Zoran Građin,
potpukovnik, dipl. inž.
Dragoljub Đurica,
dipl. inž.
Radoje Spasojević,
dipl. inž.
Tehnički opitni centar KoV,
Beograd

MERNE TEHNIKE ZA ODREĐIVANJE MEHANIČKIH GUBITAKA U MOTORIMA SUS*

UDC: 621.432.018.2.001

Rezime:

Smanjenje potrošnje goriva kod motornih vozila je sve aktuelnije, pre svega zbog ekoloških, ali i energetskih i ekonomskih razloga. Izvestan doprinos ovom smanjenju moguć je i kroz smanjenje mehaničkih gubitaka u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem. Međutim, ima dosta problema u realnom određivanju mehaničkih gubitaka. U ovom radu analiziraju se određene savremenije merne tehnike za određivanje mehaničkih gubitaka u motorima SUS, čime se ukazuje na veoma složene probleme u ovoj oblasti merenja. Poboljšanje na ovom planu doprinelo bi preciznijem definisanju triboloških karakteristika motora SUS.

Ključne reči: potrošnja goriva, mehanički gubici, gubici trenja, merne tehnike.

MEASUREMENT TECHNIQUES FOR IC ENGINE MECHANICAL LOSSES DETERMINATION

Summary:

The automobile fuel consumption decrease is of current interest due to ecologic, energetic and economic reasons. Some contributions to this goal are possible using IC engine mechanical losses decrease. There are many problems in real mechanical losses determination. Specific modern measurement techniques for IC engine mechanical losses determination are analysed in this paper. Problems in this measurement field are pointed out. The improvement in this field would contribute to more precise definitions of IC engine tribological characteristics.

Key words: fuel consumption, mechanical losses, friction losses, measurement techniques.

Uvod

Smanjenje potrošnje goriva stalni je trend u razvoju motornih vozila. Samo najrazvijenije zemlje, kao što su SAD i Švedska, imaju propise o ekonomičnosti vozila. U SAD se obuhvata cela flota svakog proizvođača, pri čemu se računa prosečna ekonomičnost za jedno vozilo,

uzimajući u obzir potrošnju u gradskim uslovima kretanja i po auto-putevima. Ovakvim propisom za graničnu potrošnju (iznad koje se plaća porez po geometrijski rastućoj progresiji) stimuliše se proizvodnja malih i ekonomičnih vozila.

Visoka ekonomičnost u potrošnji goriva ne može da se ostvari samo smanjenjem mase, oblikovanjem vozila ili poboljšanjem stepena korisnosti motora. Neizbežno je celovito sagledavanje svih potencijalnih izvora gubitaka, bez obzira

* Rad je saopšten na savetovanju „Ispitivanje upotrebnog kvaliteta mototehničkih sredstava i ocena generalnog remonta“ 08. 12. 1998. u Beogradu.

na to koliko se činio malim njihov doprinos ekonomičnosti vozila.

Zbog toga sve veći značaj dobija i iznalaženje mogućnosti smanjenja mehaničkih gubitaka u motoru, što opet zahteva razvoj mernih metoda za precizno određivanje mehaničkih gubitaka.

Metodi za određivanje mehaničkih gubitaka u motoru

Do sada su, uglavnom, bili poznati sledeći metodi za merenje mehaničkih gubitaka:

- indikatorski metod – meri se razlika između indikatorske i efektivne snage;
- metod vučenja – motor se pogoni spoljnim pogonom;
- Morseov metod – naizmenično isključivanje pojedinih cilindara;
- metod Willansovih (Rombergovih) linija – primenjiv samo kod dizel motora;
- kretanje motora po inerciji do zaustavljanja ili zaletanje motora.

Navedeni metodi imaju niz nedostataka koji ne dozvoljavaju kvalitetnu analizu mehaničkih gubitaka u motorima SUS. Dok je kod indikatorskog metoda glavni problem tačno određivanje srednjeg indikatorskog pritiska, dotle je kod metoda vučenja problem u nepostojanju sagorevanja, zbog čega se merenje izvodi pri lokalnim temperaturama i pritiscima tarnih površina koji se bitno razlikuju od temperatura i pritiska pri sagorevanju.

