

TREKUTNA UGAONA BRZINA KAO DIJAGNOSTIČKI I KONTROLNI PARAMETAR RADA MOTORA

Željko Bulatović, dipl. inž. maš.
Vojnotehnički institut (VTI) – Beograd

Ass. mr Dragan Knežević, dipl. inž. maš.
Mašinski fakultet - Beograd

U radu su prikazane neke mogućnosti primene preciznog merenja trenutne ugaone brzine kolenastog vratila u dijagnostici i kontroli rada motora. Stanje tehnike omogućava precizno, bezkontaktno merenje ugaone brzine kolenastog vratila bez potrebe većih izmena na motoru. Šta više, savremeni sistemi upravljanja radom motora, obavezno uključuju korišćenje relativno jeftinih inkrementalnih davača položaja kolenastog vratila. Informacije dobijene na taj način mogu se koristiti za određivanje trenutnog momenta motora kao i za detektovanje izostanka paljenja ili neregularnog rada pojedinih cilindara. Na ovakav način određen trenutni moment, uz primenu odgovarajućih matematičkih modela omogućava izračunavanje trenutnog pritiska u cilindru motora, što je od izuzetne važnosti za kontrolu i dalje poboljšanje rada motora. Dijagnostika izostanka paljenja pojedinih cilindara je od ključnog značaja za zadovoljenje standarda OBDII koji je na snazi od 1996. god u SAD, a u Evropi primena sličnog standarda obavezna je od 2000. godine.

Ključne reči: dizel motor, merenje ugaone brzine, pritisak u cilindru

UVOD

U ovom radu prikazane su neke mogućnosti konkretne aplikacije određenih matematičkih alata na stvarnom 12-to cilindričnom turbo-dizel motoru visoke snage, specijalne namene, koji je u fazi razvoja. Trenutna ugaona brzina kolenastog vratila motora je parametar koji sadrži veliki broj informacija o radu motora kao celine, što znači i o samom radnom procesu u cilindrima motora. Praktično precizno merenje trenutne ugaone brzine kolenastog vratila (KV) uz precizno određivanje ugaonog položaja KV, pruža mogućnost određivanja trenutnog momenta motora, a na bazi njega, u nekim slučajevima i trenutnog pritiska u cilindrima motora, što može biti od velike koristi u praksi, a što se danas, kao što je već navedeno, uveliko koristi u dijagnostici izostanka paljenja pojedinih cilindara što je od ključnog značaja za zadovoljenje standarda OBDII koji je na snazi od 1996. god u SAD, a u Evropi primena sličnog standarda obavezna je od 2000. godine.

Teorijski osnov ovog postupka daju jednačine kretanja kol. vratila motora u sledećem obliku:

$$M_u(\alpha) = M_{um} + I \frac{d\omega}{d\alpha} \quad (1)$$

$$M_u(\alpha) = \sum_{i=1}^n (M_{g_i}(\alpha) + M_{i_i}(\alpha) + M_{f_i}(\alpha)) \quad (2)$$

u ovim jednačinama su:

$M_u(\alpha)$ – trenutni moment motora,

$M_{um}(\alpha)$ – trenutni moment spoljašnjeg opt. motora,

$M_{g_i}(\alpha)$ – trenutni moment koji proizvode gasne sile u pojedinim cilindrima,

$M_{i_i}(\alpha)$ – trenutni moment koji proizvode inercijalne sile u pojedinim cilindrima,

$M_{f_i}(\alpha)$ – trenutni momenti koje proizvode sile trenja u pojedinim cilindrima

