Stručni rad UDK:621.317:531.781,53.088.3=861
BIBLID: 0350-8528(2003).15.p. 15-23

SOFTVERSKA KOMPENZACIJA GREŠKE NELINEARNOSTI MERNIH PRETVARAČA

Dragan Kovačević, Slobodan Škundrić, Srboljub Vukovojac
Elektrotehnički institut"Nikola Tesla", Beograd

***Sadržaj**: Tehnološki prelazak od sredstava merenja (senzori, pretvarači, instrumenti, merni sistemi) sa hardverom kao dominantnim elementom na sredstva merenja kod kojih softver postaje dominantan i ključni resurs razvoja i proizvodnje, stvorio je uslove za efikasnu primenu softverskih metoda kompenzacije grešaka mernih pretvarača. Terijski deo ovog rada posvećen je analizi softverskih tehnika linearizacije u slučaju kada je opšti oblik prenosne funkcije pretvarača nepoznat i to kalibracija i linearizacija u tri tačke, i kalibracija i linearizacija u više tačaka. Razvijeni algoritmi primenjeni su na specifičan slučaj mernih pretvarača sile sa tenzometarskim trakama visoke klase tačnosti, sa veoma malim početnim greškama nelinearnosti, tako da je ova greška smanjena za više od pet puta (sa 100ppm na 20ppm).*

***Ključne reči**: inteligentni merni pretvarači, greška nelinearnosti, softverska kompenzacija.*

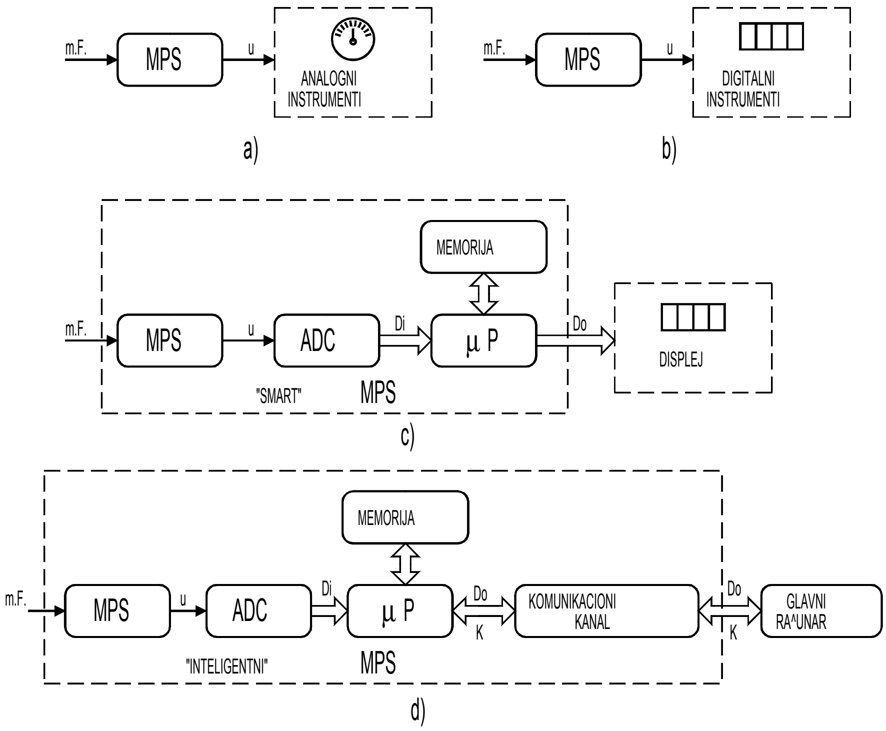
1 UVOD

Metrologija, nauka o merenjima, i instrumentacija kojom se ta merenja obavljaju su svuda prisutni faktor moderne automatske proizvodnje, trgovine, obezbeđenja kvaliteta, saobraćaja, zaštite čoveka i životne i radne sredine, medicinske dijagnostike i tretmana. Merenja su, istovremeno, i ključni elemenat istraživanja i razvoja u svakoj vrsti praktične delatnosti.
Osnovne karakteristike savremenih merenja su [1]:

- merenje gotovo svih fizičkih veličina (neelektričnih, električnih i magnetskih), električnim putem; senzori i merni pretvarači su nezaobilazni elementi koji pretvaraju ulaznu fizičku veličinu u pogodan izlazni električni signal;
- tesno povezivanje metroloških i informacionih sistema, koje za posledicu ima pojavu novih metoda merenja (inteligentna merenja) i/ili tehnologija (inteligentni pretvarači odnosno virtuelni instrumenti);
- tehnološki prelazak od sredstava merenja (senzori, pretvarači, instrumenti, merni sistemi) sa hardverom kao dominantnim elementom na sredstva merenja kod kojih softver postaje dominantan i ključni resurs razvoja i proizvodnje.
- pojam inteligentne instrumentacije vezuje se za uređaje koji u mernom procesu efikasno kompenzuju greške merenja, vrše samotestiranje, dijagnostiku otkaza i komuniciraju unutar složenih merno – informacionih sistema [2].

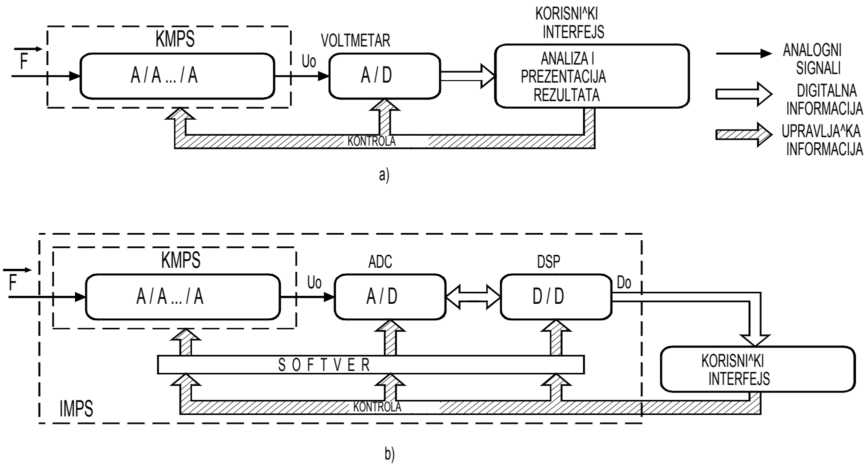
U evolutivnoj perspektivi razvoj sredstava merenja može se sagledati kao niz razvojnih tehnoloških koraka - generacija: analogna, digitalna, mikroprocesorski-bazirana ("smart") i inteligentna sredstva merenja. Na slici 1 šematski su prikazane navedene razvojne faze. Zbog potreba ovoga rada, a i dosta slobodnog korišćenja pojmova "smart" i "intelligent" u stručnoj literaturi, neophodna su njihova bliža sledeća tumačenja:

- "smart" inteligentni merni pretvarači i/ili senzori (MPS) sadrže u minimalnoj konfiguraciji analogno digitalni konvertor (ADC), mikroprocesor (µP) i memoriju koji omogućavaju ograničenu obradu signala na nivou mernog pretvarača (na primer linearizacija).
- "inteligentni" MPS poseduju, u odnosu na "smart" MPS, dodatno, i neku vrstu komunikacionog kanala čime se proširuju mogućnosti obrade signala, kompenzacije grešaka, samokalibracije, kalibracije, identifikacije, nadzora, dijagnoze kvarova.



Slika 1 - Evolutivni razvoj mernih pretvarača:
a) analogni, b) digitalni, c) "smart", d) "inteligentni".

Na slici 2 prikazano je, na nivou blok šema, principijelno poređenje između klasičnih (slika 2.a) i inteligentnih (slika 2.b) MPS. Klasični MPS, integrišu čitav niz transformacija analognih (A/A) fizičkih veličina u promenu intenziteta električnog napona. U metrološkom smislu kod klasičnih MPS kompenzacija greške ostvaruje se hardverskim sredstvima, a obradu mernih rezultata obavlja naknadno merilac. Dalja akvizicija i prelazak iz analognog u digitalni domen (A/D), obrada i analiza digitalnih mernih podataka (D/D) obavlja se u fizički odvojenim električnim blokovima. Inteligentni MPS sadrže klasični MPS i blokove za obradu podataka (informacionu mašinu) što omogućava otklanjanje nedostataka hardvera i smanjenje ukupne greške primenom adekvatnih softverskih tehnika. Inteligentni MPS imaju, kao što se vidi sa slike 2.b, mnogo složeniju strukturu od klasičnih MPS, u kojoj se uočava prisustvo i analognih i digitalnih (informacionih i upravljačkih) signala kao i hardverskih i softverskih struktura [3].