Kod Morseovog metoda poteškoće nastaju zbog promene temperature u cilindru u kojem nema sagorevanja i pulsirajućih efekata u usisnom i izduvnom kolektoru. Zbog ovih nedostataka, a radi realne dijagnoze, potrebno je u potpunosti izdvojiti trenje kako bi se otklonila

ova neizvesnost. Metod zahteva kombinaciju tačnog određivanja ukupnog trenja sa mogućnošću da se izdvoje individualni doprinosi tom trenju, ali pod realnim uslovima sagorevanja u motoru.

Kod metoda korišćenog u Shorehamu (V. Britanija) motor je opremljen davačem pritiska koji je posebno kalibrisan i koji se mogao brzo montirati na svaki cilindar, a za dobijanje referentne tačke koristio se marker na vratilu. Metod Douauda i Eyzata [1] korišćen je za određivanje SMT na određenom broju obrtaja. Zbog svega toga bilo je moguće relativno tačno izmeriti srednji indikatorski pritisak i pod uslovima metoda vučenja i pod uslovima sagorevanja. Merenje srednjeg efektivnog pritiska vršeno je pomoću klasičnog dinamometra (kočnice). Srednji pritisak mehaničkih gubitaka (p_m) dobija se oduzimanjem efektivnog srednjeg pritiska (p_e) i srednjeg pritiska pumpnih gubitaka (p_p) od indikatorskog srednjeg pritiska (p_i) izmerenog sa pozitivnog dela indikatorskog dijagrama. Pumpni gubici dobijaju se integracijom pumpnog dela indikatorskog dijagrama.

Da bi se video doprinos pojedinih komponenti, gubici koje one stvaraju moraju se izdvojiti iz ukupnih mehaničkih gubitaka, što se postiže upotrebom prikladnih davača obrtnih momenata koji se postavljaju na svakom vratilu, kako je prikazano na slici 1. Signali iz ovih davača, kao i signal iz markera na kolenastom vratilu i davača pritiska u cilindrima šalju se u višekanalnu akvizicijsku jedinicu velike brzine.

Izdvajanje pojedinih gubitaka može da se sumira na sledeći način:

$$p_i = \int p dV$$

$$p_e = \text{meri se dinamometrom}$$

$$p_p = \int p dV$$

$$p_m = p_i - p_e - p_p$$

Vratilo 1: p_{m1} = meri se davačem momenta 1

Vratilo 2: p_{m2} = meri se davačem momenta 2

Vratilo 3: p_{m3} = meri se davačem momenta 3

Sl. 1 – Položaji davača obrtnih momenata

Ostatak: $p_{m*} = p_{m1} - p_{m2} - p_{m3}$

Koristeći informacije iz gornjih relacija moguće je postići izdvajanje promenljivih komponenti trenja pod uslovima sagorevanja u motoru (a takođe i pri metodu vučenja). Gubici za pogon pomoćnih uređaja variraju sa opterećenjem i u oto i u dizel motorima. Treba imati na umu da upotreba rezultata dobijenih primenom metoda vučenja u sintezi trenja pri uslovima sagorevanja može da dovede do greške.

Informacije sa snimljenih trenutnih frikcionih momenata mogu, takođe, da se koriste za analizu režima trenja u pojedinim oblastima. Na primer, kada je reč o trenju u kliznim ležajevima kolena-stog vratila, pri ustaljenom radu motora, može da se koristi metod sa upotrebom programa za dobijanje putanje kretanja na osnovu hidrodinamičke teorije uljnog filma. Merenje trenja u ovim uslovima treba da potvrdi tu teoriju, a to može da se izvede primenom merne aparature prikazane na slici 2 [2]. Naime, merenje toka momenta trenja u osnovnim ležajevima

vima zahteva razdvajanje kliznog ležaja od kućišta motora. Ovaj zahtev može da se ispuni pomoću hidrostatickog ležaja koji je prikazan na slici 2. U koničnom dopunskom ležaju (1) po obimu su postavljena 4 džepa (b). Napajanje džepova uljem odvija se pomoću spoljne cirkulacije. Pri obrtanju vratila, zahvaljujući trenju između vratila i kliznog ležaja (c), dolazi do delimičnog obrtanja tog kliznog ležaja, što se preko nosača (2) prenosi na kapacitativni davač za detekciju putanje pomeranja (d). Ovom pomeranju suprotstavlja se savitljiva šipka (3), koja je zahvaćena spolja u jednom žlebu između prstenova, i svojim elastičnim silama drži ovaj sistem u ravnoteži.

