

Popović S., Knežević D., Petrović S.

ANALIZA UTICAJA PRINCIPA MERENJA PROTOKA GASA I KALIBRACIJE NA TAČNOST ODREĐIVANJA STEPENA RAZBLAŽENJA I EKVIVALENTNOG PROTOKA IZDUVNOG GASA KOD MIKRO -TUNELA

Mašinski fakultet u Beogradu

REZIME: U radu je prikazan računski postupak za procenu greške pri merenju i izračunavanju veličina značajnih za određivanje emisije čestica dizel motora primenom gravimetrijske metode i mikro tunela za razblaženje delimičnog protoka izduvnog gasa. Analiziran je uticaj greške merenja masenog protoka usisnog vazduha primenom laminarnog protokomera i uticaj tačnosti određivanja protoka vazduha za razblaženje i ukupnog protoka razblaženog uzorka primenom masenih termalnih protokomera. Analiziran je i uticaj broja uzastopnih merenja relevantnih veličina tokom jednog mernog stupnja na tačnost određivanja masenog stepena razblaženja uzorka i ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa. Primenom diferencijalne kalibracije instrumenata za merenje protoka, greška određivanja srednjeg masenog stepena razblaženja svodi se u granice od 0.2 ± 0.8 %, dok se greška ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa, kreće u dozvoljenim granicama od 1.1 ± 1.9 %.

KLJUČNE REČI: dizel motor, emisija čestica, mikro-tunel, greška merenja, kalibracija

ABSTRACT: A numeric procedure for estimation of the accuracy of diesel engine particulate emission measurement has been presented in this paper. The analysis has been provided for mass dilution ratio and equivalent exhaust mass flow regarding the particulate emission measurement based on gravimetric principle with the Partial-Flow Dilution. The influence of the intake air mass flow measurement error, given for the laminar flow meter, has been analysed as well as that of the measurement of the air dilution and total diluted gas sample mass flows provided by means of thermal mass flow meters. The influence of the number of samples has been analysed regarding the accuracy of cumulative mass flows within the single stage. The thermal mass flow meters differential calibration procedure has been analysed, and increased accuracy of mass dilution ratio (0.2 ± 0.8 %) and that of equivalent exhaust mass flow (1.1 ± 1.9 %) has been reported.

KEY WORDS: diesel engine, particulate emission, micro-tunel, accuracy, calibration

1. UVOD

Određivanje emisije čestica dizel motora predstavlja složenu proceduru koja objedinjuje merenje i izračunavanje veličina različitog karaktera, pa prema tome podrazumeva i korišćenje različitih instrumenata za njihovo određivanje. Ispunjavanje zahteva Pravilnika R.49.02 u pogledu dozvoljenih odstupanja pri merenju pojedinih veličina, ne garantuje i zadovoljenje uslova maksimalne dozvoljene greške koja se čini pri određivanju onih veličina, koje se javljaju u obliku jednostavnih ili složenih funkcija više merenih veličina. Konačna vrednost odstupanja zavisice, ne samo od deklarisanе tačnosti i izvršenog procesa kalibracije pojedinačnih instrumenata, već i od načina numeričkog određivanja pojedinih veličina, kao i od oblika matematičke funkcije kojom su one izražene.

Za veličinu u , koja je kao funkcija više pojedinačnih merenih veličina definisana na sledeći način:

$$u = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

maksimalna vrednost apsolutne greške prestavljaće zbir modula proizvoda parcijalnih izvoda funkcije u i maksimalnih

apsolutnih grešaka svake od pojedinačnih veličina x_i . Verovatnoća da greška složene veličine dostigne maksimalnu vrednost je mala, i sa porastom broja veličina koje figurišu u funkciji ta verovatnoća opada. Eliminacijom znaka apsolutne greške svake od merenih veličina dolazi se do izraza za najverovatniju grešku:

$$(\Delta u)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2 \quad (2)$$

Do konačnog izraza za relativnu grešku može se doći na osnovu poznavanja konkretne funkcije kojom je definisana tražena veličina u , i razvijanjem pojedinih članova, ukoliko i oni predstavljaju funkcije više merenih veličina.

