

S. Popović*, B. Međo**

SREDNJI I TRENUTNI MASENI PROTOK GORIVA - AUTOMATIZACIJA DISKONTINUALNOG MERENJA U REALNOM VREMENU

Rezime: U radu su prikazani rezultati razvoja prototipa automatizovanog procesorski upravljano laboratorijskog sistema za merenje srednjeg i trenutnog masenog protoka goriva u realnom vremenu na principu promene hidrostatičkog pritiska u mernoj posudi. Sa stanovišta obrade signala, metodom virtuelnog eksperimenta, testirane su tri statističke metode pokretnih sredina i metode najmanjih kvadrata i aproksimacionog kubnog splajna. Eksperimentalna verifikacija sprovedena je u vanmotorskim uslovima, korišćenjem piezo-rezistivnog senzora IHTM Tpr 110 i 12-bit akvizicionog sistema ED428.

KLJUČNE REČI: protok goriva, senzor pritiska, merenje, obrada signala

MEAN AND INSTANTANEOUS FUEL MASS FLOW - AUTOMATION OF THE DISCONTINUES REAL-TIME MEASUREMENT

Abstract: The results of the development of computer-based laboratory system for real-time measurement of mean and instantaneous fuel mass flow, has been presented in this paper. The functional principle is based on hydrostatic pressure change in measuring vessel. Based on the principle of virtual experiment, three statistical as well as Least-Squares and smoothing cubic spline methods have been tested regarding smoothing acquired data. The measuring principle has been proved experimentally by means of piezo-resistive pressure sensor IHTM Tpr 110 and 12-bit acquisition board ED428.

KEY WORDS: fuel flow, pressure sensor, measurement, data processing

1. UVOD

U eksperimentalnoj verifikaciji svih izmena na motoru, kako u fazi ispitivanja prototipa i u postupku optimizacije, tako i u okviru kontrolnih, primopredajnih ili eksploatacionih ispitivanja, poseban značaj ima merenje protoka goriva i određivanje specifične efektivne potrošnje goriva kao izvedene veličine. Poseban značaj razvoja tehnika merenja protoka goriva visoke tačnosti, može se sagledati sa aspekta direktne zavisnosti potrošnje goriva i emisije ugljen-dioksida. Iz uticaja povećane koncentracije CO₂ u atmosferi na efekat "staklene bašte", proizilazi jasna intencija zakonodavca da emisiju ove komponente u bliskoj budućnosti ograniči. Imajući u vidu činjenicu da se promene radnih parametara motora, koje se javljaju kao posledica stalnog usavršavanja komponenata sistema i algoritma upravljanja, najčešće kreću u vrlo uskom opsegu bliskom opsegu greške merenja, visoka tačnost i ponovljivost rezultata merenja protoka goriva predstavlja osnovni zahtev koji jedan sistem za merenje potrošnje goriva mora da ispuni.

Pored opšte poznatih metoda diskontinualnog merenja srednjeg protoka fluida koje se zasnivaju na direktnoj primeni definicije zapreminskog ili masenog protoka i koje se, u nekoj od brojnih modifikacija, danas koriste pretežno u postupcima kalibracije drugih uređaja, komercijalno su dostupni sistemi za merenje potrošnje goriva motora SUS u laboratorijskim uslovima na kvazi-stacionarnim režimima i u dinamičkim ciklusima [3, 6, 8, 19, 21]. Izbor sistema za merenje potrošnje goriva zavisi od više faktora, kao što su: tačnost i ponovljivost rezultata merenja, mogućnost merenja trenutnog protoka, mogućnost on-line obrade podataka, način montaže, troškovi

*Slobodan Popović, asistent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 27. marta 80, spopovic@mas.bg.ac.yu

**Bojan Međo, saradnik, Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu, Studentski trg 16, bmedjo@matf.bg.ac.yu

održavanja, način kalibracije, cena i mogućnost integracije sistema za merenje potrošnje goriva u sistem za ispitivanje motora.

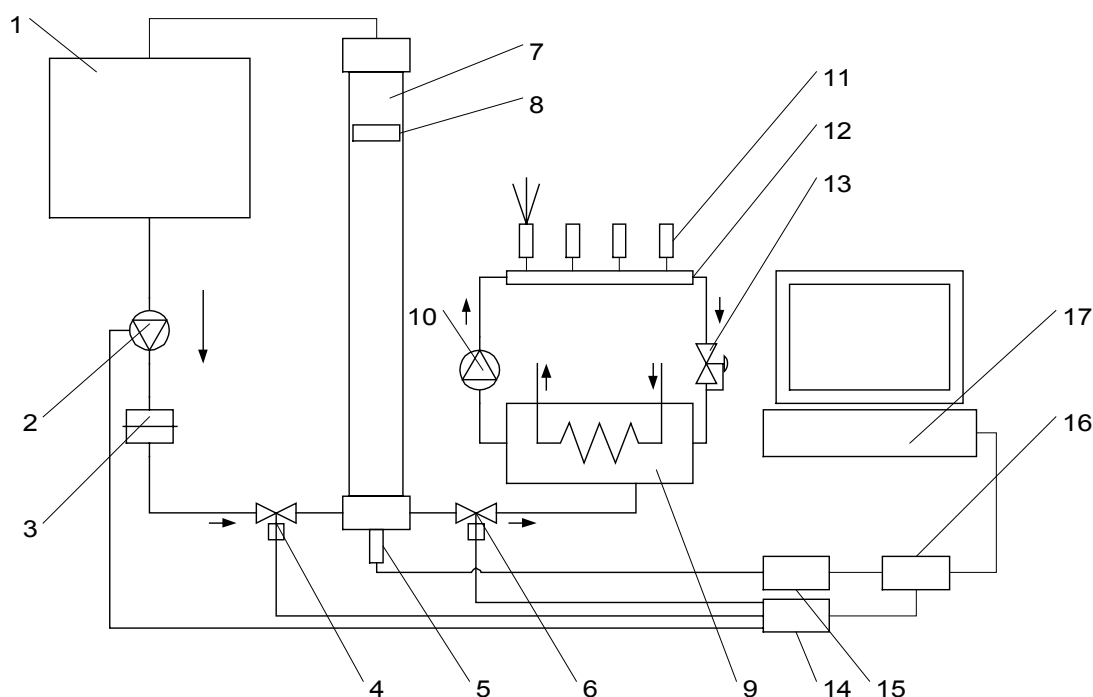
U radu su prikazani rezultati razvoja prototipa automatizovanog, procesorski upravljano laboratorijskog sistema za merenje srednjeg i trenutnog masenog protoka goriva u realnom vremenu, koji predstavlja modifikaciju opšte poznatog i prihvaćenog principa diskontinualnog merenja srednjeg zapreminskog protoka pomoću merne birete sa integrisanim senzorom pritiska visoke tačnosti.

