

**Sveučilište u Splitu
Pomorski fakultet u Splitu**

Radovan Antić

**NOVE TEHNOLOGIJE DIJAGNOSTIKE I
UPRAVLJANJA**



SADRŽAJ:

1. POUZDANOST I RASPOLOŽIVOST SUSTAVA.....	2
1.1. Pojmovi važni u dijagnostici i upravljanju	2
1.2. Određivanje pouzdanosti i raspoloživosti sustava	5
2. DIJAGNOSTIKA I UPRAVLJANJE BRODSKIH POGONSKIH SUSTAVA.....	12
2.1. Stanje i temeljne značajke SU dizelskih motora u eksploataciji.....	16
2.2. Konstrukcijska unapređenja motora u svrhe dijagnostike i upravljanja	17
2.3. Ekspertni sustavi za dizelske motore u eksploataciji.....	22
3. MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA POSTOJEĆIH SUSTAVA UPRAVLJANJA I DIJAGNOSTIKE DIZELSKOG MOTORA	27
3.1. Kvarovi u sustavu brodske propulzije.....	28
3.2. Tipovi kvarova	29
4. METODE I TEHNIKE DIJAGNOSTIKE KVAROVA.....	30
4.1. Shema FDI temeljena na relacijama simptomi - kvarovi i trend analizi.....	39
4.3. Dijagnostika kvarova senzora	42
4.3. Dijagnostika kvarova aktuatora	44
4.4. Optimalni razmještaj senzora za detekciju i lokalizaciju kvarova.....	44
4.5. Umrežavanje senzora	45
5. SCHEME REDUNDANTNOSTI U SUSTAVIMA UPRAVLJANJA I DIJAGNOSTIKE	47
5.1. Klasifikacija redundantnosti	47
5.2. Sheme sustava upravljanja s tolerancijom kvarova	50
5.2.2. Sustav u različitim okruženjima i višestruki modeli.....	50
5.2.4. Softverska struktura SU tolerantnog na kvarove	52
5.3. Nove tehnike u obradi senzorskih signala	55
5.4. Neuronske mreže u obradi senzorskih signala.....	56
5.5. Neizraziti ekspertni sustavi u obradi senzorskih signala	61
5.6. Primjena znanja eksperata u dijagnostici i upravljanju DM	62
5.6.1. Principi i tehnike prikupljanja znanja eksperata i operatera	63
5.6.2. Tehnike intervjua	64
5.6.4. Modul za prikupljanje znanja o kvarovima: primjer praktične realizacije	68
5.7. Tehnike - sheme predstavljanja znanja	72
5.7.1. Rad s neizrazitim znanjem	73
5.7.2. Sheme predstavljanja neizrazitog znanja za dijagnostiku i upravljanje.....	77
5.7.3. Neizraziti modeli.....	78
5.7.4. Konceptija neizrazitog upravljanja.....	79
5.7.5. Usporedne karakteristike neizrazitih sustava tipa Mamdani i T-S	81
5.7.6. Neizraziti regulator viskoznosti goriva tipa Mamdani: primjer sinteze.....	81
5.7.7. Stabilnost sustava s neizrazitim regulatorom.....	83
6. POJAM SUSTAVA UPRAVLJANJA TOLERANTNOG NA KVAROVE	90

1. POUZDANOST I RASPOLOŽIVOST SUSTAVA

1.1. Pojmovi važni u dijagnostici i upravljanju

Izvori:

- Safeprocess Technical Committee of IFAC.
- Pravila za tehnički nadzor pomorskih brodova, Hrvatski registar brodova.

Definicija sustava: Sustav je skup odnosno kompozicija komponenti, podsklopova i sklopova uređenih i povezanih tako da se postigne željena funkcija sustava uz prihvatljive performanse i pouzdanost. Tip komponenti, njihov broj, način povezivanja u sustav imaju izravan utjecaj na pouzdanost sustava.

Model sustava: Opisuje s dovoljnom točnošću i u odgovarajućoj formi (matematički model, pravila, heuristički opis i dr.) ponašanje odnosno dinamiku realnog sustava pod određenim uvjetima.

Kvalitativni model (engl. Qualitative Model)

model sustava čije je ponašanje (relacije među varijablama i parametrima sustava) opisano heuristički, npr. produkcijskim pravilima tipa ako - onda.

Kvantitativni model (engl. Quantitative model)

model sustava kod kojeg se dinamika opisuje diferencijalnim i algebarskim jednadžbama.

Definicija pouzdanosti: Pouzdanost (engl. Reliability) se definira kao sposobnost (mogućnost) komponente ili sustava da radi bez otkaza u određenom vremenskom periodu, ako su radni uvjeti blizu normalnim uvjetima.

Definicija raspoloživosti: Raspoloživost (engl. Availability) se definira kao vjerojatnost sustava da radi ispravno, tj. da ostvaruje dodijeljenu mu funkciju kad se to od njega zatraži. Raspoloživost je kriterij performanse za reparabilne sustave i uzima u obzir kako pouzdanost tako i aspekte održavanja sustava. Dakle, raspoloživost predstavlja vjerojatnost da sustav neće otkazati, niti će biti na opravci u vremenu kad se zatraži njegov rad.

Rad pod otkazom (engl. Fail operational)

sposobnost podnošenja jednog kvara u sustavu, tj. ostanka u radnom stanju, dok u slučaju kritičnih kvarova sustav odlazi u sigurno unaprijed zadano stanje (npr. akcijom SLD).

Ograničenje (engl. Constraint)

ograničenje koje je posljedica prirode fizikalnog sustava (fizikalni zakoni) ili akcije čovjeka.

Kvar (engl. fault)

nedozvoljeno odstupanje barem jednog fizikalnog ili matematičkog parametra od prihvatljive (uobičajene) standardne vrijednosti.

Otkaz (engl. failure)

stalni / potpuni prekid u obavljanju specificirane funkcije sustava u okruženju normalnih radnih uvjeta.

Akcija otklanjanja kvara (engl. Remedial action)

korektivna akcija (rekonfiguracija ili promjena režima rada) s ciljem sprečavanja propagacije kvara u neželjeno stanje.

Pogreška (engl. Error)

razlika između mjerene ili izračunate vrijednosti (izlazne varijable) i postavne (specificirane) ili teorijski željene vrijednosti.

Smetnja (engl. Disturbance)

nepoznati ili neupravljivi ulaz koji djeluje na sustav.

Poremećaj (engl. Perturbation)

ulaz koji svojim djelovanjem na sustav izaziva privremeno odstupanje od željenog stanja (ponašanja).

Rezidual (engl. Residual)

indikator kvara, temelji se na razlici između mjerenih (na realnom sustavu) i izračunatih vrijednosti (na nominalnom modelu).

Simptom (engl. symptom)

promjena osmotrivog kvantificiranog parametra od normalnog stanja.

Otkrivanje kvara (eng. fault detection)

ustanovljenje odnosno detekcija kvara u sustavu, vrijeme otkrivanja.

Lokalizacija kvara (engl. fault isolation)

određivanje vrste, tipa, mjesta i vremena nastanka kvara (slijedi nakon otkrivanja kvara).

Identifikacija kvara - analiza (engl. fault identification)

određivanje veličine, vremenske funkcije i mogućih uzroka i posljedica kvara (slijedi nakon lokalizacije).

Dijagnoza kvara (engl. fault diagnosis)

određivanje vrste, veličine, mjesta i vremena otkrivanja kvara, uključuje lokalizaciju i analizu kvara.

Sustav zaštite (engl. Safety System)

elektronički sustav koji štiti lokalne podsustave od trajnih oštećenja ili opasnih događaja iz okoline.

Nadzor (engl. Monitoring)

kontinuirano on-line praćenje rada fizikalnog sustava snimanjem karakteristika i podataka, te prepoznavanje i dojava nedopuštenog (nenormalnog) ponašanja sustava.

Sustav upravljanja prilagodljiv na kvar – SUTK (engl. Fault Tolerant Control System)

sustav koji se nakon pojave kvara adaptira novom stanju uz ili bez degradacije performansi, a pojedinačni kvar se ne razvije u otkaz niti jednog njegovog podsustava.

Pasivni SUTK (engl. Passive FTCS)

sustav u kojem se kvarovi u radu ne detektiraju i ne obavlja se akomodacija, već se dizajnom regulatora sustav čini neosjetljivim, robustnim na ograničeni, unaprijed određeni skup kvarova.

Aktivni SUTK (engl. Active FTCS)

sustav u kojeg se kvarovi nakon nastanka eksplicitno identificiraju i obavlja se aktivna prilagodba na kvar.

Uvjet za rekonfiguraciju (engl. Reconfiguration condition)

najveća posljedica kvara koja se još tolerira u sustavu, prije nego se ide na akciju otklanjanja/ispravke kojom se obavi prilagodba kvaru.

Hardverska redundantnost (engl. Hardware Redundancy)

korištenje više od jednog uređaja/sklopa za ostvarivanje istog cilja.

Analitička (SW) redundantnost (engl. Analitical Redundancy)

korištenje više od jednog, ne nužno identičnog načina (SW modula) za rješenje zadatka (problema) pomoću modela u analitičkoj formi.

Fuzija senzora (engl. Sensor fusion)

integracija koreliranih signala iz više različitih senzora (informacijskih izvora) u jednu reprezentaciju / informaciju.

Horizontalna redundantnost (engl. Horizontal Redundancy)

kada paralelni SU koristi različite podskupove mjerenja (iz više senzora ili fuzijom senzorskih informacija) i različite algoritme u svakoj procesnoj jedinici sustava. Ova forma paralelizma je pouzdanija od vertikalnog, jer može generirati n mogućih rješenja za odluku u procesorskim modulima.

Vertikalna redundantnost (engl. Vertical Redundancy)

kada paralelni SU koristi isti podskup mjerenja i isti algoritam u svakoj procesnoj jedinici sustava. Tolerancija kvara u ovoj formi paralelizma može se postići samo fizičkim razdvajanjem procesora. Stand-by sustavi spadaju u ovu kategoriju.

Redovito održavanje: Čini skup planiranih mjera i aktivnosti redovitog servisiranja, zamjena i remonta sustava s ciljem osiguranja kvalitetnog rada i predviđenog životnog ciklusa.

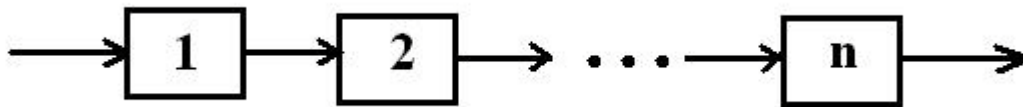
Preventivno održavanje: Predstavlja unaprijed planirane aktivnosti održavanja s ciljem prevencije kvarova, otkaza i povećanja raspoloživosti sustava, tj. potrebno je spriječiti kvar ili otkaz prije nego se dogodi. Preventivne akcije uključuju pravovremene provjere i testiranje komponenti, popravke ili zamjene prije nego nastupi kvar ili otkaz.

1.2. Određivanje pouzdanosti i raspoloživosti sustava

Pouzdanost sustava ovisi o pouzdanosti njegovih komponenti i načinu njihove povezanosti.

Komponente koje sačinjavaju sustav mogu biti međusobno povezane u seriju, paralelno i kombinirano.

Serijski spoj komponenti sustava: U serijskoj konfiguraciji (slika 1), otkaz bilo koje komponente odnosno podsustava rezultira u otkaz cijelog sustava. U većini slučajeva ako se sustav promatra na razini njegovih podsustava radi se o serijskoj konfiguraciji.



Slika 1. Serijski spoj komponenti sustava

Npr. PC kao sustav čine četiri osnovna podsustava: matična ploča, procesor, disk i izvor napajanja. Otkaz bilo kojeg ima za posljedicu otkaz rada PC. Drugim riječima, da bi sustav radio moraju ispravno raditi sve komponente.

Pouzdanost sustava u tom slučaju definirana je izrazom:

$$\begin{aligned}
 R_s &= P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_n) \\
 &= P(X_1)P(X_2 | X_1)P(X_3 | X_1 X_2) \dots P(X_n | X_1 X_2 \dots X_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdje je: R_s - pouzdanost sustava; X_i - slučaj da je i -ta komponenta u radu; $P(X_i)$ - vjerojatnost da je i -ta komponenta ispravna.

U slučaju da kvar jedne komponente utječe na pojavu kvara drugih komponenti u jednovremenom radu, mora se uzeti u obzir uvjetne vjerojatnosti u izračunu pouzdanosti sustava (jedn-a 1).

Međutim, ako se radi o statistički neovisnim otkazima pojedinih komponenti, jed-a (1) poprima oblik:

$$\begin{aligned}
 R_s &= P(X_1)P(X_2) \dots P(X_n) , \text{ odnosno} \\
 R_s &= \prod_{i=1}^n P(X_i)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

ili, izraženo pomoću pouzdanosti pojedinačnih komponenti sustava:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i
 \tag{3}$$

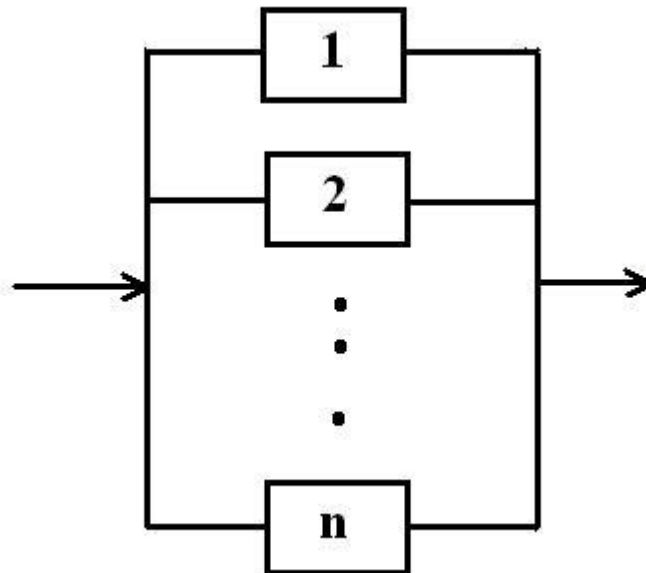
Primjer: Tri podsustava čine sustav i povezani su u seriju glede pouzdanosti. Pouzdanost podsustava 1 je 99.5%, podsustava 2 je 98.7% i podsustava 3 je 97.3% za misiju od 100 sati rada. Kolika je pouzdanost cijelog sustava u tom vremenu od 100 sati rada?

Prema izrazu (3), ukupna pouzdanost sustava je:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 = 0.995 \cdot 0.987 \cdot 0.973 = 0.95549 = 95.55\%$$

Može se zaključiti da pouzdanost sustava sa serijski spojenim podsustavima odnosno komponentama dominantno određuje komponenta s najmanjom pouzdanosti (najslabija karika u nizu). Jednako tako vrijedi da s povećanjem broja serijski spojenih komponenti ukupna pouzdanost sustava pada.

Paralelni spoj komponenti sustava: U paralelnoj konfiguraciji komponenti odnosno podsustava (slika 2), barem jedna komponenta mora raditi da bi sustav radio. Komponente povezane paralelno u sustavu nazivaju se i redundantne. Redundantnost predstavlja važan koncept u realizaciji posebno važnih odnosno sustava s kritičnom misijom (brod, zrakoplov, ...).



Slika 2. Paralelni spoj komponenti sustava

Vjerojatnost otkaza odnosno nepouzdanost za sustav s n statistički neovisnih paralelnih komponenti jednaka je vjerojatnosti da jednovremeno otkazu sve komponente sustava.

Nepouzdanost sustava je u tom slučaju dana izrazom:

$$\begin{aligned} Q_s &= P(X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_n) \\ &= P(X_1)P(X_2 | X_1)P(X_3 | X_1 X_2) \dots P(X_n | X_1 X_2 \dots X_{n-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

gdje je: Q_s - nepouzdanost sustava; X_i - slučaj da je i -ta komponenta u otkazu; $P(X_i)$ - vjerojatnost da je i -ta komponenta neispravna tj. u otkazu.

U slučaju da kvar jedne komponente utječe na pojavu kvara drugih komponenti u jednovremenom radu, mora se uzeti u obzir uvjetne vjerojatnosti u izračunu pouzdanosti sustava (jedn-a 4).

Međutim, ako se radi o statistički neovisnim otkazima pojedinih komponenti, jed-a (4) poprima oblik:

$$Q_s = P(X_1)P(X_2)...P(X_n) , \text{ odnosno}$$

$$Q_s = \prod_{i=1}^n P(X_i) \quad (5)$$

ili, izraženo pomoću nepouzdanosti pojedinačnih paralelnih komponenti , nepouzdanost sustava dana je izrazom:

$$Q_s = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (6)$$

Iz prethodnog se daje uočiti, da za razliku od serijskog spoja u kojem je pouzdanost sustava određena produktom pouzdanosti pojedinih komponenti, za paralelni sustav je nepouzdanost sustava jednaka produktu nepouzdanosti pojedinih komponenti sustava.

Pouzdanost paralelnog sustava je, dakle dana izrazom:

$$R_s = 1 - Q_s = 1 - (Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n)$$

$$= 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)] \quad (7)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Primjer: Tri podsustava čine sustav i povezani su paralelno glede pouzdanosti. Pouzdanost podsustava 1 je 99.5%, podsustava 2 je 98.7% i podsustava 3 je 97.3% za misiju od 100 sati rada. Kolika je pouzdanost cijelog sustava u tom vremenu od 100 sati rada?

Prema izrazu (7), ukupna pouzdanost sustava je:

$$R_s = 1 - [(1 - 0.995) \cdot (1 - 0.987) \cdot (1 - 0.973)] = 0.999998$$

odnosno $R_s = 99.9998\%$

Može se zaključiti da pouzdanost sustava s paralelno spojenim podsustavima odnosno komponentama dominantno određuje komponenta s najvećom pouzdanosti . Za razliku od serijskog sustava, za paralelni sustav vrijedi da s povećanjem broja paralelno spojenih komponenti ukupna pouzdanost sustava raste.

Do sada je razmatrana samo statička pouzdanost sustava, tj. s pretpostavkom da je pouzdanost komponenti neovisna o vremenu tijekom životnog ciklusa. Međutim, karakteristike kvara svake komponente imaju svoju zakonitost promjene u vremenu - distribuciju (npr. eksponencijalnu, normalnu, Weibull ili drugu razdiobu.), što znači da je pouzdanost svake komponente, pa tako i cijelog sustava vremenski ovisna. Npr. za tri serijski spojene komponente, sada jednadžba (3) za pouzdanost sustava poprima oblik:

$$R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) \quad (8)$$

Za npr. eksponencijalnu vremensku distribuciju kvarova svake komponente izraz (8) poprima oblik:

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \quad (9)$$

Distribucija životnog ciklusa sustava (engl. System Life Distribution -pdf) odnosno vjerojatnost gustoće kvarova sustava u vremenu (pdf sustava) dobije se derivacijom funkcije pouzdanosti u vremenu:

$$f_s(t) = -\frac{d(R_s(t))}{dt} \quad (10)$$

Gustoća kvarova sustava (engl. System Failure rate) dobije se temeljem slijedećeg izrara:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)} \quad (11)$$

Srednji životni vijek sustava (MTTF - engl. Mean Time To Failure) ili srednje vrijeme do otkaza dobije se iz funkcije pouzdanosti prema izrazu:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt \quad (12)$$

Uvjetna pouzdanost predstavlja vjerojatnost da sustav obavi uspješno narednu misiju nakon uspješno obavljene prethodne misije (13):

$$R_s(T, t) = \frac{R_s(T + t)}{R_s(T)} \quad (13)$$

Jednažba (13) daje pouzdanost sustava za novu misiju trajanja t, pod pretpostavkom da je sustav prije starta nove misije već uspješno radio T vremena, te provjereno uspješno započinje novu misiju.

Primjer izračuna vremenski ovisne pouzdanosti sustava.