I – ukupni moment inercije motora,

ω – trenutna ugaona brzina kolenastog vratila motora;

n – ukupan broj cilindara motora

Osnovna ideja postupka je sledeća: u toku radnog takta pojedinačnog cilindra proizvedeni moment je veći od spoljašnjeg opterećenja što

dovodi do ubrzanja kolenastog vratila. Kako se završava sagorevanje u posmatranom cilindru, oslobođena energija je sve manja, a u sledećem cilindru još nije počeo radni takt. Usled toga dolazi do pada generisanog momenta, što dovodi do usporenja kolenastog vratila. Ovo važi i onda kada se spoljašnje opterećenje menja velikom brzinom kao npr. na prelaznim režimima, zato što je učestanost te promene višestruko manja od frekvence odvijanja radnih procesa u cilindrima motora. Iz ovoga se može zaključiti da tok ugaone brzine sadrži informacije o momentu gasnih sila koje generišu pojedini cilindri. Naravno treba napomenuti da postoji principijelan problem obrade izmerenih rezultata zbog teškoća pri utvrđivanju veze između trenutne ugaone brzine i trenutnog momenta motora, odnosno trenutnih pritisaka u cilindrima. Doprinos inercijalnih sila ukupnom trenutnom momentu motora raste sa kvadratom broja obrtaja tako da pri višim ciklusnim brzinama trenutni moment inercijalnih sila može da prikrije doprinos ukupnog trenutnog momenta gasnih sila, dok je suma trenutnih momenata sila trenja svih cilindara znatno manjeg intenziteta. Sa druge strane u slučaju povezanosti motora i gonjene mašine javlja se elastični sistem pa zato i odgovor takvog sistema nije uvek jednoznačno zavisn od ukupnog trenutnog momenta gasnih sila.

Ipak podatak o trenutnoj ugaonoj brzini, uz odgovarajuću metodologiju obrade, može biti relevantan podatak sa aspekta dijagnostike i kontrole rada motora, s obzirom da se do njega dolazi jednostavnim, preciznim i jeftinim merenjem.

ODREĐIVANJE PRITISKA U CILINDRIMA NA BAZI TRENUTNE UGAONE BRZINE

Matematički modeli identifikacije uticaja procesa u pojedinim cilindrima na tok trenutne ugaone brzine bazirani su obično na jednačinama kretanja karakterističnih celina motora i gonjene mašine. Ovaj pristup je veoma korektan kada se radi o manjim motorima koji se uspešno mogu smatrati kao torziono kruti sistemi. Kada su u pitanju veći motori sa većim brojem cilindara polazni model se znatno usložnjava jer se tada moraju uzeti u obzir efekti torzionih oscilacija.

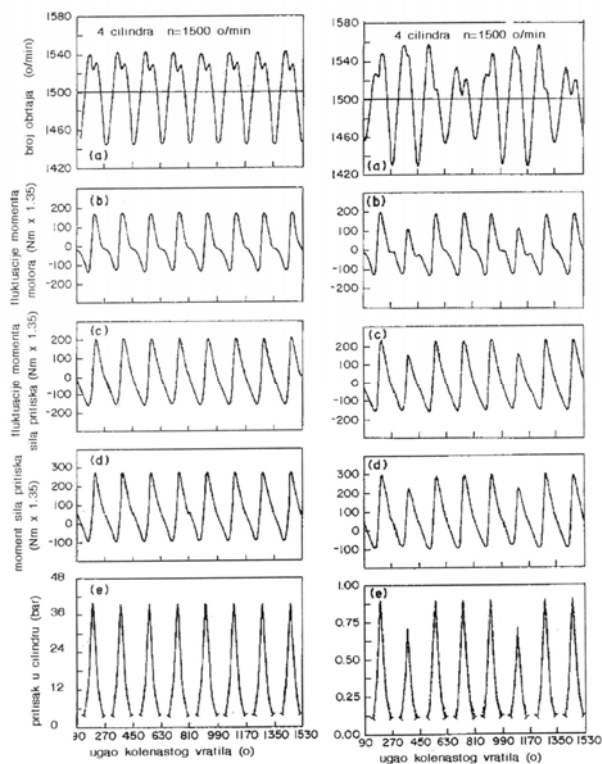
U radovima /1/ i /2/ se može naći podatak da postoje primeri uspešnog kombinovanja modela kretanja i merenja trenutne ugaone brzine, gde je sistem motor-vozilo predstavljen kao torziono

elastičan sistem sa čak četiri stepena slobode. Alternativno zavisno od zahtevane tačnosti mogu se koristiti i jednostavniji modeli realnog matematičkog sistema.

