

Dr. IVAN MAVRIN  
Fakultet prometnih znanosti  
Zagreb, Vukelićeva 4

Prometna tehnika  
Izvorni znanstveni rad  
UDK: 62-222  
Primljeno: 25.06.1990.  
Prihvaćeno: 09.07.1990.

## OSJETLJIVOST DIJAGNOSTIČKIH PARAMETARA VIBRACIJSKOG SIGNALA CILINDRA MOTORA

### SAŽETAK

U radu su definirani dijagnostički parametri za određivanje istrošenja cilindra. Kao dijagnostički parametri analizirani su amplituda ubrzanja cilindra na dominantnim frekvencijama i trenutak udara klipa u cilindar izražen kutom koljenastog vratila.

Za utvrđene dijagnostičke parametre ispitana je njihova osjetljivost. Ova je osobina izuzetno važna jer u nedostatku nje ne može se izabrati dijagnostički parametar pouzdano koristiti za utvrđivanje veličine strukturnog parametra.

Osjetljivost definiranih dijagnostičkih parametara provjerena je eksperimentom za razne vrijednosti istrošenja cilindra motora.

### 1. UVOD

Posljednjih godina primjećuje se porast udjela rada dijagnosticiranja u procesu održavanja, što je posljedica zahtjeva za sigurnom vožnjom, trajnosti u radu i smanjenju rada i troškova održavanja. Sve to zahtijeva posvećivanje posebne pažnje procesu dijagnosticiranja.

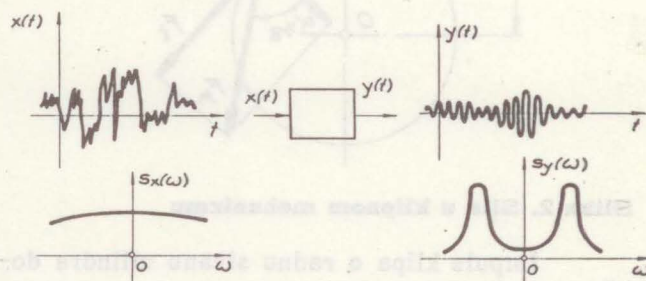
Dijagnostika stanja objekta, sklopa, može se obavljati mjerenjem vrijednosti parametara nekog od radnih izlaznih procesa.

Usporedno s radnim procesima neizbježno se pojavljuju i parazitski procesi. Ovi procesi su s funkcijskog gledišta nekorisni ali se ne mogu izbjeći (kao vibracije, buka, zagrijavanje i sl.). Vibracije koje nastaju kod sudara spregnutih dijelova smatraju se izvornom informacijom vibracijske dijagnostike. Pretpostavka je da se promjenom zračnosti između klipa i cilindra, promjenom opterećenja i karaktera djelujućih sila dolazi do promjena sadržaja vibracijskog signala cilindra. Premještanje klipa unutar cilindra, s jedne na drugu stranu, odvija se pod djelovanjem normalne sile tlaka i rotacijske inercije te se završava udarom klipa u cilindar. Poslije sudara jedan dio energije odlazi u okolinu posredstvom elastičnih valova. Ovi valovi prenose se po cijelom cilindru i registriraju se putem davača vibracija. Nužno je zatim izvršiti analizu primljenog vibracijskog signala s ciljem pronalazanja parametara koji opisuju promatranu kinematsku par. Svi parametri ne nose jednako dobre informacije o stanju cilindra pa se za dijagnosticiranje biraju samo oni koji imaju toč-

no definirane osobine: osjetljivost, jednoznačnost, stabilnost i informativnost.

Kod vibracijskog signala parametri koji ga definiraju su amplituda, fazni pomak, frekvencija, prigušenje i drugi. S ovim dijagnostičkim parametrima potrebno je izraziti istrošenje cilindra. Ovo je teško a razlog je u tome što se za vrijeme jednog procesa u motoru pojavljuju promjenljive pobudne sile, deformacije, temperature, različite debljine uljnog filma, različita krutost i sile trenja. Također, vibracije nastale kod cilindra i općenito u dijelovima motora ne mogu se opisati točnim matematičkim aparatom. To su neperiodične vibracije kod kojih se karakteristike signala mijenjaju prijenosom kroz postojeći sustav [1] što je prikazano na slici 1. U nekim slučajevima vibracije sustava dolaze u rezonanciju s ulaznim poremećajima, pa amplitude mogu osjetno porasti.