Razmotrimo sustav koji se sastoji od tri komponente s eksponencijalnom distribucijom kvarova povezane u seriju i s gustoćom kvarova (broj kvarova na sat) kako slijedi:

$$\lambda_1 = 0.0002, \lambda_2 = 0.0005, \lambda_3 = 0.0001.$$

1. Odrediti funkciju (jednadžbu) pouzdanosti sustava.
2. Kolika je pouzdanost sustava nakon 150 sati rada ?
3. Odrediti funkciju životnog ciklusa sustava.
4. Odrediti jednadžbu gustoće (funkciju distribucije) kvarova sustava.
5. Koliki je MTTF ?
6. Kakav bi trebao biti garancijski period za pouzdanost od 90% ?

$$1. \quad R_s(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_3 t} \\ e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \quad (14)$$

$$2. \quad R_s(t) = e^{-(0.0002+0.0005+0.0001) \cdot 150} \\ = \mathbf{0.8869 \text{ ili } 88.69 \%}$$

$$3. \quad f_s(t) = -\frac{d(R_s(t))}{dt} = -\frac{d(e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t})}{dt} \\ = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t} \quad (15)$$

$$5. \quad \lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{R_s(t)} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}}{e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t}} \\ = 0.0008 \text{ kvarova / sat}$$

6. Rješavanjem jednadžbe (14) po vremenu dobije se odgovarajući garancijski period za pouzdanost sustava od 90%.

$$t = t_{gar} = -\frac{\ln(R_s)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} \quad (16)$$

$$t_{gar} = -\frac{\ln(0.90)}{0.0008} = 131.7 \text{ sati}$$

Raspoloživost sustava (engl. System Availability) se definira kao kriterij za performanse reparabilnih sustava koji uključuje aspekte kako pouzdanosti tako i održavanja sustava. U životnom ciklusu sustava izmjenjuju se sekvencijalno periodi u kojima ispravno radi i periodi kvara odnosno popravki. Što su periodi kvara odnosno popravki kraći to je raspoloživost sustava u njegovoj misiji veća.

Postoje različite klasifikacije raspoloživosti sustava:

- Trenutna (engl. point) raspoloživost,
- Prosječna (engl. mean) raspoloživost,
- Raspoloživost ustaljenog stanja (engl. steady state),
- Operativna (engl. operational) raspoloživost.

Trenutna raspoloživost sustava predstavlja vjerojatnost da će sustav ili komponenta biti operativan tj. ispravan u bilo koje slučajno odabrano vrijeme. To je vrlo blisko funkciji pouzdanosti sustava koja daje vjerojatnost da će sustav funkcionirati u danom vremenu. Ali, za razliku od pouzdanosti mjera trenutne raspoloživosti inkorporira i informaciju o održavanju sustava. Dakle, sustav će biti operativan u bilo koje vrijeme t , ako udovoljava slijedeće uvjete:

1. Da je funkcionirao ispravno u vremenu t s vjerojatnošću $R(t)$, ili
2. Da je funkcionirao ispravno od zadnjeg popravka u vremenu u , $0 < u < t$, s vjerojatnošću:

$$\int_0^u R(t-u)m(u)du$$

$m(u)$ je obnovljena funkcija gustoće sustava (nakon popravka) definirana izrazom:

$$m(u) = \frac{f(u) \cdot g(u)}{1 - f(u) \cdot g(u)}$$

gdje je: $f(u)$ - funkcija distribucije vremena do kvara sustava (engl. times - to - failure),
 $g(u)$ - funkcija distribucije vremena do popravke sustava (engl. times-to-repair).

Trenutna raspoloživost je zbroj ovih dviju vjerojatnosti:

$$A(t) = R(t) + \int_0^u R(t-u)m(u)du \quad (17)$$

Srednja raspoloživost sustava definira vremenski period tijekom misije u kojem je sustav raspoloživ za korištenje. U suštini predstavlja srednju vrijednost funkcije trenutne raspoloživosti tijekom perioda vremena $(0, T)$:

$$A_m(t) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)dt \quad (18)$$

Raspoloživost ustaljenog stanja sustava je granična vrijednost (limes) funkcije trenutne raspoloživosti kad vrijeme teži beskonačno. Funkcija trenutne raspoloživosti postiže vrijednost vrlo blizu vrijednosti ustaljenog stanja za četverostruko vrijeme MTBF:

$$A(\infty) = \lim_{T \rightarrow \infty} A(T) \quad (19)$$

Operativna raspoloživost je mjera raspoloživosti koja uključuje sve iskustvene izvore o vremenima u kojima sustav neće raditi, kao što su logistički, administrativni i drugi

uzroci. Predstavlja omjer ukupnog vremena u kojem je sustav ispravno radio i predviđenog ukupnog radnog ciklusa sustava.

$$A_o = \frac{\textit{Ukupno vrijeme rada}}{\textit{Operativni ciklus}} \quad (20)$$

Preventivno održavanje reparabilnih sustava

Predstavlja redoslijed planiranih akcija održavanja sustava ciljanih sprečavanju kvarova i otkaza rada. Primarni cilj je spriječiti kvar opreme prije nego do njega dođe čime se povećava pouzdanost i raspoloživost sustava.

Prednosti preventivnog održavanja dugoročno gledano uključuju:

- povećanje ukupne pouzdanosti sustava,
- smanjivanje cijene zamjene komponenti,
- smanjivanje vremena kvara sustava (povećanje raspoloživosti),
- bolje upravljnje rezervnim dijelovima (planiranje nabave).

Optimalna politika zamjene komponenti

Komponente se zamjenjuju nakon kvara ili nakon isteka vremena rada t do zamjene, što se prije dogodi. Optimalno vrijeme zamjene se dobije minimizacijom funkcije cijene po jedinici vremena (CPUT - Cost Per Unit Time), koja predstavlja omjer ukupno očekivane cijene zamjene po ciklusu i duljine trajanja očekivanog ciklusa bez kvara, a dana je izrazom:

$$CPUT(t) = \frac{C_P \cdot R(t) + C_U [1 - R(t)]}{\int_0^t R(t) dt} \quad (21)$$

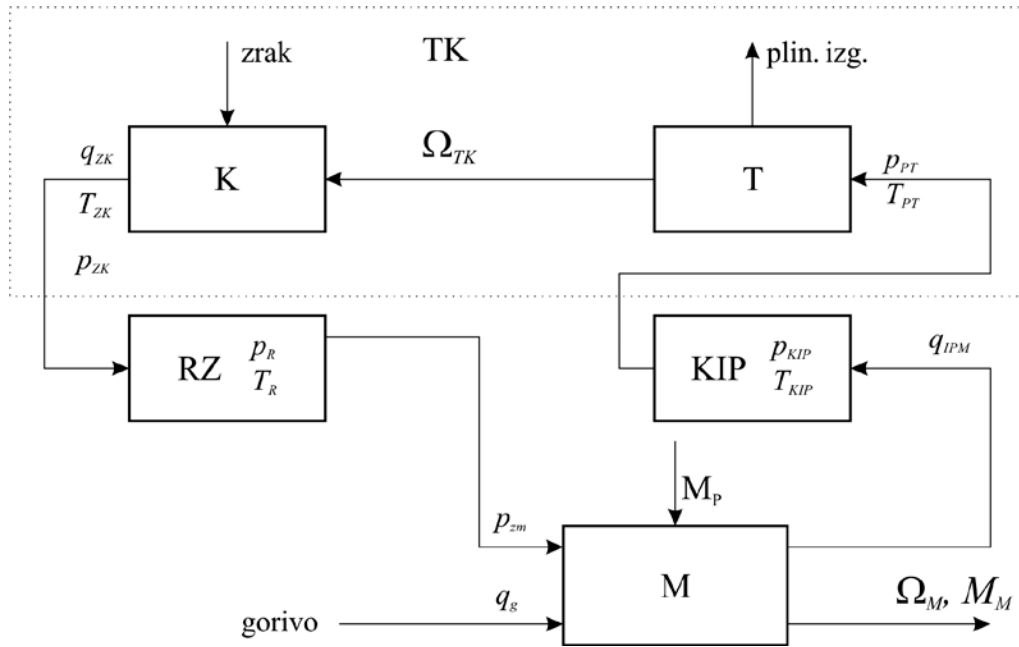
$R(t)$ - pouzdanost u vremenu t ,

C_P - cijena planirane zamjene,

C_U - cijena neplanirane zamjene.

Optimalni interval zamjene, koji minimizira cijenu zamjene po jedinici vremena dobije se parcijalnom derivacijom izraza (21) po vremenu i izjednačavanjem s nulom:

$$\frac{\partial [CPUT(t)]}{\partial t} = 0 \quad (22)$$



Slika 5. Strukturna blok shema brodskog dizelskog motora u užem smislu.

Temeljem navedenog mogu se matematički modeli pojedinih podsustava motora opisati ovim jednadžbama:

Motorni mehanizam: M

$$J_M \dot{\Omega}_M = M_M - M_P$$

$$\dot{\Omega}_M = \frac{d}{dt} \Omega_M$$

$$q_{ipm} = q_{ipm}(\Omega_M, q_g)$$

Turbokompresor: TK

$$J_{TK} \dot{\Omega}_{TK} = M_T - M_K$$

$$\dot{\Omega}_{TK} = \frac{d}{dt} \Omega_{TK}$$

$$q_{zk} = q_{zk}(\Omega_{TK}, p_{zk})$$

Risiver ispirnog zraka: RZ

$$C_R \dot{p}_R = K_{3Z} p_R + q_{zk}$$

$$\dot{p}_R = \frac{d}{dt} p_R$$

$$p_{zm} = K_{2z} p_R$$

$$p_{zk} = K_{1z} q_{zk} + p_R$$

Kolektor ispušnih plinova: KIP

$$C_{KIP} \dot{p}_{KIP} = K_{3ip} p_{KIP} + q_{ipm}$$

$$\dot{p}_{KIP} = \frac{d}{dt} p_{KIP}$$

$$p_{PT} = K_{2ip} p_{KIP}$$

Značenje varijabli i parametara:

q_g - količina - dotok goriva motoru	J_M - moment inercije motora i osovine,
p_{zm} - tlak zraka na ulazu u motor,	$M(q_g, p_{zm}, \Omega_M)$ - okretni moment motora,
Ω_M - kutna brzina motora,	$M_F(\Omega_M)$ - otporni moment motora i osovine q_{ipm} -
protok ispušnih plinova na izlazu motora,	(viskozno trenje),
p_{KIP} - tlak ispušnih plinova u KIP,	$M_p(v)$ - moment propelera,
T_{KIP} - temperatura ispušnih plinova u KIP,	J_{TK} - moment inercije turbokompresora,
p_{PT} - tlak ispušnih plinova na ulazu turbine,	M_K - moment kompresora,
T_{PT} - temperatura ispušnih plinova na ulazu turbine,	M_T - moment turbine,
q_{zk} - protok zraka koji generira kompresor,	Ω_{TK} - kutna brzina TK,
p_{zk} - tlak zraka na izlazu kompresora,	$C_R, K_{1z}, K_{2z}, K_{3z}$ - koeficijenti sustava zraka
T_{zk} - tempr. zraka na izlazu kompresora,	nabijanja,
p_R - tlak zraka u RZ,	$C_{KIP}, K_{2ip}, K_{3ip}$ - koeficijenti sustava ispuha,
T_R - temperatura zraka u RZ.	v - brzina broda.

Linearizacija modela obavlja se za određenu radnu točku, te male promjene varijabli oko odabrane radne točke.

Linearizirani model u matricnom obliku je:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{q}_g + \mathbf{D} \mathbf{v}$$

gdje je vektor varijabli stanja:

$$\mathbf{x} = \left[\Delta\Omega_M \quad \Delta p_{KIP} \quad \Delta\Omega_{TK} \quad \Delta p_R \right]^T$$

A - matrica koeficijenata sustava, dimenzija 4x4 i vrijednosti koeficijenata:

$$a_{11} = \frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial M_M}{\partial \Omega_M} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_F}{\partial \Omega_M} \right)_0 \right); a_{12} = 0; a_{13} = 0; \quad a_{14} = \frac{1}{J} K_{2z} \left(\frac{\partial M_M}{\partial p_{zm}} \right)_0$$

$$a_{21} = \frac{1}{C_{KIP}} \left(\frac{\partial q_{ipm}}{\partial \Omega_M} \right)_0; a_{22} = \frac{1}{C_{KIP}} K_{3p}; a_{23} = 0; \quad a_{24} = 0$$

$$a_{31} = 0; \quad a_{32} = \frac{1}{J_{TK}} K_{2p} \left(\frac{\partial M_T}{\partial p_{PT}} \right)_0;$$

$$a_{33} = \frac{1}{J_{TK}} \left(\left(\frac{\partial M_T}{\partial \Omega_{TK}} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_K}{\partial \Omega_{TK}} \right)_0 - K_{1z} C_1 \left(\frac{\partial M_K}{\partial p_{zk}} \right)_0 \right); a_{34} = -\frac{1}{J_{TK}} (K_{1z} C_2 + 1) \left(\frac{\partial M_K}{\partial p_{zk}} \right)_0$$

$$a_{41} = 0 \quad ; \quad a_{42} = 0 \quad ; \quad a_{43} = \frac{C_1}{C_R}; a_{44} = \frac{1}{C_R} (K_{3z} + C_2)$$

Vektor **B** je vektor ulaza i definira djelovanje dotoka goriva na proces motora s vrijednostima koeficijenata:

$$b_1 = \frac{1}{J_M} \left(\frac{\partial M_M}{\partial q_g} \right)_0; b_2 = \frac{1}{C_{KIP}} \left(\frac{\partial q_{ipm}}{\partial q_g} \right)_0; \quad b_3 = 0; \quad b_4 = 0;$$

Međutim, i pored toga što su sve varijable stanja modela mjerljive, zbog prisustva šuma i naročito mogućnosti pojave kvarova u dinamičkim režimima rada biti će potrebno koristiti i estimatore stanja.

2.1. Stanje i temeljne značajke SU dizelskih motora u eksploataciji

Prateći razvoj brodskih dizelskih motora i u njih primijenjenih sustava upravljanja i nadzora u zadnjih 10 do 15 godina, moglo se uočiti da je on tekao paralelno u dva smjera:

- **konstrukcijska unapređenja vitalnih procesa motora (stapovi i cilindar, gorivo, ulje),**

- **primjena novih mikroelektroničkih i računarskih tehnologija u sustavima upravljanja, s izraženim trendom međusobnog uvjetovanja i poticanja.**

Drugim riječima, proizvođači brodskih dizelskih motora težili su stalnim konstrukcijskim usavršenjima i prilagodbi istih novim mikroelektroničkim tehnologijama, dok su projektanti i proizvođači automatike nastojali iskoristiti mogućnosti što ih nove tehnologije i tehnike pružaju u pogledu upravljanja i dijagnostike motora.

Isto tako, stalno su se postavljali novi i stroži zahtjevi od brodovlasnika i klasifikacijskih zavoda glede pouzdanosti i ekonomičnosti brodske propulzije, kao i očuvanja i zaštite okoline.

Vodeći svjetski proizvođači brodskih motora (MAN B&W, PIELSTICK, WARTSILA, SULZER i dr.) vode oštru borbu zadnjih 20-tak godina za poboljšanje ukupnih performansi dizelskih motora, počevši od konstrukcijskih i tehnoloških do sustava dijagnostike, nadzora i upravljanja u stvarnom vremenu, a sve sa ciljem povećanja ekonomičnosti i pouzdanosti u eksploataciji odnosno konkurentne sposobnosti.

U ovom poglavlju se daje pregled i osnovne značajke dijela rješenja što ih u tom smislu nude dva vodeća svjetska proizvođača dizelskih motora (MAN B&W i SULZER) i prijedlozi za njihovo unapređenje, naročito glede tolerancije kvarova, a koji će se detaljnije razraditi u narednim poglavljima.

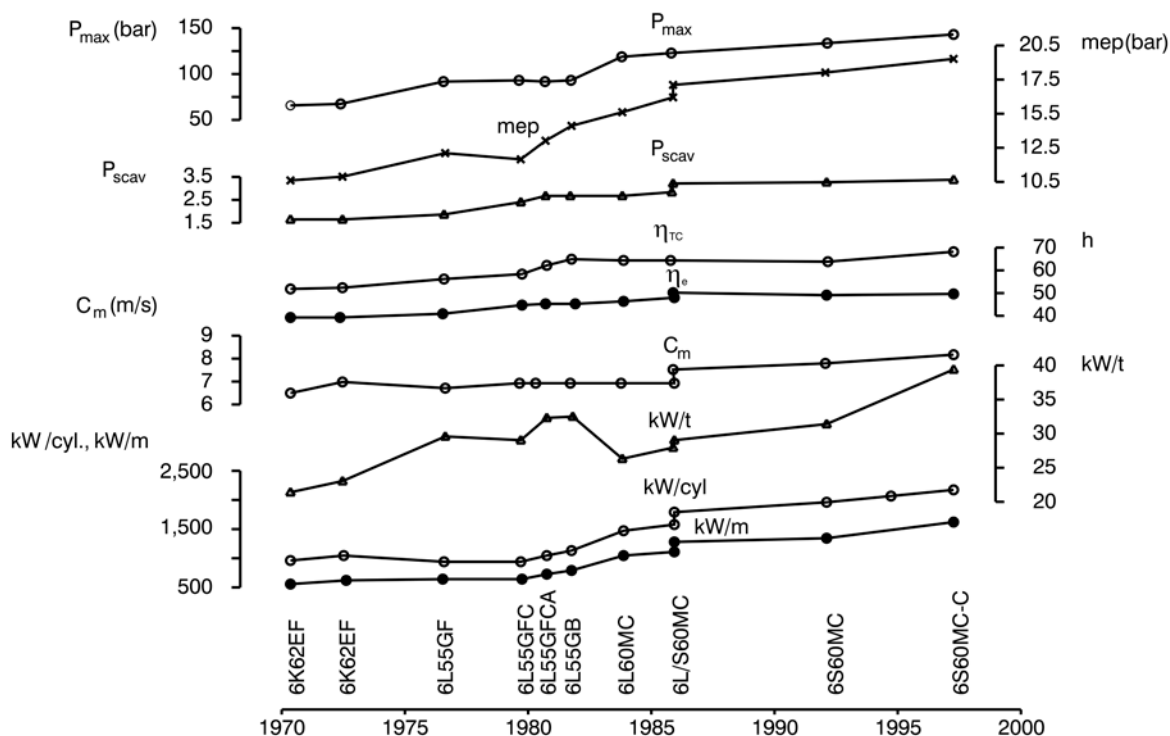
Identificirati će se ključni segmenti dizelskog procesa u eksploataciji (*održavanje, gorivo, ulje*), gdje se mogu ostvariti poboljšanja i uštede - povećati ekonomičnost, trajnost i iskoristivost. U tom smjeru idu i sadašnja novija istraživanja i rješenja proizvođača motora.

Glavni ciljevi poboljšanja koji se postavljaju u fazi projektiranja propulzijskih motora su:

- veća prilagodljivost zahtjevima propulzije u svim režimima,
- pouzdanost u pogonu,
- manja potrošnja goriva i ulja,
- udovoljavanje ISO zahtjevima glede emisije NO_x i SO_x plinova.

Slika 7 ilustrira razvojni proces ključnih parametara velikog broskog dizelskog motora svjetski poznate firme MAN B&W u zadnjih 30-tak godina.

Uočljiv je trend povećanja specifičnih snaga (kW/cil. ili kW/t) uz istovremeno smanjivanje težina i gabarita. Jednako taku su, učinkovitost i pouzdanost povećane usprkos povećanim snagama i relativnim opterećenjima.



Slika 7 Razvoj parametara performansi motora MAN B&W u zadnjih 30-tak godina.

