safety and Reliability Association - ESRA Proceedings, Joint Research Centre, 1985.
- [6] B.S. Dhillon: "*Design reliability: fundamentals and applications* ", CRC Press LLC, Boca Raton, 1999.
- [7] B.S. Dhillon: "*Maintainability, maintenance, and reliability for engineers*", CRC Press LLC, Boca Raton, 2006.
- [8] C.E.Ebling: "*An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*", McGraw-Hill Companies Inc., USA, 1997.
- [9] B.Epstein, I.Weissman: "*Mathematical models for systems reliability*", CRC Press LLC, Boca Raton, 2008.
- [10] M.S.Hamada, A.G.Wilson, C.S.Reese, H.F.Martz: "*Bayesian reliability* ", Springer Science, New York, 2008.
- [11] J.Flamm ,T.Luisi: "*Reliability Data Collection and Analysis*", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992.
- [12] M.P.Kaminskiy: "*Reliability Models for Engineers and Scientists*", CRC Press LLC, Boca Raton, 2013.
- [13] W.Q.Meecker, L.A.Escobar: "*Statistical Methods for Reliability Data*", John

- Wiley&Sons Inc., New York, 1999.
- [14] M.Modarres, M.Kaminskiy, V.Krivtsov: "*Reliability Engineering and Risk Analysis-A Practical Guide*", Marcel Dekker Inc., New York, 1999.
 - [15] J.Moubray: "*Reliability centred Maintenance*", Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
 - [16] G.Pahl, W.Beitz, J.Feldhusen, K.H.Grote: "*Engineering Design-A Systematic Approach* ", Springer-Verlag Ltd., London, 2007.
 - [17] A.Pillay, J.Wang:"*Technology and safety of marine systems*", Elsevier Ltd., Oxford, 2003.
 - [18] M.Rausand, A.Høyland: " *SYSTEM RELIABILITY THEORY, Models, Statistical Methods, and Applications –Second Edition* ", John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2004.
 - [19] M.Rausand: "*RISK ASSESSMENT Theory, Methods, and Applications*", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2011.
 - [20] S. M. Ross: "*Introduction to Probability Models*", Ninth Edition, Elsevier Inc., Oxford, 2007.
 - [21] N. D.Singpurwalla: "*Reliability and Risk A Bayesian Perspective*", John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2006.
 - [22] D. J. Smith: "*Reliability, Maintainability and Risk-Practical methods for engineers* ", Sixth Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
 - [23] E.Zio: "*An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*", World Scientific Publishing Co. Re. Ltd. , Danvers, 2007.
 - [24] R.F.Stapelberg: "*Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*", Springer-Verlag, London, 2009.
 - [25] M. A.Lundteigen: "*Safety instrumented systems in the oil and gas industry: Concepts and methods for safety and reliability assessments in design and operation*", Thesis for the degree of philosophiae doctor, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2008.
 - [26] A. Jalashgar: "*Identification of Hidden Failures in Process Control Systems through Function Oriented System Analysis*", Doctor's thesis, Risø-R 936(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1997.
 - [27] D.H.Vestvik: "*Development of FMEA/RCM methodology to be implemented in Generic Maintenance Concepts*", Master's thesis, Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Norway, 2012.
 - [28] J.D. Andrews, S.J.Dunnett: "*Event-Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams*", IEEE Transactions on Reliability", Vol.49, No.2, 2000.