U ovom radu prikazani su i definirani neki dijagnostički parametri za određivanje istrošenja cilindra. Njihova osjetljivost određena je na osnovi provedenog eksperimenta.



Slika 1. Promjene ulaznog signala kroz sistem s odgovarajućim spektrom

### 2. DEFINIRANJE DIJAGNOSTIČKIH PARAMETARA

Jedan od osnovnih parametara kojim se određuje tehničko stanje cilindarsko-klipne grupe je zračnost između klipa i cilindra. Ova zračnost ima izuzetnu važnost jer svojom promjenom direktno pridonosi nepravilnostima u radu sklopa i motora u cjelini. Povećanje radne zračnosti koja je konstrukcijskom razradom točno određena, doći će do promjene tehničkog stanja a i radne sposobnosti sklopa i motora. Trošenjem cilindra radna zračnost se povećava i pod djelovanjem bočne sile  $F_n$ , prikazane na

slici 2, dolazi do premještanja klipa u blizini GMT i DMT i udara u stijenku cilindra.

Promjena sile  $F_n$ , impulsa i vremena premještanja može se izračunati na sljedeći način [2]:

$$\frac{dF_n}{dt} = \lambda \cdot \omega \left( \sin \alpha \frac{df}{d\alpha} + F \cos \alpha \right)$$

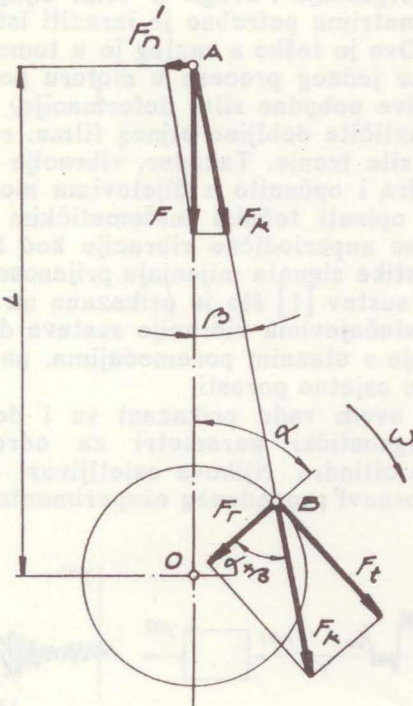
gdje je:

$$\lambda = \frac{r}{L}$$

$\omega$  - kutna brzina

$F$  - ukupna sila na klip

$\alpha$  - kut koljenastog vratila



Slika 2. Sila u klipnom mehanizmu

Impuls klipa o radnu stranu cilindra dobije se iz izraza:

$$I_n = \int_0^t F_n dt$$

odnosno

$$I_n = k \cdot \sqrt[3]{h_0^2 m_k \omega \lambda \left( \frac{dF}{d\alpha} \sin \alpha + F \cos \alpha \right)}$$

gdje je

$h_0$  - put klipa kod bočnog kretanja

$m_k$  - masa klipa

Vrijeme premještanja klipa u zračnosti između klipa i cilindra izraženo kutom koljenastog vratila iznosi:

$$\alpha_d = \omega \left( 6h_0 m_k / \lambda \cdot \omega \left( \frac{dF}{d\alpha} \sin \alpha + F \cos \alpha \right) \right)^{1/3}$$

Određivanjem i mjerenjem puta premještanja klipa od GMT do trenutka udara u cilindar dobije se jedan od dijagnostičkih parametara. Veličina ovog parametra može se uz odgovarajuću mjernu opremu odrediti iz vibracijskog signala cilindra. Do određenih odstupanja dolazi uslijed strujnih pojava u cilindru motora, koje su turbulentne po svojoj prirodi, čija je posljedica zakretanje klipa [3] a time i varijacije u veličini impulsa  $I_n$  i kuta  $\alpha_d$ .