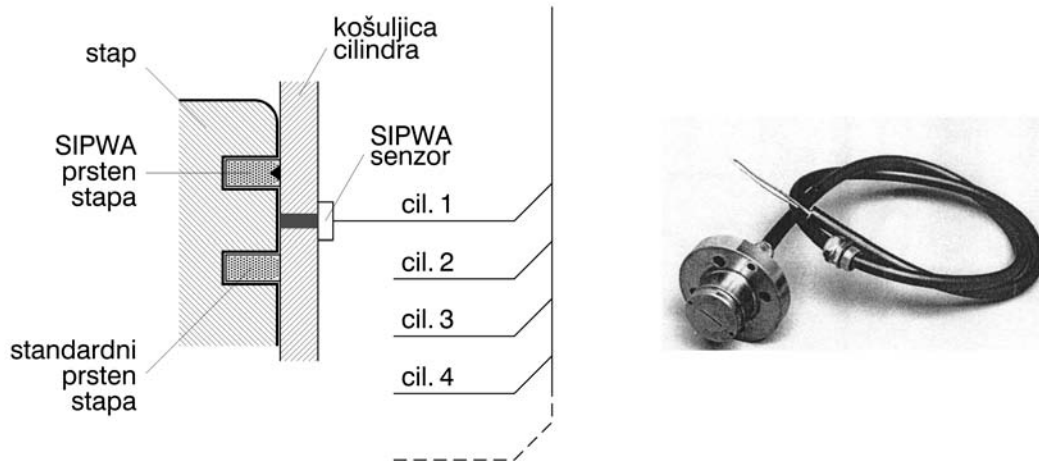
2.2. Konstrukcijska unapređenja motora u svrhe dijagnostike i upravljanja

Najviše konstrukcijskih preinaka na DM i prilagodbi novim elektroničkim tehnologijama zadnjih godina dogodilo se kod stapnog mehanizma, sustava ubrizgavanja goriva i ispuha, sustava podmazivanja cilindra.

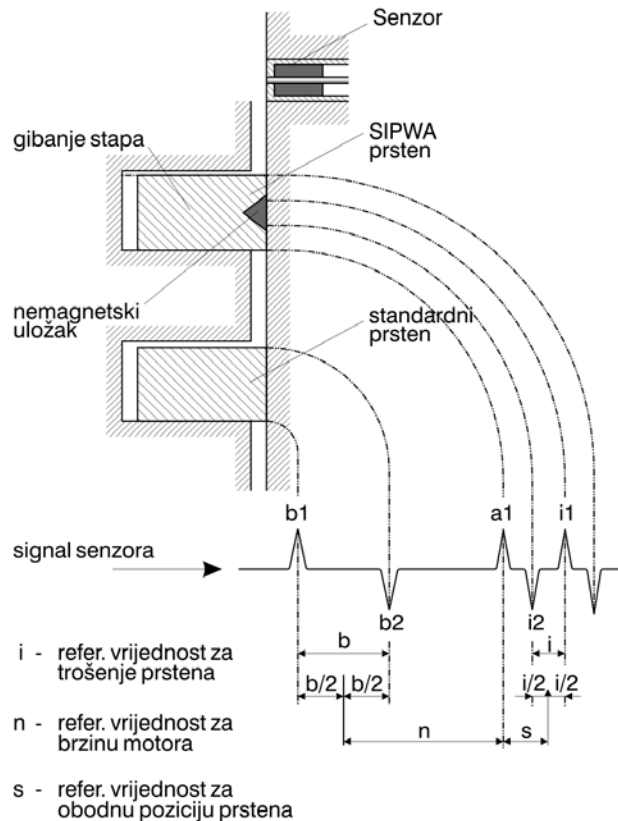
Slika 8 pokazuje novo rješenje za dijagnostiku stapnih prstena u stvarnom vremenu za velike dizelske motore proizvođača SULZER, SIPWA-TP (Sulzer Integrated Piston-ring Wear-detecting Arrangement with Trend Processing).

Ovo suvremeno rješenje omogućuje znatno bolju dijagnostiku trošenja stapnih prstena, vitalnih dijelova u radu motora.

Ključno je za ovaj koncept ugradnja SIPWA-TP prstena s inherentnim svojstvom detekcije trošenja kao najbližeg GMT (mjesto najvećeg trošenja i toplinskog opterećenja) u svaki cilindar motora. Prsten se izrađuje iz posebnih materijala s uloškom "V" oblika iz nemagnetskog materijala (vidi sl. 9) helikoidno postavljenim po cijelom obodu prstena. Induktivno osjetilo vrlo brzog odziva se ugrađuje u cilindarsku košuljicu u područje najmanjeg trošenja (nešto iznad ispušnog otvora).

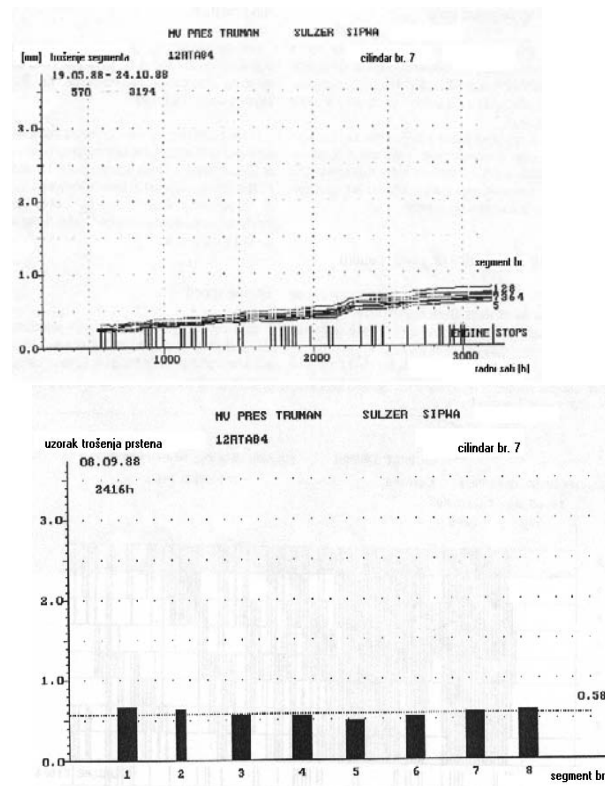


Slika 8 Ugradnja senzora za dijagnostiku stapnih prstena u stvarnom vremenu za velike dizelske motore.



Slika 9. Koncept dijagnostike stapnih prstena u stvarnom vremenu (SIPWA-TP).

Sam sustav dijagnostike zasnovan je na osobnom računalu (PC). Kontinuirano se prati stanje i trend trošenja za svaki cilindar. Primjer jednog uzorka distribucije trošenja stapnog prstena po segmentima njegovog oboda (snimljeno nakon 2016 sati rada stroja) prikazuje slika 10.



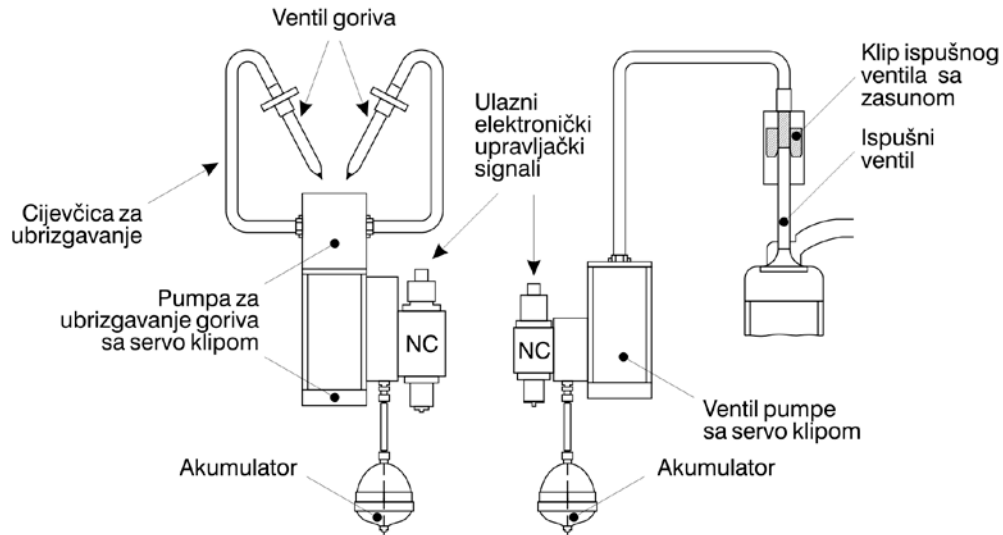
Slika 10. Uzorak distribucije trošenja stapnog prstena SIPWA-TP.

Sustav omogućuje određivanje segmenta po cijelom obodu prstena na kojem se trenutno mjeri trošenje i time točniju detekciju stanja cilindra, te mjerenje linearne brzine stapa u cilindru, a time i brzine vrtnje motora, što se može iskoristiti kao redundantna informacija za slučaj npr. otkaza mjernog davača - senzora brzine.

Bitno konstrukcijsko unapređenje koje doprinosi razvoju "inteligentnog" motora svakako je zamjena razvodnog vratila hidrauličnim servosustavom visokog stupnja upravljivosti, koji omogućuje upravljanje (elektroničko-hidrauličko) visokotlačnim pumpama goriva, sustavima ubrizgavanja goriva i aktuacije ispušnih ventila, podmazivanja cilindara i uputnim ventilima.

Upravljanje ubrizgavanjem goriva i radom ispušnih ventila pojedinačno za svaki cilindar obavlja se zasebnom mikroprocesorskom jedinicom i elektro-hidrauličkim aktuatorima (brzi proporcionalni servo ventili). Slika 11 [MAN B&W, publ. (2001)] shematski ilustrira princip upravljanja.

Računalom upravljani ventili vremenski su sinkronizirani - usklađeni s kutom koljenastog vratila motora.



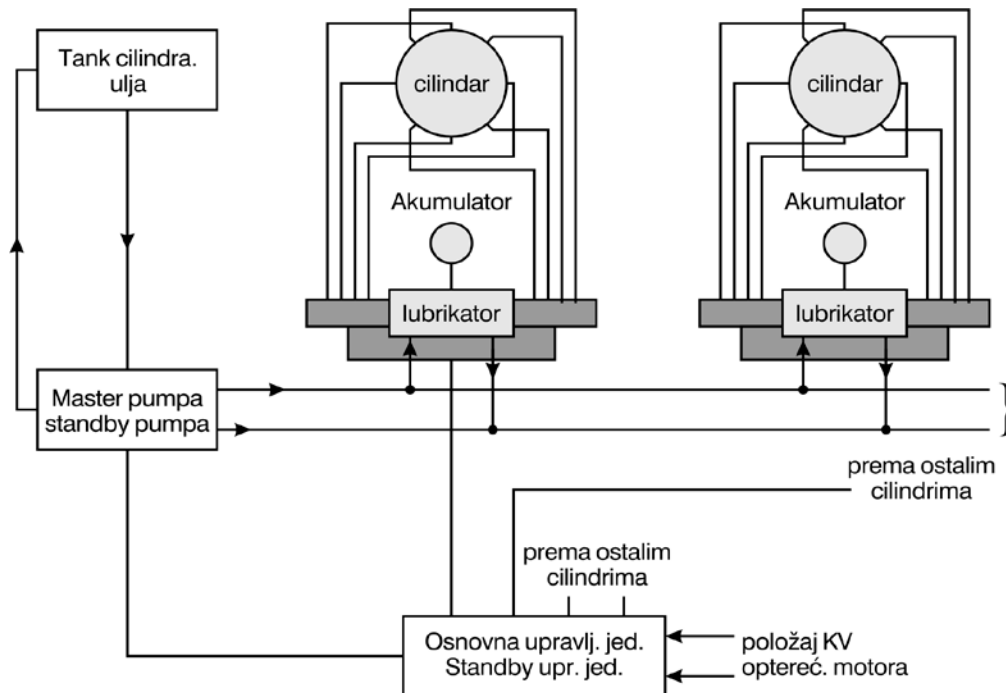
Slika 11. Pojedinačno upravljanje ubrizgavanja goriva i aktuacije ispušnih ventila cilindra.

Prednost ovog sustava u odnosu na konvencionalni je mogućnost brze prilagodbe promjeni režima rada motora, vrsti i kvaliteti goriva, te optimiranja procesa izgaranja. Integriran sa sustavom nadzora i dijagnostike u stvarnom vremenu, ovaj sustav omogućuje korekciju određenog nenormalnog stanja u njegovom začetku - prekoračenje granične vrijednosti parametra odnosno vraćanje i održavanje parametra u normalnim granicama. Npr. podatak o previsokoj temperaturi ispuha cilindra iz sustava nadzora može se iskoristiti za formiranje korekcijskog signala upravljanja ovom sustavu, koji će odgovarajuće zakasnuti trenutak ubrizgavanja goriva i/ili ranije otvoriti ispušni ventil dajući tako više energije TK i time povećati količinu rashlađenog zraka u cilindru, odnosno smanjiti temperaturu ispuha.

Sustav podmazivanja cilindara veoma važan je segment funkcionalnosti i pouzdanosti rada motora. Novi pristup upravljanju ovim sustavom omogućuje pojedinačnu kontrolu i doziranje ulja za podmazivanje svakom cilindru, ovisno o trenutnom opterećenju stroja, položaju KV, stanju cilindra, a time i optimalni rad i utrošak ulja.

Za brodske dizelske motore s velikim promjerom cilindra, po dvije su lubrikatorske¹ jedinice za svaki cilindar. **Slika 12.** [MAN B&W, publ. (2001)]: **ilustrira koncept mikroelektroničkog sustava upravljanja podmazivanja cilindara motora.**

¹ Lubrikator - ustaljeni naziv u pomorskoj praksi za podmazivač cilindra.

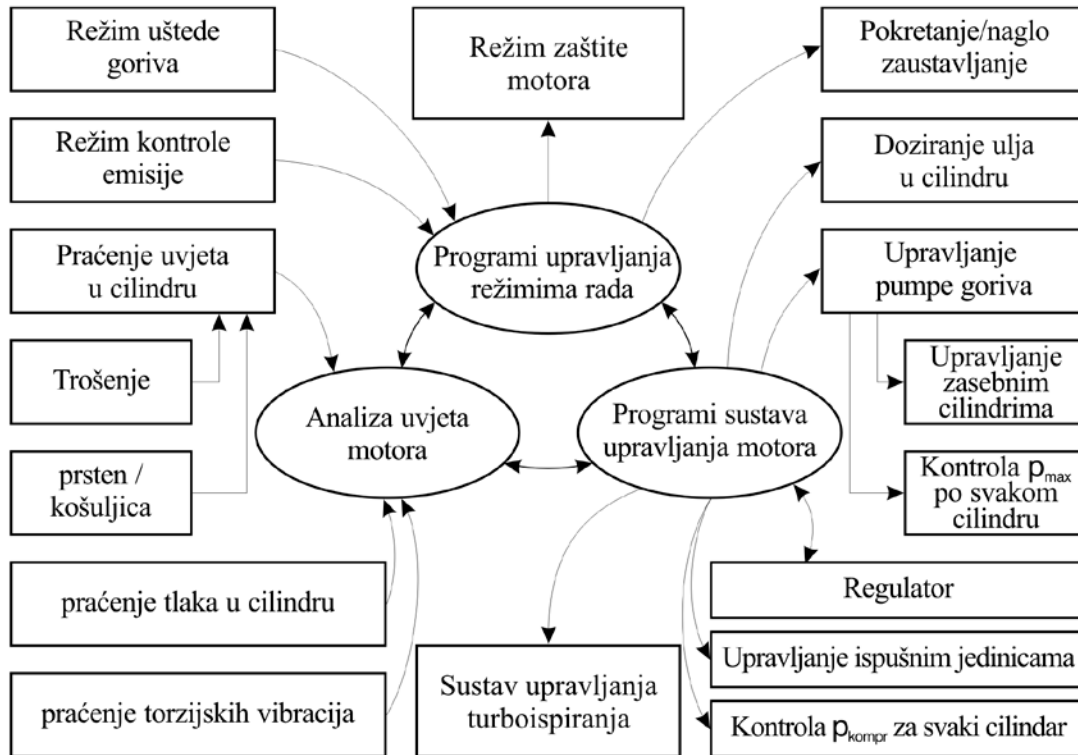


Slika 12. Koncept mikroelektroničkog upravljanja podmazivanjem cilindara.

Kontinuirano praćenje tlaka u cilindrima motora (sustav praćenja u stvarnom vremenu), te drugih, za proces izgaranja relevantnih varijabli (tlaka ubrizgavanja goriva, tlaka ispirnog zraka itd.) i optimiranje radnog procesa područje je mogućeg povećanja učinkovitosti rada i dijagnostike trenutnog, te predviđanja budućih stanja i raspoloživosti motora.

Tako je i za motore u eksploataciji trend ka razvoju "inteligentnog" motora u smislu kontinuiranog praćenja, dijagnostike i upravljanja svih relevantnih procesa (slika 13).

Koncept inteligentnog motora prvi je put primijenjen 1998. godine na brodu chemical carrier na propulzijskom motoru MAN B&W 6L60MC. Prema informacijama proizvođača u dosadašnjoj eksploataciji pokazao je dobre rezultate. Ovaj sustav kontinuirano izvještava operatera o stanju i poteškoćama u radu stroja s dijagnozom nastalog kvara, te s preporukama za rad motora dok se ne uspostave normalni radni uvjeti ili ne izvrši otklanjanje kvara.



Slika 13. Koncept inteligentnog motora

2.3. Ekspertni sustavi za dizelske motore u eksploataciji

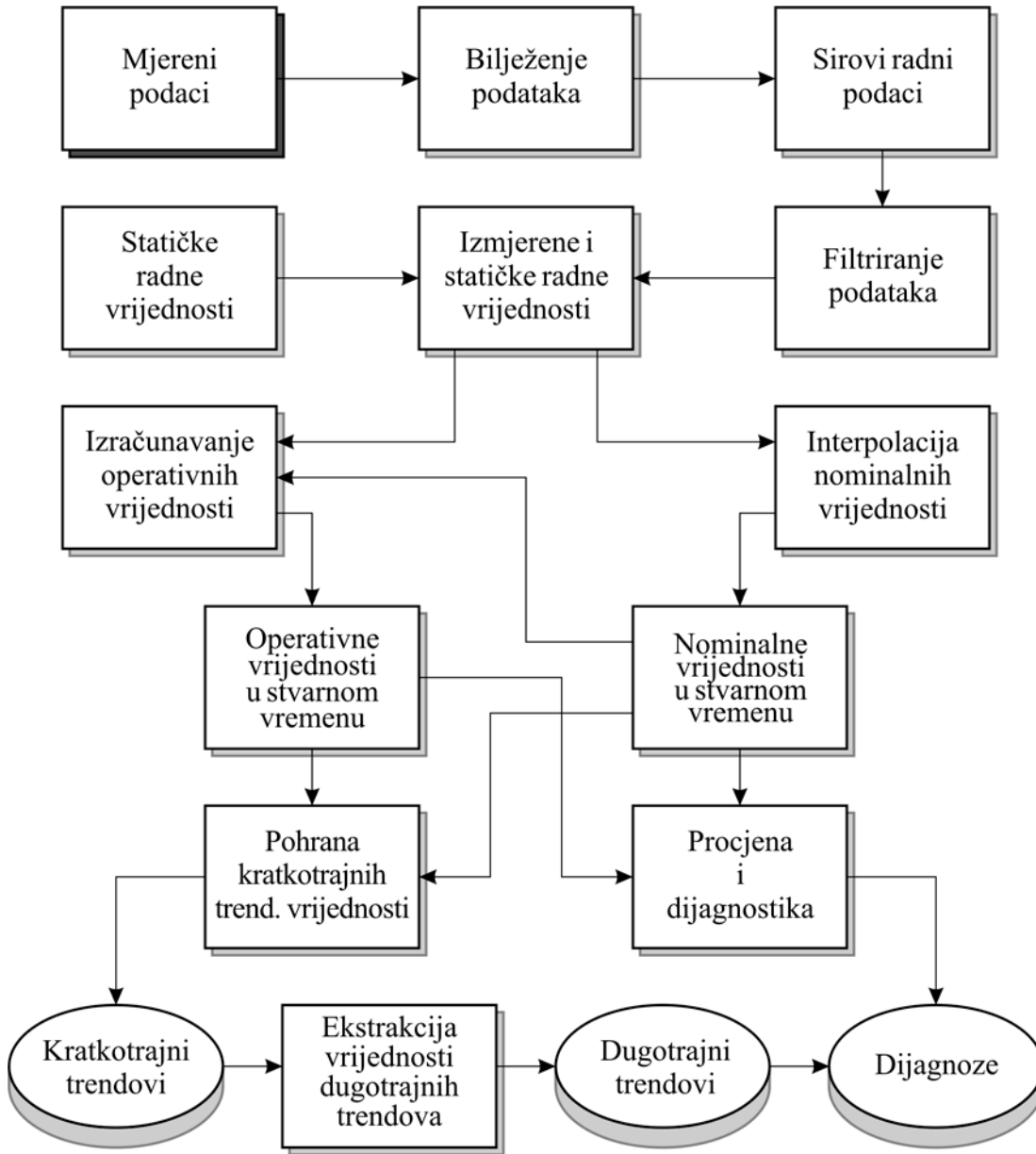
Poznati svjetski proizvođači brodskih dizelskih motora MAN B&W, SULZER, WARTSILA, PIELSTICK i drugi već su prije 10 - 15 godina započeli s razvojem i implementacijom sustava temeljenih na znanju i iskustvu eksperata i operatera, prvenstveno u području dijagnostike, održavanja, planiranja i rukovanja rezervnim dijelovima.