Protok goriva, prema osnovnoj definiciji, može biti direktno meren u masenim ili zapreminskim jedinicama. Izračunavanje masenog protoka na osnovu izmerenih vrednosti zapreminskog protoka i poznate vrednosti gustine goriva, dovodi do povećanja ukupne greške merenja, čak i ako je gustina goriva određena sa najmanjom mogućom greškom. Gustina goriva se (čak i u uz primenu sistema za kondicioniranje goriva) neprekidno menja i značajno utiče na tačnost konačnog rezultata.

Direktno merenje masenog protoka može se sprovesti primenom gravimetrijske metode (sa mehaničkom vagom, ili elektromehaničkom vagom sa tenzometrijskim [17] ili kapacitivnim senzorom sile [6, 8]), termalnih protokomera sa integrisanom kompenzacijom temperaturske osetljivosti [1], protokomera koji radi na principu hidrauličkog ekvivalenta Wheatstone-ovog mosta [19, 21], ili na principu merenja Coriolis-ovog ubrzanja [3].

2. TEORIJSKA ANALIZA

Sistem prikazan u ovom radu nastao je kao modifikacija uređaja "Seppeler" za merenje zapreminskog protoka goriva pomoću merne birete. Udvajanjem mernih posuda, moguće ga je prilagoditi kvazi-kontinualnom režimu rada i u tom slučaju se jedna posuda puni dok se motor napaja gorivom iz druge. Sistem nema pokretnih delova, i hermetički je zatvoren. Prikaz sistema dat je na sl. 1, a delovi sistema su: rezervoar za gorivo (1), pumpa za punjenje merne posude (2), prečistač (3), ulazni ventil (4), senzor (5), izlazni ventil (6), merna posuda (7), plovak za umirenje pulzacija (8), sistem za kondicioniranje goriva (9). Napojna pumpa (10), brizgači (11), magistrala (12) i regulator pritiska (13), sastavni su delovi sistema za napajanje motora gorivom. Relejni modul (14), pojačivač (15), multifunkcionalna akviziciona kartica (16) i personalni računar (17) predstavljaju osnovne delove mernog sistema. Sistem radi na principu određivanja promene mase goriva u mernoj posudi dok motor troši gorivo iz nje.



Slika 1: Shematski prikaz sistema za merenje srednjeg i trenutnog protoka goriva na principu promene hidrostatičkog pritiska

Iz izraza za trenutnu masu goriva u posudi i izraza za hidrostatički pritisak na dnu posude, može se doći do izraza za određivanje mase goriva u posudi u funkciji izmerenog pritiska, čime se istovremeno eliminiše uticaj promene gustine:

$$p = \frac{m \cdot g}{A} + C \quad (1)$$

gde je m – masa goriva u mernoj posudi, g – ubrzanje zemljine teže, A – površina dna posude, a C - pritisak goriva u pomoćnom sudu i vodovima koji vode do njega. Polazeći od pretpostavke da su promene poprečnog preseka merne posude usled promene temperature goriva i spoljne sredine zanemarljive, i da se položaj posude tokom merenja ne menja ($g=const.$), srednji maseni protok se svodi na osnovnu metodu određivanja bilansa mase u početnom i krajnjem trenutku merenja:

$$\dot{m}_{sr} \approx \frac{A}{g} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} = K \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} = K \cdot \frac{p_1 - p_n}{t_n - t_1} \quad (2)$$

Prema definiciji, trenutni maseni protok se može dobiti na sledeći način:

$$\dot{m}(t) = \frac{dm(t)}{dt} \approx \frac{A}{g} \cdot \frac{dp(t)}{dt} = K \cdot \frac{dp(t)}{dt} \quad (3)$$

Osnovni test kvaliteta izabrane metode merenja odnosi se na procenu granica očekivane greške merenja. Ovu analizu je moguće sprovesti na osnovu poznate relacije za procenu najverovatnije apsolutne greške složene veličine u , koja je funkcija drugih merenih veličina x_i , i odgovarajućih apsolutnih grešaka Δx_i :

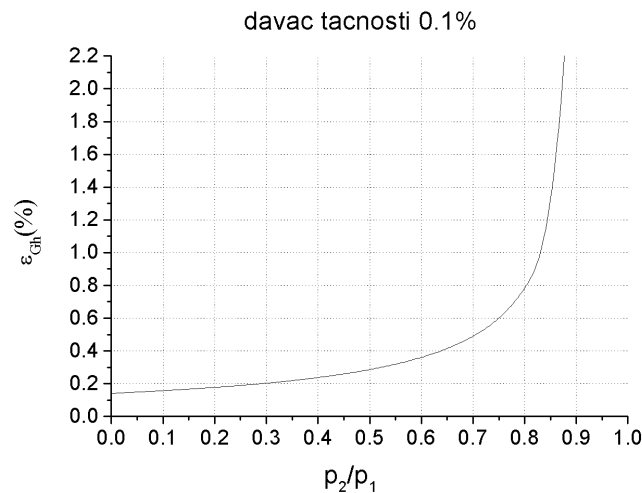
$$\Delta u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right)^2} \quad (4)$$

Zamenom odgovarajućih parcijalnih izvoda po uticajnim parametrima merenja protoka goriva (greška merenja dimenzije posude, pritiska, vremena), pogodnom transformacijom i grupisanjem pojedinih članova, može se doći do izraza za procenu relativnog odstupanja merenja srednjeg protoka goriva. Zanemarivanjem uticaja greške merenja intervala vremena i gravitacione konstante dobija se sledeći izraz:

$$\varepsilon_{\dot{m}_{sr}} = \sqrt{4 \cdot \varepsilon_d^2 + 2 \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^2} \cdot \varepsilon_p^2} \quad (5)$$

pri čemu su ε_d i ε_p relativne greške merenja prečnika merne posude i pritiska, respektivno, a p_1 i p_2 vrednosti pritiska na početku i kraju vremenskog intervala Δt tokom koga je obavljeno merenje. Za unapred definisane greške merenja prečnika posude i deklarisanu tačnost senzora pritiska, zavisnost (5) predstavljena je dijagramom na sl. 2.