Slika 2 - Strukturno i funkcionalno poredenje između:
(a) klasičnih MPS (KMPS) i (b) inteligentnih MPS (IMPS).

2 SOFTVERSKA KOMPENZACIJA GREŠKE NELINEARNOSTI

Dominantna primena digitalnih metoda, instrumenata i sistema u savremenim merenjima povećala je zahteve za linearnošću karakteristika mernih pretvarača. Idealno linearne karakteristike kod realnih mernih pretvarača ne egzistiraju. Nelinearnost, karakteristika pretvarača, najčešće se modeluje eksponencijalnim ili polinomijalnim redovima [4]. Pored velikog broja pasivnih i aktivnih analognih metoda i šema široka primena digitalnih mernih sistema dovela je do razvoja digitalnih tehnika linearizacije. Jednostavni postupci obuhvataju nekada veoma popularno pretraživanje tabela upisanih u ROM memoriju ili dovitljivo korišćenje modifikovanog kola analogno digitalnog konvertora [5]. Digitalne metode koje koriste softverske pakete, razvijene u skladu sa odgovarajućim matematičkim modelom, stalno se unapređuju zahvaljujući napretku računarski baziranih mernih sistema u brzini procesiranja i memorijskom kapacitetu. U literaturi se, generalno, sreću dve varijante softverske linearizacije MPS:

- prenosna funkcija pretvarača je egzaktno poznata, a algoritam za linearizaciju se svodi na određivanje inverzne funkcije,
- opšti oblik prenosne funkcije pretvarača je nepoznat, a za linearizaciju se primenjuju interpolacione formule uz korišćenje tri ili više kalibracionih tačaka.

Teorijski deo ovog rada posvećen je analizi softverskih tehnika linearizacije u slučaju kada je opšti oblik prenosne funkcije pretvarača nepoznat i to kalibracija i linearizacija u tri tačke, opisana u odeljku 2.1, i kalibracija i linearizacija u više tačaka, izložena u odeljku 2.2. Kalibracija i linearizacija u više tačaka obuhvatila je analizu mogućnosti metode linearizacije uz pomoć polinoma i metode višeintervalne linearne aproksimacije, koje su opisane u odeljcima 2.2.1 i 2.2.2, respektivno. Razvijeni algoritmi primenjeni su na specifičan slučaj mernih pretvarača sile sa tenzometarskim trakama (MPS sa TMT) visoke klase tačnosti sa veoma malim početnim greškama nelinearnosti, koji se koriste u konstrukciji elektrodinamometara i elektronskih vaga. Osnovni, eksperimentalno verifikovan, rezultat je smanjenje greške nelinearnosti klasičnih MPS primenom softverskih metoda što je, u formi kombinacije računarskih simulacija i realnih eksperimentalnih rezultata, prikazano u 3. odeljku.

2.1. Kalibracija i linearizacija u tri tačke

Neka je prenosna funkcija mernog pretvarača data relacijom

y = f(x) (1)

gde x predstavlja merenu fizičku veličinu, a y izlazni električni signal. Uvedimo funkciju oblika [6]:

$$V(y) = C_0 + \frac{C_1 \cdot y}{1 + C_2 \cdot y} \qquad (2)$$

u kojoj parametri C0 , C1 i C2 služe za korekciju greške nule, greške opsega i greške nelinearnosti, respektivno. Ovi se parametri mogu izračunati na osnovu merenja u tri kalibracione tačke(u nuli x=0 ; na kraju opsega x=xm i na polovini punog opsega x=xm/2):

L = f(x=0) ; H = f(x=xm) ; M = f(x=xm/2) (3)