Međutim, u motorima ipak nekoliko ležajeva radi u graničnom režimu podma-

Sl. 2 – Hidrostaticki dvostruki ležaj za merenje momenta trenja:

1 – dopunski ležaj, 2 – nosač, 3 – savitljiva šipka, a – odstojni prsten, b – uljni džep, c – klizni ležaj, d – kapacitativni davač za detekciju putanje pomeranja

zivanja, i to bar u delu njihovog životnog veka. Zbog toga je potrebno znati koliko motor radi u ovom režimu i šta mogu da urade modifikatori trenja ili poboljšivači indeksa viskoziteta, pre donošenja ocene o daljoj neupotrebljivosti ležaja.

Klipno-cilindarski sklop dominira u gubicima usled trenja kod većine motora, što dokazuje i Furuhamain rad [1]. Trenje klipa i klipnog prstena veće je nego što klasična teorija može da predvidi a debljina uljnog filma je manja. To ukazuje na to da je potrebno mnogo intenzivnije izučavanje podmazivanja klipa i klipnog prstena.

Furuhamain metod obuhvata korišćenje pokretne cilindarske košuljice koju zadržavaju u mestu opterećeni piezoelektrični prstenovi koji mere vertikalne sile na cilindarskoj košuljici, što znači da se trenje klipa preuzima direktno (slika 3).

Radijalno slobodno kretanje pokretljive cilindarske košuljice u ovom slučaju omogućeno je pomoću dve uležišne specijalne metalne membrane u obliku prstena. Gornja membrana je fiksirana kao nepokretni ležaj cilindarske košuljice u vertikalnom pravcu, dok je donja membrana umetnuta kao podesivi ležaj sa mogućnošću uvijanja za 90° [3].

Sl. 3 – Merni cilindar i principijelna šema merne opreme

Zaptivanje prostora sagorevanja u ovom slučaju sprovedeno je po principu metoda gasnog balansa. Za merenje sile upotrebljavaju se dva kvarcna piezo-davača, postavljena na spojno telo ispod cilindarske košuljice, u vertikali iznad glavnih ležajeva kolenastog vratila. Kalibrisanje ovog mernog sistema je dinamičko, pomoću mehaničkog pulzatora, u opsegu broja obrtaja eksperimentalnog motora.

Furuhamain metod predstavlja elegantnu i informacionu tehniku, ali zahteva da cilindarska košuljica bude izolovana od glavnih udara u motoru, tako da je ovaj metod teže upotrebljiv za motore koji imaju blok cilindra iz jednog dela i ima tendenciju da se primenjuje uglavnom za klipove i cilindre koji imaju pravilan geometrijski oblik cilindra.

Naime, poznato je da distorzija cilindra postoji u određenom stepenu kod svih motora, ali uticaj ove distorzije na trenje i potrošnju goriva nije potpuno poznat. U tu svrhu rađena su ispitivanja koja su izvedena pomoću relativno jednostavnog sistema deformacije cilindra, koja zavisi od uvijenosti dizalica primenjenih za postizanje poznatih deformacija na cilindarskoj košuljici. U realnim slučajevima deformacija cilindra često je kombinacija smanjenja naprezanja posle izrade, montažnog naprezanja i termičkog opterećenja, tako da dobijanje realnijih rezultata zahteva radikalnu modifikaciju Furuhamainog metoda.

Veliki naponi učinjeni su za razvoj „direktnog“ metoda za merenje trenja klipne grupe (slika 4). Ovaj metod može da se koristi pod uslovima sagorevanja u motoru i pod velikim brojem obrtaja. U tom slučaju cilindarska glava je opremljena davačem pritiska u cilindru, klipnjača je opremljena davačem naprezanja

za merenje direktnih i smicajnih sila, pri čemu se signali prenose kroz žicu koju nosi njihajući mehanizam. Pritisak u kar-teru meri se pomoću davača pritiska od-

