

# EKSPERTNI SUSTAV INTELIGENTNOGA DIZELSKOG MOTORA

## *Intelligent Diesel Engine Expert System*

UDK 621.436.068.7  
Stručni članak  
Professional paper

### Sažetak

Neizbježnom upotrebom računala i same automatizacije brodske propulzijskog sustava, došlo se do velikog broja mogućnosti poboljšanja njegova rada. Ekspertni sustavi u ovom području imaju veliki utjecaj na daljnji razvoj upotrebe računala na brodovima.

Izbacivanjem bregaste osovine i njezinom zamjenom visokotlačnom pumpom promjenjiva vremena dobave (VIT) postiže se optimalno vrijeme ubrizgavanja goriva u cilindar u različitim režimima rada. Daljnja prednost VIT-pumpe je ta što se tijekom rada motora nesmetano mogu ugađati raznovrsni parametri (vrijeme ubrizgavanja, stupnjevano ubrizgavanje goriva u cilindar...) i tako optimizirati ubrizgavanje goriva u cilindar. U radu je prikazano idejno rješenje upravljanja VIT-pumpom s pomoću ekspertnog sustava radi određivanja optimalnog kuta pri ubrizgavanju goriva. Rezultati simulacije pokazuju opravdanost upotrebe ovakva sustava na brodovima.

### Abstract

The inevitable computerisation and automation of the shipboard propulsion system have given rise to an increasing number of possibilities of improvements in its operation. This is the area in which the expert system has made an enormous impact upon the further employment of computers aboard the ship.

By eliminating the camshaft and replacing it with a high-pressure variable injection time pump (VIT) an optimum injection time in a variety of operating modes

has been achieved. A further advantage of VIT pump is that various parameters can be easily adjusted during engine operation, e.g. time of injection, gradual injection, etc., seeking thereby an optimum injection mode.

The paper deals with a conceptual solution concerning with the VIT pump operation by means of expert system, aimed at determining an optimum angle of fuel injection. The results of simulation hereby presented clearly justify the employment of such a system aboard the ship.

### 1. Uvod

#### Introduction

Karakteristika ekspertnih sustava je brzo i točno djelovanje, objašnjavanje i davanje odgovora na temelju teorije ili prema heurističkim pravilima, tj. pozivajući se na već zapamćene slučajeve iz prošlosti. Ekspertni sustavi, također, imaju sposobnost izravnog informiranja korisnika koji postavlja pitanja. Ekspertni sustav za dijagnostiku stanja brodske dizelske motora temelji se na eksperimentalnim podacima dobivenima mjerenjem relevantnih značajki brodske motora i kontinuiranim praćenjem njegova rada.

Baza znanja pri izradi dijagnostičkog ekspertnog sustava je datoteka kvarova gdje se unose teorijska i praktična znanja stručnjaka.

Osnovni zahtjevi koji se očekuju u radu stroja, pa tako i brodske dizelske motora, jesu maksimalni radni učinci s minimalnim troškovima održavanja. Danas se ovim zahtjevima može udovoljiti samo uvođenjem novoga tehnološkog pristupa u praćenju i mjerenju radnih karakteristika stroja, uz korištenje računalnom tehnikom i znanošću u dijagnosticiranju i otklanjanju kvarova.

\* Zdeslav Jurić, dipl. ing., Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, Zrinsko-frankopanska 38, 21000 Split

\*\* mr. sc. Nikola Račić, dipl. ing., Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, Zrinsko-frankopanska 38, 21000 Split

\*\*\* dr. sc. Gojmir Radica, dipl. ing., Pomorski fakultet u Splitu, Sveučilište u Splitu, Zrinsko-frankopanska 38, 21000 Split

## 2. Ekspertni računalni sustav

### Expert Computing System

Uspješnost ekspertnog sustava izravno ovisi o kvantiteti i kvaliteti formiranih primjera i pravila. Poradi toga je potrebno uskladiti prikupljene podatke s radnim značajkama motora ovisno o okolnostima kvara.

Najveći dio podataka za bazu znanja dobiva se eksperimentalnim putem, mjereći parametre motora u radnim uvjetima. Najprije se uspostavlja baza sirovih podataka na temelju već spomenutih eksperimentalnih vrijednosti, tj. laboratorijskih i servisnih podataka, a zatim se dopunjuje podacima tijekom "eksperimentiranja" (testiranja) u radu.

Posebnim softverskim postupkom, od prikupljenih podataka formira se baza kondenziranih podataka, koja sadržava statističke rezultate za kritične značajke.