Uočava se, da se primenom senzora deklarisanе kombinovane tačnosti $\pm 0.1\%$ (nula, linearnost i histerezis) može postići tačnost merenja srednjeg protoka od oko 0.2%, ukoliko se potroši najmanje dve trećine goriva iz posude ($p_2/p_1 \approx 0.3$). U opštem slučaju, najmanja relativna greška se postiže ukoliko se posuda potpuno isprazni tokom intervala Δt . Tačnost se dalje može povećavati primenom viših standarda u postupku kalibracije senzora pritiska, povećanjem broja kalibracionih tačaka i uvođenjem kalibracione krive senzora višeg stepena u tekuća izračunavanja srednjeg i trenutnog protoka. Primena auto-kalibracije svakog pojedinačnog merenja [4, 6, 8], nije moguća zbog osnovnih karakteristika senzora.



Slika 2. Procena zavisnosti relativnog odstupanja određivanja masenog protoka od odnosa pritiska na kraju i na početku merenja

3. TESTIRANJE METODA ZA OBRADU SIGNALA PRIMENOM KONCEPTA VIRTUELNOG EKSPERIMENTA

U opštem slučaju, testiranje metoda za obradu signala merenja, bar ne u početnoj fazi, ne mora se *a priori* vezati za laboratoriju i realni eksperiment. U slučaju ispitivanja prototipa ili komponente motora čije je ponašanje i odziv na spoljne uticaje nepoznat ili neizvestan, mora se računati na mogućnost pojave iznenadnih kvarova ili potpunog otkaza sistema, pa karakteristike upravljačkog i mernog sistema i aplikativnog software-a za obradu signala moraju unapred biti testirane i poznate. Kompjuterska simulacija ispitivanja motora, [7], može poslužiti kao efikasan alat u početnoj fazi razvoja mernih sistema i metoda obrade signala. Koncept virtuelnog eksperimenta, takođe, pruža mogućnost testiranja karakteristika sistema u kritičnim situacijama, kada bi u realnom okruženju postojala opasnost od ugrožavanja ljudstva i opreme (kritična faza funkcionisanja mernog objekta ili upravljačkog sistema npr.). Uslov za ovo je poznavanje osnovnih osobina delova sistema, načina promene signala u vremenu, merno područje, tačnost sistema za merenje i sl.

Program za obradu signala je razvijen primenom koncepta virtuelnog eksperimenta. Naponski signal, koji preko A/D konvertora dolazi do računara, simuliran je odgovarajućim modelom, a opseg signala određen je vrednostima osetljivosti senzora, pojačanja i izlaznog opsega A/D konvertora. Simulacija se sprovodi na sledeći način:

1. Generiše se matematička funkcija koja simulira naponski signal pritiska usled promene mase goriva u mernoj posudi u funkciji vremena $U_S(t_i)$:

$$U_S(t_i) = \sum_{k=0}^m a_i \cdot t_i^k \quad (6)$$

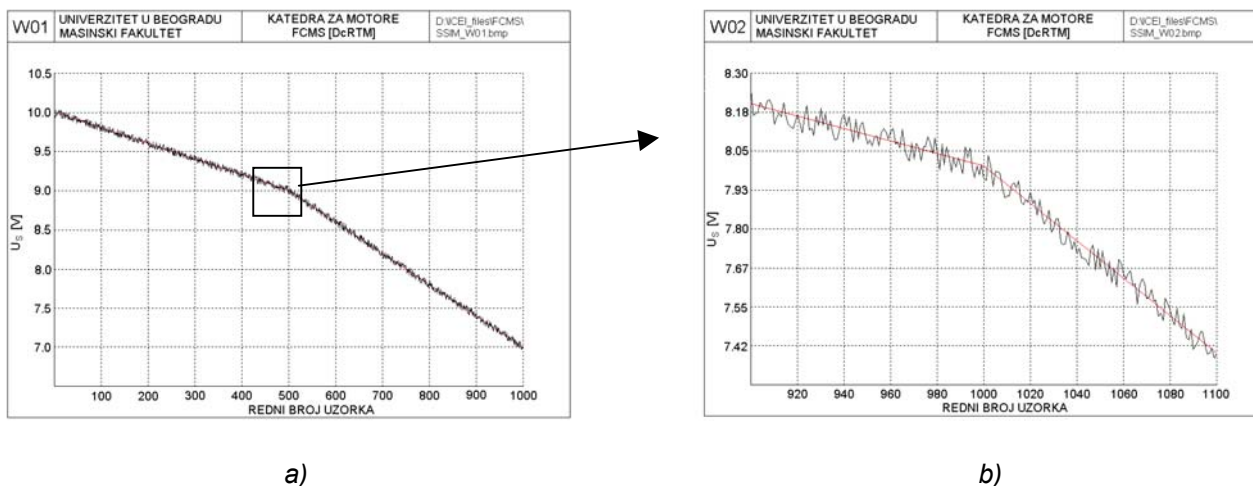
Izbor polinoma, a ne neke druge krive, uslovljen je činjenicom da se promena mase u mernoj posudi u svakom režimu rada motora može sa dovoljnom tačnošću aproksimirati polinomom.