Korišćenjem odgovarajućih modela i merenjem trenutne ugaone brzine motora moguće je prema jednačini (1) obrnutim postupkom rekonstruisati fluktuacije trenutnog momenta motora koje se odvijaju prema jednačini:

$$\Delta M_u(\alpha) = I \frac{d\omega}{d\alpha} \quad (3)$$

Fluktuacije trenutnog momenta gasnih sila mogu se sagledati oduzimanjem trenutnog momenta inercijalnih sila, korišćenjem izraza za trenutni položaj kolenastog vratila, trenutnu ugaonu brzinu, kinematiku motornog mehanizma i vrednosti karakterističnih masa. Da bi se poznavao tok trenutnog ukupnog momenta gasnih sila potrebno je naći vrednost srednjeg momenta motora i sabrati ga sa trenutnom vrednošću fluktuacije momenata gasnih sila. Ova srednja vrednost se dobija merenjem srednje vrednosti na kočnici.



Slika 1:a) trenutna ugaona brzina, b) fluktuacija trenutnog momenta motora, c) fluktuacija momenta gasnih sila, d) trenutni tok momenta gasnih sila, e) trenutni pritisak u cilindru-4 cil. motor n = 1500 o/min

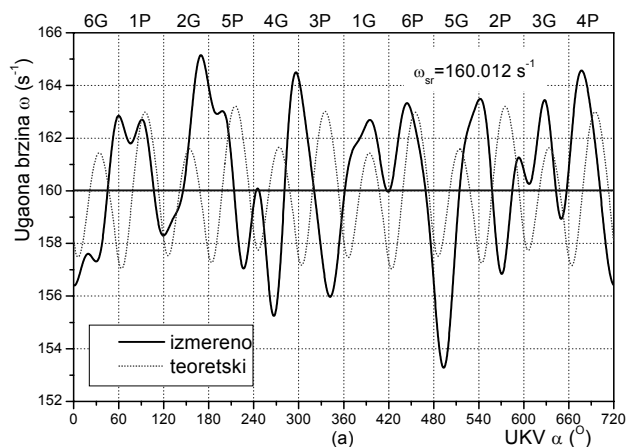
Kod motora kod kojih je ugao kolena u zvezdi prvog reda 180° ili 360°, vrednost ukupnih momenata gasnih sila u trenutku kada su svi

klipovi u mrtvim tačkama, mora biti jednaka nuli, pa se sa ograničenom tačnošću za odgovarajuće ugaone intervale, zavisno od taktosti i broja cilindara, može dobiti vrednost pritiska u onim cilindrima u kojima je započeo radni takt (što je za jedan četvorotaktni motor dato na sl. 1).

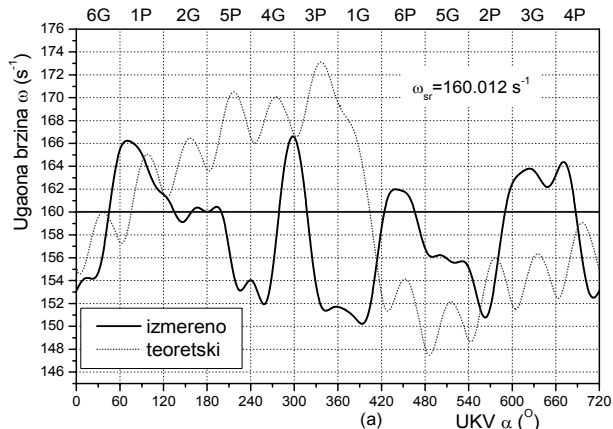
Za motore koji odstupaju od napred navedenog rasporeda kolena ovaj postupak nosi veliku grešku ali se on ipak može korisno upotrebiti pri dijagnostici rada motora, pošto se iz toka trenutne ugaone brzine i položaja kolenastog vratila a na osnovu trenutnog momenta gasnih sila može odrediti neregularnost rada pojedinih cilindara.