Koncept ekspertnog sustava za dijagnostiku kvarova prikazuje slika 1. Nakon što se specificira problem, utvrđuju se zahtjevi potrebni da se dođe do informacija. Podaci se dobivaju iz odgovarajućih izvora i adekvatno se organiziraju u bazi ulaznih podataka. Slijedi izrada modela problema sa shemom procesa koji vodi do

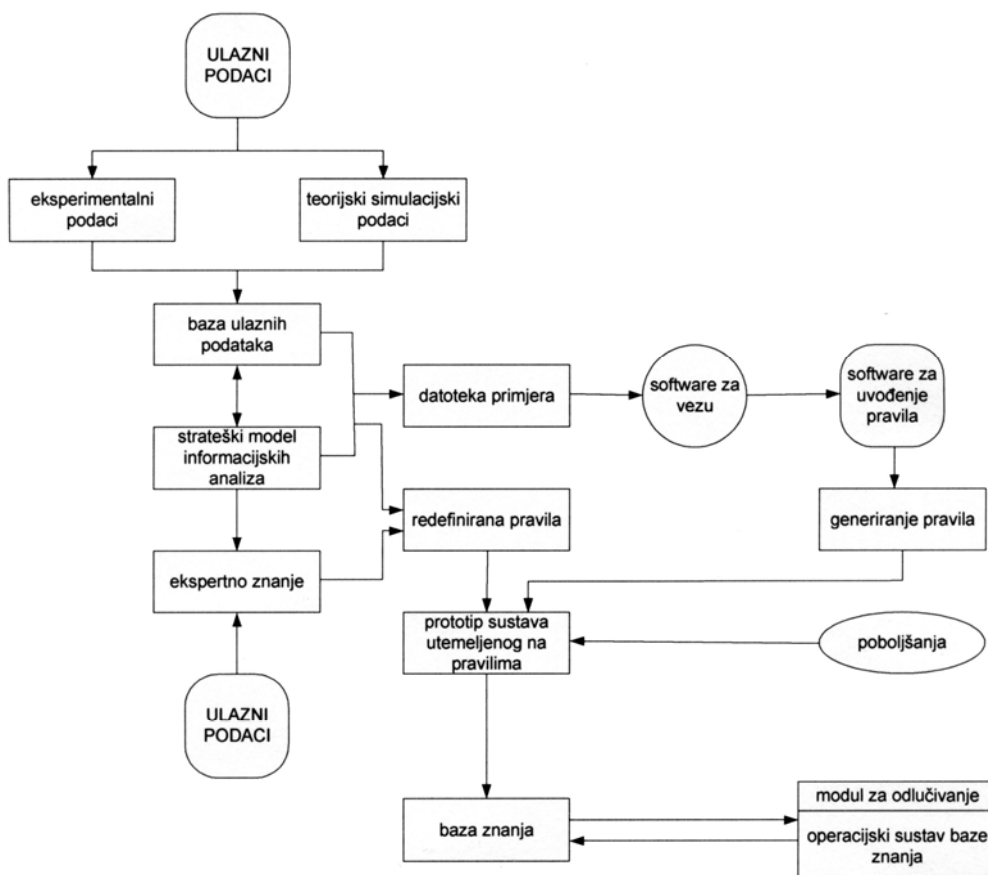
rješenja. Model problema zajedno s bazom ulaznih podataka tvori „ekspertni sustav za analizu informacija“. On služi za definiranje datoteke primjera, iz koje se primjenom pogodnog *softwarea* izvodi prototip "sustava utemeljenog na pravilima".

Da bi se kompletirao ekspertni sustav, potreban je modul za donošenje odluke, koji konzultira bazu znanja i konstruira operacijski sustav baze znanja.

Dijagnostika u sebi sadržava određivanje i analizu statičkih i dinamičkih značajka i procjenu sustava.

Promjene stanja u sustavu prate se i kvantitativno mjere temeljem odgovarajućih značajka tehničkog sustava. Izbor dijagnostičkih značajka svakoga sastavnog dijela ili sustava obnavlja se na osnovi:

- proučavanja njihovih funkcija, načina i uvjeta rada,
- analize razine njihova funkcioniranja,
- sastavljanja logičkih shema uzročno-posljedičnih veza značajka i činitelja koje utječu na radnu sposobnost tehničkog sustava,
- analize otkaza i drugo.



