

Dr. ERNEST BAZIJANAC  
Fakultet prometnih znanosti  
Zagreb, Vukelićeva 4

Prometna tehnika  
Izvorni znanstveni rad  
UDK: 621.43.038.001  
Primljeno: 10.03.1994.  
Prihvaćeno: 06.04.1994.

# DIJAGNOSTICIRANJE SUSTAVA ZA UBRIZGAVANJE GORIVA DIESELOVOG MOTORA NA TEMELJU TEORIJE PREPOZNAVANJA UZORAKA

## SAŽETAK

U radu se opisuje dio istraživanja o mogućnosti primjene teorije prepoznavanja uzoraka kao jezgre dijagnostičkog modela. Dijagnoza sustava se temelji na signalima radnih procesa. Pravila dijagnosticiranja određuju se na osnovi primjera dijagnostičkih signala, stvorenih od raznih vrsta tehničkog stanja sustava. Model je verificiran na dijagnosticiranju sustava za ubrizgavanje goriva Diesellovog motora. Kao dijagnostički signal korišten je signal tlaka ubrizgavanja goriva ispod brizgaljke.

## 1. UVOD

Suvremeni Diesellovi motori su sustavi visoke razine složenosti. U takvih sustava uvijek je prisutan problem pouzdanosti, raspoloživosti i ekonomičnosti održavanja. Izmjena Diesellova motora za pogon pojedinih posebnih (specijalnih) vozila zahtijeva visoku vjerojatnost izvršenja zadatka. Da bi se ispunio navedeni zahtjev, do sada se često koristio sustav preventivnog održavanja. Primjena preventivnog održavanja u promjenljivim uvjetima eksploatacije često uzrokuje nepotrebna rastavljanja sklopova što povećava troškove održavanja, te smanjuje pouzdanost toga sklopa.

U opisanim uvjetima, za postizanje visoke učinkovitosti tehničkog sustava sve se više primjenjuje koncepcija održavanja prema stanju.

Održavanje prema stanju oblik je preventivnog održavanja čija je strategija donošenja odluke o intervencijama održavanja utemeljena na periodičnoj ili neprekidnoj provjeri tehničkog stanja sustava u procesu eksploatacije. Taj model održavanja pretpostavlja da se stanje sustava može dostatno točno odrediti koristeći metode tehničke dijagnostike.

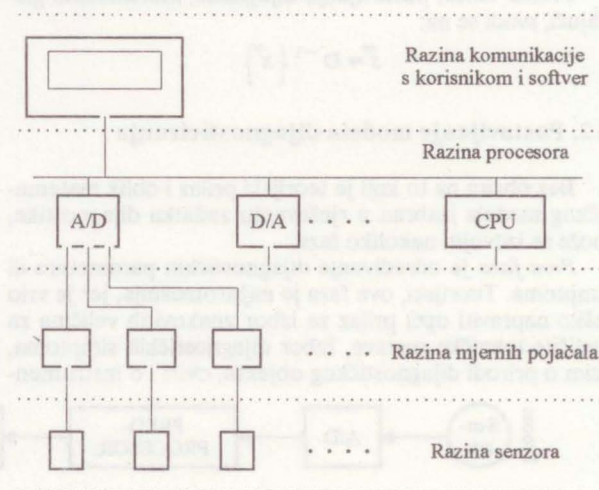
Utvrđivanje stanja i lokalizacija neispravnosti u suvremenih motora postaju sve složeniji. Jedan od mogućih načina rješavanja tog problema jest razvoj tzv. automatskih dijagnostičkih sustava (ADS). Koncepcija ADS polazi od toga da se dijagnostički parametri dobivaju mjerenjem uz pomoć senzora koji su postavljeni na objekt dijagnosticiranja, a dijagnoza tehničkog stanja dobiva se na osnovi obrade podataka koji su učitani u računalo.

Da bi se proces utvrđivanja tehničkog stanja nekog sustava automatizirao, potrebno je pronaći vezu između dijagnostičkih i strukturnih parametara, te razraditi matematički model prepoznavanja tehničkog stanja na osnovi izmjerenih parametara. Za potrebe planiranja održavanja bilo bi pogodno i da se na osnovi tih izmjerenih parametara predvidi i mogućnost daljnjeg ispravnog rada sustava (predikcija stanja).

## 2. DEFINICIJA MATEMATIČKOG MODELA DIJAGNOSTICIRANJA

### 2.1. Opći model dijagnosticiranja

Osnovne komponente svakog ADS-a čine senzori, mjerne pojačala, procesorski dio, komponente za komunikaciju s korisnikom i softver (sl. 1.).



Slika 1. Sastav automatskih dijagnostičkih sustava

Najveći dio informacija u ADS-u za utvrđivanje tehničkog stanja objekta dijagnosticiranja dobiva se od senzora koji su sastavni dio motora ili se montiraju samo za potrebe dijagnosticiranja. Jedan dio informacija u tijeku dijagnosti-

ciranja može se davati interaktivno od operatora ili se dobivaju iz baze podataka. To mogu biti npr. podaci o utrošenom resursu, zadnjem tehničkom pregledu i slično.