DIJAGNOSTIKA RADA MOTORA NA BAZI TRENUTNE UGAONE BRZINE - REZULTATI ISPITIVANJA

Biće izložena analiza mogućnosti primene nekog od kriterijuma i postupaka dijagnostike rada motora na bazi izmerene ugaone brzine kolenastog vratila 12 – cil. turbo dizel motora sa vodenim hlađenjem V-gradnje (ugao cilindara 60°) ukupne radne zapremine 38.88 lit. i nivoom snage 735 KW pri 2000 o/min. Korišćeni su rezultati indiciranja pri režimu 1530 o/min i 3000 Nm momenta (75% od punog opterećenja).



Slika 2: Izmereni i izračunati tok trenutne ugaone brzine KV motora u slučaju rada sa sagorevanjem



Slika 3: Izmereni i izračunati tok trenutne ugaone brzine KV motora u slučaju rada bez sagorevanja

Prilikom ispitivanja korišćen je višekanalni ultra-brzi akvizicioni sistem ADS 2000 u sprezi sa inkrementalnim davačem rezolucije 2500 mernih signala po radnom ciklusu i po jednom kanalu. Meren je pritisak u prvom glavnom cilindru i to sa sagorevanjem i bez sagorevanja odnosno samo sa čistom kompresijom kao i vremenski interval t (u mikrosekundama) između dva susedna inkrementa od 0,288° KV. Na osnovu toga izračunata je trenutna ugaona brzina KV motora (sl. 2 i 3) po formuli:

$$\omega = 0,288 \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot t} \quad (4)$$

za oba slučaja i sa sagorevanjem i bez sagorevanja u prvom glavnom cilindru. Primenom mate-matičkog modela [1] uz odgovarajuće pretpostavke i uprošćenja dobijeni su teorijski dijagrami promene ugaone brzine za oba slučaja, slike 2 i 3.

Obrnutim postupkom i koristeći jednačine 5,6,7,8 i 9 moguće je iz teoretske promene ugaone brzine dobiti teoretsku promenu trenutne tangentne sile koja potiče samo od gasnih sila u cilindrima.

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{R}{I \cdot \omega} (T_u(\alpha) - T_{um}) \cdot \frac{\pi}{180} \quad (5)$$

$$T_u(\alpha) - T_{um} = \frac{I \cdot \omega}{R} \cdot \frac{d\omega}{d\alpha} \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = \omega \cdot \frac{d\omega}{d\alpha} \quad (7)$$

$$T_u(\alpha) = \sum_{i=1}^{12} (T_{gi}(\alpha) + T_{ii}(\alpha)) \quad (8)$$

$$T_{gu} = \sum_{i=1}^{12} T_{gi}(\alpha) = \frac{I}{R} \cdot \varepsilon \cdot \frac{180}{\pi} - \sum_{i=1}^{12} T_{ii}(\alpha) + T_{um} \quad (9)$$

gde su:

$T_u(\alpha)$ – trenutna ukupna tangenta sila

$T_{gi}(\alpha)$ – trenutna gasna komponenta tang. sile

$T_{ii}(\alpha)$ – trenutna inercijalna komponenta tang. sile

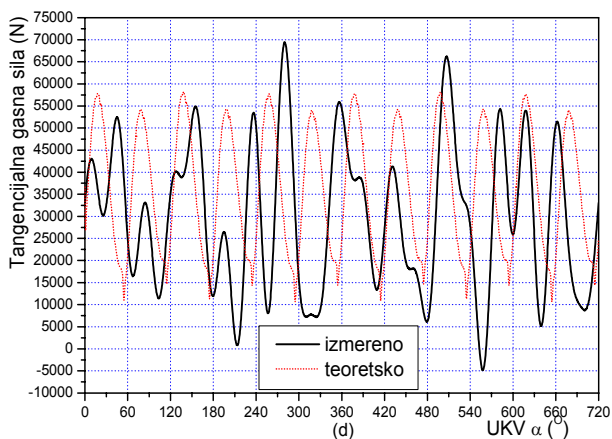
T_{gu} – ukupna gasna komponenta tang. sile