Slika 1. Ekspertni računalni sustav

Fig 1. Expert computing system

Dijagnostički model predstavlja formalni opis (u analitičkom, tabličnom ili drugom obliku) tehničkog sustava i njegova ponašanja u neispravnom i ispravnom stanju. Stanje tehničkog sustava može se utvrditi primjenom odgovarajuće mjerne i druge opreme uz pomoć stručnjaka za dijagnostiku.

Inteligentni motori koriste se ekspertnim sustavom za kontrolu i optimizaciju rada motora. Optimalni uvjeti rada „traže“ se iz prethodno formirane baze znanja, a ako se takvi rezultati ne mogu postići, tada se pronalazi drugo, približno rješenje i ono se zapisuje u bazu znanja. Kako je najvažniji sustav broskog dizelskog motora sustav njegove zaštite, on ima prioritet u automatskom sustavu upravljanja motora, a tek kada su uvjeti za sigurni rad ostvareni, tj. motor radi bez kvarova, razmatraju se optimalni radni uvjeti s ekonomskoga gledišta.

### 3. Ekspertni sustav u dijagnostici inteligentnih motora

#### *Intelligent Motor Diagnostic Expert System*

Na slici 1. prikazan je ekspertni sustav inteligentnog dizelskog motora u kojemu je prikazano polje POBOLJŠANJA. Poboljšanja se ostvaruju s pomoću jedinice za kontrolu cilindra ili jedinice za kontrolu motora postupnim otklanjanjem pojedinih vrijednosti od trenutnih. Otvaranje i zatvaranje ispušnih ventila te ubrizgavanje goriva više se ne obavljaju s pomoću bregaste osovine već se oni elektronički upravljaju, pa tako vremena nisu strogo definirana, već je moguće ugađati vremena otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila te vremena i način ubrizgavanja goriva u cilindar. Izravnim istraživanjem tijekom rada broskog motora, promjenom određenih parametara u njihovim dopuštenim granicama (dobivenih eksperimentalnim podacima na radnom stolu, teorijskim simulacijskim podacima i ljudskim znanjem) može se doći do optimalne potrošnje goriva i maziva bez posljedica za rad motora.

Budući da sve parametre nije potrebno unositi u bazu podataka za određeni motor, baza znanja može se izvesti na sljedeći način:

(i) unose se osnovni parametri što se odnose na uopćeni sustav motora kojemu se podaci ne mogu mijenjati, što predstavlja „temeljnu bazu znanja“;

(ii) unosi se baza znanja koja sadržava podatke dobivene „eksperimentiranjem“ (testiranjem) samog motora, tj. traženjem optimalnog rada pri različitim režimima rada, što predstavlja „refleksnu bazu znanja“, jer ekspertni sustav sam gradi bazu znanja na osnovi odziva, te pamćenja za zadani radni režim.

Eksperimentalno dobiveni podaci pohranjuju se u radnu memoriju, a rezultati koji su najbliži ili su jednaki rezultatima dobivenima na pokusnom stolu pohranjuju se u bazu znanja. Uz taj podatak vezuje se i radni režim motora (broj okretaja, područje plovidbe, kakvoća i vrsta goriva,...). Stanje motora i optimalni uvjeti njegova rada neće uvijek biti stalni, što se posebno odnosi na stanje i rad prilikom kvara nekog sustava ili komponente.

Budući da je riječ o nekoliko veličina na koje se utječe (vrijeme zatvaranja i otvaranja ispušnih ventila, vrijeme i količina ubrizganoga goriva, što dalje utječe na tlak i temperaturu ispirog zraka, stupanj kompresije, temperaturu ispušnih plinova, tlak izgaranja,...), postupnim mijenjanjem vremena i oblika ubrizgavanja goriva te otvaranjem i zatvaranjem ispušnih ventila dolazi se do željenog rezultata; rezultati koji najmanje odstupaju od temeljnih vrijednosti za zadani radni režim zapisuju se u bazu znanja.

Sustav dijagnostike razvijen je za rad na osobnom računalu, i osnova je za izgradnju ekspertnog sustava pa služi za dijagnostiku u *on-line* režimu gdje se s pomoću mjerno-računalne tehnike izravno s osjetnika podaci prenose u računalu i obrađuju.

Modul za akviziciju–zahvaćanje znanja omogućuje ekspertu da kreira dinamičku bazu znanja. Temeljni se podaci unose ručno na tastaturi osobnog računala, dok se refleksna baza znanja dobiva od samog ekspertnog sustava. Baza znanja čini jedan od najvitalnijih segmenata u ekspertnom sustavu. Predstavljanje znanja je u obliku činjenica, produkcijskih pravila tipa:

#### **AKO**

dođe do određene situacije

#### **TEST**

je pozitivan

#### **ONDA**

je potrebna određena akcija

Baza znanja nije konačna i ona se stalno može proširivati i dopunjavati. Upravo izgradnja kvalitetne i konzistentne baze znanja jedna je od najsloženijih faza u izgradnji ekspertnog sustava. Korisničko sučelje zajedno s modulom za objašnjenje, komunikacijsko je sredstvo sa sustavom.