- [29] G. Atxaga, A.M. Irisarri: "*Failure analysis of the end of a shaft of an engine*", Engineering Failure Analysis, Volume 17, p.p.714–721, Elsevier Ltd., 2010.
- [30] J.Ballesio, D.Dietrich: "*Risk and reliability application to marine classification*", ABS Technical papers, 2002.
- [31] J.Barle, D.Ban: "*Maritime component reliability assessment amd maintenance using bayesian framework and generic data*", Advanced Ship Design for Pollution Prevention, p.p. 181-188,Taylor & Francis Group, London, 2010.
- [32] V.Benard, L.Cauffriez, D. Renaux: "*Modeling goals and functions of complex plant*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 93, str.179–196, Elsevier Ltd., 2007.
- [33] S.Benardi:" *Dependability Analysis Techniques*", chapter 6 in book *Model-Driven Dependability Assessment of Software Systems*, Springer-Verlag Berlin, 2013.
- [34] H. Boudali, J.B. Dugan: "*A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 87, str. 337–349, Elsevier Ltd., 2005.
- [35] M.Bouissou, Jean-Louis Bon: "*A new formalism that combines advantages of fault-trees and Markov models: Boolean logic driven Markov processes*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 82, str. 149–163, Elsevier Ltd., 2003.
- [36] S. Campodonico and N. D. Singpurwalla: "*Expert Opinion in Reliability*", GWU/IRRA/Serial TR-92/5, 1992
- [37] F. Chiacchio, L.Compagno, D. D’Urso, G.Manno, N.Trapani: "*An open-source application to model and solve dynamic fault tree of real industrial systems*", 5 th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA 2011), str.1-8.
- [38] F.Chiacchio, L.Compagno, D. D’Urso, G. Manno, N. Trapani: "*Dynamic fault trees resolution: A conscious trade-off between analytical and simulative approaches*" Reliability Engineering and System Safety, Volume 96, str.1515–1526, Elsevier Ltd., 2011.
- [39] J.S.Choi, N.Z.Cho: "*A practical method for accurate quantification of large fault trees*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 96, str. 971–982, Elsevier Ltd., 2007.
- [40] S.Contini, V.Matuzas: "*Analysis of large fault trees based on functional decomposition*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 92, str.383–390, Elsevier Ltd., 2011.
- [41] S.Distefano: "*Dependability of Complex, Large, Dynamic Systems*", Proceedings of the 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS 2009) IEEE Chengdu, China., 21-25 July 2009.

- [42] S. Distefano, Antonio Puliafito: "*Dynamic reliability block diagrams: Overview of a methodology*", Safety and Reliability Conference (ESREL07), Taylor & Francis pp.1059-1068, Stavanger, Norway, June 2007.
- [43] S. Distefano, Antonio Puliafito: "*Reliability and availability analysis of dependent-dynamic systems with DRBDs*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, str.1381-1393, Elsevier Ltd., 2009.
- [44] Y. Dutuit, A. Rauzy: "*Approximate estimation of system reliability via fault trees*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 87, str. 163-172, Elsevier Ltd., 2005.
- [45] L.D. Frate: "*Failure of Engineering Artifacts: A Life Cycle Approach*", Science and Engineering Ethics 19 (3), str. 913-944, 2013.
- [46] E.E. Hurdle, L.M. Bartlett, J.D. Andrews: "*Fault diagnostics of dynamic system operation using a fault tree based method*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, str.1371-1380, Elsevier Ltd., 2009.
- [47] F. Jiménez Espadafor, J. Becerra Villanueva, M. Torres García: "*Analysis of a diesel generator crankshaft failure*", Engineering Failure Analysis, Volume 16, str.2333-2341, Elsevier Ltd., 2009.
- [48] D. Kumar, P. Hinds: "*Aggregation of Expert Opinion: Applications to Reliability Prediction and Spare parts Provisioning*", Proceedings CSER 2005, March 23-25, Hoboken, NJ, USA.
- [49] S. J. Kwang, H. C. Soon, T. W. Kim: "*Development of the Dynamic Fault Tree Using Markovian Process and Supercomponent*", Reliability Engineering, Volume 19, str.137-160, Elsevier Ltd., 1987.
- [50] M. Lambert, B. Riera, G. Martel: "*Application of functional analysis techniques to supervisory systems*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 64, str.209-224, Elsevier Ltd., 1999
- [51] J.E. Larsson: "*Diagnosis based on explicit means-end models*", Artificial Intelligence, Volume 80, page 28-93, Elsevier Ltd., 1996.
- [52] J. E. Larsson, "*Knowledge Engineering Using Multilevel Flow Models*", Proceedings of the 2nd International Symposium on Engineering of Intelligent Systems, Paisley, Scotland, 2000.
- [53] J.E. Larsson: "*Support Tools for Situation Assessment*", Proceedings of the 3rd Seminar on Alarm Systems, Safety & Nuclear Division, IBC Global Conferences, London, 2002.
- [54] J. E. Larsson: "*Diagnostic Algorithms Based on Multilevel Flow Models*", Proceedings of the 19th Workshop of the Swedish Artificial Intelligence Society, Ronneby, Sweden, 2002.