2. Matematička funkcija se diskretizuje po vremenu sa periodom Δt , čime se simulira A/D konverzija signala sa fiksnom, unapred zadatom vremenskom rezolucijom.
3. Generiše se šum signala $U_N(t_i)$ kao aditivna veličina, kojim se simulira stvarni signal sa senzora. Na slučajan način, nezavisno, određuju se vrednost i znak odstupanja u diskretnoj tački.

$$U_S(t_i) = \sum_{k=0}^m a_i \cdot t_i^k + U_N(t_i) \quad (7)$$

U okviru modula za simulaciju signala merenja može se menjati većina parametara, poput greške, osetljivosti i mernog opsega senzora, frekvencije uzorkovanja signala, prirode promene signala u vremenu itd. Deljenjem

simuliranog signala na više segmenata, može se na pojednostavljen način simulirati promena mase goriva na režimima kroz koje motor sukcesivno prolazi tokom određenog vremenskog perioda.



Slika 3. Simulirani signal pritiska usled promene mase goriva u mernoj posudi: a) ukupni interval merenja; b) uvećani deo intervala

Na slici 3a prikazan je tok simuliranog naponskog signala sa periodom uzorkovanja od 0.02 sekunde, za senzor deklarisan kombinovane tačnosti $\pm 0.2\%$. Pojednostavljenom simulacijom predstavljen je naponski signal senzora pritiska koji odgovara pražnjenju merne posude tokom dva sukcesivna, proizvoljno izabrana kvazi-stacionarna radna režima motora. Dinamičke pojave pri prelazu sa jednog na drugi kvazi-stacionarni režim su zanemarene. Na sl. 3b, sa odgovarajućim uvećanjem, prikazan je tok simuliranog signala tokom promene režima.

Određivanje vrednosti trenutnog protoka goriva prema izrazu (1) na direktan način nije moguće, jer prvi izvod pritiska u mernoj posudi po vremenu nije poznat. Direktna primena metode konačnih razlika na neobrađenom naponskom signalu prema sledećem izrazu [5, 13]:

$$\dot{m}_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} = \frac{m_{i+1} - m_i}{\Delta t_i} = C \cdot \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta t_i} \quad (8)$$

gde je i – redni broj podatka, u cilju numeričkog određivanja prvog izvoda pritiska po vremenu u diskretnim tačkama ansambla, je moguća, ali ne daje validan rezultat. Tako izračunate vrednosti prvog izvoda, usled uvek prisutnog električnog šuma, šuma u napajanju senzora, pojačivača i A/D konvertora, prirodnih oscilacija pritiska u priključnim vodovima usled dejstva napojne pumpe, brizgača i regulatora pritiska, vibracija merne posude usled rada motora koje se sa nosećih elemenata probnog stola i fundamenta prenose na sve ostale delove instalacije za ispitivanje motora, menjaju znak u uzastopnim tačkama i mogu navesti na pogrešan zaključak da protok može imati negativan znak. U tom smislu testirane su sledeće metode za filtriranje signala pritiska: pokretna sredina, adaptivna pokretna sredina, eksponencijalna pokretna sredina, metoda najmanjih kvadrata i aproksimacioni kubni splajn. Postupak osrednjavanja se sprovodi na ansamblu od n podataka (y_1, y_2, \dots, y_n), i za svakih uzastopnih m podataka ($m < n$) izračunava se aritmetička sredina, pri čemu je pogodno da m bude neparan broj. U slučaju metode pokretnih sredina (PS), ovim podatkom se zamenjuje srednji član intervala, a kod metode adaptivne pokretne sredine (APS) poslednji član intervala na kome se vrši osrednjavanje. Izrazi (9) odnose se na PS, odnosno APS, pri čemu je $p = (m-1)/2$.

$$y_{sr,k} = \frac{\sum_{i=k-p}^{k+p} y_i}{m} \quad y_{sr,k} = \frac{\sum_{i=k-m+1}^k y_i}{m} \quad (9)$$

Oba izraza se mogu transformisati u odgovarajuće rekurentne formule, pa se zbog malog utroška procesorskog vremena obe metode mogu koristiti za obradu signala u on-line režimu. Nedostatak obe metode je gubitak podataka, i to početnih i krajnjih $(m-1)/2$ podataka serije kod pokretnih sredina i prvih m podataka kod adaptivnih

pokretnih sredina, što se na dijagramu manifestuje pomeranjem osrednjenih podataka u desno. U slučaju eksponencijalnih pokretnih sredina (EPS), rekurentni obrazac za izračunavanje glasi:

$$y_{sr,k} = y_{sr,k-1} + \alpha \cdot (y_k - y_{sr,k-1}) \quad (10)$$

gde je α – ponder-faktor tekućeg podatka, kojim se može menjati uticaj vrednosti prethodnih članova serije na tekući podatak, i prema preporukama iz literature, bira se u granicama 0.1-0.3. Prilikom obrade simuliranog signala ovom metodom dolazi se do nekoliko vrlo interesantnih zaključaka:

1. posle jednog ciklusa osrednjavanja, intenzitet šuma je još uvek visok i ne omogućava dalju obradu signala;
2. visok nivo šuma je posebno izražen na početku intervala zbog male statističke težine člana $y_{sr,k-1}$;
3. zbog globalno opadajućeg karaktera signala, prethodni članovi serije bitno utiču na promenu tekućih vrednosti osrednjenih podataka, usled čega se gradijent, od početka prema kraju serije, globalno smanjuje;
4. smanjivanje koeficijenta α dovodi do smanjenja gradijenta osrednjenih podataka, a intenzitet šuma se smanjuje;
5. sukcesivnim osrednjavanjem iste serije intenzitet šuma se smanjuje (do nivoa pogodnog za numeričko diferenciranje), ali se u svakom ciklusu osrednjavanja nagib dodatno smanjuje;
6. aritmetička sredina vrednosti dobijenih višestrukim sukcesivnim osrednjavanjem unapred i unazad, predstavlja set podataka koji ima veoma malo odstupanje od signala dobijenog simulacijom (sl. 4 b).

Bitno poboljšanje rezultata dobijenih ovom metodom u odnosu na one dobijene metodama pokretne ili adaptivne pokretne sredine nije uočeno. Za dobijanje istog rezultata procesorsko vreme je 8-10 puta duže, a višestruko sukcesivno osrednjavanje serije unapred i unazad čini ovu metodu neprimenljivom u režimu on-line obrade signala.