U tablici 1. prikaz je dijela baze znanja za „inteligentni“ motor koji se odnosi na kontrolu ispušnih ventila i vremena ubrizgavanja goriva. Uz to prikazan je samo mali dio dijagnostičkog ekspertnog sustava, koji djeluje sa sustavom inteligentnog motora.

Tablica 1. Prikaz dijela baze znanja

Table 1. Data base partial survey

Pravilo br.	AKO	TEST	AKCIJA
...			
30103.	broj okretaja prevelik	smanjeno opterećenje na propeleru	smanji se dobava goriva u cilindar
30104.	tlak kompresije u cilindru nizak	provjera stanja stapnih prstenova	zamijene se stapni prstenovi
30105.	tlak kompresije u cilindru nizak	provjera zračnosti ventila	ispušni se ventil demontira i ubrusi
30106.	max. tlak izgaranja u cilindru nizak	provjera visokotlačne pumpe goriva	otkloni se kvar ili zamijene komponente pumpe
30107.	max. tlak izgaranja u cilindru nizak	provjera tlačnog ventila i njegove opruge	popravi se tlačni ventil i njegova opruga
30108.	max. tlak izgaranja u cilindru nizak	provjera ubrizgača goriva	ubrizgač se demontira, rastavi, očisti i testira, a po potrebi se ugradi novi
30109.	max. tlak izgaranja u cilindru nizak	smanjena dobava goriva u cilindar	poveća se dobava goriva u cilindar
30110.	max. tlak izgaranja u cilindru nizak	zakašnjelo ubrizgavanje goriva u cilindar	ubrizgavanje goriva u cilindar počinje prije
30111.	max. tlak izgaranja u cilindru visok	preuranjeno ubrizgavanje goriva	ubrizgavanje goriva počinje kasnije
...			
30418.	temperatura ispušnog plina se povisuje	povećana dobava goriva u cilindar	smanji se dobava goriva u cilindar
...			

Zaključivanje na temelju produkcijskih pravila „AKO – ONDA“ može se provoditi na sljedeće načine:

1. Ulančavanjem unaprijed

Ulančavanjem unaprijed zaključuje se na temelju pojedinog odstupanja određenih vrijednosti ili kvara. Ekspertni sustav upućuje na provjeru komponente koja je uzrokovala poremećaj a upisana je u bazu znanja. Ova provjera može se obavljati i u prikazivanju znanja s određenom sigurnošću, tako da se mogući kvar s najmanjom mogućnošću pojavljivanja i najmanjim utjecajem, kontrolira posljednji. Ako je test pozitivan, nastupa akcija i uklanjanje pogreške u radu motora.

Tako u slučaju (30108) da je najveći tlak izgaranja u cilindru nizak, prema inicijalnoj bazi podataka preporučuje se napraviti test:

1. količina dobave goriva u cilindar (smanjena),
2. vrijeme ubrizgavanja goriva u cilindar (zakašnjelo),

3. provjera ubrizgača goriva,
4. provjera tlačnog ventila i opruge sisaljke goriva,
5. provjera klipa visokotlačne sisaljke goriva.

Tijekom rada ekspertni sustav može obavljati provjeru (1) i (2) promjenom vremena ubrizgavanja i dobave količine goriva u cilindar, te ispitivanjem dobivenih rezultata. Ako se takvim postupkom nije došlo do zadovoljavajućih rezultata, preostaju ostala tri testa: (3), (4) ili (5), kojima se provjerava uzrok poremećaja. Regulacija dobave goriva i vrijeme ubrizgavanja goriva u cilindar obavljat će se u režimu rada najbolje dobivenih rezultata (najbliže optimalnim vrijednostima) provjere koja se izvršila u prethodnoj provjeri (rad pri kvaru).