- [55] J.E.Larsson: "*On-Line Root Cause Analysis for Nuclear Power Plant Control Rooms*," Proceedings of the International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for the 21st Century," ISSNP, Tsuruga, Fukui, Japan, 2007.
- [56] M. Lind: "*Representing Goals and Functions of Complex Systems -An Introduction to Multilevel Flow Modeling*", Technical report, 90-D-38, Institute of Automatic Control Systems, Technical University of Denmark, Lyngby, 1990.
- [57] M. Lind: "*Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants*", Journal of Applied Artificial Intelligence, vol. 8, 259–283, 1994.
- [58] M. Lind: "*Modeling Goals and Functions of Control and Safety Systems –theoretical foundations and extensions of MFM*", Nordic nuclear safety research, 2005.
- [59] M.Lind: "*Control functions in MFM: basic principles*" , Nuclear Safety and Simulation, Vol. 2, Number 2, 2011.
- [60] M. Marseguerra, E. Zio, J. Devooght P.E. Labeau: "*A concept paper on dynamic reliability via Monte Carlo simulation*", Mathematics and Computers in Simulation, Volume 47, str. 371–382, Elsevier Ltd., 1998.
- [61] G.Merle, J.M.Roussel, PhD, J.J.Lesage: "*Dynamic Fault Tree Analysis Based On The Structure Function*", Annual Reliability and Maintainability Symposium 2011 (RAMS 2011), Lake Buena Vista, Florida, United States, 2011.
- [62] G.Merle, J.M.Roussel, PhD, J.J.Lesage: "*Algebraic determination of the structure function of Dynamic Fault Trees*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 96, str.267–277, Elsevier Ltd., 2011.
- [63] S. Montani, L. Portinale, A. Bobbio, D. Codetta-Raiteri : "*A tool for reliability analysis of dynamic fault trees through conversion into dynamic Bayesian networks*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 93, str. 922–932, Elsevier Ltd., 2008.
- [64] J.Muppala, R.Fricks, and K.S.Trivedi: "*Techniques for System Dependability Evaluation in Computational Probability*", W. Grassman (ed.), str. 445–480, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000.
- [65] T.Murata: Petri Nets: "*Properties, Analysis and Application*", Proceedings of the IEEE, Vol. 77, No.4, 1989.
- [34] F.Ouchi: "*A Literature Review on the Use of Expert Opinion in Probabilistic Risk Analysis*" , World Bank Policy Research Working Paper 3201, February 2004.
- [66] B.Öhman: "*Failure Mode Analysis Using Multilevel Flow Models*" Proceedings of the 5th European Control Conference, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [67] D.F Percy: "*Maintenance Based on Limited Data*", poglavlje u knjizi K.A.H. Kobbacy, D.N.P. Murthy , *Complex System Maintenance Handbook*, p.p.133-154 Springer –

Verlag, New Jersey, 2008.