2. ANALIZA PROBLEMA

U slučaju primene mikro tunela za razblaženje uzorka izduvnog gasa sa regulacijom stepena razblaženja uzorka na osnovu izmerenih protoka razblaženog uzorka i protoka vazduha za razblaženje, merenje protoka gasa je od fundamentalnog značaja. Pod ovim se podrazumeva merenje sledećih veličina:

- a) maseni protok izduvnog gasa G_{EXH} - meri se u cilju određivanja ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} za koji se izračunava emisija čestica;
- b) maseni protok vazduha za razblaženje uzorka izduvnog gasa G_{DIL} i maseni protok ukupnog protoka razblaženog izduvnog gasa G_{TOT} - mere se u cilju određivanja masenog protoka uzorka izduvnog gasa i stepena njegovog razblaženja DR_{MASS} .

Ekvivalentni maseni protok izduvnog gasa je prema ECE R.49 definisan na sledeći način:

$$G_{EDF} = G_{EXH} \cdot DR_{MASS,m} \quad (3)$$

Odnos masenih protoka goriva G_{FUEL} i vazduha G_{AIR} kreće se u rasponu od oko 0.0125 ± 0.050 , pa se u slučaju indirektnog određivanja masenog protoka izduvnog gasa G_{EXH} , uticaj relativne greške merenja G_{FUEL} sa značajnom dozom sigurnosti može zanemariti. Relativna greška merenja G_{EDF} može se prema /1/ proceniti primenom sledećeg izraza:

$$\delta_{G_{EDF}} = \pm \sqrt{\delta_{G_{AIR}}^2 + \delta_{DR_{MASS,m}}^2} \quad (4)$$

Za slučaj primene laminarnog protokomera (Laminar Flow Meter - LFM) i očitavanja vrednosti preko akvizicionog sistema, izraz za zapreminski protok usisnog vazduha, mora biti modifikovan /1/, s obzirom da se merenja pada pritiska obavljaju u diskretnim vremenskim intervalima čija dužina varira u određenim granicama. Izraz za zapreminski protok usisnog vazduha definisan je na sledeći način:

$$V_{LFM} = \frac{1}{t_n - t_0} \cdot \sum_{i=1}^n C_{LFM} \cdot C_v(T) \cdot \Delta p_{LFM} \cdot \Delta t_i \quad (5)$$

Δt_i - vreme koje protekne između dva uzastopna uzorkovanja signala sa diferencijalnog davača pritiska;

t_0, t_n - respektivno, početni i krajnji trenutak vremenskog intervala na kome se određuje protok gasa.

Radi pojednostavljenja, pretpostavlja se da se faktor korekcije viskoznosti gasa $C_v(T)$ za izmerenu temperaturu na izlazu iz LFM ne menja značajno (temperatura je najčešće bliska standardnoj 20°C , za koju ovaj koeficijent uzima diskretnu vrednost 1.0) i da se njegov uticaj na konačnu grešku može zanemariti. Merenje ukupnog intervala vremena i intervala između dva uzastopna vremena, u slučaju primene akvizicionog sistema, odvija se nezavisno, u okviru različitih modula, pa će i pri traženju odgovarajućih parcijalnih izvoda, ove dve veličine biti tretirane na isti način.

Uz pretpostavku da je svako pojedinačno merenje zapreminskog protoka nezavisno od prethodnog, raspodela greške merenja u smislu znaka jednako verovatna, svako merenje izvršeno sa maksimalnim odstupanjem, i da su vrednosti izmerene elementarne zapremine međusobno približno jednake i iznose V (slučaj stacionarnog protoka), uvođenjem odgovarajuće aproksimacije prema /1/, dobija se izraz za relativnu grešku ukupne zapremine usisnog vazduha:

$$\delta_{V_{LFM}}^2 = \delta_{V_{LFM,j}}^2 \cdot \frac{n \cdot V^2}{n^2 \cdot V^2} = \frac{\delta_{V_{LFM,j}}^2}{n} \quad (6)$$

