

ANALIZA UTICAJA KALIBRACIJE PROTOKOMERA ZA GAS NA TAČNOST ODREĐIVANJA EMISIJE ČESTICA DIZEL MOTORA

THE INFLUENCE OF THE GAS FLOWMETER CALIBRATION PRINCIPLE ON DIESEL ENGINE PARTICULATE EMISSION MEASUREMENT ACCURACY

Popović, S., Knežević, D., Petrović, S.*

REZIME

U radu je prikazan računski postupak za procenu greške određivanja masenog stepena razblaženja uzorka izduvnog gasa i njegovog uticaja na tačnost određivanja ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa. Na osnovu toga analizirane su tri metode pojedinačne kalibracije masenih termalnih protokomera za gas. Analiza pokazuje da bez obzira na primenjeni princip kalibracije, direktna primena preporuka Pravilnika ECE R49 u domenu određivanja srednjeg masenog stepena razblaženja dovodi do greške u rasponu od $\pm 0.5 \div 1.0$ %, što metodu čini neprihvatljivom. Daljom analizom je obuhvaćena posebna tehnika diferencijalne kalibracije instrumenata za merenje ukupnog protoka razblaženog uzorka gasa i protoka vazduha za razblaženje, čijom se primenom, prema dobijenim rezultatima, greška određivanja srednjeg masenog stepena razblaženja može svesti u granice od $0.2 \div 0.8$ %, dok se greška ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa, zavisno od protoka, kreće u dozvoljenim granicama od $1.1 \div 1.9$ %.

Ključne reči: dizel motor, emisija čestica, mikro-tunel, greška merenja, kalibracija

SUMMARY

A numeric procedure for the 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 (DR_{MASS}) and equivalent exhaust mass flow (G_{EDF}) regarding the particulate emission measurement based on gravimetric principle with the Partial-Flow Dilution System with heated micro-tunnel and particulate Total Sampling (PFDS-TS Type, accord. to ECE R.49 and ISO 8178). The analysis has been applied to the measurement of the air dilution (G_{DIL}) and total diluted gas sample (G_{TOT}) mass flows provided by means of thermal mass flow meters.

* Mr Slobodan Popović, dipl. ing., Mr Dragan Knežević, dipl. ing., Dr Stojan Petrović, dipl. ing.,
Mašinski fakultet u Beogradu, 27. marta 80, 11000 Beograd

Three basic flowmeters calibration principles have been analysed too. According to the results, the recommendations from ECE R49, if strictly applied, lead to the mass dilution ratio error of $\pm 0.5 \div 11.0$ %, which is much beyond proposed limits, making this method unacceptable. The thermal mass flow meters differential calibration procedure has been analysed, and as a result, increased accuracy of mass dilution ratio ($0.2 \div 0.8$ %) and that of equivalent exhaust mass flow ($1.1 \div 1.9$ %) has been reported.

Key words: diesel engine, particulate emission, micro-tunnel, accuracy, calibration

UVOD

Određivanje koncentracije toksičnih komponenata u izduvnom gasu dizel motora, u opštem slučaju, predstavlja niz strogo definisanih procedura. Preventivno održavanje i redovna kalibracija pojedinačnih instrumenata predstavlja osnovni preduslov za kvalitetan eksperiment. Tačnost i ponovljivost rezultata, ipak, time nisu garantovani, i u većoj ili manjoj meri zavisice od spoljnih uticaja tokom samog eksperimenta, kao što su pojačana zaprljanost pojedinih delova sistema za uzorkovanje i merenje ili održavanje njihovog stabilnog termičkog nivoa. Određivanje emisije čvrstih čestica (partikulata) predstavlja u tom smislu, još složeniju proceduru, koja objedinjuje merenje i izračunavanje veličina različitog karaktera, pa prema tome podrazumeva i korišćenje različitih mernih i regulacionih instrumenata. 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, oblika matematičke funkcije kojom su one izražene i mogućnosti eliminacije nekih sistematskih grešaka. Ovakva odstupanja se ne odražavaju na veličinu rasipanja rezultata merenja, i njihovo postojanje se ne može odrediti primenom standardnih statističkih metoda obrade rezultata merenja. Detaljna analiza sistematskih grešaka merenja može se naći u literaturi /6/, a u ovom radu biće više pažnje posvećeno sistematskim odstupanjima mernih instrumenata za merenje protoka i uticaju kalibracije na tačnost određivanja ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} .

TEORIJSKA ANALIZA

Za veličinu u , definisanu kao funkcija više pojedinačnih merenih veličina, maksimalna vrednost apsolutne greške predstavlja 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:

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

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.