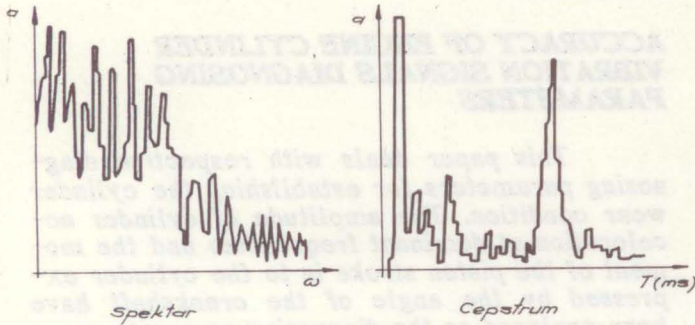
Jedna od važnih komponenata u strukturi vibracijskog signala je njegov intenzitet. On može biti izražen preko tri veličina: pomaka, brzine ili ubrzanja. Pomak je proporcionalan napreznju materijala, dok je ubrzanje posebno osjetljivo na veličinu udara pa najbolje opisuje zračnost. Zato je ubrzanje uzeto kao parametar kojim se opisuju vibracije. Također, s praktične strane, ubrzanje je najjednostavnije mjeriti. Veoma efikasna metoda analize je frekventna analiza spektra ubrzanja, kod koje su često izraženi određeni harmonici, koji su rezultat rezonancije cilindra. Za određivanje rezonantnih frekvencija potrebno je poznavanje vlastitih frekvencija. Eksperimentalne vrijednosti pokazale su [4] da se vlastite frekvencije cilindra nalaze u granicama 1,8 - 4 kHz. Važno je primijetiti da se područje vlastitih frekvencija neće mijenjati s povećanjem istrošenja cilindra.

Frekventnu analizu moguće je izvršiti i preko amplitudno frekventnog spektra. Ona ima i neke svoje prednosti. Često će porast ukupnog nivoa vibracija označiti da se nešto mijenja, ali to još ne daje informaciju o izvoru promjene. Ne smijemo zaboraviti da će se tijekom vremena povećavati zazor i kod drugih spregnutih dijelova a ne samo između cilindra i klipa. Svi ovi zazori mogu biti izvor određenih vibracija i povećanja njihovog ukupnog nivoa. O kojem izvoru se radi i koliki je njegov udio u ukupnom povećanju nivoa vibracija pitanja su na koja se može dati odgovor tek nakon analize frekvencija. Također neće nam uvijek, na početku, neka pojava utjecati na nivo vibracija već će se primjećivati promjene samo u manjim spektralnim komponentama. O kojoj pojavi je riječ to će nam otkriti samo frekventna analiza.

Nakon uočavanja dominantnih frekvencija nekog izvora (npr. istrošenja cilindra), te praćenjem ili uspoređivanjem amplituda moći će se zaključiti o stanju cilindra. No, nekad se ne može precizno odrediti u amplitudno-frekventnom spektru dominantne frekvencije jer su neprepoznatljive. Tada obavljamo cepstrum analizu.

Cepstrum je spektar od spektra i tom analizom odvajaju se nepotrebni pratiloci procesa. Cepstrum prigušuje smetnje a ističe karakteristične veličine spektra koje generiraju signal. Na slici 3. dan je primjer slučaja kad se iz izvornog spektra ne mogu uočiti dominantne frekvencije. One su se izdvojile veoma lagano s pomoću cepstruma.

Cepstrum analiza potencira bitne frekvencije i skraćuje vrijeme obrade. Veoma je



Slika 3. Spektar i cepstrum slučajnog procesa

pogodna za izdvajanje pojedinih elemenata nekog sklopa preko dominantnih frekvencija. Na tako izdvojenim frekvencijama veličina amplitude može nam poslužiti kao dijagnostički parametar.

### 3. EKSPERIMENTALNO UTVRĐIVANJE OSJETLJIVOSTI DIJAGNOSTIČKIH PARAMETARA

Pri ispitivanju osjetljivosti dijagnostičkih parametara korišten je motor vozila TAM F4L413 FR. Kod ovog zrakom hlađenog motora cilindri se ne nalaze u kućištu već su izvučeni izvan bloka. Ovo omogućuje postavljanje davača ubrzanja direktno na cilindre. Time se znatno olakšava mjerenje ubrzanja cilindra. Za registraciju postavljena su tri davača B i K 8308 na radnu stranu cilindra. U toku ispitivanja bilo je neophodno registrirati vibracije za razna istrošenja cilindra.