Tako su MAN B&W i PIELSTICK u kooperaciji razvili sustav CoCoS (Computer Controlled Surveillance) sa četiri temeljna softverska modula:

- CoCoS EDS - (Engine Diagnostics System) sustav za dijagnostiku rada stroja,
- CoCoS MPS - (Maintenance Planning System) sustav planiranja održavanja,
- CoCoS SPO - (Spare Parts Ordering) sustav narudžbi pričuvnih dijelova i optimiranja zaliha,
- CoCoS SPC - (Spare Parts Catalogue) sustav identifikacije pričuvnih dijelova.

Sustav je instaliran na brod i u eksploataciji je od sredine 1998. god. Ovaj sustav je integriran s osnovnim sustavom nadzora i upravljanja stroja. Sustav za dijagnostiku rada motora (EDS) dobiva podatke u stvarnom vremenu iz sustava nadzora, temeljem kojih i primijenjene baze znanja o motoru obavlja dijagnostiku.

Slika 14. ilustrira dijagram toka podataka odnosno informacija temeljem kojih se iz mjerenih podataka i pohranjene baze znanja obavlja dijagnostika u stvarnom vremenu.



Slika 14. Dijagram toka podataka-informacija u CoCoS sustavu.

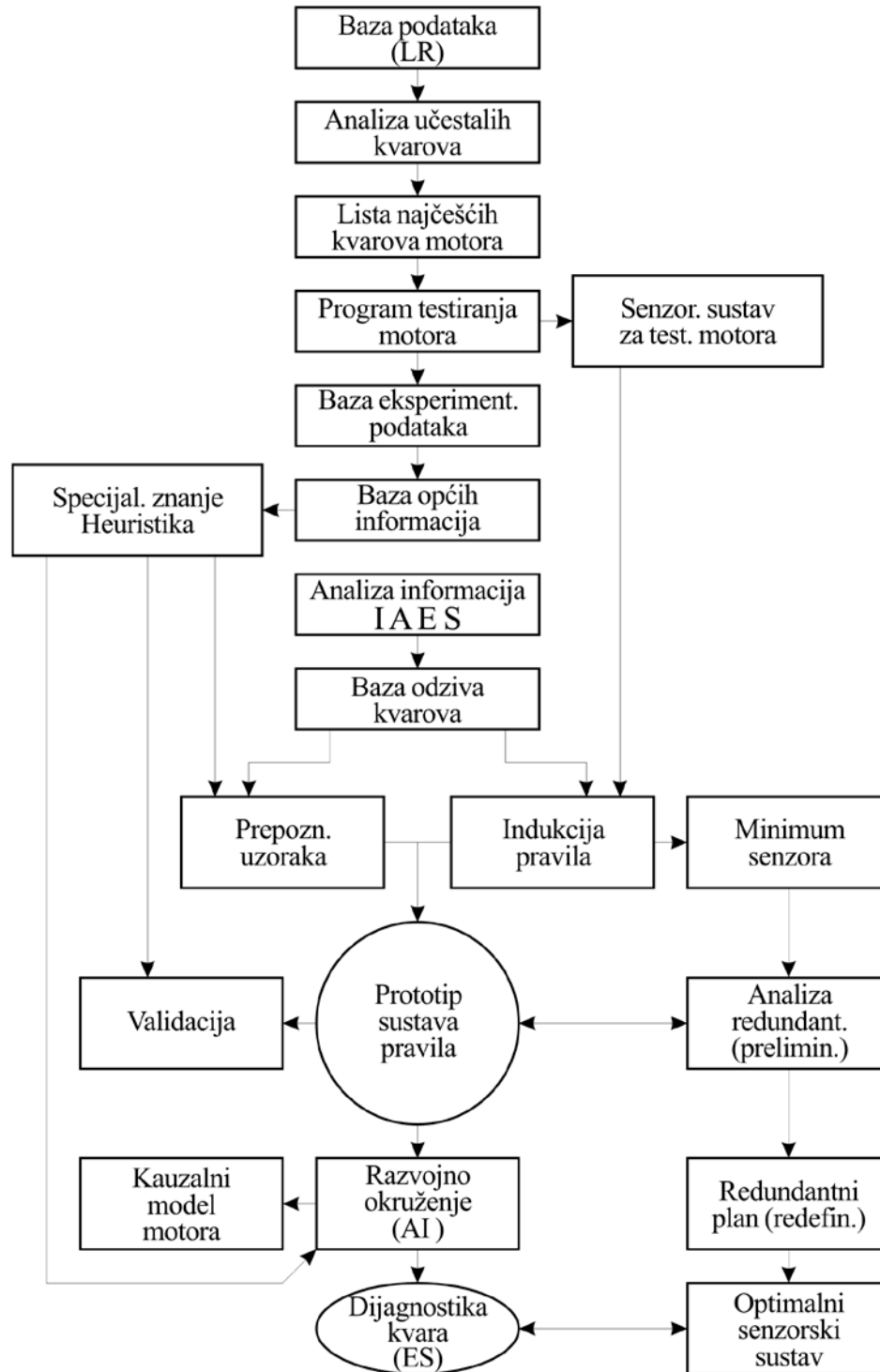
SULZER je razvio i primijenio sustav za dijagnostiku stanja brodskih dizelskih motora "MAPEX" (Monitoring And Performance enhancement with EXpert knowledge) koji

integriran sa sustavom dijagnostike SIPWA-TP pruža mogućnost optimiranja performansi u radu motora.

WARTSILA DIESEL je razvio ekspertni sustav FIKS (Fault Indicating Knowledge System) za detekciju i lokalizaciju kvarova 4-taktnih dizelskih motora.

U razvoj ekspertnih sustava brodskih motora išla su i vodeća klasifikacijska društva (Lloyd's Register, Bureau Veritas i dr.).

Slika 15 ilustrira koncept razvoja dijagnostičkog sustava dizelskih motora zvanog DEEDS (Diesel Engine Expert Diagnostic System) kakvog koristi Lloyd's Register.



Slika 15. Razvojni proces ES za dijagnostiku dizelskih motora - DEEDS.

Zajedničke osnovne značajke u dosadašnjem razvoju sustava nadzora, dijagnostike i upravljanja brodskih dizelskih motora u eksploataciji su:

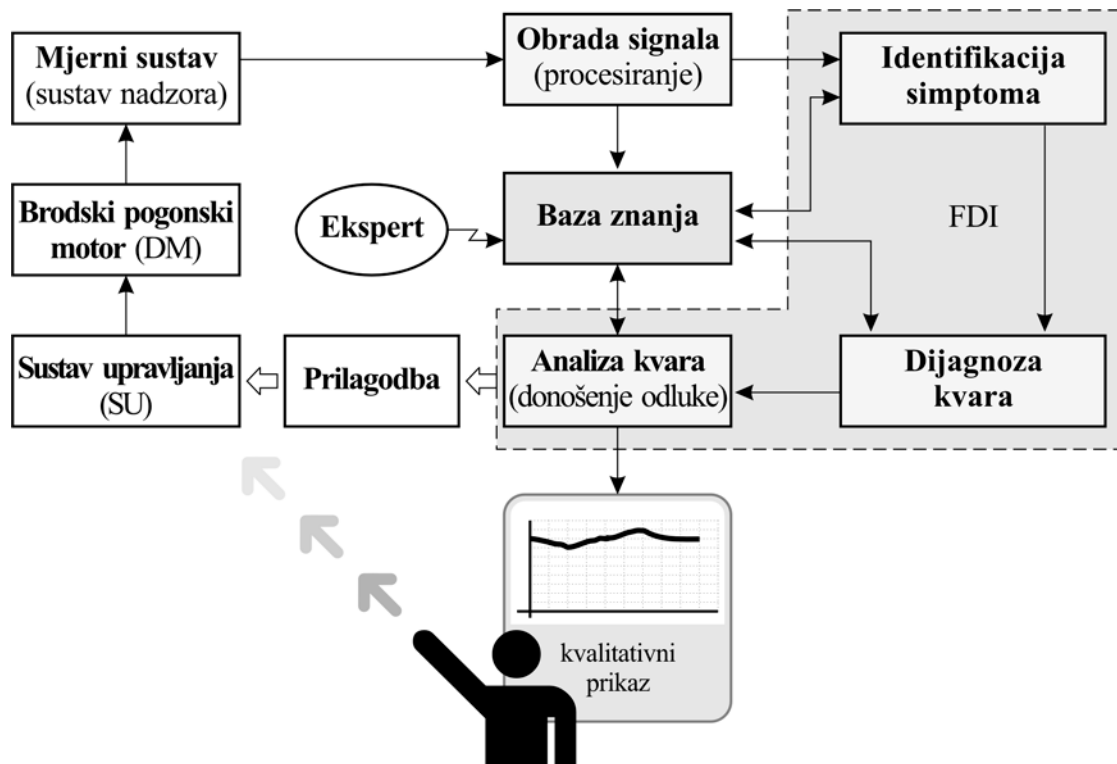
- segmentirano uvođenje novih tehnologija i tehnika upravljanja i određeno vremensko kašnjenje (brod kao specifično i teško okruženje) u odnosu na neka druga područja.
- nepotpuna standardiziranost i kompatibilnost opreme za automatizaciju (različiti proizvođači i standardi),
- međusobno uvjetovanje između tehnoloških i konstrukcijskih mogućnosti motora kao objekta upravljanja i primjene novih tehnika i tehnologija upravljanja,
- iskorištavanje mogućnosti mikroelektroničke tehnologije (mikroprocesora) u upravljanju posebno važnih procesa motora (gorivo, ulje, ispuh) s temeljnim ciljem povećanja učinkovitosti i smanjivanja troškova u eksploataciji motora,
- težnja (u zadnjih desetak godina) za prikupljanjem i primjenom znanja i iskustva eksperata u upravljanju i dijagnostici, razvojem i primjenom ekspertnih sustava, prvo kao podrške sustavima nadzora i upravljanja u stvarnom vremenu, a onda i njihova integracija s ciljem bolje dijagnostike i održavanja,
- sigurnost i zaštita procesa temeljene su prvenstveno na HW redundantnosti komponenti i konceptu pasivne zaštite (dovođenje procesa u sigurno stanje: SLD ili SHD) u slučaju kvara ili posebnih situacija,
- ograničene mogućnosti detekcije i naročito identifikacije kvarova i prilagodbe u režimu realnog vremena,
- postupna integracija funkcija nadzora, upravljanja, dijagnostike i zaštite na razini broskog propulzijskog procesa, te integracija u jedinstveni sustav upravljanja broda.

3. MOGUĆNOSTI UNAPREĐENJA POSTOJEĆIH SUSTAVA UPRAVLJANJA I DIJAGNOSTIKE DIZELSKOG MOTORA

Osnovna ideja u izgradnji inteligentnih sustava upravljanja jest ugradnja i korištenje logike zaključivanja i donošenja odluka - akcija svojstvenih čovjeku (operateru-ekspertu), te mogućnost snalaženja odnosno uspješnog vođenja procesa u nepredvidljivim okolnostima, kao što su kvarovi ili situacije nužde, iznenadnog manevra i sl.

Ovakvi sustavi inherentno su zasnovani na bazi znanja o procesu, što znači da za njihov rad nisu dovoljni samo mjereni - osmotreni podaci, već su oni ovisni i o kvalitetnoj bazi znanja o procesu - objektu upravljanja.

Slikom 16. ilustriran je koncept odnosno struktura inteligentnog sustava upravljanja i dijagnostike broskog pogonskog motora, koja integrira sustav nadzora odnosno praćenja u stvarnom vremenu i bazu znanja eksperta, operatera. Iz slike je očito da ovakvi sustavi u radu koriste, osim signala dobivenih neposrednim mjerenjem s mjernih pretvarača - senzora, i pridodane baze znanja i simulacijske modele procesa, te mehanizme zaključivanja i odluke što im pruža nove mogućnosti dijagnostike, te inteligentnog i adaptivnog upravljanja.

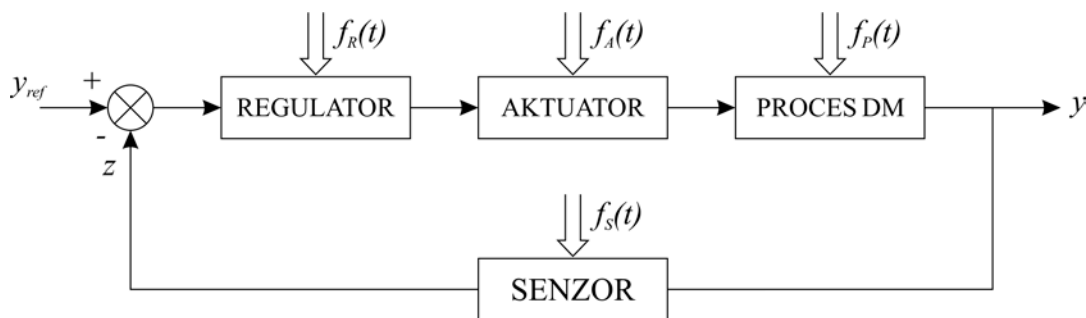


Slika 16 Koncept sustava upravljanja i dijagnostike broskog dizelskog motora temeljen na bazi znanja i sustavu nadzora.

3.1. Kvarovi u sustavu brodske propulzije

Elemente strukture SU broskog dizelskog procesa, slično drugim procesima, čine senzori odnosno mjerni davači, aktuatori, regulatori odnosno upravljački algoritmi i sam proces kao objekt dijagnostike i upravljanja.

Kvarovi u sustavu, na bilo kojoj komponenti, javljaju se kao slučajni događaji s različitim učincima na performanse rada, ovisno o vremenu i mjestu nastanka, te veličini i posljedicama po osnovnu misiju sustava. Svaki kvar se tretira kao nenormalno stanje u radu sustava. Klasifikacija kvarova može se obaviti prema fizičkoj lokaciji nastanka ili efektima odnosno posljedicama na funkcioniranje sustava. Slika 17 ilustrira osnovne komponente sustava u kojima nastaju kvarovi, a koje je potrebno dijagnosticirati s ciljem odgovarajuće prilagodbe SU novo nastaloj situaciji s kvarovima.



Slika 17 Struktura zatvorenog sustava s kvarovima.

Kvar u zatvorenom sustavu, ponekad u svom nastajanju tj. početnoj fazi može biti i "skriven" sve dok se ne razvije u neizbježno stanje kvara, o čemu se mora voditi računa pri projektiranju sustava dijagnostike i upravljanja.

Signali iz mjernih davača - senzora nose najvažnije informacije u zatvorenom SU i zato je njihova ispravnost od bitne važnosti za pouzdan rad cijelog sustava.

Najčešći kvarovi senzora su prekid ili kratki spoj, nepoznati offset (istosmjerni pomak) u izlaznom signalu, neočekivane promjene - kvarenje dinamičkih karakteristika, prisustvo šuma.

Najčešći kvarovi aktuatora, kojih je na broskom dizelskom motoru više različitih tipova (električni, pneumatski, hidraulički, mehanički, kombinirani), su blokiranje, istrošenost, trenje, starenje, kvarenje dinamičkih karakteristika, sve do potpunog prekida funkcionalnosti, što može ozbiljno ugroziti rad cijelog sustava. Njima se posvećuje posebna pozornost, počevši od konstrukcije, izvedbe, te robusnosti i redundandnosti.

Kvarovi regulatora najčešće su u domeni softvera (digitalni regulatori, procesni i upravljački SW algoritmi) ili elektroničkih komponenata, te A/D i D/A pretvornika koje se obično svrstava u senzorske ili aktuatorске kvarove.

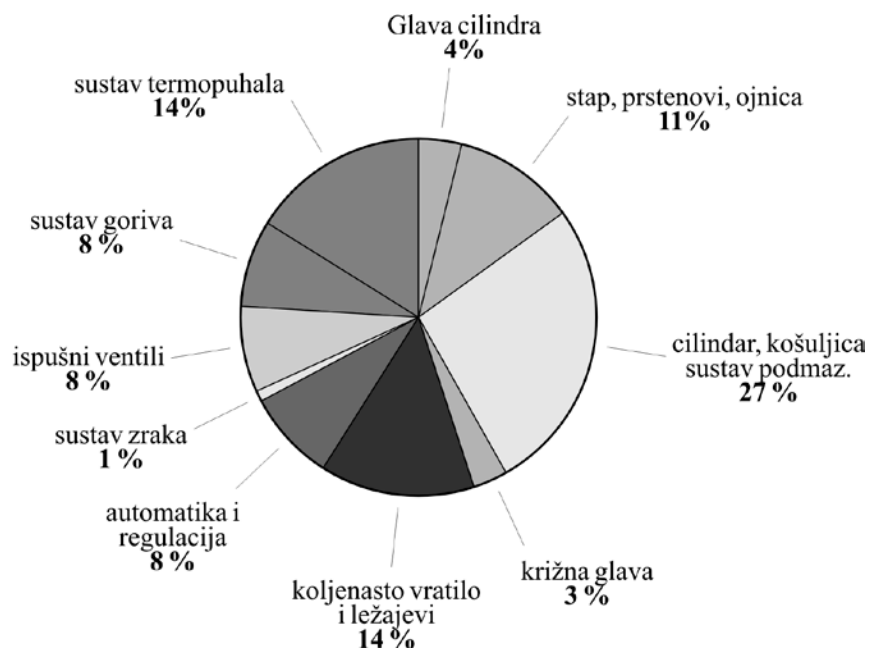
Kvarovi samog sustava - dizelskog motora koji je, kao što je pokazano u 2. poglavlju, sastavljen iz niza međusobno ovisnih i povezanih podsustava s velikim brojem raznolikih komponenti, ovdje će se dodatno analizirati na simulatoru dizelskog propulzijskog procesa Norcontrol PPS2000, koji omogućuje simulaciju kvarova komponenti i utjecaj na

ukupan rad veoma blizu realnim uvjetima na brodu. S obzirom na veliki broj različitih, kvarovima podložnih, komponenti procesa dizelskog motora, kvarovi se mogu javljati relativno često tijekom rada, pa je detekcija i lokalizacija istih od posebne važnosti za sigurnost i pouzdanost rada.

Učestalost kvarova na velikim brodskim dizelskim motorima ovisna je o mnogobrojnim čimbenicima: konstrukciji i kvaliteti materijala, izradi, održavanju, uvjetima plovidbe, duljini eksploatacije i drugim. Temeljem dugogodišnjeg iskustva za motore u eksploataciji, ipak se može približno doći do raspodjele učestalosti kvarova vitalnih dijelova .

Slika 18 prikazuje raspodjelu učestalosti kvarova komponenti brodskog dizelskog motora, grupirano po pojedinim najvažnijim podsustavima i komponentama.