Određivanje trenutnog protoka goriva eksplicitnim izračunavanjem prvog izvoda signala pritiska po vremenu, podrazumeva prethodno poznavanje matematičke funkcije koja aproksimira promenu pritiska tokom ciklusa merenja sa dovoljnom tačnošću. Ova funkcija je nepoznata, a za njenu identifikaciju moguće je primeniti nekoliko algoritama. Gauss-Newton metoda najmanjih kvadrata, može se primeniti u cilju nalaženja parametara matematičke funkcije f koja aproksimira datu vremensku seriju sa minimalnim odstupanjima, i u slučaju polinoma m -tog stepena može biti definisana na sledeći način,

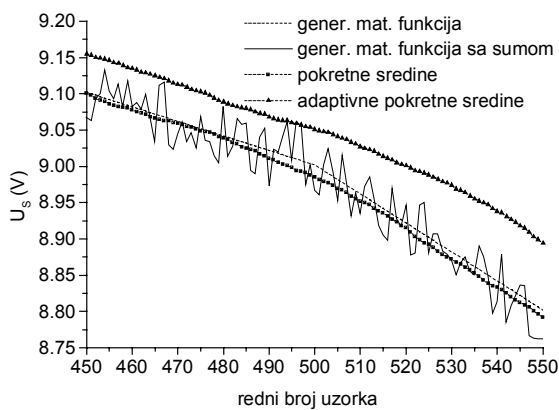
$$y_i = \sum_{j=1}^m (a_j \cdot t_i^j) = f(t_i, a_1 \dots a_m) \quad (11)$$

Parametri a_j ($j=1-m$) određuju karakter funkcionalne zavisnosti, a njihova pojedinačna vrednost određuje se iz uslova postizanja minimuma χ^2 -funkcije [9]. Zanemarivanjem uticaja srednjeg kvadratnog odstupanja signala u diskretnim vremenskim trenucima (u prvoj iteraciji ovaj podatak čak nije ni dostupan), χ^2 -funkcija se transformiše u funkcional sledećeg oblika:

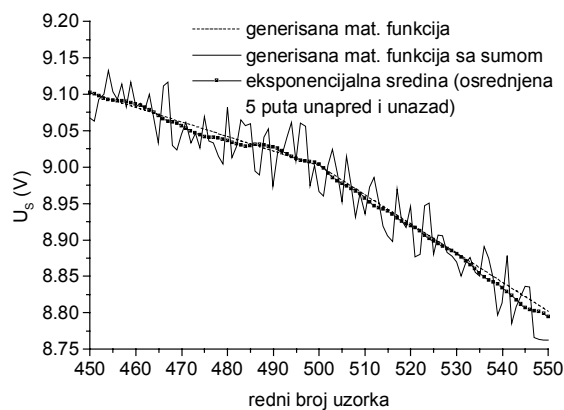
$$S(a_1 \dots a_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - f(t_i, a_1 \dots a_m)]^2 = S_{\min} \quad (12)$$

Izborom aproksimacionog polinoma višeg stepena ($m>3$), moguće je aproksimirati sve zavisnosti nižeg reda bez prethodnog poznavanja karaktera te zavisnosti i bez dodatnih podešavanja software-skog modula. Sistem linearnih jednačina, može se rešiti primenom iterativne metode. Nedostatak ove metode predstavlja činjenica da signal pritiska tokom ciklusa merenja u kome dolazi do višestrukih dinamičkih promena režima rada motora, a time i protoka goriva, ne može biti adekvatno aproksimiran jedinstvenom funkcijom na kompletnoj seriji, i da bi u tom slučaju algoritam morao biti nezavisno primenjen na pojedinačne segmente te serije. Iz toga proizilazi novi problem diferencijabilnosti u prekidnim tačkama, što ovu metodu čini neprimenljivom u ekstremnim uslovima.

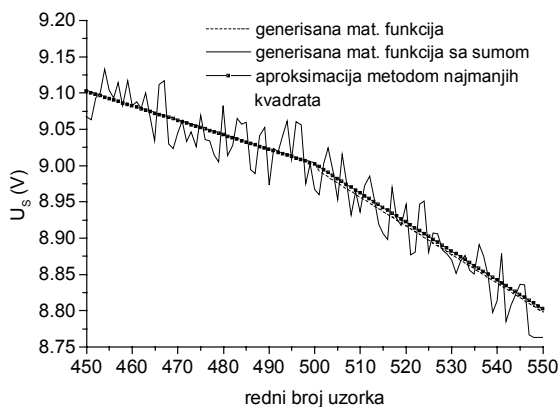
Dalja evolucija algoritma za obradu signala merenja protoka goriva, išla bi u pravcu integracije osnovnih tehnika optimizacije (kao što je metoda najmanjih kvadrata npr.) i dobrih osobina nekih tehnika interpolacije, što bi omogućilo bolju aproksimaciju signala na dinamičkim režimima. Priroda signala ne dozvoljava direktnu primenu tehnike interpolacionog kubnog splajna, jer ova tehnika podrazumeva prolaz interpolacionog polinoma kroz jedan određeni broj ili čak sve tačke jedne vremenske serije. Aproksimacioni kubni splajn (AKS) karakteriše neprekinuti prvi izvod, a aproksimacija se sprovodi na ograničenom intervalu od 3 uzastopne tačke. Osnovni nedostatak ove



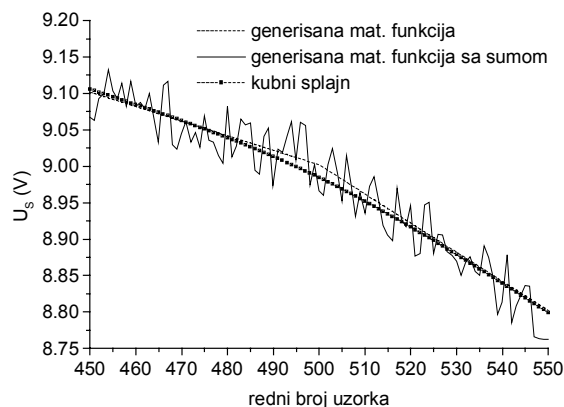
a)



b)



c)



d)