gde je n broj uzoraka. Nakon uvođenja članova koji se odnose na greške merenja gustine gasa (pritisk i temperatura) i intervala vremena τ , dobija se izraz za relativnu grešku masenog protoka usisnog vazduha:

$$\delta_{G_{AIR}} = \pm \sqrt{\delta_{\Delta\tau}^2 + \frac{\delta_{\Delta p_{LFM,j}}^2 + \delta_{\Delta t_i}^2 + \delta_{C_{LFM}}^2}{n} + \delta_p^2 + \delta_T^2} \quad (7)$$

Maseni stepen razblaženja, za pojedinačno merenje odgovarajućih protoka razblaženog uzorka i vazduha za razblaženje definisan je prema /2/ sledećim izrazom:

$$DR_{MASS,j} = \frac{G_{TOT,j}}{G_{TOT,j} - G_{DIL,j}} \quad (8)$$

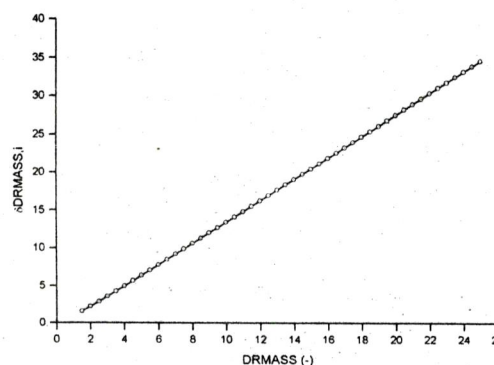
Uz pretpostavku da je protok razblaženog izduvnog gasa G_{TOT} konstantan (CVS princip), $\delta_{DR_{MASS}}$ će se menjati sa promenom protoka vazduha za razblaženje G_{DIL} i njegove relativne greške. Relativna greška pojedinačnog merenja G_{DIL} definisana je preko vrednosti deklarisanе relativne greške instrumenta δ_{MFM} , (MFM- Mass Flow Meter) sledećim izrazom /1/:

$$\delta_{G_{DIL,j}} = \delta_{MFM} \cdot \frac{DR_{MASS,j}}{DR_{MASS,j} - 1} \quad (9)$$

Može se zaključiti da će greška merenja monotono opadati sa povećanjem stepena razblaženja, i da će za vrednosti $DR_{MASS} > 10$ težiti deklarisanj vrednosti greške instrumenta δ_{MFM} ($\pm 1\%$).

Ako se oba masena protoka gasa G_{TOT} i G_{DIL} mere istom vrstom uređaja (maseni termalni protokomer), istog opsega i iste deklarisanе tačnosti δ_{MFM} , izraz za $\delta_{DR_{MASS,j}}$ dobija prema /1/ sledeći oblik:

$$\delta_{DR_{MASS,j}} = \pm \delta_{MFM} \cdot \sqrt{(DR_{MASS,j} - 1)^2 + DR_{MASS,j}^2} \quad (10)$$



Sl. 1 Dijagram relativne greške masenog stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja

U slučaju velikih stepena razblaženja, kada se vrednosti izmerenih protoka razblaženog izduvnog gasa i vazduha za razblaženje približavaju, greška stepena razblaženja monotono raste. Ova zavisnost prikazana je na Sl. 1, na kojoj se vidi da se relativna greška stepena razblaženja može kretati u granicama

od 2 do čak 36%, što je neprihvatljivo sa stanovišta apsolutne tačnosti, ali i sa aspekta ponovljivosti merenja.