Osjetljivost dijagnostičkih parametara definirana je kao promjena  $Y$  koja odgovara promjeni strukturnog parametra  $X$ .

$$O_{sj} = \frac{dY}{dX}$$

Brojčana osjetljivost dijagnostičkog parametra određuje se njegovom relativnom promjenom za određene granice strukturnog parametra npr. od početka rada pa do stanja nastajanja neispravnosti.

$$\Delta Y = \left| \frac{Y_g - Y_p}{Y_g} \right|$$

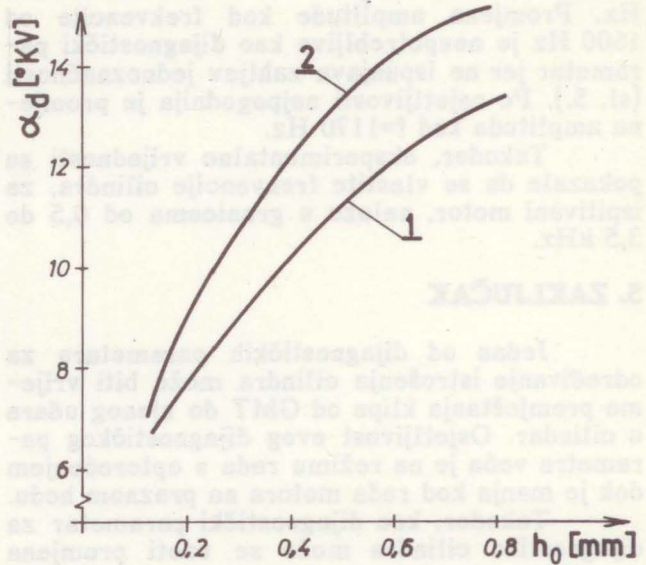
gdje je

$Y_p$  - početna vrijednost dijagnostičkog parametra

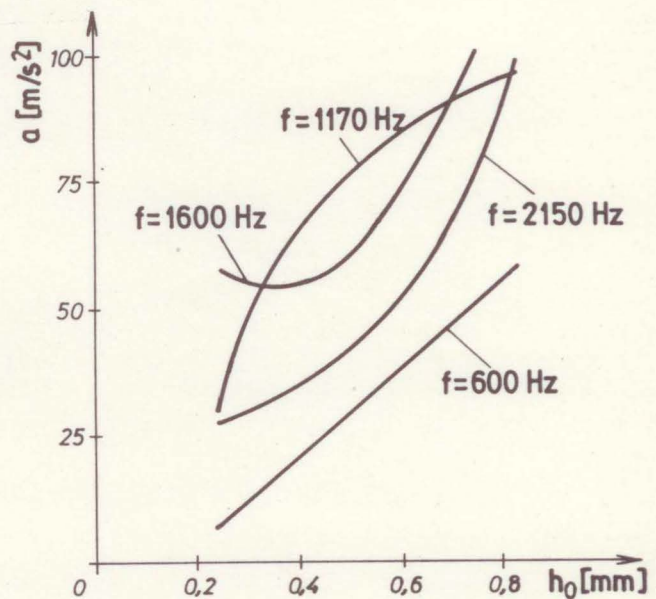
$Y_g$  - vrijednost parametra prigodom nastale neispravnosti

### 4. REZULTATI ISPITIVANJA

Pri mjerenju ubrzanja cilindra uspjelo se nakon nekoliko pokušaja, uz odgovarajuću mjerne opremu, dobiti takav signal s kojeg se mogao utvrditi trenutak udara klipa u cilindar. Rezultati su pokazali da se kut udara mijenja s reži-



Slika 4. Promjena kuta udara za 1 - rad motora na praznom hodu i 2- rad motora s opterećenjem kod  $n=1600$  o/min za maks. ubrizganu količinu goriva



Slika 5. Promjena amplitude kod dominantnih frekvencija za razna istrošenja cilindra

mom rada motora, što je prikazano na slici 4.

Prema podacima proizvođača, kada istrošenje prijeđe vrijednost od 0,35 mm, mora se ići na rasklapanje motora i brušenje cilindra. Osjetljivost se uzima za tu graničnu vrijednost i iznosi  $\Delta Y_1 = 0,3$  a  $\Delta Y_2 = 0,35$ . Znači, da je osjetljivost dijagnostičkog parametra kuta udara

manja na praznom hodu. Na režimu kod  $n = 1600$  o/min (krivulja 2 na slici 4) veća je za 18%.