- [68] A.Rauzy: "*New algorithms for fault trees analysis*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 40, str. 203–211, Elsevier Ltd., 1993.
- [69] K.A.Reay, J.D. Andrews: "*A fault tree analysis strategy using binary decision diagrams*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 78, str. 45–56, Elsevier Ltd., 2002.
- [70] K. D.Rao, V. Gopika, V.S. Rao, H.S. Kushwaha, A.K. Verma, A. Srividya: "*Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment*" Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, str. 872–883, Elsevier Ltd., 2009.
- [71] R.Robidoux, H.Xu, L.Xing, M.Zhou: "*Automated Modeling of Dynamic Reliability Block Diagrams Using Colored Petri Nets*", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans Volume 40 Issue 2, 2010.
- [72] N.Sadou, H.Demmou: "*Reliability analysis of discrete event dynamic systems with Petri nets*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 58, p.p. 1848–1861, Elsevier Ltd., 2009.
- [73] D.M.Shaleva, Joseph Tiran: "*Condition-based fault tree analysis (CBFTA): A new method for improved fault tree analysis (FTA), reliability and safety calculations*" , Reliability Engineering and System Safety, Volume 92, p.p. 1231–1241, Elsevier Ltd., 2007.
- [74] R.M.Sinnamon, J.D.Andrews: "*New approaches to evaluating fault trees*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, p.p.89–96, Elsevier Ltd., 1997.
- [75] P. Slottje, , J.P. van der Sluijs, A.B Knol,,: "*Expert Elicitation: Methodological suggestions for its use in environmental health impact assessments* ", RIVM Letter report 630004001/2008.
- [76] S.G.Soares, A.P.Teixeira: "*Risk assement in maritime transportation*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 74, str.299–309, Elsevier Ltd., 2001.
- [77] A. S. B.Tam, I.Gordon: "*Clarification of Failure Terminology by Examining a Generic Failure Development Process*", International Journal of Engineering Business Management, Vol. 1, No. 1, pp. 33-36, 2009.
- [78] V.Volovoi: "*Modeling of System Reliability Using Petri Nets with Aging Tokens*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 84, p.p. 149–161, Elsevier Ltd., 2004.
- [79] J.K.Vaurio: "*Fault tree analysis of phased mission systems with reparable and non-reparable components*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 74, str.169–180, Elsevier Ltd., 2001.

- [80] E. Zio, M. Marella, L. Podofillini: "*A Monte Carlo simulation approach to the availability assessment of multi-state systems with operational dependencies*", Reliability Engineering and System Safety, Volume 92, str.871–882, Elsevier Ltd., 2007.
- [81] Naval Surface Warfare Center (NSWC): "*Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*", Carderock Division, Maryland, U.S., 2010.
- [82] OREDA: "*Offshore reliability-Data Handbook*", 4th.Edition, Sintef Industrial Management, Trondheim, Norway, 2002.
- [83] NSWC-10: "*Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment*", Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, U.S., 2010.
- [84] NPRD-91: "*Nonelectronic parts reliability data*", Reliability Analysis Center, Rome, U.S., 1991.
- [85] M.Stamatelatos, W.Vesely: "*Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*", NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.
- [87] H. Dezfuli, D. Kelly, C. Smith, K.Vedros, W. Galyean: "*Bayesian Inference for NASA Probabilistic Risk and Reliability Analysis*", NASA/SP-2009-569, National Aeronautics and Space Administration, 2009.
- [88] W.Vesely, F.F.Goldeberg, N.H.Roberts, D.F.Haasl: "*Fault Tree Handbook*", NUREG-0492, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [89] NUREG/CR-6823: "*Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment Nuclear Regulatory Commission*", 2003.
- [90] Reactor Safety Study: "*Accident Definition and use of Event Trees*", U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1971.
- [91] H.Dezfuli, D.Kelly, C.Smith, K.Vedros, W.Galyean: "*Bayesian Inference for NASA Probabilistic Risk and Reliability Analysis*", NASA/SP-2009-569, 2009.
- [92] MIL-STD-882E: "*System safety standard practice*", Department of Defense, U.S., 2012.
- [93] MIL-STD-1629A: "*Procedures for Performing a Failure Mode Effects and Criticality Analysis*", Department of Defense, U.S., 1980.
- [94] BS EN ISO 9000:2000: "*Quality management systems–Fundamentals and vocabulary*", European Committee for Standardization (CEN), 2000.
- [95] ISO 14224 (E): "*Petroleum, petrochemical and natural gas industries Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*", Second edition, 2006.
- [96] The International Marine Contractors Association (IMCA): "*Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs)*", IMCA M 166, 2002.