Pri postavljanju dijagnoze u objektima u kojih se provjerava samo jedan parametar, nema posebnih metodoloških problema. U tom slučaju dostatno je provjeriti je li dijagnostički parametar veći ili manji od graničnog.

Čest je slučaj da se tehničko stanje nekog sustava definira s više parametara koji znače *vektor stanja* koji je promjenljiv tijekom vremena. U općem slučaju vektor stanja ima oblik:

$$\vec{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))^T$$

Koordinate  $x_i(t)$  su stohastičke veličine. Dakle, jedan od problema bi bio da se nakon odabranog vektora stanja odredi stanje sustava, tj. postavi dijagnoza, a drugi problem je konstruiranje optimalnog sustava preventivnih aktivnosti utemeljenih na promatranju vektora stanja  $\vec{x}$ . Taj dio pripada u područje optimalnog upravljanja multidimenzionalnog stohastičkog sustava. On se ovdje neće posebno analizirati.

Postavljanje dijagnoze stanja pojedinih elemenata složenog sustava, pri kojima se koristi više dijagnostičkih parametara i višedimenzionalni vektor stanja vrlo je složeno, te se obrađuje matematičkim modelima dijagnosticiranja.

Najopćenitiji model dijagnosticiranja može se predočiti u obliku "crne kutije" (sl. 2.). Ako je:

$\vec{x}$  – vektor stanja dijagnostičkih parametara,

$\vec{s}$  – vektor strukturnih parametara,

$\vec{y}$  – vektor parametara vanjskih utjecaja,

tada se može pisati:

$$\vec{x} = D \{ \vec{y}, \vec{s} \}$$

gdje D označuje dijagnostički operator. U procesu dijagnosticiranja komponente su vektora  $\vec{y}$  koje opisuju vanjske utjecaje (režim rada motora, stanje okoline itd.) konstantne ili se mijenjaju po točno određenom zakonu, pa se može pisati:

$$\vec{s} = D \{ \vec{x} \}$$

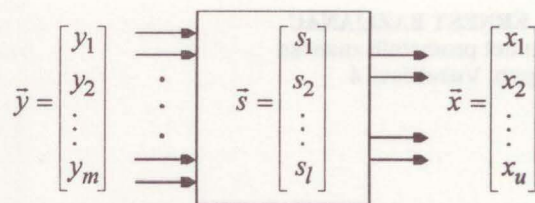
Prema tomu, postavljanje dijagnoze, matematički gledajući, svodi se na:

$$\vec{s} = D^{-1} \{ \vec{x} \}$$

## 2.2. Postavljanje modela dijagnosticiranja

Bez obzira na to koji je teorijski prilaz i oblik matematičkog modela izabran u rješavanju zadatka dijagnostike, može se izdvojiti nekoliko faza.

*Prva faza* je određivanje dijagnostičkih parametara ili simptoma. Teorijski, ova faza je najsiromašnija, jer je vrlo teško napraviti opći prilaz za izbor znakovitih veličina za različite tehničke sustave. Izbor dijagnostičkih simptoma, osim o prirodi dijagnostičkog objekta, ovisi i o instrumen-



Slika 2. Model objekta dijagnosticiranja

tariju za dijagnosticiranje, iskustvu i intuiciji osobe koja rješava problem, o mogućnosti pristupa mjernoj točki itd.

*Druga faza* je redukcija dimenzionalnosti vektora dijagnostičkih parametara. Tu se matematičkim metodama pokušavaju izdvojiti samo najinformativniji parametri od nekog većeg broja parametara odabranih u prvoj fazi.

*Treća faza* je razrada metode za postavljanje dijagnoze. Primarni cilj je dobivanje maksimalnog broja točnih dijagnoza.

## 3. MODELI DIJAGNOSTICIRANJA

### 3.1. Polazni modeli

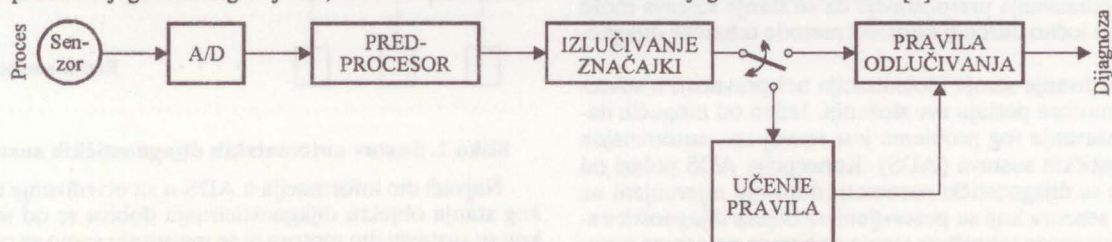
Na osnovi analize literature i osobnih iskustava i istraživačkih spoznaja, izdvojeni su i analizirani neki teorijski prilazi i matematički modeli koji mogu biti osnovica za rješavanje problema utvrđivanja stanja složenih strojarskih sustava. To su sljedeći modeli:

- analitički model,
- logički model,
- model na osnovi vjerojatnosti, te
- model utemeljen na metodama teorije prepoznavanja uzoraka.