Raspoloživost brodskog pogonskog motora svakako je ključna za misiju broda, pa je pitanje kvarova od nezaobilazne važnosti u projektiranju i primjeni SU.

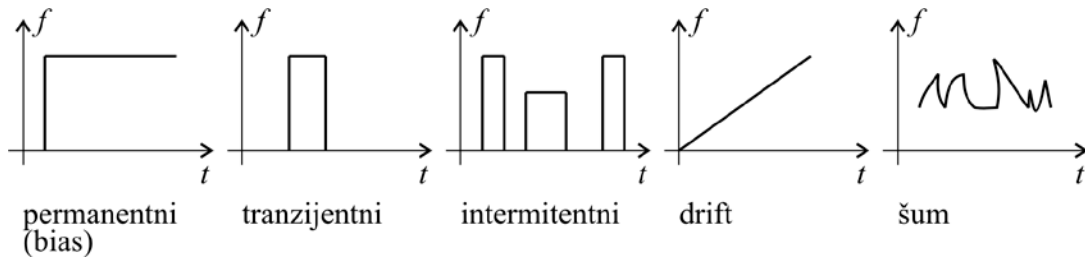


Slika 18 Učestalost kvarova komponenti dizelskog motora (statistički podaci).

3.2. Tipovi kvarova

Projektiranje sustava visoke pouzdanosti i funkcionalnog integriteta ovisi svakako i o tipovima mogućih kvarova, koji se mogu pojaviti tijekom rada, a koji karakteriziraju ponašanje komponenti u raznim okolnostima. **Kvarove se, prema fizičkoj lokaciji nastanka, može klasificirati u sistemske (kvarovi komponenti sustava), kvarove aktuatora i kvarove senzora. Oni se mogu razlikovati po formi nastajanja kao sistematski i slučajni kvarovi. Prema vremenskim karakteristikama kvarovi mogu biti (slika 19) :**

permanentni (bias), tranzijentni, intermitentni, drift, šum.



Slika 19 Tipovi kvarova po vremenskim karakteristikama.

Prema efektima odnosno posljedicama kvarovi mogu biti lokalni i globalni s manjim ili ozbiljnim posljedicama na rad sustava.

Kvarove se može modelirati prema njihovim učincima na odziv - izlaze sustava, kada ih se klasificira u aditivne i multiplikativne:

Aditivni kvarovi obično ne mijenjaju dinamiku sustava. Relativno ih je lako detektirati. Primjeri za ovaj tip kvara su: blokada izvršnog elementa aktuatora u određenom položaju ili istosmjerni pomak (offset) u senzorskom signalu.

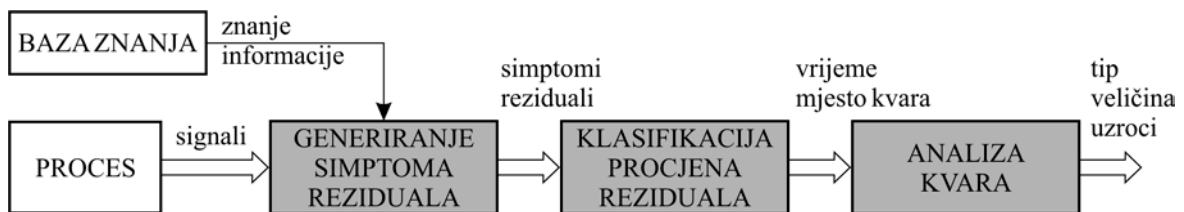
Kvarovi komponenti sustava su po svojoj prirodi multiplikativni. Oni mogu imati ozbiljne posljedice na ukupan rad sustava, od abnormalnih promjena u dinamičkom ponašanju do nestabilnosti i prekida rada. Kvarovi aktuatora i senzora mogu biti aditivnog i multiplikativnog tipa.

4. METODE I TEHNIKE DIJAGNOSTIKE KVAROVA

Osnovni zadaci u dijagnostici kvarova su:

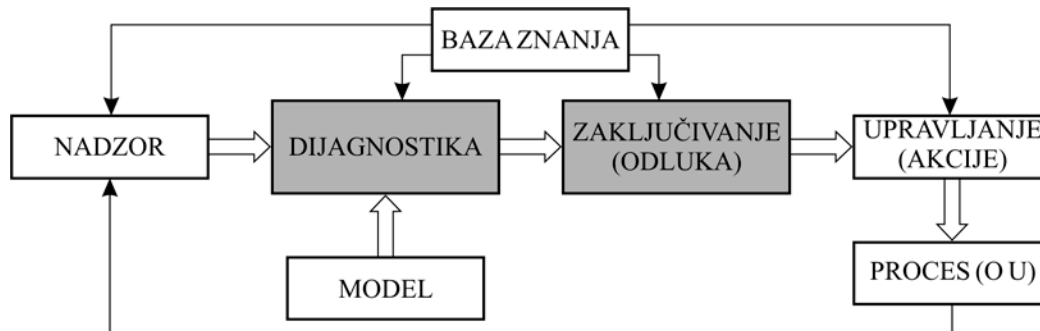
- otkrivanje kvara (engl. fault detection),
 - detektirati vrijeme nastanka kvara uz prisustvo poremećaja (smetnje, šum)
- lokalizacija kvara (engl. fault isolation),
 - klasificirati nastale kvarove, odnosno odrediti mjesta nastanka, vrstu i vremena pojave kvarova,
- analiza - identifikacija kvara (engl. fault analysis),
 - odrediti veličinu, tip kvara, uzroke i moguće posljedice.

Slika ilustrira proceduru u dijagnostici kvarova.



Slika 20. Procedura dijagnostike kvarova.

Jedan od učinkovitih načina za ostvarivanje aktivnog SUTK jest primjena on-line tehnika dijagnostike kvarova zajedno s kvalitetnim sustavom nadzora i upravljanja, čiji je princip ilustriran slikom 21.



Slika 21 Koncept on-line dijagnostike.

Sustavi dijagnostike kvarova mogu se, prema načinu generiranja reziduala - simptoma kvarova, klasificirati u tri skupine:

- generiranje reziduala temeljem mjerenih signala,
- temeljem analitičkih (matematičkih) modela,
- temeljem znanja eksperata (kvalitativni, heuristički modeli).

Dijagnostika na temelju simptoma

Simptomi predstavljaju promjenu osmotrivog kvantificiranog parametra od normalnog stanja sustava ili opažanje eksperta, operatera, heurističke činjenice i drugo, što ukazuje na mogućnost pojave kvara sustava, te se mogu izraziti kao:

- **analitički:** promjene u rezidualima, koje su prešle prag za detekciju kvara (konstantni ili adaptivni),
- **heuristički:** opažanje ili mjerenje eksperta, operatera (akustički šum, posebne oscilacije, boja, dim, miris,..), heurističke činjenice temeljene na iskustvu eksperta, operatera,
- **statistički podaci i povijest procesa** (učestalost kvarova, vrijeme rada bez kvara, prosječno vrijeme između kvarova, prosječno vrijeme trajanja komponenti, posljednji popravak, dopušteno opterećenje, radna područja i opterećenja, povijest ponašanja u sličnim okruženjima, trend analiza itd.).

Za obradu simptoma i identifikaciju kvarova koriste se različite metode zaključivanja u okviru FDI shema i dijagnostičkih ekspertnih sustava

Baza znanja za sustav dijagnostike formira se kao skup pravila i činjenica koji opisuju logičku vezu između opaženih simptoma i kvarova. Za mnoge komponente sustava, dublja fizikalna slika između simptoma i kvara, te dinamika prostiranja kvara nije poznata (npr. utjecaj temperature ležaja na trenje, istjecanja medija, sadržaj metala u ulju, vode u gorivu, pukotina u materijalu i sl.). Zato se, heuristička znanja obično predstavljaju u obliku statičkih odnosno produkcijskih pravila tipa:

ako <uvjet> onda <posljedica>

Uvjeti (premise) predstavljaju činjenice u obliku opaženih simptoma S_i ili međudogađaja E_k , a posljedice (zaključci ili akcije) su međudogađaji E_k ili kvarovi F_j kao logički uzroci činjenica. Pravila se obično organiziraju u hijerarhijsku strukturu u obliku stabla kvarova,

$$F = \{f_i : i = 1, 2, \dots, I\}; \quad S = \{s_j : j = 1, 2, \dots, J\}$$

$$V = \bigcup_{s_j \in S} V_j \quad ; \quad r_v = F \times S \rightarrow r(V)$$

gdje je: F - skup kvarova komponenti sustava.

S - skup dijagnostičkih signala / simptoma, koji u on-line dijagnostici čine varijable / parametri i njihov trend vremenske promjene.

V - skup vrijednosti dijagnostičkih signala.

r_v - funkcija definirana na Cartezijevom skupu $F \times S$, kojom se svakom paru kvar - simptomi $\{f, s\}$ dodjeljuje jedna ili više vrijednosti za svaki pojedini kvar:

$$r_v(f_i, s_j) = V_{ij} \subset V_j$$

U najjednostavnijem slučaju, vrijednosti dijagnostičkih signala mogu se izraziti u binarnom obliku $V_j = \{0, 1\}$, kada se dijagnostički sustav može predstaviti pomoću binarne dijagnostičke matrice kvarovi / simptomi u kojoj stupce sačinjavaju kvarovi a retke simptomi odnosno dijagnostički signali.

Signatura tj. opis i-tog kvara definiran je skupom mogućih dijagnostičkih signala, simptoma za taj kvar i njima pridruženih vrijednosti:

$$D(f_i) = \{S_{ij}, v_{ik} : j = 1, 2, \dots, J \ ; \ k = 1, 2, \dots, K\}, \quad S_{ij} \subset S \ ; \ v_{ik} \subset V_j$$

Uzmimo za primjer slijedeću dijagnostičku tablicu (tablica 1) s binarnim relacijama simptomi-kvarovi i pokažimo princip zaključivanja odnosno detekcije kvarova.

Tablica 1: Binarne relacije simptomi-kvarovi

F/S	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_0
s_1	1	0	1	1	1	0	1	0
s_2	0	1	0	1	1	0	0	0
s_3	1	0	0	0	1	1	0	0
s_4	1	1	1	0	0	1	1	0
s_5	0	0	1	1	0	0	1	0

Pravila zaključivanja odnosno detekcije kvarova, mogu se u ovom slučaju izraziti oblikom:

$$\text{Ako } s_j = v_{jk} \text{ onda } f_i \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, I; \ j = 1, 2, \dots, J; \ k = 1, 2, \dots, K$$

Npr. za kvar f_1 vrijedi:

$$\text{Ako } s_1 = 1 \text{ i } s_2 = 0 \text{ i } s_3 = 1 \text{ i } s_4 = 1 \text{ i } s_5 = 0 \text{ o n d a } f_1$$

Kvarovi koji imaju identičan opis odnosno istu kolonu u dijagnostičkoj matrici ne mogu se razlikovati tj. lokalizirati. Primjer su kvarovi f_3 i f_7 iz tablice.

Bolja lokalizacija i brže otkrivanje kvarova postižu se, ako se u opisani dijagnostički sustav uključi i dinamika nastajanja odnosno vremenski slijed kvarova, te više-vrijednosna umjesto binarne logike. Sada se dijagnostički sustav može izraziti u proširenom obliku:

$$DFST = \{F, S, V, r_v, T, r_T\}$$

$$T = \{t_{ij}^l : i = 1, 2, \dots, I ; j = 1, 2, \dots, J ; l = 1, 2\}$$

T - skup vremenskih parametara (izraženih u sekundama ili bez dimenzijskim brojem za slučaj višestrukih perioda uzorkovanja dijagnostičkih signala)

r_T - funkcija koja pridjeljuje vrijednosti skupu T za svaki par iz skupa kvarovi - simptomi i to po dvije vrijednosti: t_{ij}^{\min} i t_{ij}^{\max} :

t_{ij}^{\min} - minimalni vremenski period između pojave i -tog kvara i j -tog simptoma,

t_{ij}^{\max} - maksimalni vremenski period između pojave i -tog kvara i j -tog simptoma.

Dobar način za određivanje ovih parametara jest testiranje i analiza na probnom stolu motora ili heurističko iskustvo operatera i eksperata.

U ovom slučaju, pravilo zaključivanja za dijagnostički sustav može se izraziti ovako:

$$\text{Ako } s_j = v_{jk} \text{ i } t_{ij}^{\min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{\max} \text{ onda } f_i$$

Primjer: Detekcija i lokalizacija kvarova na cilindru motora 5L90MC (simulirano pri opterećenju motora 100 % na simulatoru Norcontrol PPS2000)

simulirani kvarovi: f_1 : istrošenost stapnih prstena 1. cilindra (80 %)

f_2 : propuštanje stapnih prstena 1. cilindra (80 %)

opaženi simptomi:

s_1 : pad tlaka kompresije i maksimalnog tlaka u 1. cilindru,

s_2 : pad okretnog momenta i brzine motora,

s_3 : porast temperature košuljice u 1. cilindru,

s_4 : porast temperature zraka na ulazu u 1. cilindrar,

s_5 : porast temperature ispuha iz 1. cilindra,

s_6 : porast odstupanja temperature ispuha 1. cilindra prema srednjoj vrijednosti svih cilindara

s_7 : porast temperature poklopca 1. cilindra,

s_8 : porast tlaka goriva u motor

Relacije između simuliranih kvarova i opaženih simptoma dane su tablicom 2, dok su u tablici 3 dana vremena pojave simptoma za simulirane kvarove.

Tablica 2: Dijagnostička binarna tablica simptomi – kvarovi za DM 5L90MC.

Simptomi/ kvarovi	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
f_1	1	1	1	0	1	1	1	1
f_2	1	1*	1	1	1	1	1	1

Tablica 3: Vremena pojave simptoma za simulirane kvarove f_1 i f_2 .

Simptomi/ vremena	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
t_{1min}	4	9	55	-	201	203	293	315
t_{2min}	4	6	41	188	194	196	275	194
t_{1max}	7	18	64	-	212	318	318	326
t_{2max}	7	11	52	204	206	209	306	312

Iz tablica 2 i 3 vidljivo je da se, temeljem vremenske pojave simptoma i trenda parametara, može već nakon pojave drugog simptoma s_2 (cca. 10-tak sekundi) obaviti detekcija i lokalizacija kvarova f_1 i f_2 . Bez uzimanja u obzir vremena pojave simptoma i kvarova u ovom slučaju lokalizacija kvara bi bila moguća tek nakon pojave simptoma s_4 tj. za oko 180 sekundi, što je relativno kasno za odgovarajuću reakciju.

Vremenska pojava simptoma ovisi o dinamici sustava, radnom režimu i definiranim vrijednostima praga reziduala dijagnostičkih signala. Tako, za niži prag reziduala brža je detekcija, ali i veća vjerojatnost pojave lažnih alarma, dok se za viši prag povećava vjerojatnost ne otkrivanja kvara ili zakašnjelog otkrivanja.

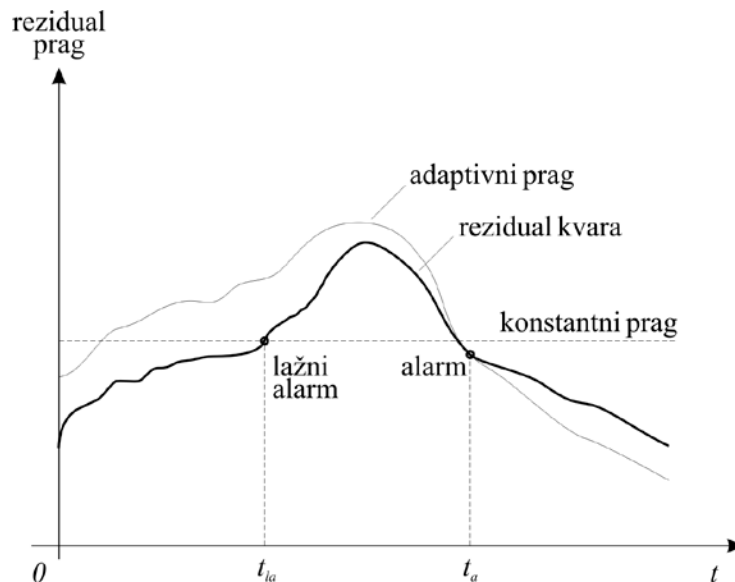
Zato se u novije vrijeme, umjesto konstantnog praga, sve češće koristi vremenski promjenjivi, adaptivni prag koji se prilagođuje promjenama radnih uvjeta sustava (npr. značajnije promjene radne točke, determinističke smetnje - poremećaji).

Slika 23 ilustrira princip detekcije s konstantnim i adaptivnim pragom. Očito je, da se u slučaju konstantnog praga javlja u točki 1 lažni alarm, a u točki 2 neotkrivena pojava stvarnog kvara, što se adaptivnim pragom izbjegava.

Adaptivni prag se može vremenski mijenjati praćenjem nekoliko relevantnih mjerljivih signala (npr. promjene postavne vrijednosti brzine motora - radne točke, režima rada: normalan rad, rad u nuždi, rad s kvarovima ili vanjskih utjecaja - poremećaja: stanje mora, snaga i brzina vjetra i sl.). On se može i analitički odrediti.

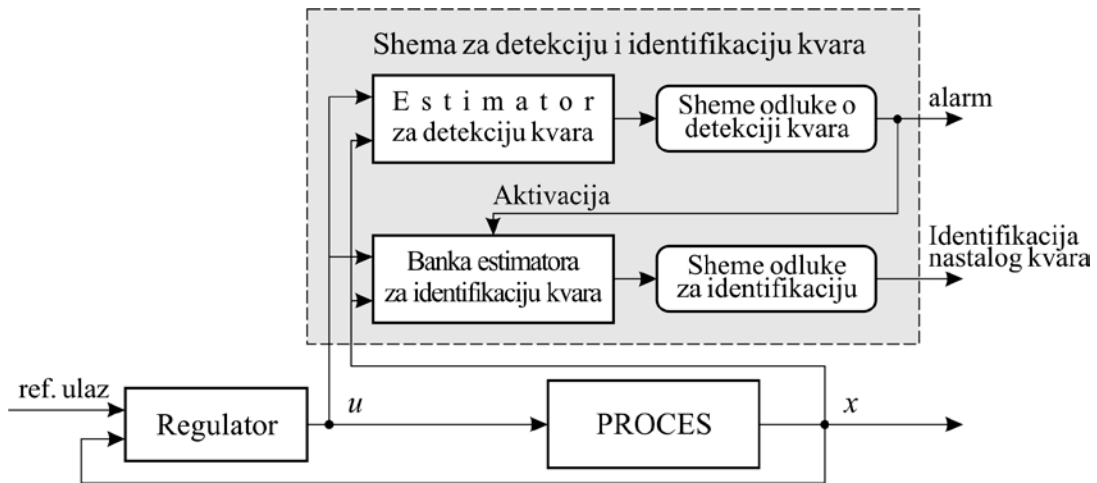
U novije vrijeme koriste se sve više metode za adaptaciju praga reziduala simptoma, temeljene na neizrazitoj logici i neuronskim mrežama, što omogućuje bolju prilagodbu praga trenutnom stanju procesa i heurističkom iskustvu operatera.

Na ovaj način, kombinacijom podataka dobivenih iz sustava nadzora i dijagnostike u stvarnom vremenu, te koristeći bazu pravila, moguće je učinkovito obavljati detekciju i lokalizaciju kvarova, što se dalje može koristiti za prilagodbu strukture SU nastalom kvaru.