PRILOG

Popis slika

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Slika 1. Raspoloživost kao funkcija svojstvene pouzdanosti, pogodnosti održavanja i podrške održavanju.</i> | 7 |
| <i>Slika 2. Sustavni pristup za rješenje problema, Blische i Murthy (2003).</i> | 9 |
| <i>Slika 3. Međuodnosi u tehničkom sustavu uključujući ljude.</i> | 10 |
| <i>Slika 4. Tehnički sustav i njegove veze.</i> | 11 |
| <i>Slika 5. Primjer funkcijskog blok dijagrama za brodski sporohodni dizel motor.</i> | 13 |
| <i>Slika 6. Kvantitativna analiza sustava.</i> | 15 |
| <i>Slika 7. Shema SIS sustav zatvaranja ventila u slučaju nužde.</i> | 18 |
| <i>Slika 8. Funkcijski blok dijagram SIS sustava.</i> | 19 |
| <i>Slika 9. Funkcionalno stablo SIS sustava za zatvaranje ventila u slučaju nužde.</i> | 20 |
| <i>Slika 10. FAST formalizam i logički operatori.</i> | 22 |
| <i>Slika 11. FAST dijagram SIS sustava.</i> | 22 |
| <i>Slika 12. Dvije osi za modeliranje sustava.</i> | 23 |
| <i>Slika 13. Grafički prikaz funkcionalnog bloka u SADT dijagramu.</i> | 23 |
| <i>Slika 14. Hijerarhijska i modularna raščlamba SADT modela.</i> | 24 |
| <i>Slika 15. A0 razina SADT modela SIS sustava.</i> | 25 |
| <i>Slika 16. Detaljni SADT model A0 razine SIS sustava.</i> | 25 |
| <i>Slika 17. Aktigram A3 razine SADT modela SIS sustava.</i> | 26 |
| <i>Slika 18. Raščlamba u MFM modelu.</i> | 27 |
| <i>Slika 19. Simboli različitih objekata u MFM modelu.</i> | 28 |
| <i>Slika 20. Benzinski motor i njegov rashladni sustav.</i> | 30 |
| <i>Slika 21. MFM model benzinskog motora i njegovog rashladnog sustava.</i> | 31 |
| <i>Slika 22. Primjer GTST modela.</i> | 32 |
| <i>Slika 23. Primjer GTST-MPLD modela.</i> | 33 |
| <i>Slika 24. Prikaz razlike između kvara, neispravnosti i greške.</i> | 34 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Slika 25. Odnos između moda kvara, uzroka kvara i mehanizma kvara.</i> | 39 |
| | |
| <i>Slika 26. Klasifikacija kvarova prema modovima kvara.</i> | 42 |
| | |
| <i>Slika 27. Podjela kvarova prema uzrocima u skladu s IEC 60050(191).</i> | 43 |
| | |
| <i>Slika 28. Podjela kvarova prema uzrocima.</i> | 44 |
| | |
| <i>Slika 29. Podjela kvarova prema uzrocima u skladu s IEC 61508.</i> | 44 |
| | |
| <i>Slika 30. Podjela modova kvara prema efektu kvara u skladu s IEC 61508.</i> | 45 |
| | |
| <i>Slika 31. Podjela kvarova stupnju težine kvara u skladu s ISO 14224</i> | 47 |
| | |
| <i>Slika 32. Varijabla stanja i vrijeme kvara objekta.</i> | 49 |
| | |
| <i>Slika 33. Funkcija pouzdanosti $R(t)$ i nepouzdanosti $Q(t)$ za Weibullovu razdiobu kvarova.</i> | 50 |
| <i>Slika 34. Funkcija gustoće vjerojatnosti $f(t)$ za Weibullovu razdiobu kvarova.</i> | 51 |
| | |
| <i>Slika 35. Funkcija učestalosti kvarova $\lambda(t)$ Weibull-ovog modela kvarova.</i> | 53 |
| | |
| <i>Slika 36. Funkcija učestalosti kvarova u obliku kade.</i> | 54 |
| | |
| <i>Slika 37. Vrste popravka i stohastički procesi brojenja.</i> | 61 |
| | |
| <i>Slika 38. Metode određivanja vjerojatnosti pojave događaja kvara u zavisnosti o dostupnim podacima.</i> | 64 |
| | |
| <i>Slika 39. Učestalost kvarova i 90% interval povjerenja za opremu za bušenje na 12 različitih platformi za bušenje.</i> | 74 |
| | |
| <i>Slika 40. AFR Weibull-ovog modela vremena kvara s β parametrom.</i> | 76 |
| | |
| <i>Slika 41. Tablica populacije opreme u OREDA priručniku 2009.</i> | 78 |
| | |
| <i>Slika 42. Definicija granice pumpe u OREDA priručniku</i> | 79 |
| | |
| <i>Slika 43. Tablica pumpe kao podvrste održavanog elementa u priručniku OREDA.</i> | 79 |
| | |
| <i>Slika 44. Format tablice podataka pouzdanosti u OREDA priručniku.</i> | 80 |
| | |
| <i>Slika 45. Fotografija samohodnog usisnog jaružala</i> | 81 |
| | |
| <i>Slika 46. Spuštanje usisne cijeve van broda.</i> | 82 |
| | |
| <i>Slika 47. Uređaj za kompenzaciju.</i> | 83 |
| | |
| <i>Slika 48. Podesivi sustav preljeva.</i> | 83 |
| | |
| <i>Slika 49. Fotografija skladišta broda i opreme za iskrcaj usisane smjese.</i> | 84 |
| | |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Slika 50. Mehanizam razdvajanja skladišta.</i> | 84 |
| | |
| <i>Slika 51. Hidraulička shema upravljanja ventilima.</i> | 85 |
| | |
| <i>Slika 52. Funkcijski blok dijagram elektrohidrauličkog sustava ventila za raspodjelu usisane smjese u brodsko skladište.</i> | 88 |
| | |
| <i>Slika 53. Aktigram razine A0 funkcije sustava "otvaranje i zatvaranje ventila".</i> | 90 |
| | |
| <i>Slika 54. Aktigram razine A4 funkcije funkcije sustava "otvaranje i zatvaranje ventila". ...</i> | 91 |
| <i>Slika 55. Aktigram razine A0 funkcije funkcije sustava "sprječavanje otvaranje ventila".</i> | 91 |
| <i>Slika 56. RBD model za funkciju sustava "otvaranje i zatvaranje ventila".</i> | 92 |
| | |
| <i>Slika 57. RBD model za funkciju sustava "sprječavanje otvaranje ventila".</i> | 93 |
| | |
| <i>Slika 58. Komponente i dijelovi hidrauličkog sustava.</i> | 99 |
| | |
| <i>Slika 59. Bayes-ov proces nadogradnje.</i> | 103 |
| | |
| <i>Slika 60. Definicija granice ventila u OREDA priručniku.</i> | 105 |
| | |
| <i>Slika 61. Brtvljenje klipa dvoradnog hidrauličkog cilindra.</i> | 108 |
| | |