T_{um} – srednja ukupna tang. sila

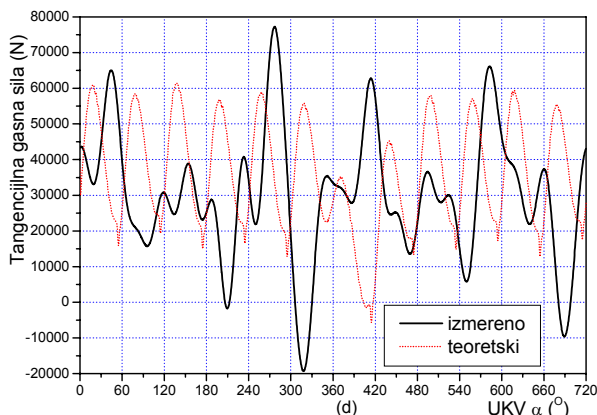
ε – ugaono ubrzanje KV

R – poluprečnik kolena KV

Vrednost ove sile se potpuno poklapa sa vrednošću trenutne tangente sile dobijene proračunom iz snimljenog indikatorskog dijagrama, što prikazuju slike 4 i 5.



Slika 4: Tok gasne komponente trenutne tangente sile sa sagorevanjem u prvom glavnom cilindru



Slika 5: Tok gasne komponente trenutne tangente sile bez sagorevanja u prvom glavnom cilindru

Može se pretpostaviti da se i iz izmerene ugaone brzine kolenastog vratila motora mogu dobiti, primenom odgovarajućeg algoritma, tokovi trenutne tangente sile koju proizvode pritisci u cilindrima (gasne sile) i uporediti sa

onima dobijenim teorijskim putem za oba slučaja, slike 4 i 5. Analizom izmerenih i teoretskih vrednosti toka ugaone brzine (sl. 2 i 3) i na osnovu tih tokova dobijenih vrednosti gasnih komponenti trenutne tangente sile (slike 4 i 5), može se uočiti dosta veliko odstupanje.

Uzroci ovih odstupanja su uglavnom sledeći:

- pretpostavka o identičnosti radnih procesa u svim cilindrima je očigledno suviše gruba jer su zapremine pomoćnih cilindara (desni red) veće od zapremina glavnih cilindara (levi red) tako da se iz tog razloga i pumpa visokog pritiska podešava da ubrizgava više goriva u pomoćne cilindre nego u glavne i to srazmerno razlici zapremina navedenih cilindara;
- takođe ugao predubrizgavanja i vremenski interval trajanja ubrizgavanja nisu isti kod svih cilindara čak i kada je taj interval izražen u funkciji ugla bregastog vratila pumpe visokog pritiska isti za sve cilindre;
- usled veze kol. vratila motora i bregastog vratila pumpe visokog pritiska preko dugog torziono elastičnog vratila, neravnomernost ugaone brzine kolenastog vratila se direktno odražava na tok ugaone brzine bregastog vratila, takođe i samo bregasto vratilo utiče na tu neravnomernost, tako da se javljaju različiti uglovi predubrizgavanja i vremenski intervali trajanja ubrizgavanja pa i različita ubrizgana količina goriva od cilindra do cilindra;
- s obzirom da je merenje vršeno na natpunjenom motoru niži nivoi pritiska u pojedinim cilindrima imaju za posledicu manju energiju izduvnih gasova, što direktno utiče na punjenje sledećih cilindara u redosledu paljenja i samim tim na niži nivoi pritiska u njima;
- pretpostavke po kojima se zanemaruju uticaji sile trenja a posebno uticaji torzionih oscilacija sistema kolenasto – bregasto vratilo daju znatno jednostavniji matematički model, ali zato i neefikasniji;
- merenja su praćena određenim greškama, posebno usled neizbežnih vibracija motora na osloncima i potrebe filtriranja izmerenog signala ugaone brzine