Model utemeljen na metodama teorije prepoznavanja uzoraka bio je osnovica za razradu originalnoga dijagnostičkog modela primjenljivog za dijagnosticiranje elemenata sustava za ubrizgavanje goriva Diesellova motora.

### 3.2. Model utemeljen na metodama teorije prepoznavanja uzoraka

Postavljanje dijagnoze na osnovi analognoga dijagnostičkog signala za kompleksnije strojarske sustave može se rješavati korištenjem metoda iz područja prepoznavanja uzoraka ili umjetne inteligencije. Osnovni zadatak koji se pritom rješava je: na osnovi informacije o nekoj pojavi ili procesu, te unaprijed zadanih primjera klasa pojava ili procesa, obavlja se automatsko donošenje odluke o pripadnosti novih primjera tim klasama. U tijeku analize metoda dijagnosticiranja zaključeno je da se međusobnom razmjenom ideja i rezultata iz obiju tih disciplina može doći do novih praktičnih koncepata radi sinteze djelotvornih automatskih dijagnostičkih sustava [1].



Slika 3. Model sustava za dijagnosticiranje utemeljen na metodama teorije prepoznavanja uzoraka

Tako koncipirani dijagnostički sustavi zahtijevaju znatnu numeričku obradu informacija, što u današnje vrijeme nije poseban problem, jer se mogu koristiti mikroročunala u masovnoj primjeni.

Postupak dijagnosticiranja uz pomoć primjene metoda temeljenih na teoriji prepoznavanja uzoraka pokazan je na slici 3. [2].

Dijagnostička veličina, snimljena s pomoću senzora, digitalizira se i dolazi do pretprocesora, gdje se obavlja filtriranje signala, osnovne provjere kvalitete signala itd. Iz digitaliziranog signala obavlja se izlučivanje značajki koje pokazuju samo značajna svojstva signala i koja su dostatna za kvalitetnu dijagnozu. U tijeku tog postupka obavlja se ujedno i eliminacija suvišnih značajki.

Uvođenju dijagnostičkog sustava u rad mora prethoditi faza učenja pravila odlučivanja. U toj fazi se na određenom broju poznatih stanja, odnosno vrsta neispravnosti oblikuju pravila odlučivanja.

### 3.3. Teorijska osnova dijagnosticiranja na temelju teorije prepoznavanja uzoraka

U teoriji prepoznavanja uzoraka mogući su različiti pristupi rješavanju ovog problema. Ovdje je primijenjena statistička klasifikacija s pomoću Bayesova klasifikacijskog pravila. Ono glasi:

$$P(\omega_i / \vec{x}) = \frac{P(\vec{x} / \omega_i) \cdot P(\omega_i)}{P(\vec{x})} \quad (1)$$

gdje je:

$P(\omega_i)$  – vjerojatnost da izmjereni vektor stanja pripada i-toj klasi stanja sustava. Pritom važi:

$$P(\vec{x}) = \sum_{i=1}^c P(\vec{x} / \omega_i) \cdot P(\omega_i)$$

$P(\vec{x} / \omega_i)$  – relativna funkcija gustoće raspodjele za i-tu klasu

$c$  – broj klasa tehničkog stanja

Koristeći Bayesovo klasifikacijsko pravilo, može se izračunati vjerojatnost da izmjereni vektor stanja  $\vec{x}$  pripada tehničkom stanju  $\omega_i$ .

Bayesovo pravilo odlučivanja za minimalnu pogrešku, vektor stanja  $\vec{x}$ , klasificira u klasu  $\omega_i$ , ako je ispunjen uvjet:

$$P(\omega_i / \vec{x}) > P(\omega_j / \vec{x}) \quad j = 1, 2, \dots, c \quad j \neq i$$

Koristeći (1), izraz se svodi na:

$$P(\vec{x} / \omega_i) \cdot P(\omega_i) > P(\vec{x} / \omega_j) \cdot P(\omega_j) \quad j = 1, 2, \dots, c \quad j \neq i$$

Diskriminacijska funkcija za normalnu relativnu funkciju gustoće izgleda ovako [2]:

$$g_i(\vec{x}) = -\frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{m}_i)^T \cdot C_i^{-1} \cdot (\vec{x} - \vec{m}_i) - \frac{d}{2} \log 2\pi - \frac{1}{2} \log |C_i| + \log P(\omega_i) \quad (2)$$

gdje je:

$\vec{x}^T$  – transponirani vektor

$\vec{m}_i$  – srednji vektor i-te klase

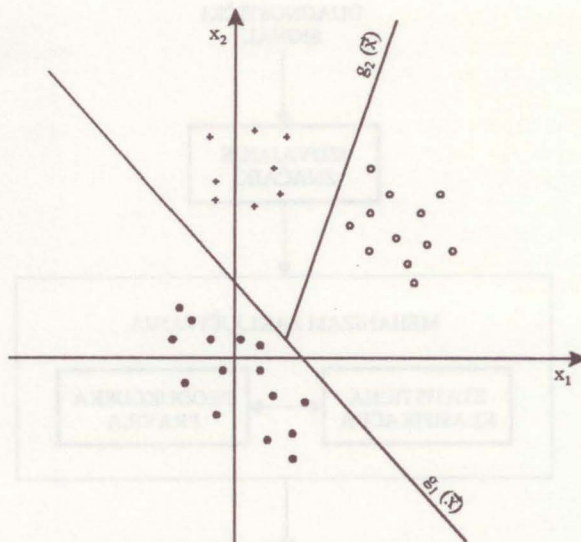
$C_i$  – kovarijantna matrica i-te klase

$d$  – dimenzija vektora stanja

U slučaju kada se može pretpostaviti da su kovarijantne matrice  $C_i = C$ , izraz (2) se pojednostavnjuje i izgleda:

$$g_i(\vec{x}) = \vec{k}_i^T \cdot \vec{x} + k_{i0}$$

gdje je  $\vec{k}_i$  tzv. težinski vektor stanja:



Slika 4. Dvodimenzionalni vektor stanja i tri klase tehničkog stanja

$$\vec{k}_i = C^{-1} \cdot \vec{m}_i$$

a  $k_{i0}$  težinska razina komparacije:

$$k_{i0} = -\frac{1}{2} \vec{m}_i^T \cdot C^{-1} \cdot \vec{m}_i + \log P(\omega_i)$$

granica između klasa  $\omega_i$  i  $\omega_j$  je:

$$g_i(\vec{x}) - g_j(\vec{x}) = 0$$

i općenito znači tzv. hiperpovršinu odluka.

### 3.4. Stvaranje pravila dijagnosticiranja

Vidljivo je da se za Bayesov klasifikator, obučavanje, odnosno stvaranje pravila za postavljanje dijagnoze, svodi na određivanje vrijednosti  $P(\vec{x} / \omega_i)$  i  $P(\omega_i)$ .

Postavljanje dijagnoze kompleksnih strojarskih sustava uglavnom se ne može temeljiti samo na statističkoj klasifikaciji. Stoga mehanizam zaključivanja u kojemu se postavlja dijagnoza ima dva modula (sl. 5.). Jedan modul obavlja klasifikaciju stanja na osnovi već opisanih pravila statističke klasifikacije, a drugi modul sadrži produkcijska pravila i osigurava određeno logičko okruženje. Taj modul sadrži dodatna znanja koja su potrebna za dijagnosticiranje, a koja je nemoguće ugraditi u modul za statističku klasifikaciju.

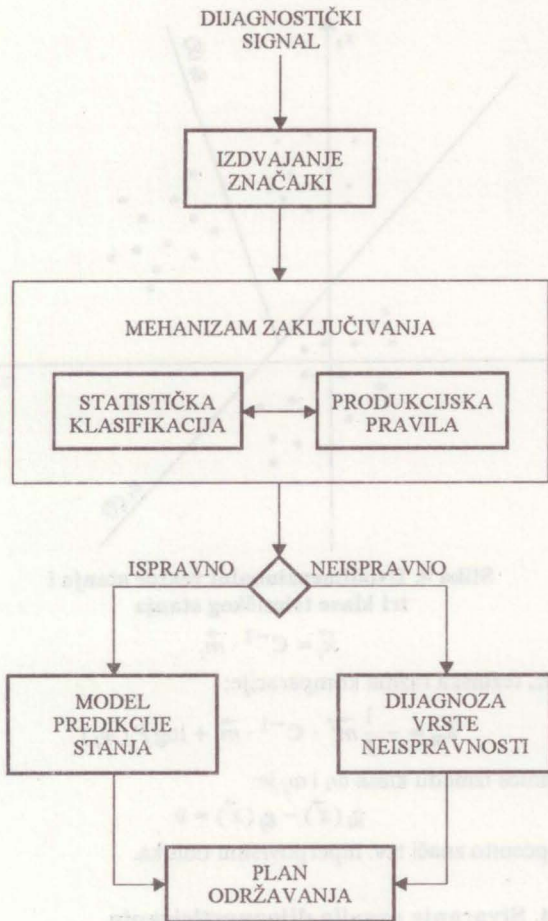
U ovom radu opisani su samo neki rezultati u radu na razvoju modula za statističku klasifikaciju.

## 4. VERIFIKACIJA MODELA DIJAGNOSTICIRANJA

Opisani model dijagnosticiranja primijenjen je na sustav za ubrizgavanje goriva Diesellova motora. Navedeni se sustav za potrebe statističke klasifikacije dekomponira u sljedeće podsustave:

- crpna sekcija,
- ventil rasterećenja,
- brizgaljka i
- podsustav niskog tlaka.