Ako se uvedu i pomoćni parametri za kontrolu nule n=V(L) i opsega d=V(H)-V(L) mogu se parametri C0 , C1 i C2 izračunati po sledećim formulama:

$$C_2 = \frac{H + L - 2M}{H(M - L) - L(H - M)} \qquad (4)$$

$$C_1 = \frac{(H - M)(M - L)(H - L)d}{\left[H(M - L) - L(H - M)\right]^2} \qquad (5)$$

$$C_0 = n - \frac{L(H - M)d}{H(M - L) - L(H - M)} \qquad (6)$$

Izložena metoda je relativno jednostavna za primenu, pruža mogućnost istovremene kontrole nule i osetljivosti, uz mogućnost kompenzacije greške nelinearnosti. Privlačnu perspektivu pruža primena metode u multisenzorskom načinu rada. Ponovna kalibracija je brza i jednostavna, a metoda je posebno pogodna kod sistema za akviziciju koji integrišu više različitih pretvarača na jednom mestu.

Prikazana metoda ima smanjenu efikasnost u slučaju kada greška nelinearnosti unutar opsega merenja menja znak, jer se greška nelinearnosti primenom ove metode u jednom delu mernog opsega smanjuje, a u drugom delu mernog opsega povećava (ovo je posledica činjenice da je C2=const. u celom opsegu merene veličine). Ovaj nedostatak se može umanjiti vodeći računa o znaku greške nelinearnosti ili podelom opsega merenja na odgovarajuće intervale. Ipak, u takvom slučaju, metoda gubi od svoje osnovne privlačnosti – jednostavnosti primene.

2.2. Kalibracija i linearizacija u više tačaka

Egzaktan oblik funkcije definisane jednačinom *y*=f(*x*), u opštem slučaju, nije poznat, a raspolaže se eksperimentalnim numeričkim podacima o veličinama *xi* i *yi* (i=1, 2, 3, … n) u n kalibracionih tačaka. Radi se zapravo o određivanju empirijske formule pa se problem svodi na određivanje tipa funkcije, a zatim sračunavanje parametara u cilju dobijanja jedne sasvim određene funkcije koja će najbolje odgovarati numeričkim podacima uz željenu tačnost aproksimacije. Formulisani problem nije jednoznačno određen i može se rešavati različitim metodama interpolacije (Lagranž, Njutn, Berštajn, Čebišev) [7].

2.2.1. Linearizacija uz pomoć polinoma

Prema Vajerštrasovoj teoremi, ako je funkcija f(x) neprekidna u intervalu [a,b] tada postoji polinom P(x) takav da je u svim tačkama [a,b] zadovoljena nejednakost $|f(x) - P(x)| < \varepsilon$, gde je $\varepsilon>0$ proizvoljno mali broj. Polazeći od ove teoreme moguće je primeniti metod polinomijalne regresione analize (aproksimacije) kod koga je tip empirijske funkcije polinom m-tog stepena

$$y = P(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + ... + a_m x^m \tag{7}$$

Parametri konkretne funkcije a_0, a_1, … a_m odrediće se po metodi najmanjih kvadrata kod koje je suma:

$$S = \sum_{I=1}^{n} \left[a_0 + a_i x_i + ... + a_m x_i^m - y_i\right]^2 \tag{8}$$

minimalna (parcijalni izvodi su jednaki nuli). Polinom m-tog stepena, m<n, gde je n broj kalibracionih tačaka, omogućava aproksimaciju funkcije zadate kalibracionim eksperimentalnim numeričkim podacima (x_i,y_i) sa minimalnom srednjekvadratnom greškom:

$$Esk = \left[\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 / (n+1)\right]^{1/2} \tag{9}$$

U slučaju kada je m=n, regresiona analiza se svodi na običnu interpolaciju kod koje je vrednost funkcije za $x=x_i$ tačno jednaka numeričkoj vrednosti y_i , pa je i srednjekvadratna greška Esk=0.