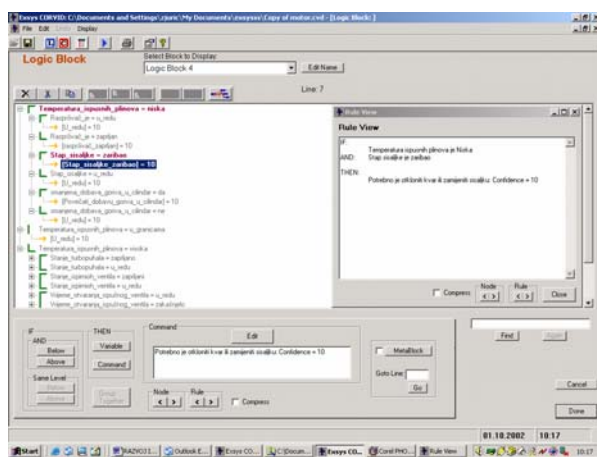
Nakon provjere, ako se utvrdilo da je stap sisaljke istrošen, zaključuje se da je istrošenost visokotlačne pumpe goriva uzrokovalo pad tlaka izgaranja, pa se nakon uklanjanja kvara, radni režim motora vraća se u onaj prijašnji.

## 2. Ulančavanjem unatrag

Ulančavanjem unaprijed nije moguće odrediti na što kvar određenog strojnog dijela može utjecati. U tu svrhu primjenjuje se postupak ulančavanja unatrag.

Tako, ako je test iz pravila broj 30108. pozitivan, tada se ulančavanjem unatrag zaključuje da je posljedica toga i pad temperature ispušnih plinova u određenom cilindru. Tad nije potrebno tražiti uzrok sniženoj temperaturi ispušnih plinova kad se zna da je to uzrokovao kvar visokotlačne pumpe goriva.

Primjer ekspertnog sustava „inteligentnoga“ motora izrađen je u programskom paketu CORVID tvrtke Exsys. Ova ekspertna ljuska ima više mogućnosti: povezivanje i upotreba različitih baza podataka (*MS Access, Clipper,...*), mogućnost analize slikovnih podataka, prikupljanje podataka iz raznih simulacijskih programa (*Matlab Simulink*).



Slika 2. Prikaz znanja u CORVID Exsys ekspertnoj ljusci

Fig. 2. Available data shown in CORVID Exsys expert shell

### 3.1. On-line sustav ugađanja parametara motora

#### Engine Parameters Adjustment On-Line System

Vlastiti razvijeni sustav eksperimentiranja motorom temelji se na promjeni vremena otvaranja i zatvaranja ispušnih ventila te vremena i količine ubrizganoga goriva u cilindar. Tako, ako se dogodi da je najviši tlak izgaranja za određeni režim rada motora nizak, motor će pokrenuti petlju (temeljenu na pravilu broj 30110), gdje su:

$OPIR(X)$  – optimalni tlak izgaranja za određeni režim rada motora  $X$ ,

$PI$  – najviši tlak izgaranja,

TOLERANCIJA – dopušteno odstupanje od optimalnog tlaka izgaranja,

$A$  – pomak kuta početka ubrizgavanja [ $^{\circ}$  KV]<sup>\*</sup>,

$PPI$  – najviši tlak izgaranja u prethodnom pokusu,

$FI$  – kut ubrizgavanja koji se upisuje u radnu memoriju,

$KU$  – stvarni (trenutni) kut ubrizgavanja; uzima se iz radne memorije,

$DGR(X)$  – donja granica početka ubrizgavanja [ $^{\circ}$  KV],

$GGR(X)$  – gornja granica početka ubrizgavanja [ $^{\circ}$  KV].

Tijek programa izvodi se na sljedeći način:

```

10 INPUT (OPIR (X))
20 INPUT (PI)
30 INPUT (KU)
40 INPUT (TOLERANCIA)
50 A=0.5
60 DO
70 FOR I=0 TO 10 STEP A
80 PPI=PI
90 FI=KU-I
100 INPUT (PI)
110 IF ABS(OPIR(X)-PPI)=ABS(OPIR(X)-PI) THEN
120 A=-0.5
130 KU=KU+I
140 GOTO 50
150 ELSEIF ABS(OPIR(X)-PPI)>ABS(OPIR(X)-PI)
160 KU=FI
170 ELSE
180 GOTO 70
190 ENDF
210 IF (PI-OPIR(X)) OR PI-TOLERANCIA-OPIR(X) AND PI-TOLERANCIA-OPIR(X):KU=FI:GOTO 210
220 WHILE FI-DGR (X) OR FI-GGR (X)
230 END
  