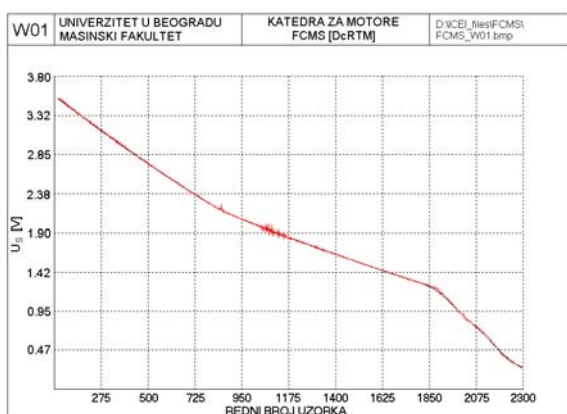
Slika 4. Prikaz rezultata obrade signala

metode je što zahteva veći utrošak procesorskog vremena od bilo koje napred navedene metode, značajno angažovanje memorijskih resursa procesorskog sistema i nemogućnost rada u on-line režimu. Na sl. 4 prikazani su rezultati simulacije i obrade naponskog signala senzora pritiska za slučaj dva sukcesivna intervala tokom kojih motor radi na kvazi-stacionarnim režimima. Interval osrednjavanja kod sve tri statističke metode je ograničen na 100 uzastopnih merenja, odnosno, za zadatu frekvenciju uzorkovanja od 50 Hz, na intervalu od 2 s. U slučaju obrade signala metodom PS i APS (sl. 4a), aproksimacije kompletne serije polinomom 5-og stepena metodom najmanjih kvadrata (sl. 4c) i metodom aproksimacionog kubnog splajna (sl. 4d), filtrirani signal prati tok simuliranog naponskog signala, ali se uočava izvesno odstupanje na delu na kome dolazi do promene karaktera simuliranog signala (promena režima). Ovo se u slučaju obe metode pokretnih sredina može objasniti uticajem veličine izabranog intervala osrednjavanja, a u slučaju aproksimacionih metoda uticajem reda polinoma kojim je aproksimiran taj deo intervala. Rezultati primene metode eksponencijalnih pokretnih sredina prikazani su na sl. 4b, ali se oni odnose na višestruko sukcesivno ponavljanje algoritma (sukcesivno osrednjavanje vremenske serije unapred i unazad). Odstupanje filtriranog signala od noseće matematičke funkcije je neznatno, čak i u delu intervala u kome dolazi do promene karaktera signala, ali efikasnost metode zbog neophodnosti primene sukcesivnog višestupnog osrednjavanja (najmanje 5 sukcesivnih osrednjavanja unapred i unazad) drastično opada.

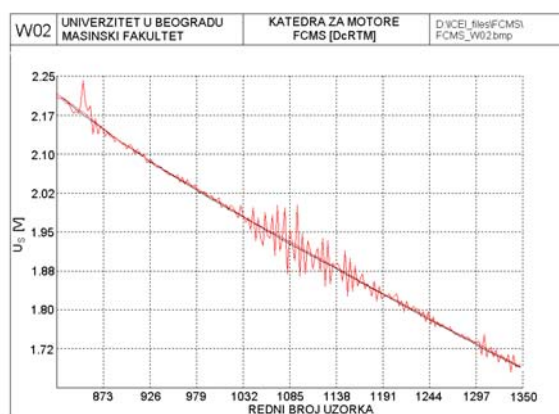
Sve napred navedene metode pogodne su za obradu podataka u off-line režimu, tj. po završetku merenja. Sa druge strane, ako su obrada i grafičko prikazivanje rezultata merenja u on-line režimu imperativ, mora se izabrati neka od metoda koja obrađuje podatke tempom kojim oni pristižu. Ovaj uslov eksplicitno ne zadovoljavaju aproksimacione metode, jer one zahtevaju da svi podaci budu poznati pre početka procesiranja signala. Kod metode PS ne može se uzeti u obzir prvih i poslednjih $(m - 1)/2$ tačaka, a u slučaju APS gubi se prvih m tačaka. Ovaj problem se može rešiti tako što će se merenje jednostavno započeti prvom osrednjenom vrednošću i završiti poslednjom osrednjenom vrednošću.

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

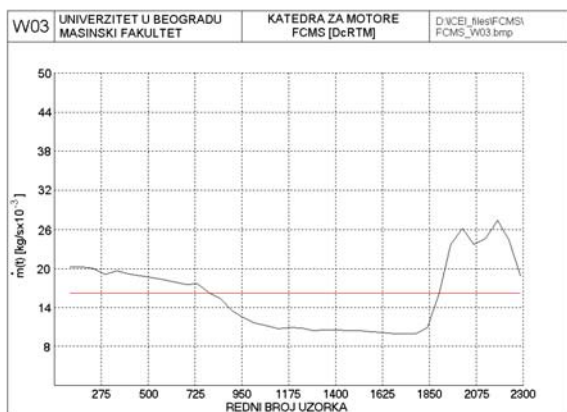
Opravdanost i tačnost polaznih pretpostavki i rezultata testiranja metode konceptom virtuelnog eksperimenta, potvrđeni su eksperimentom u vanmotorskim uslovima. Kao merna posuda poslužila je cev prečnika 15 mm. Na donji kraj cevi postavljen je T-priključak, na čiji je jedan kraj preko adaptera priključen piezorezistivni senzor pritiska IHTM Tpr-110 opsega 0-2.0 bar kombinovane tačnosti 0.2%. Protok se reguliše ventilom postavljenom na izlaznom otvoru T-priključka. Za akviziciju podataka je upotrebljena akviziciona kartica ED 428, koja je priključena na ISA-magistralu PC 486. Napajanje senzora pritiska i pojačanje signala obezbeđeno je preko mostnog pojačivača PROAMP-1. Akvizicija podataka i upravljanje sistemom programirani su u paketu Visual Designer v.2.3, (Burr-Brown). Frekvencija uzorkovanja A/D konvertora zadata je programski i iznosi 50 Hz.