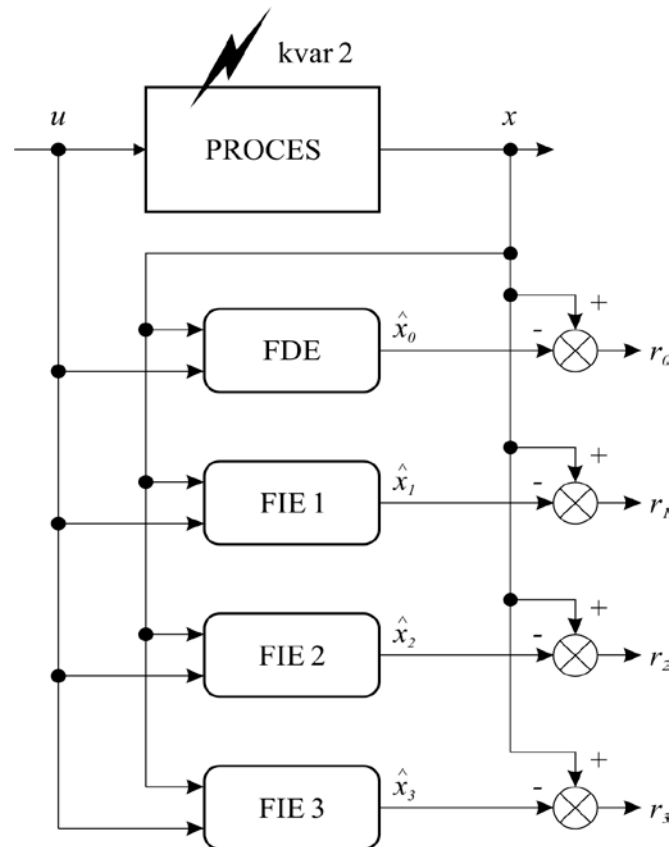
Slika 23. Detekcija kvara konstantnim i adaptivnim pragom.

Jedna od pogodnih shema FDI bila bi s bankom nelinearnih adaptivnih estimatora (sl. 24).



Slika 24 Struktura sheme za detekciju i identifikaciju kvarova.

U shemi se primjenjuje $N+1$ estimatora: jedan od njih je za detekciju nastanka kvara i kao aproksimator funkcije kvara. Ostalih N su za identifikaciju N tipova kvarova (svakom estimatoru pridijeljen je samo jedan tip kvara). Slika 25 ilustrira primjer sheme FDI za slučaj tri tipa kvarova u procesu.



Slika 25 Primjer FDI sheme za detekciju i identifikaciju 3 tipa kvara sustava.

U normalnim radnim uvjetima u funkciji je samo estimator za detekciju kvara (FDE) koji stalno nadzire proces, te ga uspoređuje s nominalnim. Kada ovaj detektira nastanak kvara, odmah se aktiviraju svi estimatori za identifikaciju (FIE) određenog tipa kvara. Svaki estimator za identifikaciju tipa kvara u shemi osjetljiv je na sve tipove, osim njemu pridijeljenog, pa se identifikacija nastalog kvara obavlja metodom eliminacije. Rezidualu svakog estimatora kvara pridijeljen je odgovarajući adaptivni prag. Ovaj se može lako primijeniti u stvarnom vremenu korištenjem metoda linearnih filtara (npr. Kalmanovih). Pojava određenog tipa kvara je isključena, ako najmanje jedna od rezidualnih komponenti odgovarajućeg estimatora za identifikaciju prijeđe svoj adaptivni prag u konačnom vremenu. U određivanju adaptivnog praga uvijek je kompromis između lažnih alarma i neotkrivenih kvarova.

Drugi, veoma važan parametar u identifikaciji kvara jest vremenski model (profil) određenog tipa kvara odnosno brzina razvijanja kvara od njegove pojave.

$$\beta_{fi}(t - T_0) = \begin{cases} 0 & ; \quad t < T_0 \\ 1 - e^{-\alpha_i(t - T_0)} & ; \quad t \geq T_0 \end{cases}$$

gdje : $\alpha_i > 0$ predstavlja nepoznatu brzinu razvijanja kvara,
 T_0 – početno vrijeme nastajanja kvara.

Mala vrijednost α_i predstavlja sporo razvijajuće kvarove (engl. incipient faults), dok velike vrijednosti približavaju profil odskočnoj funkciji, što karakterizira brzo razvijajuće, nagle kvarove (engl. abrupt faults).

$$\beta_{\bar{f}}(t - T_0) = \begin{cases} 0 & ; t < T_0 \\ 1 & ; t \geq T_0 \end{cases}$$

Ukoliko se identifikacija kvara obavi brzo tj. Pravovremeno, moguća je on-line prilagodba na kvar, npr. promjenom strukture algoritma regulatora ili promjenom radnog režima procesa.

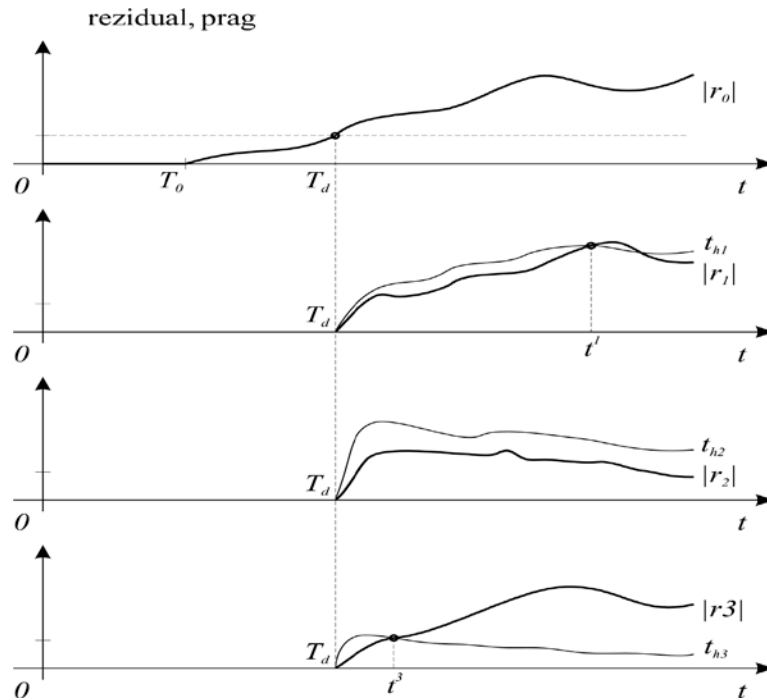
Vremenski profil nastajanja kvara (sl. 26) može se koristiti u razvoju metodologija učenja u dijagnostici kvara.

- Vrijeme potrebno za detekciju kvara je: $t_d = T_d - T_0$.
- Vrijeme za identifikaciju i -tog kvara je: $t_{lok}(i) = \max\{t^i\}$, ($i \neq k$; $i=1,2,\dots,N$).
- Ukupno vrijeme za detekciju i lokalizaciju i -tog kvara je: $t_u = t_d + t_{lok}(i)$.

Tipično je, za robusne SU s povratnom vezom da mogu «sakriti» pojavu nekog kvara, prvenstveno malih amplituda (početnih i sporo razvijajućih). Ponekad je to dobro, jer se obavi automatska prilagodba na takav kvar, a ponekad zna biti s velikim posljedicama zbog toga što nije moguće otkriti eventualne posljedice takvih kvarova kad se razvijaju u ozbiljne.

Dobar pristup u ovom slučaju jest integralni tj. jednovremeni pristup sintezi SU (regulatora) i sheme FDI (što se sugerira i slikom 4.15).

Jedan od najvažnijih parametara za ocjenu performansi FDI sheme jest vrijeme potrebno za detekciju kvara $t_d = T_d - T_0$ (vremenski period koji protekne od same pojave kvara do konačne detekcije) i vrijeme potrebno za identifikaciju tipa kvara (lokalizaciju kvara) $t_{lok} = T_{lok} - T_d$ tj. vremenski period između trenutka detekcije kvara i konačne identifikacije kvara.



Slika 26. Vremenski profili za detekciju i identifikaciju kvara – primjer prema sl. 25.

4.1. Shema FDI temeljena na relacijama simptomi - kvarovi i trend analizi

Rano otkrivanje kvarova sustava u operativnom radu, veoma je bitno za pravovremeno poduzimanje odgovarajućih preventivnih i zaštitnih akcija, te prilagodbu SU u stvarnom vremenu.

Kontinuiranim praćenjem većeg broja važnih varijabli sustava i analizom njihovog vremenskog trenda, moguće je detektirati nastajanje kvara u ranijoj fazi, čak prije same pojave i mogućih posljedica, što daje mogućnosti reakcije SU ili operateru stroja.

Relacije između dijagnostičkih signala / simptoma i kvarova učinkovit su način za detekciju i lokalizaciju kvarova komponenti sustava, a mogu se izraziti u raznim oblicima: preglednim tablicama (engl. look-up tables), analitičkim izrazima, dijagnostičkom matricom simptomi / kvarovi, kvalitativnim modelima u neizrazitoj logici ili neuronskim mrežama, heurističkim relacijama temeljenim na iskustvu eksperta i operatera.

Relacije između dijagnostičkih signala i kvarova, bez obzira u kojoj formi su predstavljene čine informacijski sustav za detekciju i lokalizaciju kvarova odnosno FDI sheme, koji se može izraziti na sljedeći način:

$$DFS = \{F, S, V, r_v\}$$

$$F = \{f_i : i = 1, 2, \dots, I\}; \quad S = \{s_j : j = 1, 2, \dots, J\}$$

$$V = \bigcup_{s_j \in S} V_j \quad ; \quad r_v = FxS \rightarrow r(V)$$

gdje je: F - skup kvarova komponenti sustava.

S - skup dijagnostičkih signala / simptoma, koji u on-line dijagnostici čine varijable / parametri i njihov trend vremenske promjene.

V - skup vrijednosti dijagnostičkih signala.

r_v - funkcija definirana na Cartezijevom skupu $F \times S$, kojom se svakom paru kvar

- simptomi $\{f, s\}$ dodjeljuje jedna ili više vrijednosti za svaki pojedini kvar:

$$r_v(f_i, s_j) = V_{ij} \subset V_j$$

U najjednostavnijem slučaju, vrijednosti dijagnostičkih signala mogu se izraziti u binarnom obliku $V_j = \{0, 1\}$, kada se dijagnostički sustav može predstaviti pomoću binarne dijagnostičke matrice kvarovi / simptomi u kojoj stupce sačinjavaju kvarovi a retke simptomi odnosno dijagnostički signali.

Signatura tj. opis i-tog kvara definiran je skupom mogućih dijagnostičkih signala, simptoma za taj kvar i njima pridruženih vrijednosti:

$$D(f_i) = \{S_{ij}, v_{ik} : j = 1, 2, \dots, J ; k = 1, 2, \dots, K\}, \quad S_{ij} \subset S ; v_{ik} \subset V_j$$

Uzmimo za primjer slijedeću dijagnostičku tablicu s binarnim relacijama simptomi-kvarovi i pokažimo princip zaključivanja odnosno detekcije kvarova.

Tablica 4: Binarne relacije simptomi-kvarovi

F/S	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
s_1	1	0	1	1	1	0	1	0
s_2	0	1	0	1	1	0	0	0
s_3	1	0	0	0	1	1	0	0
s_4	1	1	1	0	0	1	1	0
s_5	0	0	1	1	0	0	1	0

Pravila zaključivanja odnosno detekcije kvarova, mogu se u ovom slučaju izraziti oblikom:

$$\text{Ako } s_j = v_{jk} \text{ onda } f_i ; i = 1, 2, \dots, I ; j = 1, 2, \dots, J ; k = 1, 2, \dots, K$$

Npr. za kvar f_1 vrijedi:

$$\text{Ako } s_1 = 1 \text{ i } s_2 = 0 \text{ i } s_3 = 1 \text{ i } s_4 = 1 \text{ i } s_5 = 0 \text{ o n d a}$$

Kvarovi koji imaju identičan opis odnosno istu kolonu u dijagnostičkoj matrici ne mogu se razlikovati tj. lokalizirati. Primjer su kvarovi f_3 i f_7 iz tablice 4.2.

Bolja lokalizacija i brže otkrivanje kvarova postižu se, ako se u opisani dijagnostički sustav uključi i dinamika nastajanja odnosno vremenski slijed kvarova, te više-vrijednosna umjesto binarne logike. Sada se dijagnostički sustav može izraziti u proširenom obliku:

$$DFST = \{F, S, V, r_v, T, r_T\}$$

$$T = \{t_{ij}^l : i = 1, 2, \dots, I ; j = 1, 2, \dots, J ; l = 1, 2\}$$

T - skup vremenskih parametara (izraženih u sekundama ili bez dimenzijskim brojem za slučaj višestrukih perioda uzorkovanja dijagnostičkih signala)

r_T - funkcija koja pridjeljuje vrijednosti skupu T za svaki par iz skupa kvarovi - simptomi i to po dvije vrijednosti: t_{ij}^{\min} i t_{ij}^{\max} :

t_{ij}^{\min} - minimalni vremenski period između pojave i -tog kvara i j -tog simptoma,

t_{ij}^{\max} - maksimalni vremenski period između pojave i -tog kvara i j -tog simptoma.

Dobar način za određivanje ovih parametara jest testiranje i analiza na probnom stolu motora ili heurističko iskustvo operatera i eksperata.

U ovom slučaju, pravilo zaključivanja za dijagnostički sustav može se izraziti ovako:

$$\text{Ako } s_j = v_{jk} \text{ i } t_{ij}^{\min} \leq t_{ij} \leq t_{ij}^{\max} \text{ onda } f_i$$

Primjer: Detekcija i lokalizacija kvarova na cilindru motora 5L90MC (simulirano pri opterećenju motora 100 % na simulatoru Norcontrol PPS2000)

simulirani kvarovi: f_1 : istrošenost stapnih prstena 1. cilindra (80 %)

f_2 : propuštanje stapnih prstena 1. cilindra (80 %)

opaženi simptomi:

s_1 : pad tlaka kompresije i maksimalnog tlaka u 1. cilindru,

s_2 : pad okretnog momenta i brzine motora,

s_3 : porast temperature košuljice u 1. cilindru,

s_4 : porast temperature zraka na ulazu u 1. cilindrar,

s_5 : porast temperature ispuha iz 1. cilindra,

s_6 : porast odstupanja temperature ispuha 1. cilindra prema srednjoj vrijednosti svih cilindara

s_7 : porast temperature poklopca 1. cilindra,

s_8 : porast tlaka goriva u motor

Relacije između simuliranih kvarova i opaženih simptoma dane su tablicom 5, dok su u tablici 6 dana vremena pojave simptoma za simulirane kvarove.

Tablica 5: Dijagnostička binarna tablica simptomi – kvarovi za DM 5L90MC.

Simptomi/ kvarovi	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
f_1	1	1	1	0	1	1	1	1
f_2	1	1*	1	1	1	1	1	1

Tablica 6: Vremena pojave simptoma za simulirane kvarove f_1 i f_2 .

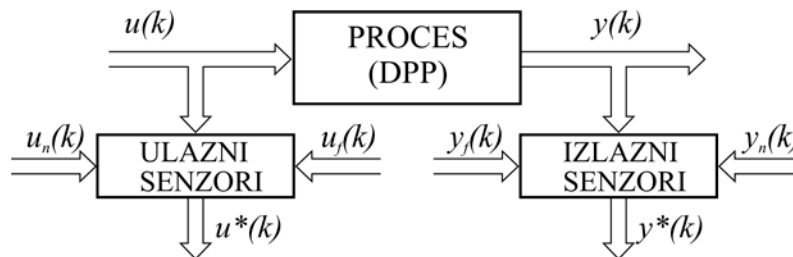
Simptomi/ vremena	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8
t_{1min}	4	9	55	-	201	203	293	315
t_{2min}	4	6	41	188	194	196	275	194
t_{1max}	7	18	64	-	212	318	318	326
t_{2max}	7	11	52	204	206	209	306	312

Iz tablica 5 i 6 vidljivo je da se, temeljem vremenske pojave simptoma i trenda parametara, može već nakon pojave drugog simptoma s_2 (cca. 10-tak sekundi) obaviti detekcija i lokalizacija kvarova f_1 i f_2 . Bez uzimanja u obzir vremena pojave simptoma i kvarova u ovom slučaju lokalizacija kvara bi bila moguća tek nakon pojave simptoma s_4 tj. za oko 180 sekundi, što je relativno kasno za odgovarajuću reakciju.

Vremenska pojava simptoma ovisi o dinamici sustava, radnom režimu i definiranim vrijednostima praga reziduala dijagnostičkih signala. Tako, za niži prag reziduala brža je detekcija, ali i veća vjerojatnost pojave lažnih alarma, dok se za viši prag povećava vjerojatnost ne otkrivanja kvara ili zakašnjelog otkrivanja.

4.3. Dijagnostika kvarova senzora

Senzori se u dizelskom propulzijskom procesu, kao općenito i drugim industrijskim procesima, mogu klasificirati u ulazne i izlazne senzore procesa. Blok shema na slici 27 ilustrira strukturu senzora sustava.



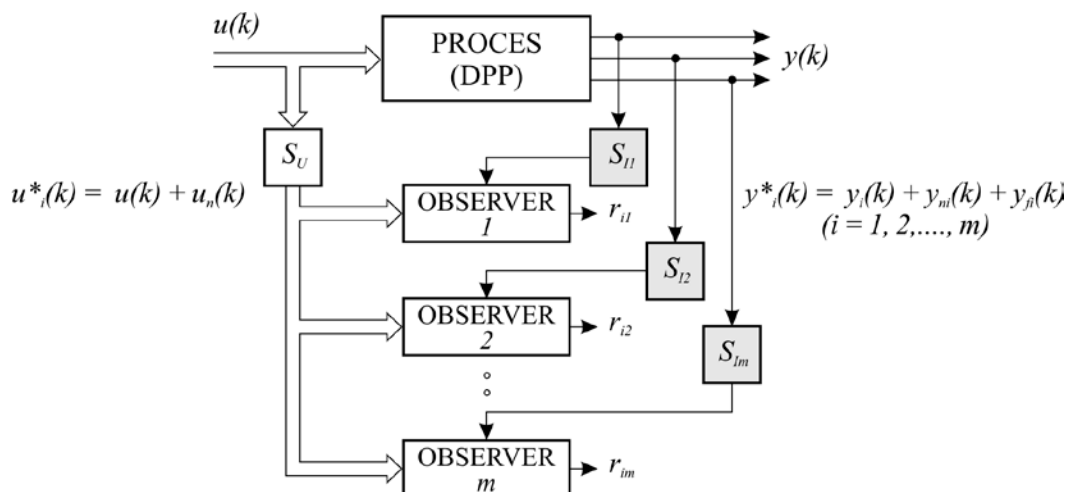
Slika 27. Struktura senzora s kvarovima.

Ulazni senzori prvenstveno mjere upravljačke signale - ulaze sustava odnosno signale iz aktuatora tj. djelovanje na sustav, dok izlazni senzori mjere varijable i parametre na izlazu sustava odnosno dinamiku sustava.

Model sustava u prostoru stanja pruža dobre mogućnosti za dijagnostiku senzorskih kvarova, kako za deterministički slučaj sustava (observeri stanja), tako i za stohastičke sustave (Kalmanovi filtri).

Vrlo učinkovita shema za detekciju senzorskih kvarova i generiranje reziduala je namjenska banka observera. Shema za detekciju i lokalizaciju kvarova i generiranje reziduala U/I senzora temeljena na banci dinamičkih observera ili Kalmanovih filtara prikazana je slikama 28 i 29.