```

Za određeni režim rada motora očitava se iz baze znanja optimalni tlak izgaranja ( $OPIR(X)$ ), dok se preko osjetnika (*spin-up* osjetnik tlaka) očitava tlak u cilindru ( $PI$ ). Također se može uzeti i odstupanje od optimalnog tlaka (TOLERANCIA). Programom je određen korak koji se uzima pri "traženju" optimalnog kuta ubrizgavanja koji se u ovom primjeru iznosi 0,5. Tada nastupa sljedeća petlja: za prethodni tlak izgaranja (referentni) uzima se trenutni tlak izgaranja u cilindru ( $PPI=PI$ ). Nakon toga se kut ubrizgavanja goriva u cilindar mijenja se za definirani korak kuta ubrizgavanja, pa kut ubrizgavanja iznosi  $FI=KU-0,5$ . Slijedi očitavanje tlaka izgaranja ( $PI$ ) i provjera je li apsolutno odstupanje tlaka izgaranja prije promjene kuta ubrizgavanja i optimalnog tlaka za određeni režim rada manje, jednako ili veće od apsolutnog odstupanja trenutnog tlaka izgaranja i optimalnog tlaka izgaranja za određeni režim rada.

Ako je apsolutna razlika optimalnog tlaka izgaranja za određeni režim rada motora  $X$  i prethodne vrijednosti maksimalnog tlaka izgaranja ( $PI$ ) manja od apsolutne razlike optimalnog tlaka izgaranja za određeni režim rada motora  $X$  i trenutnoga maksimalnog tlaka izgaranja, kut ubrizgavanja vraća se na staru vrijednost, te se on počinje povećavati za korak  $A$ . Ako je apsolutna razlika optimalnog tlaka izgaranja za određeni režim rada motora  $X$  i prethodne vrijednosti maksimalnog tlaka izgaranja veća od apsolutne razlike optimalnog tlaka izgaranja za određeni režim rada motora  $X$  i trenutnoga maksimalnog tlaka izgaranja, kut se ubrizgavanja pomiče na kut  $FI$ , te se nastavlja s petljom. Ako nije nastupila nikakva promjena tlaka, program se nastavlja s istim korakom  $A$ . Kada je tlak izgaranja jednak onom optimalnom tlaku izgaranja ili se on pak kreće u granicama tolerancije, kut  $FI$  iz radne memorije uzima se kao kut ubrizgavanja goriva.

\* [ $^{\circ}$  KV] – kut koljeničastog vratila

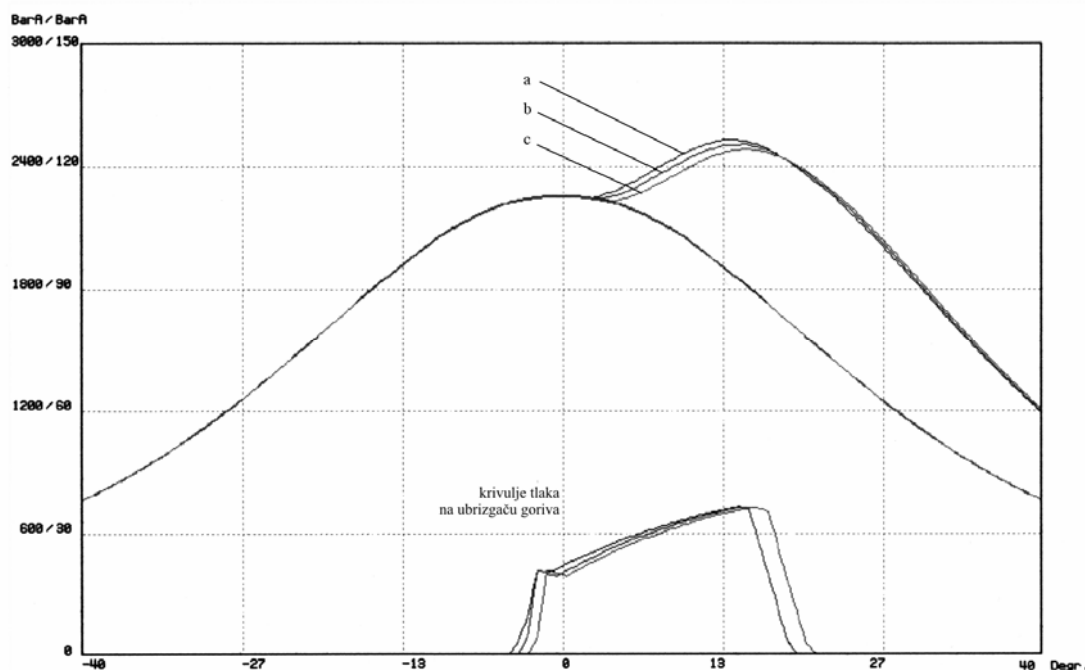
Ako se rješenje nije pronašlo, a izlazi se iz područja dopuštenih odstupanja, program pamti optimalno vrijeme početka ubrizgavanja goriva (u vidu kuta koljeničastog vratila), te nastavlja s tim radnim režimom.