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:

- ◆ maseni protok izduvnog gasa G_{EXH} - meri se u cilju određivanja ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} za koji se izračunava emisija čestica;
- ◆ 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 G_P i stepena njegovog razblaženja DR_{MASS} .

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

$$G_{EDF} = G_{EXH} \cdot DR_{MASS,m} \quad (2)$$

Odnos masenih protoka goriva G_{FUEL} i vazduha G_{AIR} kreće se u rasponu od oko $0.0125 \div 0.050$, 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 određivanja masenog protoka usisnog vazduha $\delta_{G_{AIR}}$ može se proceniti primenom odgovarajućeg izraza razvijenog prema primenjenoj metodi (standardno prigušno sredstvo, viskozni protokomer, mehanički protokomer ili anemometar sa usijanom vlaknom) u kome će figurisati relevantne veličine za tu metodu. Uz pretpostavku da je protok razblaženog izduvnog gasa G_{TOT} konstantan (CVS princip), $\delta_{DR_{MASS,i}}$ će se menjati sa promenom protoka vazduha za razblaženje G_{DIL} i njegove relativne greške. Ako se oba masena protoka gasa G_{TOT} i G_{DIL} mere istom vrstom uređaja, istog opsega i iste deklarisanе tačnosti $\delta_{MFM} (\pm 1\%)$, izraz za $\delta_{DR_{MASS,i}}$ dobija prema /1/ sledeći oblik:

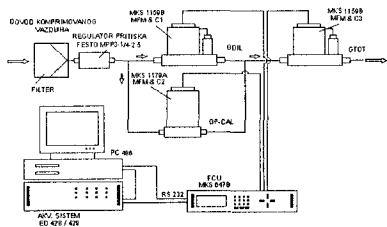
$$\delta_{DR_{MASS,i}} = \pm \delta_{MFM} \cdot \sqrt{(DR_{MASS,i} - 1)^2 + DR_{MASS,i}^2} \quad (3)$$

U slučaju velikih stepena razblaženja, kada se vrednosti izmerenih protoka G_{TOT} i G_{DIL} približavaju, greška stepena razblaženja pojedinačnog merenja monotono raste i kreće se u rasponu od 2 do čak 36% /1/, što je neprihvatljivo sa stanovišta apsolutne tačnosti, ali i sa aspekta ponovljivosti merenja. Relativna greška srednje vrednosti stepena razblaženja $DR_{MASS,m}$ može se dobiti razvojem izraza (3), pod pretpostavkom da je svako pojedinačno merenje nezavisno od prethodnog, raspodela greške merenja u smislu znaka jednako verovatna, svako merenje izvršeno sa maksimalnim odstupanjem, i da su vrednosti izmerenog masenog protoka međusobno približno jednake (slučaj stacionarnog protoka). Uvođenjem odgovarajuće aproksimacije prema /1/, a za slučaj merenja zapreminskog protoka usisnog vazduha laminarnim protokomerom sa korekcijom gustine, dobija se izraz za relativnu grešku ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa δ_{GEDF} :

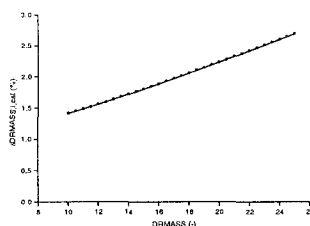
$$\delta_{GEDF} = \sqrt{\left[\delta_{\Delta t}^2 + \frac{\delta_{\Delta P_{LFM,i}}^2 + \delta_{\Delta t_i}^2 + \delta_{C_{LFM}}^2}{n} \right]_{LFM} + \left[\delta_p^2 + \delta_T^2 \right]_p + \left[\delta_{\Delta t}^2 + \frac{\delta_{DR_{MASS,i}}^2 + \delta_{\Delta t_i}^2}{n} \right]_{DR_{MASS,m}}} \quad (4)$$

Oba masena termalna protokomera kojima se mere protoci G_{TOT} i G_{DIL} istih su tehničkih karakteristika, a protoci uzorka izduvnog gasa G_P predstavljaju $2 \div 10\%$ njihovog punog opsega. Za deklarisanu relativnu grešku od 1% i opseg od 100 sl/min, u slučaju razlike bliskih vrednosti protoka, odstupanje od samo 1 sl/min dovodi do pojave izuzetno velike relativne

greške, koja se u najgorem može kretati u rasponu od 20% za protok uzorka od 10 sl/min do 100% za protok od 2 sl/min. Primenom metode kloniranja (transfer standard ili redna kalibracija /1/) tačnost pojedinačnih instrumenata ne može se značajno povećati i tačnost kalibrisanog instrumenta ograničena je dvostrukom vrednošću deklarisanane tačnosti korišćenog etalona. Metoda primarne kalibracije, međutim, može dati izvesno poboljšanje tačnosti pojedinačnih instrumenata, ali prema istraživanjima /1, 2/ u konkretnom slučaju, bitno poboljšanje se ne može postići.