Svaki od navedenih sustava može biti ispravan ili neispravan. Prema tomu, postoje  $2^4$  stanja. U slučaju međuo-visnosti događaja, tada bi se vjerojatnost događaja isprav-



Slika 5. Dijagnostički sustav

nog rada sustava (kad su svi podsustavi ispravni), računala prema:

$$P(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) = P(\omega_1/\omega_2, \omega_3, \omega_4) \cdot P(\omega_1/\omega_3, \omega_4) \cdot P(\omega_3/\omega_4) \cdot P(\omega_4)$$

Takav pristup generira dva problema: veliki broj stanja što zahtijeva veliki broj eksperimenata za stvaranje baze referentnih uzoraka, i nemogućnost praktičnog određivanja vjerojatnosti pojave međuovisnih događaja iz prethodne relacije. Stoga se u ovom modelu, pri određivanju klasa stanja, pretpostavlja neovisnost događaja, što znači da istodobno ne mogu biti neispravna dva i više elemenata. Ta pretpostavka je realna jer se radi o visoko pouzdanim sustavima.

Usvajanjem navedene pretpostavke, definiraju se sljedeće klase tehničkih stanja:

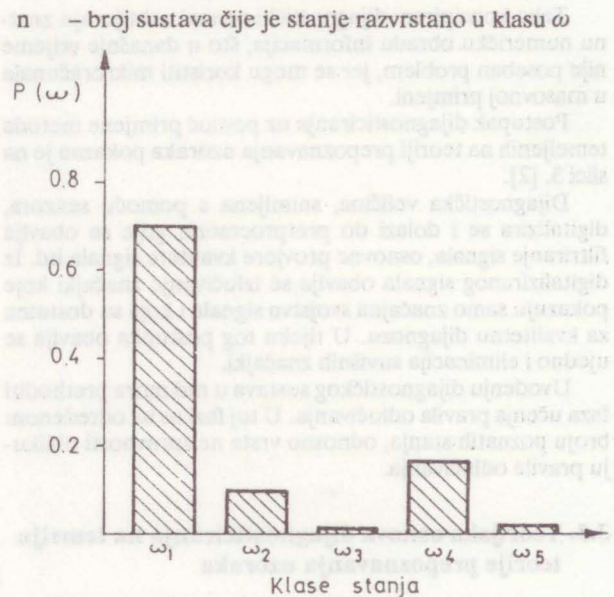
- sustav ispravan:  $\omega_1$
- neispravan podsustav niskog tlaka:  $\omega_2$
- neispravan ventil rasterećenja:  $\omega_3$
- neispravna brizgaljka:  $\omega_4$
- neispravan crpni element:  $\omega_5$

Apriorne vjerojatnosti  $P(\omega_i)$  dobivene su statističkom obradom tehničkog stanja crpke visokog tlaka i brizgaljke pri tehničkom pregledu:

$$P(\omega_i) = \frac{n_i}{N}$$

gdje je:

$N$  - ukupan broj analiziranih sustava



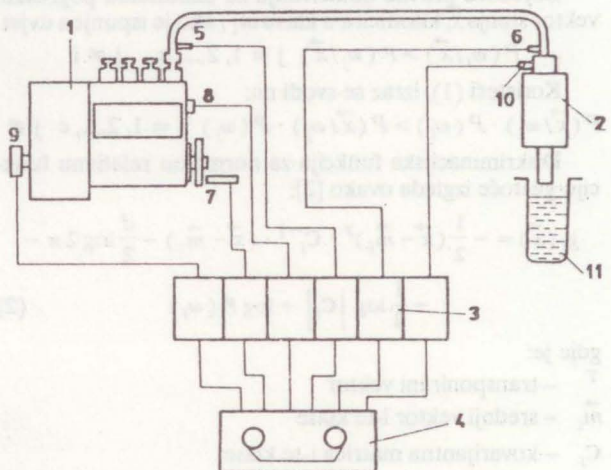
Slika 6. Apriorne vjerojatnosti klasa stanja