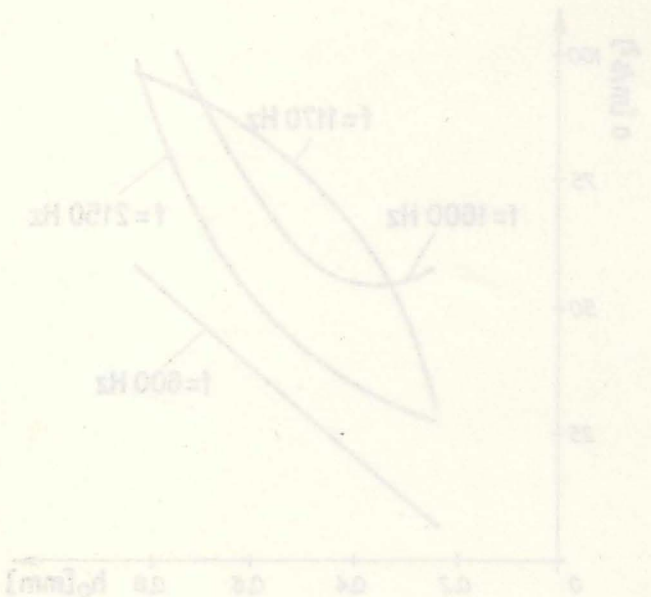
Od dominantnih frekvencija upotrebljive su promjene amplituda kao dijagnostičkih parametara na frekvencijama od 600, 1170 i 2150 Hz. Promjena amplitude kod frekvencije od 1600 Hz je neupotrebljiva kao dijagnostički parametar jer ne ispunjava zahtjev jednoznačnosti (sl. 5.). Po osjetljivosti najpogodnija je promjena amplituda kod  $f=1170$  Hz.

Također, eksperimentalne vrijednosti su pokazale da se vlastite frekvencije cilindra, za ispitivani motor, nalaze u granicama od 0,5 do 3,5 kHz.

## 5. ZAKLJUČAK

Jedan od dijagnostičkih parametara za određivanje istrošenja cilindra može biti vrijeme premještanja klipa od GMT do njenog udara u cilindar. Osjetljivost ovog dijagnostičkog parametra veća je na režimu rada s opterećenjem dok je manja kod rada motora na praznom hodu.

Također, kao dijagnostički parametar za dijagnostiku cilindra može se uzeti promjena amplitude ubrzanja na frekvencijama od 600, 1170 i 2150 Hz. Najveću osjetljivost pokazala je promjena amplitude na frekvenciji od  $f = 1170$  Hz.



Slika 5. Promjena amplitude kod dominantnih frekvencija na razini istrošenja cilindra

## SUMMARY

### ACCURACY OF ENGINE CYLINDER VIBRATION SIGNALS DIAGNOSING PARAMETERS

*This paper deals with respective diagnosing parameters for establishing the cylinder wear condition. The amplitude of cylinder acceleration at dominant frequencies and the moment of the piston stroke in to the cylinder expressed by the angle of the crankshaft have been analysed as the diagnosing parameters.*

*The accuracy of the obtained diagnosing parameters has been tested. This property is of major importance, because if missing, the selected diagnosing parameter cannot be used in a reliable manner for establishing the value of the structural parameter. The accuracy of defined diagnosing parameters has been tested in an experiment for different values of the engine cylinder wear condition.*

## LITERATURA

- [1] D. NEWLAND: Random Vibrations and Spectral Analysis, London and New York, 1975.
- [2] I. MAVRIN: Nove metode za određivanje tehničkog stanja cilindra diesel motora. Međunarodni skup "Nauka i motorna vozila 87", Beograd, 1987.
- [3] H. TSCHOKE, U. ESSERS: Einfluss des Zylinderdruckverlaufes auf die Sekundorbewegung des Kolbens, MTZ br. 4, 1982.
- [4] B.V. PAVLOV: Akustičeskaja dijagnostika mehanizmov, Mašinstroenije, Moskva, 1979.