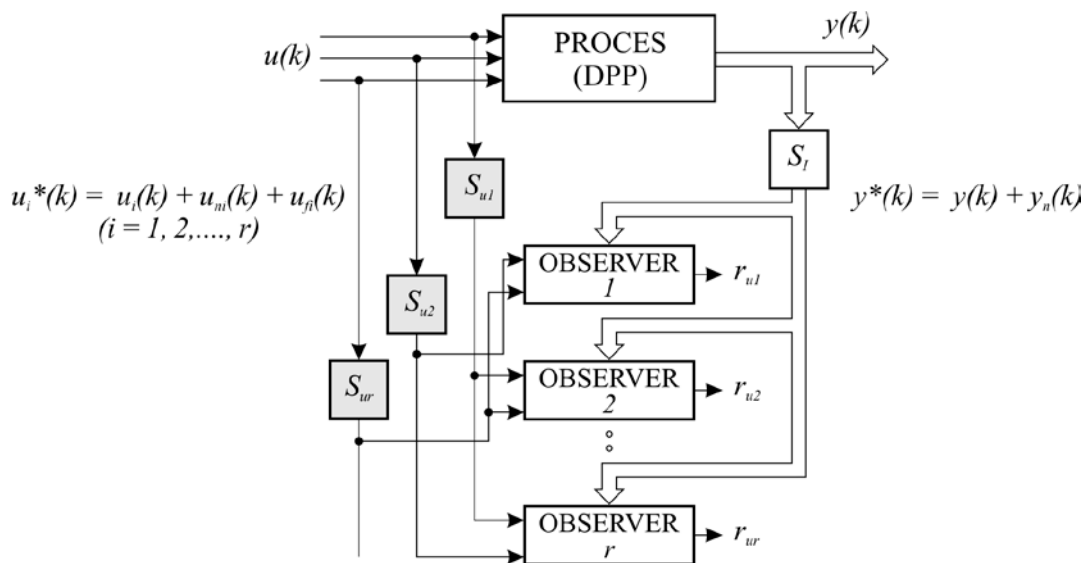
Za pouzdanu detekciju i lokalizaciju kvara jednog od izlaznih senzora sustava koristi se, prema shemi na slici 28, m observera tj. po jedan za svaki izlaz sustava. Svaki observer pobuđen je svim upravljačkim ulazima i samo jednim odgovarajućim izlazom. U ovom slučaju, kvar na i -tom izlaznom senzoru djeluje jedino na funkciju reziduala i -tog izlaznog senzora pobuđenog i -tim izlazom. Pretpostavka je da su ulazni senzori bez kvarova.



Slika 28. Banka observera za generiranje reziduala kvara izlaznog senzora.

Za pouzdanu detekciju i lokalizaciju kvara ulaznih senzora povoljna je observerska shema prema slici 29. U ovom slučaju pretpostavlja se ispravnost (rad bez kvara) izlaznih senzora.

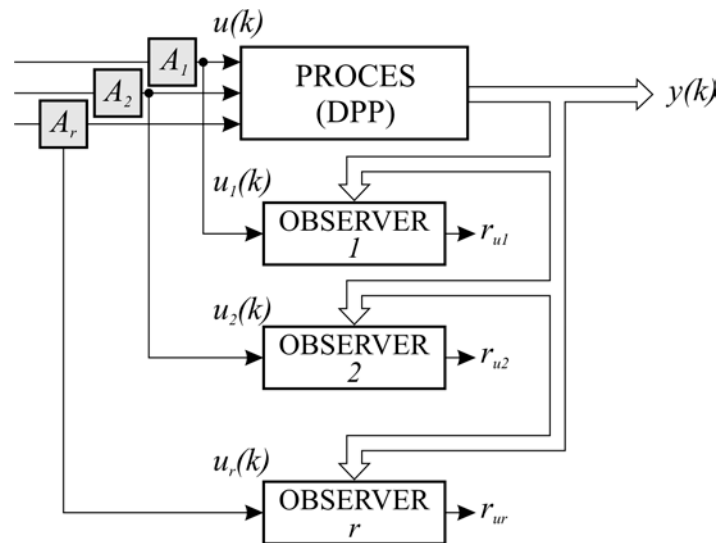
Observer *i*-tog ulaznog senzora pobuđen je svim ulazima, osim onog iz *i*-tog senzora i svim izlazima sustava. Generirana funkcija reziduala osjetljiva je na sve ulaze, osim *i*-tog, koji je iz senzora u kvaru. Na ovaj način moguće je detektirati kvar jednog ulaznog senzora, pošto kvar na *i*-tom senzoru djeluje na funkcije reziduala svih observera osim *i*-tog, koji je neosjetljiv na kvar tog senzora.



Slika 29. Banka observera za generiranje reziduala kvara ulaznog senzora.

4.3. Dijagnostika kvarova aktuatora

Aktuatori se, općenito sastoje iz različitih komponenti po tipu djelovanja i fizičkim karakteristikama (električne, hidrauličke, pneumatske, mehaničke), pa se dijagnostika kvarova aktuatora tretira kao posebni slučaj dijagnostike komponenti sustava. Međutim, za potrebe projektiranja sustava upravljanja, može se kvarove aktuatora tretirati kao aditivne nepoznate ulaze. Najčešći kvarovi aktuatora su blokada ili potpuni gubitak izvršnog signala snage, smanjenje učinkovitosti djelovanja, propuštanje i histereza. Slično kao i za senzore, za detekciju i lokalizaciju kvarova aktuatora, učinkovita shema je s namjenskim observerima prema slici 30.



Slika 30. Namjenska observerska shema za detekciju kvara aktuatora.

U ovoj shemi i -ti observer ($i = 1, 2, \dots, m$) pobuđen je samo izlazom iz i -tog aktuatora odnosno i -tim upravljačkim ulazom u sustav i zato na njegovu funkciju reziduala djeluje samo kvar i -tog aktuatora. Za ostalih $m-1$ ulaznih signala pretpostavlja se da su nepoznati ulazi prema kojima je funkcija reziduala robustna.

4.4. Optimalni razmještaj senzora za detekciju i lokalizaciju kvarova

Cilj je odabrati varijable procesa koje treba mjeriti u svrhu omogućavanja detekcije i lokalizacije kvarova senzora, a s kojima će se odabrane varijable kontinuirano on-line pratiti.

Izabrane varijable moraju imati odgovarajući stupanj redundantnosti.

Definicija: varijabla je redundantna stupnjem 0 (minimalna osmotrivost), ako se njena vrijednost ne može estimirati za slučaj kvara samo jednog senzora.

Općenito, osmotriva varijabla x je stupnja redundantnosti k , ako se njena vrijednost može ocijeniti i u slučaju jednovremenog kvara k senzora u sustavu. Dakle, varijabla x je redundantna stupnjem k ($k \geq 1$), ako ona intervenira odnosno ima utjecaj u k neovisnih jednažbi - ograničenja.

Slijedeći teoremi pokazuju zajedničke osobine koncepta redundantnosti s jedne strane, te koncepta detekcije i lokalizacije kvara s druge strane:

(1) Kvar senzora se može detektirati, ako i samo ako njemu pridružena mjerena varijabla je stupnja redundantnosti 1.

(2) Kvar senzora se može lokalizirati, ako i samo ako njemu pridružena mjerena varijabla je stupnja redundantnosti najmanje 2.

Očito se kvar može detektirati, ako se može lokalizirati.

Naravno, kod izbora senzorske opreme (instrumentacije) sustava, koja je veoma skupa treba voditi računa i o cijeni pojedinih senzora.

Mjerene varijable treba razvstati u odvojene skupove prema traženom stupnju redundantnosti. Neka je S_k skup varijabli stupnja redundantnosti k .

Problem optimalnog određivanja arhitekture senzora svodi se na određivanje i izbor varijabli koje treba kontinuirano mjeriti u cilju postizanja tražene redundantnosti i uz minimizaciju troškova - cijene instalacije senzora. Općenito se ovaj problem može izraziti funkcionalom:

$$J_s = \min \sum_{i=1}^z c_i b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, z)$$

za svaku varijablu x_j iz skupa S_k i njoj pridruženi stupanj redundantnosti $r_s(x_j) \geq k$.

c_i - težinski koeficijent cijene instalacije senzora koji mjeri varijablu x_i .

b_i - binarna vrijednost koja ukazuje da li varijabla x_i mora biti mjerena da udovolji traženi stupanj redundantnosti ($b_i = 1$, ako mora, inače 0).

Ovaj problem se u suštini svodi na poznati problem cjelobrojnog linearnog programiranja.

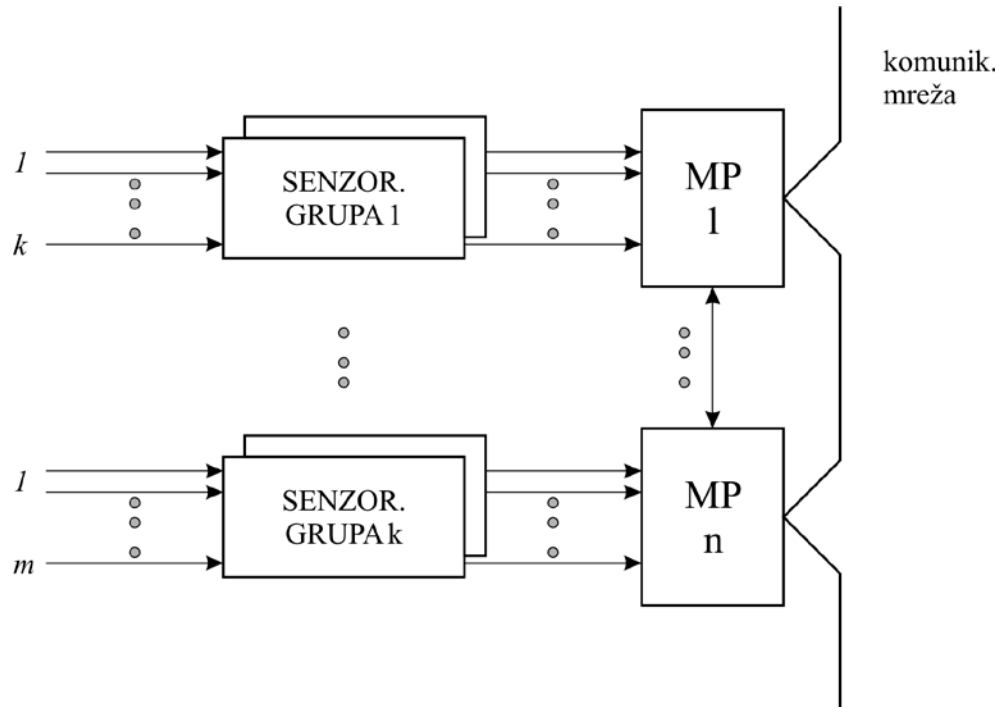
Može se zaključiti, da optimalni izbor i razmještaj senzora u procesu ima ključnu ulogu, ne samo u praćenju rada procesa, već i njegovom vođenju i dijagnostici. Zato se ovom problemu mora posvetiti posebna pozornost u analizi i sintezi sustava upravljanja i dijagnostike.

4.5. Umrežavanje senzora

Jedan od mogućih načina povećanja sposobnosti tolerancije kvarova u SU, jest umrežavanje senzora i integracija s drugim ovisnim sustavima.

Funkcija senzora jest izmjeriti i pretvoriti jednu veličinu, obično fizikalnu (temperatura, tlak, vlažnost, uvijanje, brzina,..) u drugu, obično električnu veličinu (naponski ili strujni signal). Takav se signal može dalje jednostavno prenijeti u mjerni ili procesni sustav ili neposredno koristiti u regulaciji i upravljanju.

SU procesa brodske propulzije uključuje veliki broj različitih senzora - mjernih davača (više stotina), od kojih signali najvećeg broja podliježu procesiranju za daljnju upotrebu. Analiza broja i razmještaja senzora ukazuje na opravdanost i potrebu grupiranja i umrežavanja senzora (slika 31 ilustrira koncept).



Slika 31 Koncept umrežavanja senzora u DPP broda.

Osnovne prednosti umrežavanja senzora su:

- smanjivanje broja i dužine prijenosnih vodova signala, posebno prema udaljenom centralnom upravljačkom mjestu - mostu na brodu,
- uvećanje mogućnosti komunikacije i prijenosa signala u oba smjera,
- lakša integracija u lokalnu mrežu broda,
- smanjivanje utjecaja elektro-magnetskih smetnji, jer se senzorski analogni signali digitaliziraju u procesoru koji je u neposrednoj blizini, pa se suvremenim protokolima i tehnikama prijenosa smetnje i šumovi mogu znatno umanjiti ili čak eliminirati,
- kombinacija procesora i mrežnih senzora omogućuje ugradnju inteligentnih funkcija senzora: npr. kalibriranje izlaza senzora prije prijenosa, a prema korekcijskim parametrima iz procesora (npr. ISO korekcija) ili kompenzacija utjecaja iz okoline (temperatura, vlažnost, tlak),
- povećane mogućnosti fuzije senzorskih informacija (redundantnosti informacija),
- bolje mogućnosti razmjene informacija između udaljenih sustava broda i njihovih izvora podataka,
- bolje komunikacijske mogućnosti prema višoj razini komunikacije – sustavu ISUB.

5. SCHEME REDUNDANTNOSTI U SUSTAVIMA UPRAVLJANJA I DIJAGNOSTIKE

Redundantnost je veoma važan koncept u SU, posebno onima u kojima se zahtijeva sposobnost tolerancije i prilagodbe na kvarove. U takve zasigurno spada i sustav dijagnostike i upravljanja brodskog dizelskog procesa. Može se općenito reći da, sposobnost tolerancije kvarova uvelike ovisi o redundantnosti u samom procesu, kao i SU.

Sposobnost sustava upravljanja da radi i u prisustvu kvarova prvenstveno ovisi o dva čimbenika: koliko sustav inherentno posjeduje redundantnosti i koliko uspješno se redundantnost koristi u prisustvu kvarova. Zahtjevi sustava na pouzdanost, raspoloživost i sigurnost ključno determiniraju stupanj redundantnosti. Dobro projektiran i primijenjen SU mora održavati osnovne performanse procesa (upravljivost, osmotrivost i stabilnost) i u slučaju kvarova.

Jedan od najboljih načina za postizanje tolerancije kvarova jest redundantnost komponenti, modula, podsustava, upravljačkih algoritama i sl. Međutim, treba imati u vidu da takav pristup sustav poskupljuje i čini ga još kompleksnijim, te prostorno zahtjevnijim što je za brod ograničavajući faktor. To je jedan od razloga da se ide u razvoj i primjenu SU tolerantnih na kvarove i u brodskim procesima uključujući i DPP.

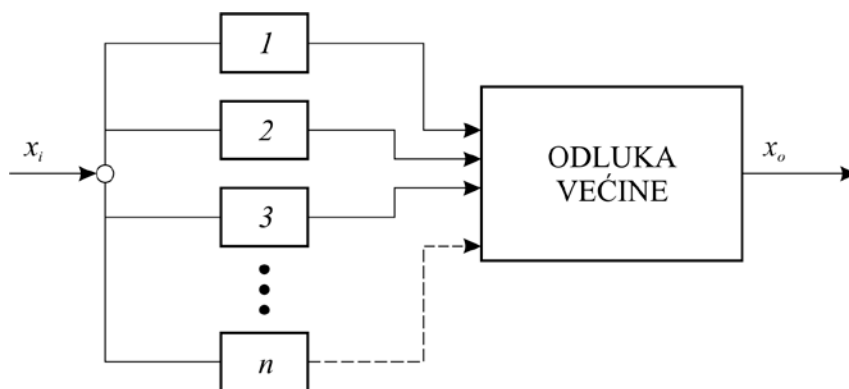
5.1. Klasifikacija redundantnosti

Redundantnost se, u osnovi, može klasificirati u sklopovsku - hardversku (komponente, dijelovi sustava ili podsustavi) i analitičku - softversku (matematički modeli, relacije, modeli temeljeni na znanju itd.).

□ Sklopovska redundantnost

U većini današnjih sustava u praksi redundantnost, odnosno otpornost na kritične kvarove postiže se sklopovskim odnosno hardverskim (HW) putem, tj. multipliciranjem bitnih funkcijskih komponenti (dvostruke, trostruke ili čak i višestruke), pa se principom odluke većine zaključuje o komponenti, modulu u kvaru, te se ista isključuje iz rada, a njenu funkciju preuzima ispravna redundantna komponenta.

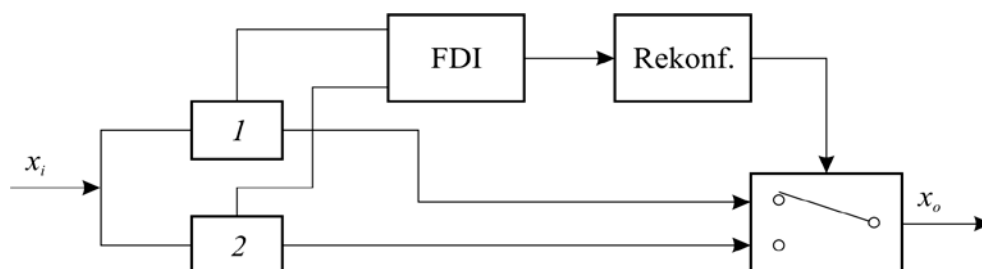
Princip ilustrira slika 32. Ovakva struktura predstavlja statičku redundantnu shemu (npr. za senzore brzine vrtnje motora).



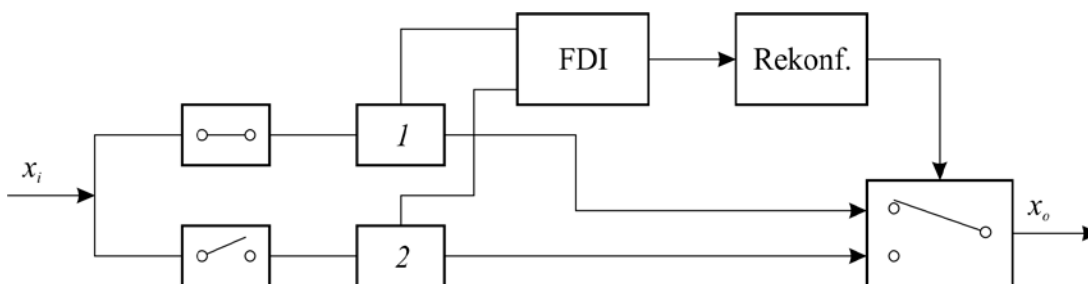
Slika 32. Statička HW redundantna shema s odlukom na principu većine.

Sa n redundantnih komponenti / modula može se tolerirati $(n-1)/2$ komponenti u kvaru (n je neparan broj).

Druga, možda najčešća shema redundantne strukture u DPP broda je s dvostrukim komponentama: dinamička redundantna shema s vrućom pričuvom (engl. hot standby) ili hladnom pričuvom (engl. cold standby). Primjer za prvu strukturu (slika 33) su procesne stanice u SU. Primjer za drugu redundantnu strukturu (slika 34) su sustavi goriva, podmazivanja, hlađenja (pumpe, filtri, izmjenjivači topline, pojedini aktuatori,...).

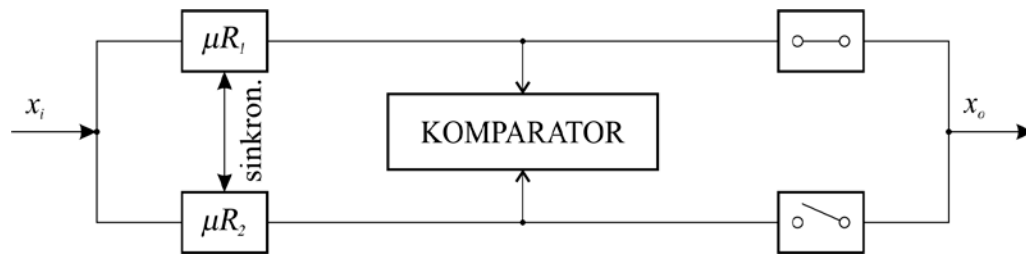


Slika 33. Dinamička redundantna shema s vrućom pričuvom.



Slika 34. Dinamička redundantna shema s hladnom pričuvom.

Slika 35 prikazuje dvostruki računarski sustav s dinamičkom redundantnošću kao vrućom pričuvom, u kojoj računala sinkronizirano i paralelno rade, s tim da se koriste rezultati rada jednog od njih. Ona međusobno testiraju ispravnost i u slučaju kvara osnovnog računala automatski se uključuje pomoćno s mogućnošću, da po potrebi svako od njih može ići u zaštitno stanje (engl. fail safe). U ovom slučaju nema tolerancije kvara.



Slika 35 Dinamička redundantnost mikroračunala s vrućom pričuvom.