#### 4.1. Izdvajanje parametara za statističku klasifikaciju

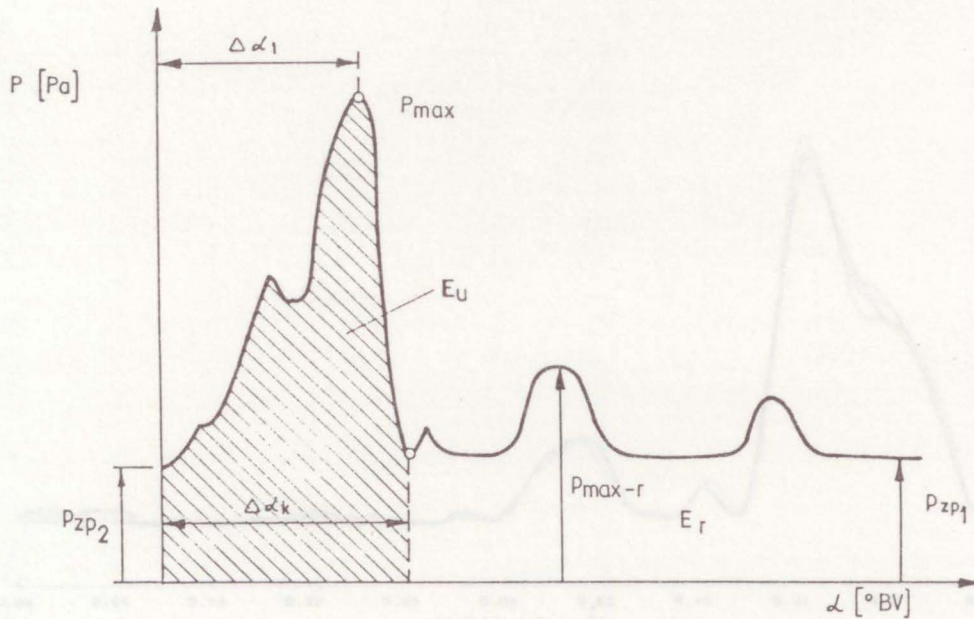
Pri definiranju kriterija za izbor komponenta vektora stanja, odnosno značajki, u ovom radu pošlo se od sljedećeg:

- izdvojeni parametri za statističku klasifikaciju koriste se i pri postavljanju dijagnoze s pomoću produkcijskih pravila u sklopu logičkog modela,
- postupak za izdvajanje značajki iz dijagnostičkog signala treba biti jednostavan a mogućnost pogrešnog izdvajanja mala.

Za eksperimentalno istraživanje procesa ubrizgavanja razrađen je mjerni lanac pokazan na slici 7. Podaci za vrijeme ispitivanja snimani su na mjerni magnetofon. S magnetofona podaci su digitalizirani i pohranjeni u računala.



Slika 7. Mjerni lanac: 1-crpka visokog tlaka, 2-brizgaljka, 3- mjerna pojačala, 4-magnetofon, 5 i 6-senzori tlaka, 7-senzor pozicije GMT, 8-senzor pomaka zupčaste letve, 9-tahogenerator, 10-senzor pomaka igle brizgaljke, 11-menzura



Slika 8. Izlučivanje značajki na signalu tlaka ubrizgavanja goriva

lo. Kompletna obrada se kasnije odvijala na računalu HP 9000/300.

Oslanjajući se na analizu procesa ubrizgavanja i navedene kriterije za izbor komponenata vektora stanja za statističku klasifikaciju, u ovom radu eksperimentiralo se sa sljedećim značajkama izdvojenim iz signala tlaka ispred brizgaljke (sl. 8):

- maksimalni tlak ubrizgavanja:  $p_{max} = x_1$
- maksimalni tlak reflektiranog vala tlaka:  $p_{max-r} = x_2$
- zaostali tlak goriva:  $p_{zp1} = x_3$
- brzina porasta tlaka:  $Der = p_{max} / \Delta \alpha_1 = x_4$
- "energija" impulsa tlaka:  $E_u = x_5$
- indeks promjene zaostalog tlaka:  $p_{zp1} / p_{zp2} = x_6$

- trajanje potiskivanja do postizanja maksimalnog tlaka:  $\Delta \alpha_1 = x_7$

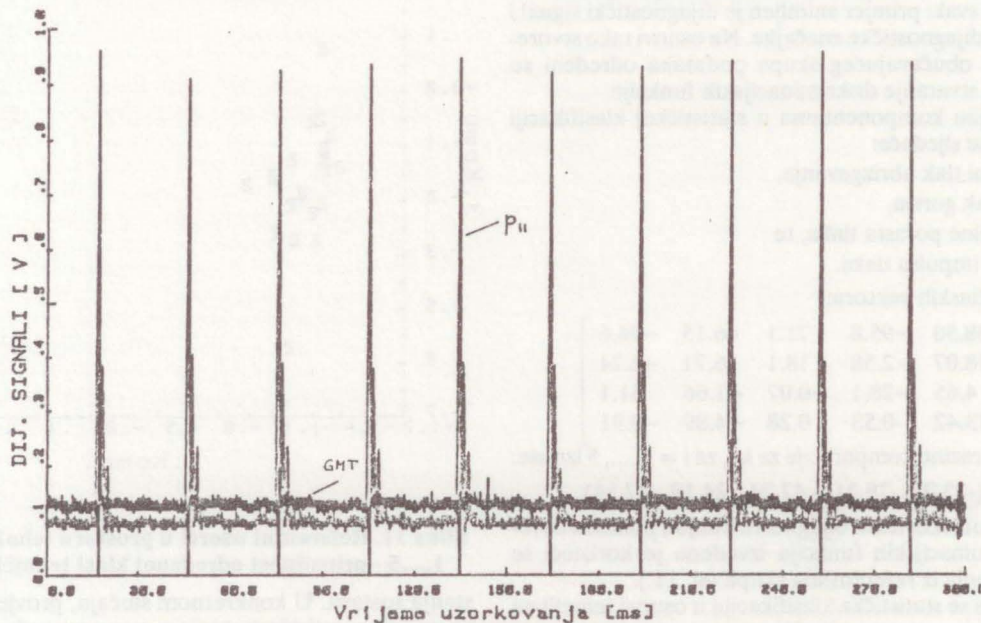
- trajanje impulsa tlaka:  $\Delta \alpha_k = x_8$