Ako su date koordinate tačaka (x_i,y_i) (i=0,1,...,n), neke funkcije f(x), pri čemu su vrednosti x_i međusobno različite, tada postoji jedan i samo jedan polinom Ln(x) stepena najviše n koji zadovoljava uslove Ln(x_i)=y_i (i=0,1,...,n), i ako je on određen formulom

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^{n} y_i \cdot \frac{(x-x_1)\cdot(x-x_2)\cdots(x-x_{i-1})\cdot(x-x_{i+1})\cdots(x-x_n)}{(x_i-x_1)\cdot(x_i-x_2)\cdots(x_i-x_{i-1})\cdot(x_i-x_{i+1})\cdots(x_i-x_n)} \tag{10}$$

onda se Ln(x) naziva Lagranžeov interpolacioni polinom funkcije f(x). Ako su čvorovi interpolacije udaljeni jedan od drugog za istu vrednost h, odnosno ako je $x_i=x_0+ih$ (i=0,1,...,n), onda se Lagranžeov interpolacioni polinom može svesti na prvi, odnosno drugi Njutnov interpolacioni polinom.

Odgovor na pitanje da li će izabrani polinom sa željenom tačnošću aproksimirati funkciju u celom intervalu $[x_0,x_n]$ zavisi, međutim, od prirode funkcije greške nelinearnosti i broja i rasporeda kalibracionih tačaka. Jasno je da se tačnost aproksimacije povećava sa povećanjem broja kalibracionih tačaka. Rad sa veoma velikim brojem kalibracionih tačaka u praksi je nepraktičan ili povezan sa određenim problemima realizacije pa, uvek, treba računati na neku realnu grešku aproksimacije.

2.2.2. Višeintervalna linearna aproksimacija

Ukoliko primena polinoma rezultira neprihvatljivo velikom greškom aproksimacije preporučuje se primena:

- višeintervalne aproksimacije, kod koje stepen interpolacionog polinoma ne zavisi od broja kalibracionih tačaka, a greška aproksimacije monotono teži nuli sa povećanjem broja kalibracionih tačaka,
- "Splain"–aproksimacija koja, pored neprekidnosti funkcije $y=y(x)$ i uslova $y_i=y(x_i)$, obezbeđuje i neprekidnost izvoda funkcije u tačkama kalibracije (najčešće se primenjuje kubni-splain koji obezbeđuje neprekidnost prvog i drugog izvoda).

Kao specijalan slučaj, koji daje dovoljno dobre rezultate kod praktične primene u oblasti inteligentnih mernih pretvarača i elektronskih vaga, daju se jednačine za višeintervalnu linearnu aproksimaciju. Zadat je niz kalibracionih tačaka svojim koordinatama (x_1,y_1), (x_2,y_2), ..., (x_n,y_n). Ako je x u intervalu $[x_i,x_{i+1}]$, koristeći se linearnom interpolacijom i jednačinom prave kroz tačke (x_i,y_i) i (x_{i+1},y_{i+1}) može se, približno, izračunati y=f(x) po jednačini

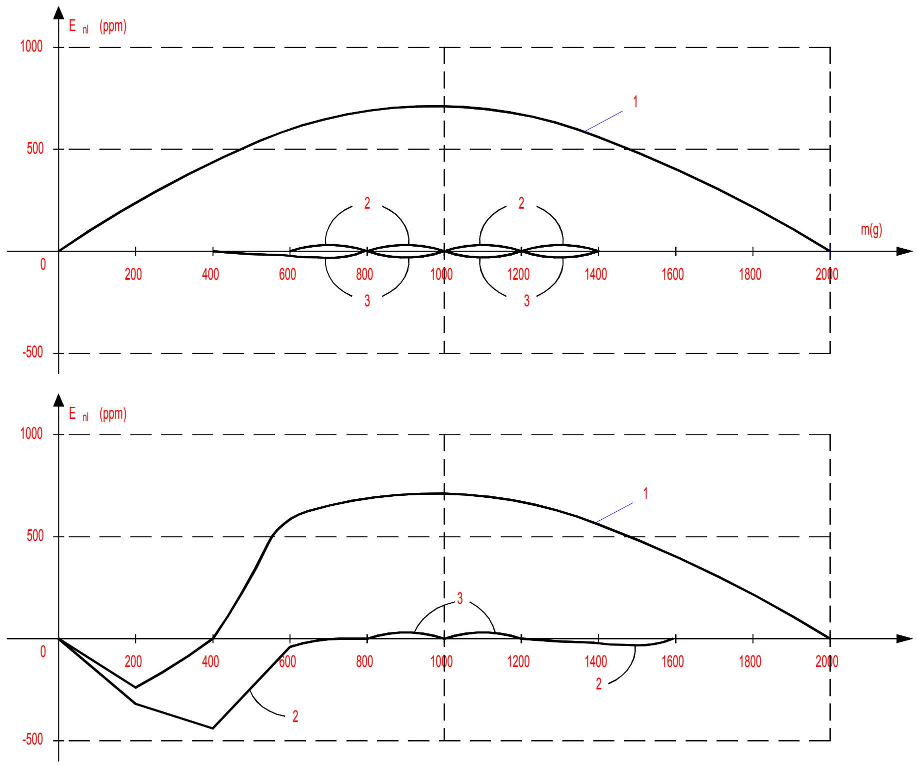
$$y = y_i + \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot \left(x - x_i\right) \tag{11}$$