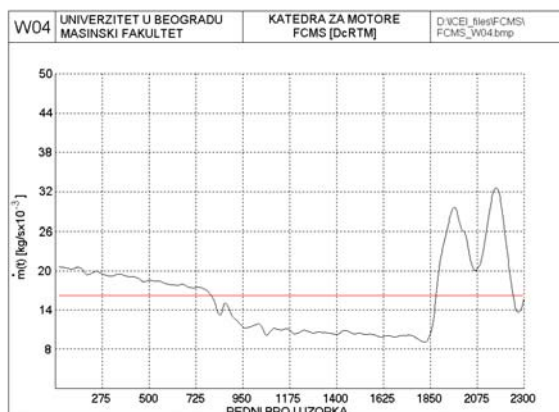
a)



b)



c)



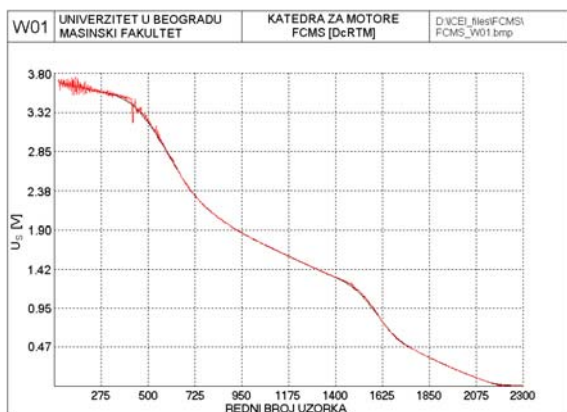
d)

Slika 5. Rezultati merenja protoka u kvazi-stacionarnim uslovima primenom piezorezistivnog senzora pritiska (vanmotorsko ispitivanje)

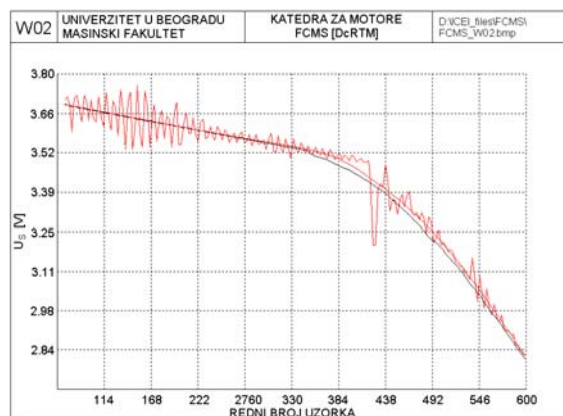
Na sl. 5 i 6 prikazani su rezultati dobijeni tokom dva uzastopna merenja. Šum dobijen eksperimentom u vanmotorskim uslovima, globalno je nešto nižeg intenziteta nego što bi se u realnim uslovima, usled dejstva napojne pumpe, regulatora pritiska i vibracija koje se prenose sa nosećih elemenata probnog stola motora na nosač sistema za merenje protoka goriva, moglo očekivati. Tokom eksperimenta je, u proizvoljnim trenucima, eksterno, mehaničkim putem, generisan šum pojačanog intenziteta, a sa ciljem da se sagledaju mogućnosti filtriranja signala u ekstremnim uslovima.

Na sl. 5 prikazani su rezultati merenja kvazi-stacionarnog i dinamičkog protoka tokom intervala od 46 s. Na sl. 5a prikazane su promene osnovnog naponskog signala i signala dobijenih filtriranjem metodama pokretnih sredina i aproksimacionog kubnog splajna. Šum je veštačkim putem uveden u 20. sekundi merenja (kvazi-stacionarni režim isticanja) i kritični interval je prikazan sa uvećanjem na sl. 5b. Bitna razlika u rezultatima **dobijenih**

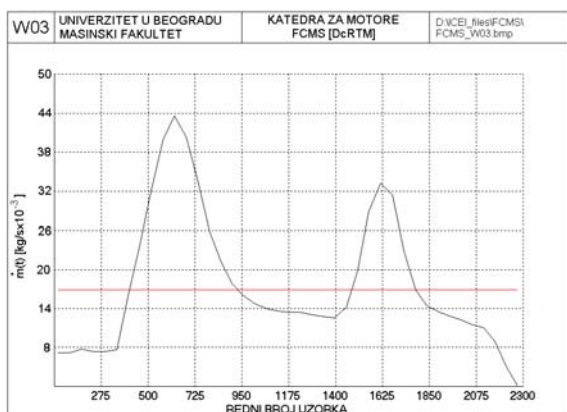
primenom ove dve metode se ne uočava. Vrednosti trenutnog protoka dobijene filtriranjem pomoću metode pokretnih sredina i diferenciranjem metodom konačnih razlika, prikazane su na sl. 5c, dok su vrednosti trenutnog protoka dobijene filtriranjem pomoću metode aproksimacionog kubnog splajna i eksplicitnim diferenciranjem polinoma trećeg stepena u svakoj tački prikazane na sl. 5d. Oscilacije trenutnog protoka su globalno, znatno manje izražene u slučaju metode pokretnih sredina, ali se razlika dobijenih vrednosti kreće u relativno uskom opsegu od oko 0.04-0.09%.