Sl. 1 Shematski prikaz sistema za diferencijalnu kalibraciju uređaja za merenje protoka G_{DIL} i G_{TOT}
Fig. 1 Flow bench for differential calibration of G_{DIL} i G_{TOT} mass flow devices



Sl. 2 Dijagram relativne greške srednjeg stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja (sa dif. kalibracijom)
Fig. 2 Average mass dilution ratio relative accuracy vs. mass dilution ratio current value (with differential calibration)

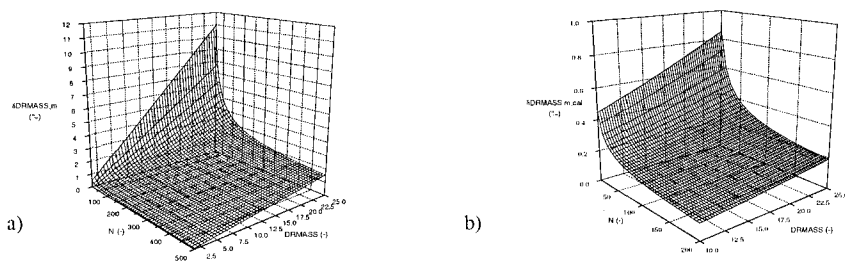
Ovaj problem se može rešiti prethodnom kalibracijom razlike dva protoka. Instalacija za kalibraciju razlike masenih protoka prikazana je na Sl. 1. Postupak predstavlja simulaciju procesa mešanja uzorka izduvnog gasa sa odgovarajućom masom vazduha za razblaženje. Protok uzorka izduvnog gasa se direktno meri masenim protokomerom MFC2, čiji opseg odgovara maksimalnom protoku uzorka izduvnog gasa G_p , a deklarisanana relativna greška merenja takođe, iznosi 1%. Tada se, umesto razlike $G_{TOT} - G_{DIL}$ koja figuriše u izrazu (4), uvodi kalibrisana veličina G_p . Zavisnost relativne greške stepena razblaženja od stepena razblaženja definisana je izrazom (7), i prikazana na Sl. 2.

$$\delta_{DR_{MASS,i}} = \pm \delta_{MFM} \sqrt{1 + \left(DR_{MASS,i} \cdot \frac{G_{p,FSR}}{G_{TOT,i}} \right)^2} \quad (5)$$

Na Sl. 3 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 (4), moguće je izvršiti analizu relativne greške ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa G_{EDF} , u odnosu na koji se određuje emisija

čestica. Na Sl. 4 prikazani su rezultati procene vrednosti δ_{GEDF} za slučajeve bez (a) i sa primenom postupka kalibracije razlike protoka za vrednost protoka izduvnog gasa, koja odgovara režimu maksimalnog obrtnog momenta traktorskog dizel motora IMR DM34/T. U slučaju bez kalibracije razlike protoka, vrednosti δ_{GEDF} 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



Sl. 3 Dijagram relativne greške srednje vrednosti stepena razblaženja u funkciji stepena razblaženja i broja uzoraka: a) bez kalibracije razlike protoka; b) sa kalibracijom razlike protoka

Fig. 3 Average mass dilution ratio relative accuracy vs. mass dilution ratio and number of samples: a) without tflow difference calibration; b) with flow difference calibration

članove koji figurišu u izrazu (4). Takođe se uočava da relativna greška opada naglo sa porastom broja merenja relevantnih veličina n , i da se granica od 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 njegova greška 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 (4). Sa povećanjem protoka usisnog vazduha situacija je povoljnija, i čak i za najmanji broj merenja za koji je analiza sprovedena, 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%.

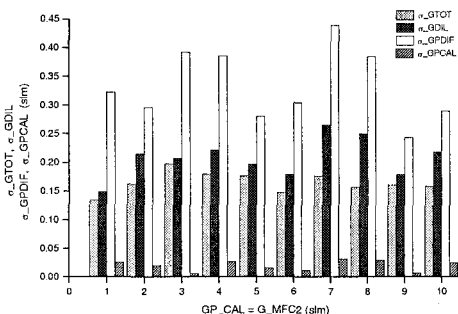


Sl. 4 Dijagram relativne greške ekvivalentnog masenog protoka izduvnog gasa u funkciji stepena razblaženja i broja merenja za režim maks. obrtnog momenta ($G_{EXH}=160.0$ kg/h): a) bez kalibracije razlike protoka; b) sa kalibracijom razlike protoka