Ukoliko je $x<x_1$, koristi se jednačina prave kroz tačke (x_1,y_1) i (x_2,y_2), a ako je $x>x$n, koristi se jednačina prave kroz tačke (x_{n-1},y_{n-1}) i (x_n,y_n) (linearna ekstrapolacija).

3 SIMULACIJE I EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Veoma male početne greške nelinearnosti (manje od 1000 ppm) su specifičnost MPS sa TMT visoke klase tačnosti. S obzirom da na grešku nelinearnosti utiču brojni izvori, problem "najbolje" interpolacione formule se ne može postaviti uopšteno već se može govoriti o najpodesnijoj metodi za rešenje konkretnog zadatka. Zato što se interpolacione formule moraju analizirati i sa gledišta mogućnosti realizacije na računskim mašinama, gde se, obično, za merilo efikasnosti uzima jednostavnost njihove realizacije uz postizanje zadate tačnosti, u prethodnom teorijskom delu rada je dat relativno širok okvir za istraživanja u ovoj oblasti: kalibracija i linearizacija u tri tačke i kalibracija i linearizacija u više tačaka.

Sa slike 3a, gde kriva zavisnosti funkcije greške nelinearnosti od merene mase, $E_{nl}=f(m)$, ima oblik parabole, vide se velike mogućnosti metode kalibracije i linearizacije u tri tačke. U slučaju kada funkcija greške nelinearnosti (kriva 1 na slici 3.) menja znak, kao što je prikazano na slici 3b, ova metoda ne daje dobre rezultate i znatno je nepovoljnija od metode višeintervalne linearne interpolacije.



Slika 3 - Komparativna analiza metoda linearizacije

a) greška nelinearnosti je pravilnog, paraboličnog oblika, b) greška nelinearnosti menja znak; oznake na slici: 1- kriva greške nelinearnosti, 2- rezultati primene metode linearizacije u tri tačke, 3- rezultati primene metode višeintervalne linearne interpolacije.

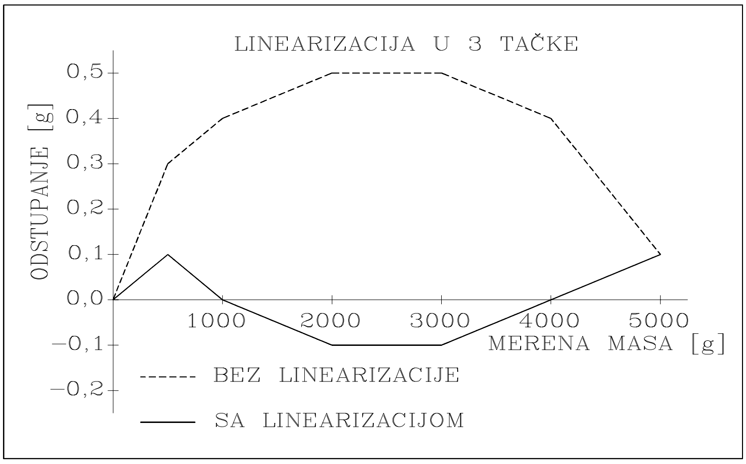
Na slici 4 prikazani su dijagrami zavisnosti greške nelinearnosti od merene mase i rezultat linearizacije klasičnog MPS sa TMT, za opseg od 5000g, klase C3, čija je greška nelinearnosti po prirodi parabolična, a po amplitudi iznosi maksimalno 0.5g (relativno oko 100ppm u odnosu na opseg). Primenom metode kalibracije i linearizacije u tri tačke, uz korišćenje jednačina (1) do (6), greška nelinearnosti je smanjena oko pet puta (ispod 20ppm) čime je značajno povećana klasa tačnosti inteligentnog MPS, odnosno elektronske vage.