Uz ovu petlju istodobno se obavlja i petlja za povećanje vremena ubrizgavanja i količine goriva u cilindar, te petlja koja prati vrijeme i kut koljeničastog vratila za najvišu temperaturu izgaranja.

Ovaj program (petlja) je općenit i vrijedi za sve ostale parametre koji se mogu mijenjati u inteligentnih motora promjena. Tako za *OPIR(X)* može se uzeti optimalna temperatura izgaranja, optimalni stupanj kompresije itd.

za određeni režim rada X, pa se mijenjaju relevantne značajke koje utječu na promjenu temperature izgaranja. U prikazanom primjeru uzet je tlak izgaranja.

Na slici 3. prikazan je razvijeni  $p-\alpha$  dijagram glavnoga brodskog porivnog motora tvrtke MAN B&W 5L90MC, broja okretaja od 74 o/min ovisno o različitim vremenima početka ubrizgavanja goriva u cilindar. Polazi se od pretpostavke da su svi elementi u sustavu ispravni. U tablici 2. osnovne su vrijednosti u pojedinom cilindru za pripadajuća različita vremena ubrizgavanja goriva.



Slika 3. Razvijeni indicirani dijagram dizelskog motora MAN B&W 5L90MC

Fig. 3. An MAN B&W 5L90MC indicating diagram

Tablica 2.

Table 2.

Parametri		Krivulja "a"	Krivulja "b"	Krivulja "c"
Ubrizgavanje	tlak otvaranja ubrizgača goriva [bar]	420,0	420,0	420,0
	najviši tlak na ubrizgaču goriva [bar]	730,5	730,1	730,7
	vrijeme otvaranja ubrizgača goriva [° KV]	-1,7	-1,4	-0,5
	vrijeme trajanja ubrizgavanja goriva [° KV]	16,7	16,7	16,8
Osnovne veličine	broj okretaja motora [min <sup>-1</sup> ]	74,0	74,0	74,0
	indeks pumpe goriva [%]	92,9	92,7	93,2
	srednji indicirani tlak [bar]	18,5	18,2	17,8
	indicirana snaga [kW]	4114,0	4046,0	3952,0
Izgaranje	vrijeme zapaljenja goriva [° KV]	3,5	3,8	4,6
	najviši tlak izgaranja [bar]	126,6	125,5	124,2
	vrijeme nastajanja najviše temperature [° KV]	14,5	15,2	15,8
	tlak kompresije [bar]	113,0	112,7	113,0

Vrijeme otvaranja ubrizgača goriva u početnom trenutku pokusa iznosi 1,4 stupnja koljeničastog vratila prije gornje mrtve točke, krivulja „b“. Budući da za

postavljeni režim rada nije postignut optimalni tlak izgaranja, pokreće se petlja kojom se on pokušava postići (130 bara) ili barem da bude u području

određenom tolerancijom. Pokušaj postizanja tlaka izgaranja pomicanjem kuta ubrizgavanja koljeničastog vratila za pozitivan korak radi njegova povećanja, povećava se odstupanje od optimalnog tlaka izgaranja, a time se smanjuje i indicirana snaga - krivulja „c“. Sljedećim se korakom kut ubrizgavanja vraća na početnu vrijednost, a za korak se uzima negativna vrijednost, pa se time i smanjuje kut početka ubrizgavanja goriva. Budući da se smanjuje razlika između optimalnog tlaka izgaranja i stvarnog tlaka izgaranja, krivulja „a“, petlja će nastaviti smanjivati kut početka ubrizgavanja goriva sve dok se ne ostvari optimalni tlak izgaranja ili dok tlak izgaranja ne uđe u područje koje je određeno tolerancijskim poljem za zadani radni režim. Također je vidljivo da se u ovom slučaju ranijim ubrizgavanjem dobiva veća indicirana snaga u cilindru, ali i viši srednji indicirani tlak.

Prilikom programiranja ovakva sustava treba obratiti pozornost na utjecaje na cjelokupni sustav prilikom pronalazanja optimalnog vremena ubrizgavanja goriva i otvaranja ispušnih ventila. Tako prilikom smanjivanja kuta ubrizgavanja goriva u cilindru, a radi povećanja indicirane snage motora, dolazi do većih mehaničkih opterećenja na koljeničasto vratilo, većih trošenja temeljnih i letećih ležajeva, porasta temperature glave motora, smanjenja devijacije temperature ispušnih plinova i povećanoga prirasta tlaka po kutu koljeničastog vratila.