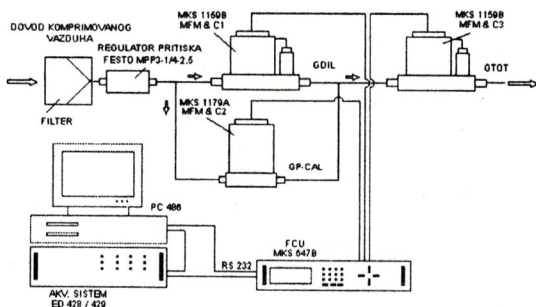
Srednja vrednosti stepena razblaženja $DR_{MASS,m}$ je prema analogiji sa postupkom za određivanje greške masenog protoka (7), definisana na sledeći način:

$$\delta_{DR_{MASS,m}} = \pm \sqrt{\delta_{\Delta\tau}^2 + \frac{\delta_{DR_{MASS,j}}^2 + \delta_{\Delta_i}^2}{n}} \quad (11)$$

Izraz za izračunavanje najverovatnije greške ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} nakon zamene izraza (7) i (11) dobija sledeći oblik:

$$\delta_{G_{EDF}}^2 = \left[\delta_{\Delta\tau}^2 + \frac{\delta_{\Delta p_{LEM,j}}^2 + \delta_{\Delta_i}^2 + \delta_{C_{LEM}}^2}{n} \right]_{LEM} + \left[\delta_p^2 + \delta_{\tau}^2 \right]_p + \left[\delta_{\Delta\tau}^2 + \frac{\delta_{DR_{MASS,j}}^2 + \delta_{\Delta_i}^2}{n} \right]_{DR_{MASS,m}} \quad (12)$$

Oba masena termalna protokomera kojima se mere protoci razblaženog izduvnog gasa G_{TOT} i vazduha za razblaženje G_{DIL} , istih su tehničkih karakteristika, a protoci uzorka izduvnog gasa G_p predstavljaju 2÷10% njihovog punog opsega. Za deklarisanu relativnu grešku od ±1% i opseg od 100 l/min, apsolutna greška iznosi ±1 l/min. U slučaju razlike bliskih vrednosti protoka, odstupanje od samo ±1 l/min dovodi do pojave izuzetno velike relativne greške koja se u najgorem slučaju (odstupanja oba protokomera su maksimalna i suprotnog znaka) kreće u rasponu od 20% za protok uzorka od 10 l/min do 100% za protok od 2 l/min.



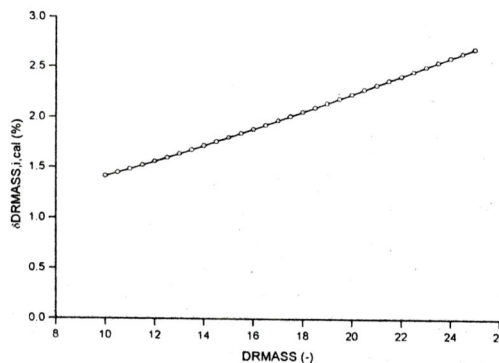
Sl. 2 Shematski prikaz sistema za diferencijalnu kalibraciju uređaja za merenje protoka G_{DIL} i G_{TOT}

Ovaj problem se može rešiti prethodnom kalibracijom razlike dva protoka. Instalacija za kalibraciju razlike masenih protoka prikazana je na Sl. 2. Postupak predstavlja simulaciju procesa mešanja uzorka izduvnog gasa sa odgovarajućom masom vazduha za razblaženje. Kao kalibracioni gas koristi se čist vazduh (iz praktičnih razloga je izabran vazduh, ali se za ovaj postupak može koristiti i azot), što omogućava da se protok uzorka izduvnog gasa simulira odgovarajućim protokom čistog vazduha. Ovaj protok se direktno meri masenim protokomerom MFC2, čiji opseg odgovara maksimalnom protoku uzorka izduvnog gasa G_p , a deklarisanu relativna greška merenja

takođe, iznosi ±1%. Tada se, umesto razlike $G_{TOT} - G_{DIL}$, koja figuriše u izrazu (8) za određivanje masenog stepena razblaženja DR_{MASS} , može uvesti kalibrisana veličina G_p . Izraz za grešku tako definisane veličine izgleda ovako:

$$\delta_{DR_{MASS,j}} = \pm \delta_{MFM} \sqrt{1 + \left(DR_{MASS,j} \cdot \frac{G_{p,FSR}}{G_{TOT,j}} \right)^2} \quad (13)$$