4 ZAKLJUČAK

Pojam inteligentne instrumentacije vezuje se za uređaje koji u mernom procesu efikasno kompenzuju greške merenja, vrše samotestiranje, dijagnostiku otkaza i komuniciraju unutar složenih merno–informacionih sistema. Osnovni, eksperimentalno verifikovan, rezultat prikazan u radu je smanjenje greške nelinearnosti klasičnih MPS primenom softverskih metoda što je prikazano u formi kombinacije računarskih simulacija i realnih eksperimentalnih rezultata.

U slučaju kada funkcija greške nelinearnosti menja znak, metoda kalibracije i linearizacije u tri tačke ne daje dobre rezultate nepovoljnija je od metode višeintervalne linearne interpolacije. Primenom metode kalibracije i linearizacije u tri tačke greška nelinearnosti klasičnog MPS sa TMT, za opseg od 5000g, klase C3, čija je greška nelinearnosti po prirodi parabolična, je smanjena oko pet puta (ispod 20ppm) čime je značajno povećana klasa tačnosti inteligentnog MPS, odnosno elektronske vage.

Od velikog broja potencijalnih fizičkih principa koji se mogu koristiti za realizaciju mernih pretvarača mnogi su bili zapostavljeni zbog nedostataka (nelinearnost, temperaturne karakteristike) koji primenom softverske kompenzacije mogu biti znatno ublaženi. Uvođenje koncepta inteligencije znatno proširuje istraživački horizont u oblasti razvoja i proizvodnje senzora i mernih pretvarača.



Slika 4. Dijagrami greške nelinearnosti: klasičnog MPS, u opsegu od 5000g, klasa C3 (crtkasta linija) i inteligentnog MPS uz primenu metode linearizacije u tri tačke (puna linija).

LITERATURA

[1] D.Kovačević, "Inteligentni merni pretvarači sile na bazi tenzometarskih traka", doktorska disertacija, Elektronski fakultet Niš, Niš, 1999.

[2] L.Finkelstein, "Intelligent and knowledge based instrumentation – An examination of basic concepts", Measurement, Vol. 14, No. 1, 1994.

[3] J.Brignell, N.White, "Intelligent Sensor Systems", Institute of Physics Publishing, Bristol, 1996.

[4] D.Patranabis, S.Ghosh, C.Bakshi, "Linearizing Transducer Characteristics", IEEE Tran. on Instr and Meas.. Vol. 37, No. 1, 1988.

[5] G.Iglesias, E.Iglesias, "Linearization of Transducer Signals Using an Analog to Digital Converter", IEEE Tran. on Instr. and Meas. Vol. 37, No. 1, 1988.

[6] W.T.Bolk, "A General Digital Linerising Method for Transducers", Phys. E: Sci. Instrum. Vol. 18, 1985.

[7] S.Stearns, R.David, "Signal Processing Algorithms", Prentice Hall, NJ, 1988.

Abstract: Software has become the key resource in the transducer error compensation measurement, particularly in the field of intelligent systems. Nonlinearity error software compensation technics, as three-point and multiple-point methods, are outlined. Nonlinearity error of a high accuracy strain gauge based load cell was sagnificantly reduced (from 100ppm to 20ppm) by software compensation.

Keywords: *intelligent measurement transducer, nonlinearity error, software compensation.*

SOFTWARE COMPENSATION OF TRANSDUCER NONLINEARITY ERROR

Dragan Kovačević, Slobodan Škundrić, Srboljub Vukovojac