Popis tablica

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tablica 1. Terminologija za koncept kvarova kod postrojenja, Tam i Gordon (2009).</i> | 41 |
| <i>Tablica 2. Osnovne metode analize pouzdanosti prema raznim standardima.</i> | 57 |
| <i>Tablica 3. Karakteristike osnovnih metoda analize pouzdanosti.</i> | 58 |
| <i>Tablica 4. Primjeri generičkih baza podataka.</i> | 72 |
| <i>Tablica 5. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidrauličku pumpu.</i> | 93 |
| <i>Tablica 6. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidraulički cilindar.</i> | 94 |
| <i>Tablica 7. Modovi kvara i uzroci kvarova i korektivne radnje za hidrauličke ventile.</i> | 94 |
| <i>Tablica 8. Razvrstavanje modova kvara prema stupnju težine za komponente hidrauličkog sustava.</i> | 96 |
| <i>Tablica 9. Podaci o kvarovima elektrohidrauličkog sustava upravljanja stražnjim ventilom za distribuciju usisanog materijala iz iskrcajne cijevi u brodsko skladište.</i> | 97 |
| <i>Tablica 10. Održavani elementi ventila.</i> | 105 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tablica 11. Podaci pouzdanosti za ventil s zasunom.</i> | 106 |
| <i>Tablica 12. Podaci pouzdanosti za klip hidrauličkog cilindra.</i> | 107 |
| <i>Tablica 13. Kinematička viskoznost hidrauličkog ulja Shell Tellus S3 V46 na tri različite temperature i atmosferskom tlaku i gustoća ulja na temperaturi od 15°C. ...</i> | 109 |
| <i>Tablica 14. Podaci za hidraulički cilindar u NPRD-91 za NS radnu okolinu.</i> | 112 |
| <i>Tablica 15. Podaci za hidraulički cilindar u NPRD-91 za AUC radnu okolinu.</i> | 113 |