- "energija" reflektiranih valova tlaka:  $E_r = x_9$

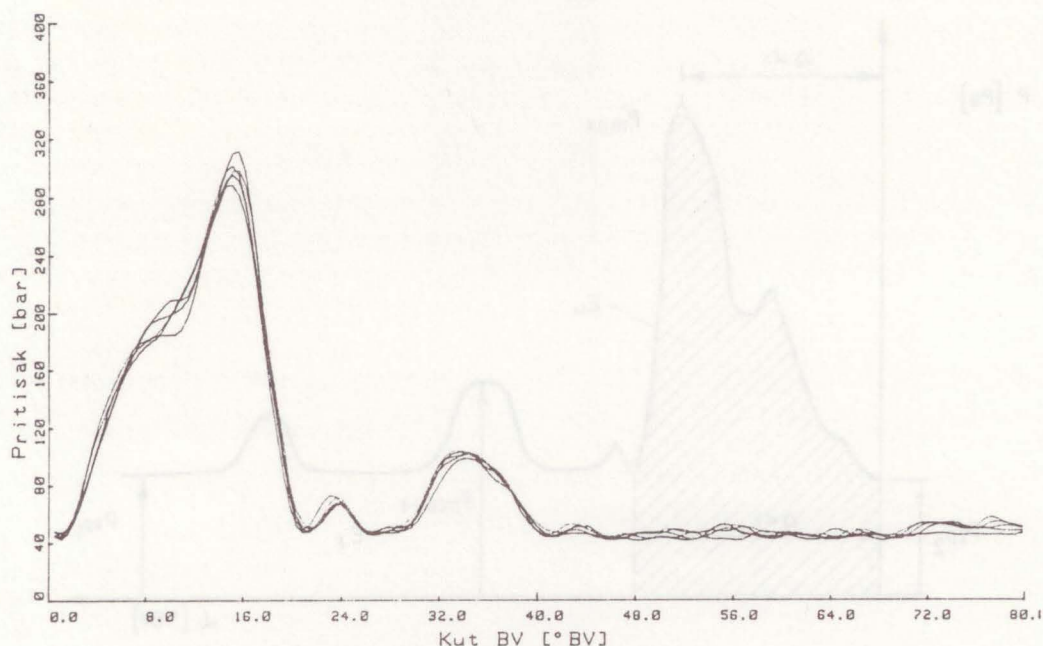
Digitalizirani i neobrađeni dijagnostički signali (tlak goriva ispred brizgaljke i pozicija gornje mrtve točke - GMT) pokazani su na slici 9.

Obrada dijagnostičkog signala kao i izdvajanje značajki iz dijagnostičkog signala obavlja se automatski s pomoću programa specijalno razrađenog za tu svrhu. Program je pisan u jeziku HP Pascal i HP Basic.

Nakon obrade, dijagnostički signali, pripremljeni za izdvajanje značajki pokazani su na slici 10.



Slika 9. Dijagnostički signali:  $p_{11}$  tlak ubrizgavanja ispred brizgaljke GMT-pozicija gornje mrtve točke na bregastom vratilu crpke visokog tlaka



Slika 10. Dijagnostički signal pripremljen za izdvajanje značajki:  
Kut BV-zaokret bregastog vratila crpke visokog tlaka u stupnjevima

#### 4.2. Određivanje diskriminacijskih funkcija

Diskriminacijske funkcije s pomoću kojih se prostor stanja dijeli na klase stanja i s pomoću kojih se obavlja klasifikacija imaju oblik:

$$g_i(\vec{x}) = \vec{k}_i \cdot \vec{x} + k_{i0} \quad i = 1, \dots, 5$$

Težinski vektori, proračunani na temelju referentnog skupa, pokazani su u obliku matrice  $k$  gdje  $i$ -ti redak matrice predstavlja vektor  $\vec{k}_i$ . Težinski vektori dani su samo za značajne komponente vektora stanja.

Da bi se dobile diskriminacijske funkcije, nabavljeno je desetak primjera za svaku vrstu definiranoga tehničkog stanja sustava za ubrizgavanje, dakle, ukupno pedesetak primjera. Za svaki primjer snimljen je dijagnostički signal i izdvojene su dijagnostičke značajke. Na osnovi tako stvorene baze tzv. obučavajućeg skupa podataka određeni su parametri za stvaranje diskriminacijskih funkcija.

Značajnijim komponentama u statističkoj klasifikaciji pokazale su se sljedeće:

- maksimalni tlak ubrizgavanja,
- zaostali tlak goriva,
- indeks brzine porasta tlaka, te
- "energija" impulsa tlaka.