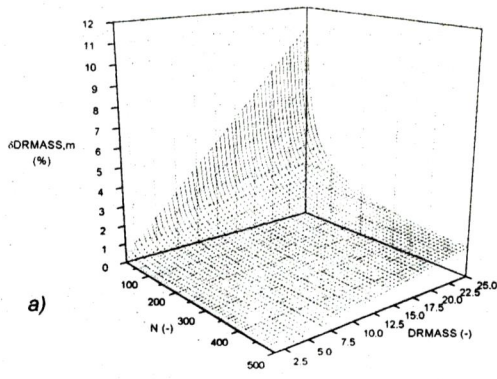
S obzirom da je odnos protoka $G_{p,FSR}$ i $G_{TOT,j}$ približno 0.1, uticaj stepena razblaženja je oko 10 puta manji, nego u slučaju izraza (10). Zavisnost relativne greške stepena razblaženja od stepena razblaženja prikazana je na Sl. 3.



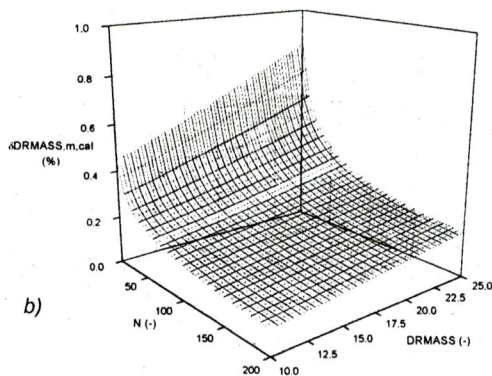
Sl. 3 Dijagram relativne greške srednjeg stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja (sa dif. kalibracijom)

Na Sl. 4 prikazani su dijagrami relativne greške srednje vrednosti stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja i broja uzoraka tokom jednog stupnja za slučajeve bez primene kalibracije razlike protoka (a) i sa primenom ovog postupka (b). Slučaj primene kalibracije razlike protoka odnosi se na rad sistema za razblaženje uzorka izduvnog gasa sa deklarisanim maksimalnim protokom. Analizom je obuhvaćeno područje vrednosti stepena razblaženja između 10 i 25. Primenom postupka kalibracije razlike protoka greška se smanjuje oko 11 puta, i ne prelazi 1%, čak ni za najmanji broj uzoraka 10, koji je u oba dijagrama uzet kao početna vrednost. Takođe se uočava da se greška sa povećanjem broja merenja asimptotski približava vrednosti od oko 0.2%.

Na osnovu ovakvih podataka, a prema izrazu (12), moguće je izvršiti analizu relativne greške ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} , u odnosu na koji se određuje emisija čestica. Na Sl. 5 prikazani su rezultati procene vrednosti relativne greške ekvivalentnog protoka izduvnog gasa za slučajeve bez (a) i sa primenom postupka kalibracije razlike protoka za vrednost protoka izduvnog gasa (b), koja odgovara režimu maksimalnog obrtnog momenta motora IMR DM34. U slučaju bez kalibracije razlike protoka, vrednosti $\delta_{G_{EDF}}$ neznatno se menjaju sa promenom G_{EXH} , što se i moglo očekivati ako se u obzir uzme da $\delta_{DR_{MASS}}$ ima značajno veće vrednosti u odnosu na ostale članove koji figurišu u izrazu (12). Takođe se uočava da relativna greška opada naglo sa porastom



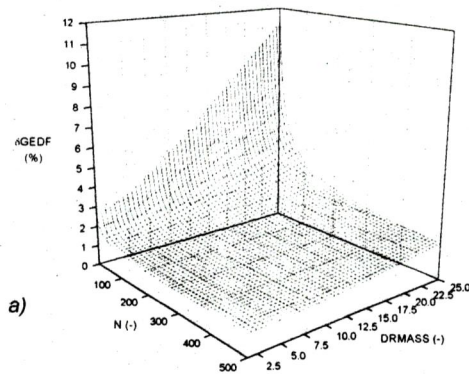
a)