Očigledno je da ovakav pristup problemu nije u ovom slučaju dao zadovoljavajuće rezultate, zbog same konstruktivne koncepcije predmetnog motora (radi se o dvanaestocilindričnom V – motoru), koji predstavlja izrazito elastičan

torzioni sistem, što značajno povećava kompleksnost matematičkog modela.

Postavljanje kriterijuma detekcije stanja motora u eksploataciji ovom metodom zahteva preduzimanje niza detaljnih merenja, da bi se u skladu sa realnim mogućnostima i raspoloživom mernom opremom prikupilo što više informacija i realno procenila mogućnost primene metode na konkretnom motoru s obzirom na njegove izražene konstruktivne specifičnosti, što će biti izloženo u nekom od sledećih radova.

ZAKLJUČAK

Precizno merenje trenutne ugaone brzine kolenastog vratila motora može biti moćno sredstvo u oblasti istraživanja, dijagnostike i regulacije rada motora. Ovo naročito s toga što savremeni motori sa elektronskom kontrolom procesa standardno uključuju dosta jeftine inkrementalne davače sa prostom ugradnjom i bez održavanja u eksploataciji.

Za konkretan motor na kome je izvršeno merenje se može zaključiti da je mogućnost postavljanja odgovarajućih kriterijuma dosta problematična. Ovo je motor specifične koncepcije, izrazito torziono elastičan, natpunjeni i bez zamajca, sa velikim brojem cilindara i mehaničkom kontrolom ubrizgane količine goriva. Ipak, neki pokazatelji upućuju na to da se opsežnim sveobuhvatnim ispitivanjima u relativno ograničenom domenu mogu postići određeni pozitivni rezultati tako da će se započeta istraživanja nastaviti i u buduću.

/3/ Brown T.S., Determination of engine cylinder pressures from crankshaft speed fluctuations, SAE Paper 920463

/4/ Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, 1988

THE CRANKSHAFT SPEED AS ENGINE DIAGNOSTIC AND CONTROL PARAMETER

This paper presents some applications of a precise crankshaft speed measurement for engine diagnostics and control. The state of the art of measuring technique enables precise, noncontacting measurement of crankshaft speed without necessity for serious engine modifications. Even more, modern engine management systems necessarily incorporate relatively unexpensive incremental crankshaft position sensor. Information, obtained by instantaneous crankshaft speed measurement could be use for an engine torque estimation as well as for an engine misfire or malfunction detection. It is possible to determine cylinder pressure by utilizing engine torque waveform, what is essential for engine control and optimization. Engine misfire detection is extremely important to fulfill the requirements of the OBDII regulation, which is obligated from 1996. in USA and similar regulation is also regulation ia also obligated in Europe from 2000.

Key words: diesel engine, crankshaft speed, cylinder pressure

*) Autori se posebno zahvaljuju kolegama iz VTI – a M. Štavljaninu, D. Radiću i Lj. Bojeru na saradnji pri merenju i analizi dobijenih rezultata

LITERATURA

/1/ Bulatović Ž.: Analiza ciklusnih varijacija ugaone brzine kolenastog vratila motora, seminarski rad, Beograd 2005.

/2/ Knežević D., Matejić M.: Dijagnostika i kontrola rada motora na bazi merenja trenutne ugaone brzine kolenastog vratila, VI Međunarodni naučno-stručni skup IPS 2001, Pogorica-Bečići 2001,CG-2790A15