F_p - sila usled razlike pritiska duž klipa

F_{ip} - sila inercije vsled ubrzanja klipa

F_{ir} - sila inercije usled ubrzanja dela klipnjače iznad ravni merenja

F_w - normalna sila na klip

F_{ric} - sila trenja na klipu

F_s - sila u ravni merenja

F_d - sila duž klipnjače (normalna na ravan merenja)

F_l - sila od veze sa kolenastim vretalom

Sl. 4 – Sile koje deluju na klip

govarajućeg mernog područja. Senzori, koji su postavljeni uz klip, služe za detekciju SMT i UMT, a optički marker na kolenastom vratilu postavlja se radi dobijanja referentnog ugla kolenastog vratila. Svi signali slivaju se u akvizicijski sistem podataka velike brzine, a podaci se uzimaju u intervalima od 0,5 stepeni ugla kolenastog vratila. Sirovi podaci ulaze u računar koji je povezan u merni lanac zbog unakrsnog kalibrisanja i dovođenja na srednju vrednost radi poboljšanja tačnosti i smanjenja uticaja šumova.

Kod ovog metoda se pritisak gasova u cilindru koji deluju na klip meri direktno pomoću davača pritiska u cilindru, a sile na klipnjači pomoću davača deformacije na klipnjači (svode se sile na pravac ose cilindra). Inercijalne sile na klipu, osovini i odgovarajućem delu klipnjače određuju se računskim putem (i svode se na pravac ose cilindra). Razlika između sile gasova i ostalih sila duž ose cilindra je trenje klipa. Slika 4 pokazuje relevantne sile i njihove pravce. Uras i Patterson [1] koristili su ovaj metod na jednocilindričnom oto motoru i uspeali su da izdvoje promene režima podmazivanja u različitim taktovima i da detektuju razliku između trenja klipa bez sagorevanja i sa sagorevanjem. Slika 5 prikazuje rezultate merenja, dobijene pod uslovima sagorevanja. I ovde se može govoriti o tačnosti tehnike merenja, posebno pri velikim brzinama, kada inercione sile postaju dominantne. Ispitivanja amplituda sila bila su veoma komplikovana, tako da se nije u potpunosti moglo ući u trag mogućim izvorima greške.

Sl. 5 – Direktno merenje sile trenja klipne grupe

Mala je razlika između razložene sile na klipnjači i sile pritiska. To je zbog činjenice da je položaj maksimuma sile trenja 0,5% od položaja maksimuma sile pritiska, a da se rezultujuća sila dobija

kao razlika sile pritiska i sile na klipnjači. Postoji i jasna oblast greške davača, pogotovo u impulsnoj osetljivosti i linearnosti pri merenju pritiska u cilindru. Toplotni izlazni ekvivalent od samo 0,1 bar iz davača pritiska dovodi do srednje potencijalne greške od oko 10% u računanju trenja klipne grupe (srednjeg pritiska trenja). Sem greške davača potencijalni izvori netačnosti su i tehnike koje su korišćene u računanju inercijalnih sila i održavanje vremenske baze.

Ako se ovaj sistem koristi pod uslovima vučenja, i bez kompresije, dobijaju se izuzetno dobri rezultati, dajući podatke za dovoljno razlikovanje ciklusa radi omogućavanja detekcije režima podmazivanja, kao i za razlikovanje raznih vrsta ulja po karakteristikama trenja.

Ipak, preovladava mišljenje da ova eksperimentalna tehnika mora da se poboljša, kako bi na osnovu nje moglo da se razume trenje klipne grupe, što se zahteva pri izučavanju konstrukcije i materijala novog klipa i klipnih prstenova, i tačnom sagledavanju ulja u radu, koja modifikuju trenje u ovom veoma važnom delu trenja u motoru.

Originalan metod za određivanje ukupnih mehaničkih gubitaka E. Pasztora [4], sastoji se u tome da se motor pogoni spolja (slika 6), ali su pri tome sva stanja bliska onim u radnim režimima, tako da se eliminiše većina slabosti koje kod drugih metoda dovode do velikih grešaka.