Fig. 4 Equivalent exhaust mass flow relative accuracy vs. mass dilution ratio and number of samples at the max. torque flow rate ($G_{EXH}=160.0$ kg/h): a) without tflow difference calibration; b) with flow difference calibration

REZULTATI PRIMENE DIFERENCIJALNE KALIBRACIJE PROTOKOMERA

Da bi se utvrdila odstupanja protoka pogodnije je meriti odstupanja izvornog naponskog signala, tim pre što je rezolucija pokazivanja protoka koje daje upravljačka jedinica MKS 647B suviše mala (0.1% pune skale). Izlazni signal sa protokomera je u opsegu od 0.5 do 5.5 V, a da bi se izmerile fluktuacije u okviru 1% pune skale, neophodno je obezbediti instrument čija je apsolutna greška najmanje 2 puta manja od očekivanog odstupanja signala. Merenje naponskog signala obavlja se pomoću akvizicionog sistema ED 20428. S obzirom da se koristi 12-bitni A/D pretvarač, najmanja vrednost napona koja se može izmeriti za slučaj mernog opsega od 0-10 V iznosi $10 \sqrt{12}^2$, tj. 0.00244 V, što je oko 10 puta manje od očekivanih odstupanja signala sa protokomera.



Sl 5 Dijagram sr. kv. odstupanja za izmerene vrednosti protoka G_{TOT} , G_{DIL} , $G_{P,dif}$ i $G_{P,cal}$

Fig. 6 G_{TOT} , G_{DIL} , $G_{P,dif}$ i $G_{P,cal}$ standard deviation

izvršeno za 10 vrednosti protoka uzorka G_p , sa po 100 uzorkovanja naponskih signala sa sva tri protokomera. Na Sl. 5 prikazan je dijagram srednjeg kvadratnog odstupanja za svaki od merenih protoka kao i za razliku protoka G_{TOT} i G_{DIL} . Srednja kvadratna odstupanja protoka G_{TOT} i G_{DIL} kreću se u granicama od 0.13 do 0.19, odnosno 0.15 do 0.26 sl/min, ali je srednje kvadratno odstupanje njihove razlike dosta visoko i kreće se u granicama od 0.24 do 0.43 sl/min. Relativna greška se kreće u rasponu od oko 32% na najnižoj vrednosti protoka G_p , do oko 2.8% na najvišim vrednostima. Sa druge strane, srednje kvadratno odstupanje vrednosti protoka izmerenih protokomerom MFC2 kreću se u granicama od 0.01 do 0.035 l/min, a relativna greška od 2% na najnižem, do oko 0.2% na nominalnom protoku. Ove vrednosti su manje od onih proračunskih, što je i logično, ako se u obzir uzme činjenica da je proračun sproveden pod pretpostavkom da se tokom merenja javljaju maksimalne vrednosti odstupanja. Na osnovu ovih rezultata moguće je izračunati vrednosti kalibracionih konstanti za razliku protoka G_{TOT} i G_{DIL} . Pretpostavlja se linearna zavisnost između svake dve uzastopne kalibracione tačke, i za kalibracione konstante se mogu uspostaviti sledeći izrazi:

$$k_{GP,cal,i} = \frac{G_{P,cal,i} - G_{P,cal,i-1}}{G_{P,dif,i} - G_{P,dif,i-1}} \quad (6)$$

$$t_{GP,cal,i} = G_{P,cal,i} - k_{GP,cal,i} \cdot G_{P,dif,i} \quad (7)$$

gde su parametri definisani na sledeći način:

$k_{GP,cal,i}$ i $t_{GP,cal,i}$ - kalibracione konstante za i-ti odsečak kalibracione krive;

$G_{P,dif,i}$ i $G_{P,dif,i-1}$ - osrednjene vrednosti razlike protoka u dve uzastopne kalibracione tačke;

$G_{P,cal,i}$ i $G_{P,cal,i-1}$ - osrednjene vrednosti kalibrisane razlike protoka u dve uzastopne kalibracione tačke.

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%, što metodu u datim uslovima čini neprihvatljivom.
- Primenom diferencijalne kalibracije masenih protokomera, proračunske vrednosti rel. greške pojedinačne i srednje vrednosti DR_{MASS} smanjuju se naoko 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} .
- Primena diferencijalne kalibracije u realnim uslovima na 10 diskretnih režima na ansamblu od po 100 uzastopnih uzoraka, srednje kvadratno odstupanje vrednosti kalibrisane razlike protoka protoka G_{TOT} i G_{DIL} izmerenih protokomerom MFC2 kreću se u granicama od 0.01 do 0.035 l/min, a relativna greška od 2% na najnižem, do oko 0.2% na nominalnom protoku G_{TOT} .

LITERATURA

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

Rad primljen: 25.10.2001.

Rad prihvaćen: 01.11.2001.