Međutim, ako je neki sustav u kvaru ili je pred zastojem, program nastavlja rad s najmanjim mogućim posljedicama na sigurnost rada stroja, a ipak tražeći optimalne uvjete za takav rad. Na primjer, ako je izlazna temperatura ulja za podmazivanje na jednome temeljnom ležaju povišena, dok su ostali parametri normalni, zaključak je da su se pojavila istrošenja na tom ležaju. Smanjivanjem opterećenja na tom cilindru znatno se dobilo na odgodi vremena otkaza, a da se cilindar potpuno ne isključi iz rada (držanjem ispušnog ventila otvorenog i zatvaranjem dovoda goriva na visokotlačnu pumpu goriva), i znatno se nije izgubilo na snazi porivnog stroja. U ovom slučaju potreba za uljem za podmazivanje cilindra također bi bila manja.

Ovakvim upravljanjem ubrizgavanja goriva u cilindru postiže se optimalni način ubrizgavanja goriva u cilindru pri različitim opterećenjima stroja, dok je to kod motora s bregastom osovinom samo u rasponu od 90 do 100% nominalne snage pri neprekidnom radu. Kombiniranjem vremena ubrizgavanja i variranjem stupnja kompresije postigao bi se maksimalni tlak izgaranja u velikom rasponu opterećenja motora, a da se pritom motor ne bi opteretio.

#### 4. Zaključak

##### Conclusion

Upotreba „inteligentnih motora“ dugoročno je ulaganje u porivni sustav uopće. To omogućuje da se smanji posada, uz pouzdaniju plovidbu broda, manji trošak održavanja, predviđanje kvarova i drugo.

Koristeći se računalom *on-line* povezuju se sve radnje u vezi s održavanjem broda (preventivno održavanje, održavanje nakon kvara, rezervni dijelovi...) pa se time postiže bolja organiziranost, što je preduvjet za sigurniju plovidbu. Satelitskom vezom brodar u svakom trenutku (u području pokrivenosti telekomunikacijskom vezom) može dobiti podatke o stanju porivnog motora. Tako se omogućuje ekspertu na kopnu uvid u kvar, ako kvar zahtijeva njegovu intervenciju.

Primjenom elektroničkog uređaja koji preuzima funkciju bregaste osovine motora, otvaraju se nove mogućnosti za daljnji razvoj i ispitivanje broskog porivnog sustava. Centralizacijom informacija pojedinih sustava i podsustava može se ostvariti i veza onih elemenata koji nisu prije bile vezane sustavom automatizacije (npr. veza sustava rashladne morske vode s visokotemperaturnim i niskotemperaturnim sustavom slatke vode, pa zatim tih sustava sa sustavima uputnog zraka, ulja za podmazivanje,...). Ovim bi se omogućilo točnije zaključivanje ekspertnog računalnog sustava o kakvu se kvaru radi, te eventualna redukcija alarma.

Razvojem računalne industrije, ključni elementi ovakva inteligentnog motora postajat će sve jeftiniji, pa tako i sam proces proizvodnje, ugradnje i primjene računala, a time i inteligentnih motora na brodovima. Primjena novih istraživanja bit će lako prihvatljiva, što se posebno odnosi na elektronički upravljane sustave.

Izvedba prototipa motora kojem bi se ekspertni sustav temeljio na „samoučenju“ i donošenju zaključaka, olakšala bi ispitivanje najkompleksnijih međudjelovanja pojedinih sustava radi što preciznije dijagnostike kvarova.

#### Literatura

##### References

1. P. Sørensen & P. Sunn Pedersen, „The Intelligent Engine and Electronic Products - A Development Status”, Proceedings of the 22nd CIMAC International Congress on Combustion Engines, Copenhagen 18-21 May 1998, pp 551-564.
2. P. Sunn Pedersen, „Development Towards the Intelligent Engine”, 16th International Marine Propulsion Conference, London 10-11 March 1994, Proceedings pp 77-88.
3. P. Sunn Pedersen & P. Sørensen, „Computer Controlled System for two-stroke Machinery (A Progress Report)“. 22nd Marine Propulsion Conference, Amsterdam 29-30 March 2000. Conference Proceedings, pp 17-33.
4. G. Radica, „Dijagnostika kvarova“, skripta, Pomorski fakultet u Splitu, 1994.

---

Rukopis primljen: 28.12.2004.