U motoru (1) imitira se radni proces vrlo blizak realnom, tako što motor ima spoljni pogon (2). Usisavanje se vrši iz rezervoara (6), a izduvavanje u isti takav rezervoar (6), a oni su spojeni preko merne blende (7) radi održavanja stalne količine radnog fluida u procesu. Za održavanje željenog pritiska u instalaciji,

i za kompenzaciju gubitaka, koristi se mali klipni kompresor (10) i regulator (11). Produvanje kroz karter meri se gasnim satom (12), a sistemi za hlađenje (8) i podmazivanje (9) kontrolisano se drže na traženom termičkom stanju.

Sl. 6 – Šema merne instalacije za određivanje mehaničkih gubitaka po metodu E. Pasztora

Veza sa vrednostima gasnih sila u realnom radnom ciklusu motora uspostavlja se preko radnog pritiska u ovom procesu (p_d), koji predstavlja srednju vrednost u procesu kompresije i ekspanzije, što kod motora bez sagorevanja zavisi od stepena kompresije i početne vrednosti pritiska (p_0).

Željene vrednosti p_d mogu direktno da se zadaju. Pošto su gubici trenja funkcije jedino veličine p_d , a ne više od nepoznatog p_i , došlo se do načina za merenje otpora u motoru.

Ovim metodom mogu da se ispituju različiti uticaji na mehanički stepen korisnosti motora, kao što su:

- taktnost motora,
- odnos najvećeg i najmanjeg pritiska u radnom procesu,
- toplotno stanje motora,
- broj obrtaja motora, tj. srednja brzina klipa,

- snaga, zapremina i konstruktivna koncepcija motora,
- vrsta ulja i aditiva.

Predviđanja

U bliskoj budućnosti korišćenje metoda konačnih elemenata i graničnih metoda u predviđanju deformacija oblika delova motora moglo bi olakšati:

- bolju dijagnozu radi dobijanja niskofriktionog motora;
- konstrukciju bloka cilindra koji dozvoljava minimalnu deformaciju.

Izračunavanje gubitaka u ležajevima doprinosi uvođenju realne strukture oko ležaja u proračun, odnosno u model ležaja i podmazivanja, bez pojednostavljenja koja se danas koriste.

Karakteristike trenja mogu se na ovaj način izračunati pre nego što se motor konstruiše, tako da mogu da se definišu kompromisi koji su potrebni u konstruisanju cilindra (na primer, cilindri namenjeni za veoma visoke pritiske ili za veoma velike brojeve obrtaja).

Novi materijali, poput keramičkih, uvode se zbog njihovih triboloških karakteristika ili zbog prednosti u pogledu izolacije.

Proizvođaće se motori sa boljim stepenom iskorišćenja (što je delom dobijeno i smanjenjem trenja), sa dužim intervalima servisiranja i boljom celokupnom pouzdanošću (što je delom dobijeno i poboljšanjem uljnih formulacija).

Može se zaključiti, da se izučavanju trenja u motoru mora posvetiti mnogo veća pažnja kroz razvoj analize trenja i mernih tehnika, što povećava mogućnost ostvarenja niskofriktionih motora.

Zaključak

Može se očekivati da će uskoro biti doneti propisi o dozvoljenoj potrošnji goriva u svim zemljama sveta. Slično ekološkim normama, propisima će biti obuhvaćena potrošnja goriva novih vozila i vozila tokom duže eksploatacije, što zahteva preispitivanje dosadašnjih metoda optimizacije motora.

Značajni dobici u stepenu korisnosti mogu se postići smanjenjem mehaničkih gubitaka u motorima, što je posebno važno za motore putničkih vozila.

Poboljšanja u trenju motora uglavnom ne moraju da prave kompromise u odnosu na radne cikluse u motoru.

Danas su znatno upotrebljiviji analitički i eksperimentalni alati za postizanje znatnijih smanjenja trenja.

Literatura:

- [1] Monaghan M.L.: Engine friction – a change in emphasis, The Institution of Mechanical Engineering, BP Tribology Lecture, 1987., pp 14.
- [2] Thiele E.: Ermittlung der reibungsverluste in verbrennungsmotoren, MTZ 43 (6/1982), st. 253–258.
- [3] Halsband M.: Messung und optimierung der reibungsverluste der kolbengruppe – teil I, MTZ 55 (11/1994), st. 664–671.
- [4] Pasztor E.: Hungarian experience with lubricants and additives, Simpozijum „Nauka i motorna vozila“, Beograd, 1995.