Sustavi upravljanja i dijagnostike s mogućnostima tolerancije kvarova kompleksnog procesa kao što je DPP proces broda, su paralelni procesorski sustavi s vertikalnim i horizontalnim redundantnim strukturama.

U vertikalnoj redundantnosti koristi se isti skup mjerenja i isti algoritmi za svaki procesorski informacijski sustav. Toleranciju kvarova u ovih sustava moguće je postići fizičkim razdvajanjem procesora. U ovu kategoriju spadaju navedeni stand-by sustavi.

Za bolju detekciju i lokalizaciju kvarova koriste se dvostruke redundantne različite strukture DDRS (engl. Dual-Difference Redundant Structure) ili trostruke redundantne strukture TRS u okviru složenijih shema FDI.

U horizontalnoj redundantnosti koristi se različite podskupove mjerenja i različite algoritme za svaku procesnu jedinicu sustava.

Ovime se, za određeni problem odnosno kvar, osigurava n mogućih rješenja za odluku. Ove strukture bolje rukuju i tranzijentnim kvarovima.

Kod sustava s TRS ili TMS (engl. Triple Modular Structure), pojavom i detekcijom kvara u jednom modulu ova se struktura promijeni npr. u DDRS s dva preostala regulatora (procesora) uz izvjesnu degradaciju ukupnih performansi sustava. Dakle, ovakva struktura tolerira kvar i otkaz jednog od tri modula.

U aktuatora se redundantnost može postići HW višestrukim redundantnim strukturama (statičkim ili dinamičkim), međutim zbog njihove specifičnosti (fizička izvedba, instalacija, cijena) najčešće se u praksi ostvaruje redundantnost samo vitalnih komponenti aktuatora, npr. izvora pogonske energije (hidrauličke i pneumatske komponente) i krajnjih izvršnih elemenata (ventili, cilindri).

□ Analitička redundantnost

Da bi se postiglo brzo otkrivanje i pouzdana identifikacija kvarova nužno je, u projektiranju shema FDI, koristiti redundantne informacije iz samog sustava, inherentne strukturi sustava u različitim modovima rada. One se mogu dobiti iz redundantnih senzora (HW redundantnost), te temeljem identifikacije modela sustava (strukturna analiza, eksperimentalno numerička analiza, heuristička znanja eksperta, operatera) i korištenjem inherentnih redundantnih informacija dobivenih iz kvalitativnog ili kvantitativnog modela, bez dodatne ugradnje senzora. Ovaj tip redundantnosti predstavlja analitičku ili SW redundantnost, koja se veoma efikasno može, raznim SW metodama, koristiti u FDI shemama za dijagnostiku i prilagodbu na kvar.

Ovdje je elaboriran način identifikacije analitičke redundantnosti procesa dizelske propulzije primjenom strukturne analize. Dakle, poznavanjem relacija i ovisnosti relevantnih varijabli i njihovog utjecaja na ponašanje pojedinog dijela ili cijelog sustava,

moguće je iz poznatih signala, informacija, znanja i relacija estimirati nepoznate i odgovarajućom shemom obaviti promjenu strukture i prilagodbu na kvar.

5.2. Sheme sustava upravljanja s tolerancijom kvarova

Može se zaključiti da ne postoji univerzalni i jedinstveni model dizelskog procesa, posebno u uvjetima kvarova i ne predvidivih vanjskih poremećaja. Zato se, u identifikaciji i modeliranju, mora polaziti od specifičnosti svakog podsustava motora i njihove međusobne povezanosti, te koristiti kombinirane pristupe (kvantitativne i kvalitativne modele, heuristička znanja eksperata i operatera i dr.). Takav integralni pristup vrijedi i za projektiranje SU DM, koji će posjedovati mogućnosti tolerancije kvarova.

5.2.1. Arhitektura SU s više modela i regulatora procesa

Jedna od vrlo učinkovitih metoda u projektiranju adaptivnih SU složenih procesa, kakav je dizelski propulzijski proces broda, jest primjena višestrukih modela procesa i prikladnih algoritama - regulatora s mogućnostima učenja različitih operativnih uvjeta i okruženja, te adaptacije uz odgovarajuće sheme preklapanja (engl. switching scheme). Ovom pristupu značajno doprinose nove računarske tehnologije kao: neuronske mreže, neizrazita logika i ekspertni sustavi, genetički algoritmi, prepoznavanje uzoraka, objektno orijentirano programiranje itd.

Model sustava se može promatrati kao jedinstvena reprezentacija njegovih bitnih dijelova (podsustava) u nekoj uobičajenoj formi. Najčešća forma predstavljanja karakteristika sustava jesu matematički modeli. Međutim, sve više se kombiniraju različite forme u modeliranju kompleksnih sustava: heuristički modeli, modeli temeljeni na znanju, matematički modeli, simulacijski i eksperimentalni modeli i sl., a sve s ciljem pronalaženja kvalitetnijih modela u svim uvjetima rada i okruženja.

Posljednjih godina, veliki značaj pridaje se shemama prebacivanja odnosno izmjene regulatora ili upravljačkih algoritama u stvarnom vremenu u kontekstu adaptivnih i SU s tolerancijom kvarova. U literaturi se javljaju direktne i indirektno sheme za on-line izmjenu regulatora. U prvima se prebacivanje upravljanja na novi regulator (upravljački algoritam) obavlja temeljem vrijednosti izlaza procesa odnosno regulacijskog odstupanja $y_{ref} - y$. Ovaj pristup nije dao veće praktične rezultate, pogotovo za nelinearne sustave.

U indirektnim shemama koristi se više modela procesa za određivanje kada i koji će se regulator primijeniti temeljem najmanje pogreške identifikacije modela tj. odstupanja između izlaza modela i procesa $\hat{y}_i - y$ (slika 36).

5.2.2. Sustav u različitim okruženjima i višestruki modeli

Ponašanje odnosno ulazno-izlazne karakteristike procesa mogu se promijeniti u različitim okruženjima i okolnostima (normalni uvjeti, vanjski poremećaji, kvarovi komponenti i sl.).

Neka je proces opisan skupom diferencijalnih (kontinuirani model) ili jednadžbi diferencija oblika (diskretni model):

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p)$$

$$y(t) = g(x(t), p)$$

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), p)$$

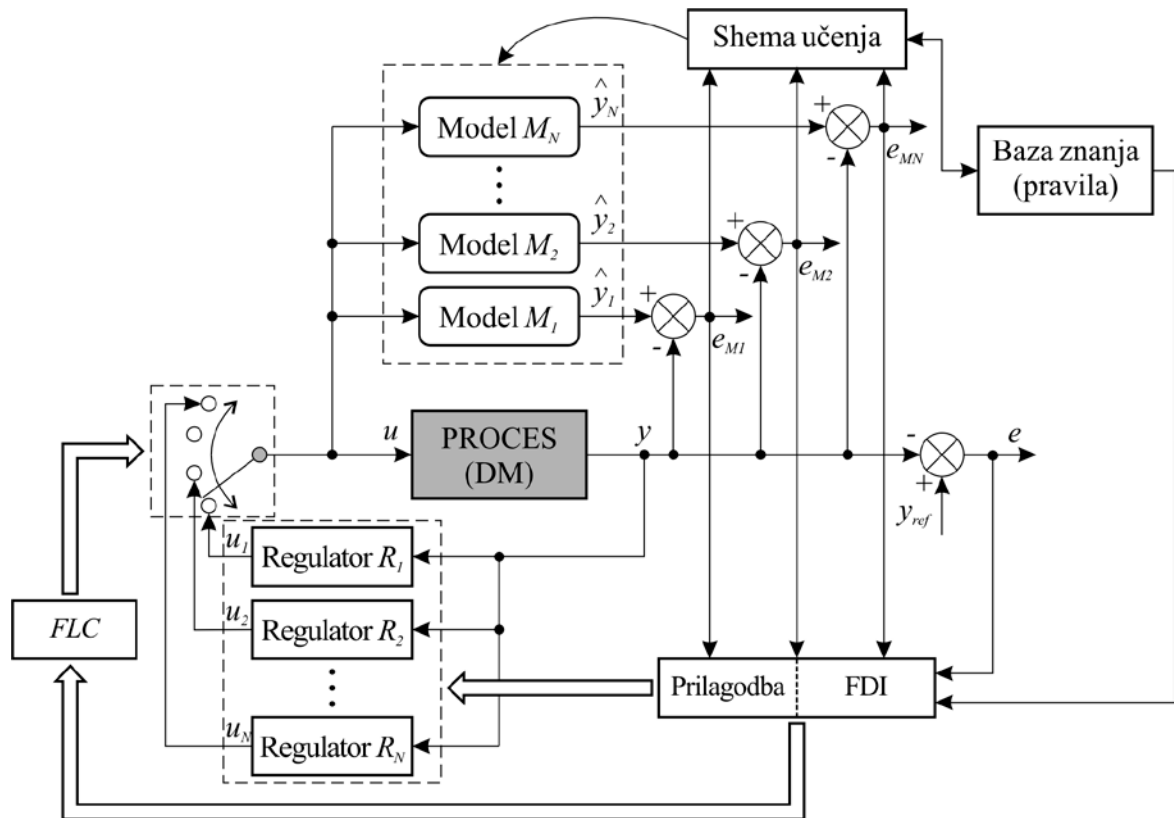
$$y(k) = g(x(k), p)$$

Različita okruženja, odnosno uvjeti rada sustava mogu se predstaviti različitim vrijednostima vektora konstantnih parametara p uz uvjet da su funkcije f i g poznate i nepromijenjene.

Opisom sustava na ovaj način, mogu se kvarovi komponenti, senzora i aktuatora, te vanjski poremećaji i promjene parametara promatrati kao različita promjenljiva okruženja sustava.

Kada se okruženje promijeni, promijeni se i ponašanje odnosno model sustava. Ako bi se koristio samo jedan identifikacijski model, on bi se morao adaptirati na novo okruženje prije nego se poduzme odgovarajuća upravljačka akcija. Međutim, spora adaptacija imala bi za posljedicu veliku tranzijentnu pogrešku. U nelinearnih i kompleksnih sustava kakav je i DPP broda, gdje su različita okruženja opisana i različitim funkcijama f i g , jedan model nije dovoljan za identifikaciju promjena, te se višestruki modeli nameću kao potreba.

Kao regulatori odnosno upravljački algoritmi koristili bi se, pored konvencionalnih i neizraziti (fuzzy) regulatori, te njihova kombinacija. Npr. u upravljanju brzinom i snagom motora, kombinacija konvencionalnog s neizrazitim regulatorom bila bi učinkovito rješenje, dok je za regulaciju u sustavu hlađenja motora sasvim dobro konvencionalno rješenje.



Slika 36. Arhitektura SU s višestrukim modelima i regulatorima.

5.2.4. Softverska struktura SU tolerantnog na kvarove

Sve veću ulogu u ukupnoj strukturi sustava upravljanja i dijagnostike imaju danas softverski moduli (algoritmi), koji za SUTK moraju udovoljiti i posebnim zahtjevima.

Softverski zahtjevi na SU

Od SU, s mogućnostima prilagodbe na kvarove, složenih dinamičkih sustava kakav je dizelski motor u okviru DPP broda traže se nove i visoko sofisticirane mogućnosti, što ih klasične tehnologije ne pružaju, a to su prvenstveno:

- *Dinamička prilagodba*: odnosno sposobnost brzog otkrivanja promjene uvjeta okruženja ili stanja sustava i pravovremene prilagodbe svoje strukture tj. upravljačkih algoritama i akcija bez značajnijeg degradiranja performansi i utjecaja na operative mogućnosti i integritet sustava. Ovi SU moraju imati mogućnosti on-line prebacivanja – izbora između različitih HW i posebno SW

- modula, brzog preusmjerenja i promjene veza među komponentama, promjene prioriteta u korištenju modula i komunikacijskih kanala.
- *Međuoperativnost:* suvremeni SU, poput onog za DPP broda, rade u distribuiranom i heterogenom okruženju, pa se SW komponente – moduli realiziraju na različitim procesorima, korištenjem različitih programskih jezika, operacijskih sutava i mrežnih protokola za komunikaciju. Stoga je vrlo važna njihova kompatibilnost i mogućnost brze i pouzdane komunikacije u realnom vremenu, kako između njih samih na nižoj razini tako i prema komponentama sustava na višoj razini (ISUB).
 - *Mogućnosti proširenja i primjene novih tehnologija:* nove tehnologije se sve više koriste u SU (senzorske, komunikacijske, informatičke, HW platforme i sl.). Za iskoristiti prednosti što ih pružaju nove tehnologije, nužno je da sustav bude dovoljno fleksibilan i modularne izvedbe.
 - *Otvorenost sustava:* Međusobna zamjenljivost komponenti i dinamička promjena strukture traže i od SW strukture fleksibilnost i podršku alatima i algoritmima iz različitih izvora i domena. Dakle, nužna je otvorenost k novim tehnologijama i tehnikama, kao što su: distribuirano objektno programiranje, upravljanje bazama, nove HW strukture sa “plug-and-play” komponentama, nove komunikacijske tehnologije i protokoli, neuronske mreže, neizrazita logika itd.

Koncepcija SW strukture SU za dizelski proces

Tradicionalna implementacija SU s mogućnostima za prilagodbu na kvarove sastojala se prvenstveno u redundantnim, ne samo HW nego i SW strukturama na principu hladne ili vruće pričuve u slučaju kvara osnovnog podsustava (lokalni pristup) tj. temeljila se na konceptu pasivne redundantnosti. Važniji sustavi su se izvodili čak s trostrukom strukturom. Noviji pristup međutim, temelji se sve više na konceptu aktivne redundantnosti sustava, a realizira se primjenom novih SW tehnologija i tehnika integracijom inherentnih svojstava upravljanog procesa, kao redundantnosti senzorskih informacija, međuovisnosti podsustava i informacija, primjeni heurističkih znanja i iskustava eksperata i operatera i sl. U tom smislu mijenja se i pristup upravljačkim algoritmima odnosno SW upravljačkim modulima, pa se umjesto klasičnih, glomaznih i pogreškama podložnih modula ide na manje namjenske (po funkciji ili komponenti / podsustavu) upravljive SW jedinice s dobrim komunikacijskim mogućnostima prema drugim jedinicama na istoj ili višoj razini.

Na ovaj način se proširuju mogućnosti SU za dijagnostiku kvarova i potrebnu rekonfiguraciju, ne samo po opsegu, već i brzini.

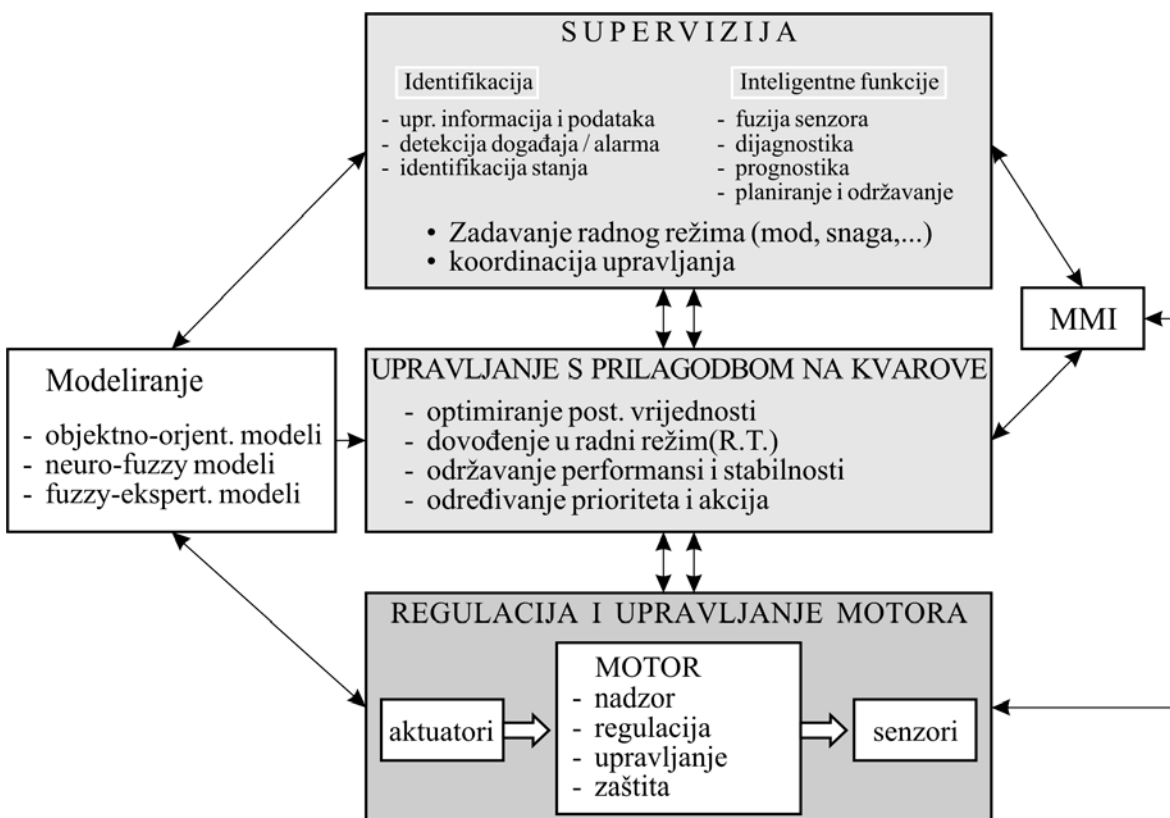
Svakako da je ovakav pristup motiviran i omogućen novim SW tehnologijama i tehnikama (AI, neuronske mreže, FES, genetičko programiranje, objektno orijentiranim programskim jezicima itd.), otvorenim HW platformama i operacijskim sustavima.

Istraživanja, a i praksa ukazuju na prednosti funkcionalne dekompozicije sustava, ne samo zbog gore spomenutih razloga, već i zbog jednostavnosti programiranja modula, održavanja, proširenja, gradnje složenijih iz više jednostavnih modula i njihove integracije. Svi moduli u razvoju i eksploataciji imaju jednak tretman bez obzira na mjesto u hijerarhiji, s time da se naknadno u njihovom korištenju u sustavu mogu postavljati prioriteti ovisno o zahtjevima i uvjetima novonastale situacije.

Svaka važnija komponenta ili podsustav mogu imati svoj vlastiti upravljački objekt / modul (npr. modul kontrole postavne vrijednosti brzine, komande za uspon propelera, modul za regulaciju brzine motora, modul za rukovanje situacije u nuždi, moduli za kontrolu pojedinih odvojenih i međusobno ovisnih podsustava motora kao: goriva, zraka, ulja za podmazivanje, hlađenja motora, ispuha itd.).

Arhitekture SU mogu se promatrati kao hijerarhijske strukture njegovih komponenti, distribuirane ili najčešće kombinirane tj. hijerarhijsko-distribuirane, što je najpovoljnije za DPP broda (sl. 37).

SW infrastruktura SU mora podržati slabu povezanost i dobru komunikativnost između različitih komponenti sustava i time osigurati proširivost, izmjenjivost komponenti i fleksibilnost u prilagodbi novim uvjetima odnosno dinamičkoj promjeni strukture sustava. To omogućuju samo otvorene i modularne strukture. Strategija promjene strukture upravljanja (rekonfiguracija) nužna je u hibridnim regulatorima i ona se mora obaviti bez većeg utjecaja na pouzdanost, sigurnost i radnu sposobnost. Tako se, u slučaju pojave kvara, javlja potreba za promjenom algoritma upravljanja: iz nominalnog režima prijeći u algoritam za taj kvar (npr. smanjivanjem opterećenja motora). Strategijom prilagodbe na kvar odlučuje se: kada će se prebaciti upravljanje s jednog algoritma (modula) na drugi, a što određuje trenutna situacija ili kada će se uključiti redundantna komponenta sustava, o promjeni veza među aktivnim komponentama, kreiranju i korištenju novih komponenti - modula i sl.



Slika 37. Funkcionalna shema SW strukture SU (hijerarhijsko - distribuirana).