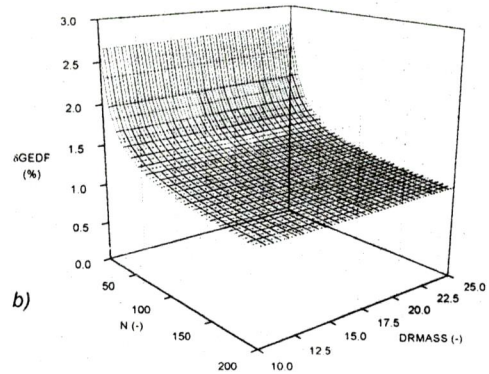
b)

Sl. 4 Dijagram relativne greške srednje vrednosti stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja i broja uzoraka: a) bez kalibracije razlike protoka; b) sa kalibracijom razlike protoka

broja merenja relevantnih veličina n , i da se granica od $\pm 4\%$, definisana Pravilnikom R.49, dostiže sa oko 150 uzoraka. U slučaju primene kalibracije razlike protoka, G_{EDF} je invarijantan u odnosu na DR_{MASS} , i opada sa porastom broja uzorkovanja tokom jednog stupnja. Vrednosti relativne greške će biti najveće za slučaj režima praznog hoda, kada relativna greška merenja protoka izduvnog gasa (odnosno usisnog vazduha) dominira u odnosu na ostale članove izraza (12). Sa povećanjem protoka usisnog vazduha situacija je povoljnija, i čak i za najmanji broj merenja za koji je analiza sprovedena,



a)



b)

Sl. 5 Dijagram relativne greške ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa u funkciji stepena razblaženja i broja merenja za režimu maks. obrtnog momenta ($G_{EXH}=160.0$ kg/h): a) bez kalibracije razlike protoka; b) sa kalibracijom razlike protoka

greška je manja od granične vrednosti. U slučaju režima maksimalnog obrtnog momenta iznosi približno 2.7%. Sa povećanjem broja merenja greška se dalje smanjuje i asimptotski se približava vrednosti od oko 1.2%.

3. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Direktna primena postupka određivanja protoka uzorka izduvnog gasa prema R.49.02 utiče na porast greške određivanja srednjeg masenog stepena razblaženja (do 12%), a rel. greška određivanja ekv. masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} zavisno od DR_{MASS} i G_{EXH} kreće se u rasponu od 2 do 13%.
- Primenom diferencijalne kalibracije masenih protokomera, rel. greške pojedinačne i srednje vrednosti DR_{MASS} smanjuju se na 1.5 do 2.7% i 0.45 do 0.8% respektivno, a rel. greške ekv. protoka izduvnog gasa za 150 uzoraka svode se na 1.1 do 1.9%, zavisno od G_{EXH} .

LITERATURA

- /1/ Popović, S. J.: "Istraživanje eksperimentalnih metoda određivanja emisije čestica dizel motora", Magistarski rad, Mašinski fakultet Beograd, 1999
- /2/ Engeljehring, K.: "Smart Sampler PC SPC 472 - Diesel Particulate Dilution and Sampling Equipment", AVL List GmbH, 1993
- /3/ Henning, H. J.: "Die Messung kleiner Durchflussmengen"
- /4/ Olin, J. G.: "An Engineering Tutorial: Thermal Mass Flowmeters", INTECH Enginner's Notebook (8), 1993
- /5/ Stone, Richard: "Introduction to Internal Combustion Engines", 2nd Edition, SAE Inc., Warrendale, USA 1993.
- /6/ Stone, C. R.: "Air Flow Measurement in Internal Combustion Engines", SAE Paper 890242
- /7/ Slivka, J., Terzić, M.: "Obrada rezultata fizičkih kspervenata", Univerzitet u Novom Sadu, 1995
- /8/ SAE Handbook, SAE Warrendale, USA 1982