Matrica  $k$  težinskih vektora:

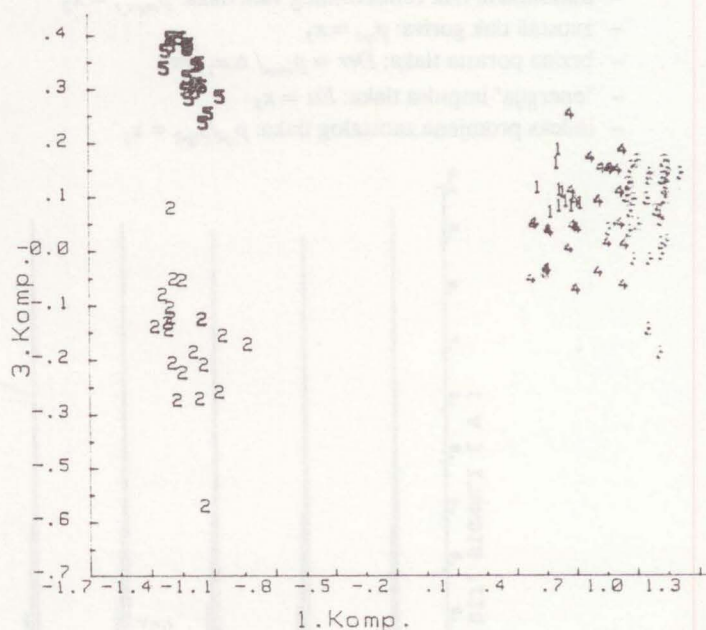
$$k = \begin{bmatrix} 38.30 & -95.8 & 71.1 & 46.15 & -94.6 \\ 18.07 & -2.58 & 18.1 & 16.71 & -2.74 \\ 4.65 & -28.1 & -0.07 & -1.66 & 31.1 \\ 13.42 & 0.53 & 0.28 & -4.89 & -0.91 \end{bmatrix}$$

Težinske razine komparacije za  $k_{i0}$  za  $i = 1, \dots, 5$  iznose:

$$k_{i0} = (-23.07, -78.31, -47.74, -24.19, -77.54)$$

Provjera učinkovitosti dijagnosticiranja s pomoću navedenih diskriminacijskih funkcija izvedena je koristeći se vektorima stanja iz referentnog skupa (sl. 11.).

Budući da se statistička klasifikacija u osnovi temelji na klasificiranju na osnovi zadanih primjera, jasno je da će stvarna učinkovitost dijagnosticiranja umnogome ovisiti o uspješnosti obuhvaćanja što većeg broja primjera različitih



Slika 11. Referentni uzorci u prostoru tehničkog stanja:  
1, ..., 5 - pripadnost određenoj klasi tehničkog stanja

stanja sustava. U konkretnom slučaju, provjereno je da je za navedene primjere stanja sustava moguća uspješna klasifikacija s opisanim linearnim diskriminacijskim funkcijama.

## 5. ZAKLJUČCI

Suvremeni motori i vozila sve više znače visoku razinu integracije strojarskih, hidrauličkih i elektroničkih komponenata. Za postizanje visoke učinkovitosti tako složenih tehničkih sustava sve više se primjenjuje koncepcija održavanja prema stanju. Budući da se teorijske postavke te koncepcije temelje na stalnoj provjeri izlaznih performanci sustava, dijagnostika postaje sastavni dio održavanja prema stanju.

U ovom radu je prikazan dio istraživanja na sintezi dijagnostičkog modela, koji može biti osnovica za razvoj uređaja za automatsku dijagnostiku složenih strojarskih sustava.

Dijagnostički model utemeljen na statističkoj klasifikaciji verificirao se na sustavu za ubrizgavanje goriva Diesellova motora gdje se kao dijagnostički signal koristio tlak ubrizgavanja sniman ispred brizgaljke.

## SUMMARY

### **DIESEL ENGINE FUEL INJECTION SYSTEM DIAGNOSING BASED UPON THE THEORY OF RECOGNIZING SAMPLES**

*The paper deals with a segment of research examining the possibility of application of the theory of recognizing samples as the core of a diagnosing model. System diagnosing is based upon the signals of operation process. Diagnosing rules are determined based upon the sample of diagnosing signals produced by different simulated aspects of system technical condition. The model has been verified in the process of Diesel engine fuel injection system diagnosing. The fuel injection pressure signal in front of the injector has been used as a diagnosing signal.*

## LITERATURA

- [1] E.BAZIJANAC: Istraživanje mogućnosti automatskog dijagnosticiranja sistema za ubrizgavanje goriva dizel motora. Doktorska disertacija, VVTŠ, Zagreb, 1991.
- [2] J.T.TOU, R.C.GONZALES: Pattern recognition principles. Addison- Wesley Publishing Company, London, 1984.
- [3] L.MONOSTORI: Pattern recognition based learning and decision making in complex machine tool monitoring systems. International Federation for Information Processing, Dubrovnik, 1987.