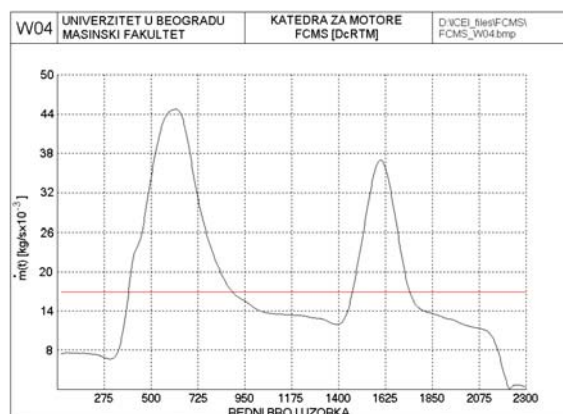
a)



b)



c)



d)

Slika 6. Rezultati merenja protoka goriva u dinamičkim uslovima primenom piezorezistivnog senzora pritiska (vanmotorsko ispitivanje)

Na slici 6 prikazani su rezultati merenja vremenski promenljivog protoka u vanmotorskim uslovima. Šum je veštačkim putem generisan tokom prvih 5 s merenja, sa ciljem da se sagleda efikasnost obe metode u uslovima pojačanog šuma na dinamičkim režimima. Ovaj efekat prikazan je sa uvećanjem na sl. 6b, na kojoj se mogu uočiti razlike u intenzitetu filtriranih signala u rasponu od 0.58-0.67% i to ograničeno, u delu intervala na kome dolazi do dinamičke promene režima isticanja. Vrednosti trenutnog protoka dobijene primenom metode pokretnih sredina i diferenciranjem metodom konačnih razlika, prikazane su na sl. 6c, dok su vrednosti trenutnog protoka dobijene filtriranjem pomoću metode aproksimacionog kubnog splajna i diferenciranjem polinoma trećeg stepena prikazane na sl. 6d. Uočava se, kao i u slučaju kvazi-stacionarnog isticanja, neznatna razlika u vrednostima dobijenih dvema metodama, i može se konstatovati da kubni aproksimacioni splajn, zahvaljujući tome što aproksimira podatke u vrlo uskom intervalu od 3 uzastopna člana, pruža mogućnost praćenja finih promena u protoku goriva, koje se inače ne primećuju u slučaju pokretnih sredina. Sužavanjem intervala osrednjavanja, moguće je otkloniti ovu razliku. Cilj nove analize treba pre svega ograničiti na definisanje veličine intervala osrednjavanja sa kojim algoritam pouzdano funkcioniše i u slučajevima ekstremnih promena režima strujanja goriva.

5. ZAKLJUČCI

U radu je prikazan rezultat razvoja prototipa sistema za merenje srednjeg i trenutnog masenog protoka goriva u realnom vremenu pomoću piezorezistivnog senzora pritiska. U osnovne prednosti primenjene metode spadaju: jednostavnost konstrukcije, relativno niska cena, visoka tačnost merenja (uz primenu davača visoke tačnosti), mogućnost određivanja trenutnog protoka i odsustvo pokretnih delova. Osnovnim nedostatkom smatra se neprilagođenost sistema postupku auto-kalibracije pojedinačnog merenja.

Testiranje metoda filtriranja, obrade i interpretacije signala konceptom virtuelnog eksperimenta upućuju na sledeće zaključke:

- procenjena tačnost određivanja srednjeg protoka, za piezo-rezistivni senzor deklarisan kombinovane tačnosti 0.1%, kreće se u rasponu od ± 0.15 do 0.2%;
- u on-line režimu obrade i vizualizacije signala prednost se daje metodi pokretnih sredina i izračunavanju trenutnog protoka metodom konačnih razlika;
- u off-line režimu, prednost se daje metodi aproksimacionog kubnog splajna i izračunavanju trenutnog protoka diferenciranjem.

Eksperimentalnom proverom metode merenja protoka pomoću piezo-rezistivnog senzora pritiska u vanmotorskim uslovima, dobijeni su naponski signali koji po karakteru odgovaraju simuliranom, kako za uslove kvazi-stacionarnog, tako i za uslove dinamičkog protoka. Međusobna razlika rezultata dobijenih gore navedenim metodama, zavisno od režima, kreće se u granicama od 0.04 do 0.38%.

6. LITERATURA

- [1] Bernstein, H.: "Sensoren und Messelektronik", Pflaum Verlag, Muenchen, 1998.
- [2] Drndarević V.: "Akvizicija mernih podataka pomoću personalnog računara", Institut za nuklearne nauke "Vinča", 1999.
- [3] Goebel J.: "Flow motion", Engine Technology, 2/2001.
- [4] Grujić N.: "Sistemi za merenje potrošnje goriva kod motora SUS", diplomski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2000.
- [5] Jordan-Engeln, G., Reutter, F.: "Formelsammlung zur Numerischen Mathematik mit Fortran IV Programmen", Bibl. Institut Mannheim, 1974.
- [6] Kampelmühler F. T., Ebner H.W.: "Quality Assurance in Fuel Consumption Measurement", MTZ 55 (6/1994)
- [7] Međo B.: "Istraživanje metoda obrade signala merenja potrošnje goriva kod motora SUS", diplomski rad, Mašinski fakultet Beograd, 2003.
- [8] Pichler K., Ebner H. W.: "Fuel consumption measurement – effect of system architecture on accuracy and costs" MTZ 57, (4/1995)
- [9] Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B.: "Numerical Recipes in Fortran", Cambridge Press, 1997.
- [10] Popović M.: "Senzori i merenja", Viša elektrotehnička škola, Beograd, 1994.
- [11] Popović S.: "Istraživanje metoda eksperimentalnog određivanja emisije čestica dizel motora", Magistarski rad, Mašinski fakultet Beograd Beograd, 1999.
- [12] Rohrbach, C.: "Handbuch fuer elektrisches Messen mechanischer Groessen", VDI Verlag, Duesseldorf, 1967.
- [13] Simonović V.: "Numeričke metode", Mašinski fakultet, Beograd, 1988.
- [14] Simonović V.: "Uvod u teoriju verovatnoće i matematičku statistiku", Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [15] Stone R.: "Introduction to Internal Combustion Engines", SAE, Warrendale, 1995.
- [16] Thelen B.: "Virtual test case", Engine Technology, 2/2001.
- [17] "CUSSONS", Product Catalogue, Manchester
- [18] "DIGITAL Visual Fortran – Programmers Guide", Digital Equipement Corporation, 1998.
- [19] "Flowmeter PLU 103A/116H", Pierburg Product Catalogues, Neuss, 1988.
- [20] "How to Evaluate and Select a Data Acquisition & Control System for Your Application", Neff Instrument Corporation, 1986.
- [21] "Hydraulic Wheatstone Bridge Mass Flowmeter FT-10", Pierburg Product Catalogues, Neuss, 1998.