

XI. PRILOG RAZVOJU SAVREMENIH MERILA SILE I MASE

Poglavlje o merenju sile i mase tenzometarskim trakama posvećeno je višedecenijskom istraživanju i razvoju ove oblasti u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“ u Beogradu. Pored teorijskih razmatranja i opisa najdelikatnijih kompenzacionih metoda za smanjenje greške puzanja mernih pretvarača sile na bazi tenzometarskih traka, u radu su prikazani i neki primeri praktičnih realizacija merenja sile i mase električnim putem.

XI.1 UVOD

Metrologija, nauka o merenjima, i instrumentacija kojom se ta merenja obavljaju su osnova prirodnih nauka i 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 element istraživanja i razvoja u svakoj vrsti praktične delatnosti pa i kod merenja sile i mase električnim putem.

Sila kao fizička veličina predstavlja jednu od najznačajnijih manifestacija prirode. Njena spoznaja i praktično korišćenje u velikoj meri je određivalo tokove razvoja civilizacije. Merenje sile imalo je u tome važnu ulogu, danas pogotovo. Razvojem nauke i tehnologije prošireni su i pooštreni zahtevi u pogledu mernog opsega i tačnosti merenja sile. Skoro da nema oblasti ljudske delatnosti, od nauke, privrede, sporta i medicine gde nije zastupljeno merenje sile. Usko sa ovim povezano je i merenje mase.

Vaganje je važna i kompleksna oblast metrologije. Danas se pod vaganjem podrazumeva merenje mase. U vrlo (dugom periodu, vagao se teret, odnosno merila težina. Izrazi "masa i težina", kao i niz drugih metroloških pitanja vezanih za vage i vaganje, zaslužuju detaljnija razjašnjenja koja se mogu naći u stručnoj literaturi [1].

Najbolje što tehnika i tehnologija mogu da ponude iz oblasti konstrukcije i materijala, nalazi primenu u merenju i vagarstvu. Od vankada su se ovom problematikom bavili najugledniji naučnici. U starom veku problemima vaganja i vaga bavili su se: Aristotel, Euklid i Arhimed, a u novom veku mnogi poznali naučnici, među njima Leonardo da Vinči, Galilej, Kepler, Njutn, Gaus, Ojler, Mendeljejev i dr. Vage i vaganje su vrlo rano prerasle osnovni tehnički značaj i postale civilizacijska tekovina i interes najšireg sloja ljudi. To se vidi i kroz širinu leksičke upotrebe glagola vagati. Važu se ne samo masa i sila, već i dela, reči, osećanja, nagrade, kazne i dr. Vage su simbol tačnosti i pravednosti. Pored ovih opšteprihvaćenih značenja, vage imaju i tajanstveno - mistično značenje. Mitološko, božansko značenje vaga verovatno je i izdvojilo ovo merila od svih drugih. Sa vagama se susrećemo neposredno po rođenju, a lično i profesionalno tokom celog života. Kupuje se i prodaje, proizvodi i istražuje, analizira i zaključuje prema pokazivanju vaga.

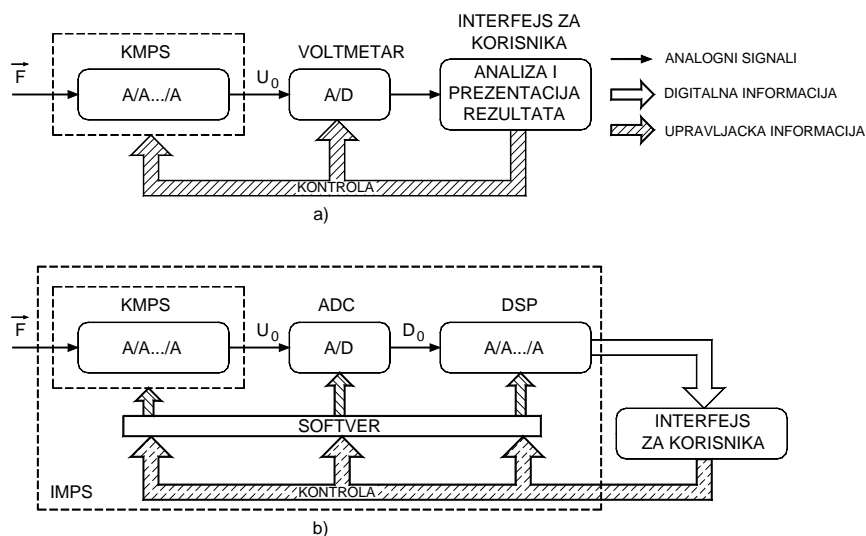
Vage i vaganje staro je koliko i civilizacija, što znači oko deset hiljada godina. Sve do sredine prošlog veka bile su to uglavnom mehaničke vage. Princip rada mehaničkih vaga je u osnovi vrlo jednostavan i očigledan, ali su vage i vaganje oduvek predstavljali nešto posebno.

Pojava elektromehaničkih (mehanotronskih) vaga podstaknuta je pre svega razvojem informatičke tehnologije. U razmaku od samo desetak godina ove vage su skoro u potpunosti istisnule mehaničke vage. Princip rada ovih vaga bazira se na merenju sile električnim putem. To podrazumeva primenu mernih pretvarača sile (MPS), koji mehaničku silu transformišu u korespondentnu električnu veličinu (napon,

struju, učestanost). Postoje zaista mnogo različitih vrsta MPS. Zbog dobrih mernotehničkih karakteristika, ali i povoljnog odnosa kvaliteta i cene, MPS na bazi elektrootpornih tensometarskih traka (strain gage) postali su dominantan koncept merenja sile i mase električnim putem.

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" bavi se problematikom merenja sile i mase električnim putem već četrdeset godina u kontinuitetu. Ovaj za tehniku ne mali vremenski period obeležen je mnogobrojnim rezultatima i uspesima u rešavanju vrlo delikatnih i složenih metroloških problema merenja mase i sile električnim putem.. Počelo se sa razvojem prvih analognih elektrodinamometara za potrebe sportista i stomatologa, a stiglo se do multifunkcionalnih virtuelnih vaga i elektrodinamometara. Greške merenja prvih elektrodinamometara bile su reda 2%, a danas se u Institutu merenje sile i mase u vrlo širokom mernom opsegu (od 1N do 1MN i od 100 g do 100 t) ostvaruje sa greškom manjom od 0,02%. Prostor i namena ovog rada ne omogućavaju da se prikažu sva pažnje vredna dostignuća, tehnička rešenja i patenti. U radu se razmatraju samo neki od ključnih problema razvoja i primene merne elektrodinamometara i elektromehaničkih vaga. U poglavlju 2 prikazana su dve originalne metode (jedna hardverska i jedna softverska) kompenzacije greške puzanja (creep) MPS. U poglavlju 3 razmatran je problem merenja sile i mase sa proširenim mernim opsegom. U poglavlje 4 prikazana su neka savremena originalna rešenja elektromehaničkih vaga razvijena u Institutu za konkretne potrebe korisnika.

Kao uvod u problematiku MPS i materije razmatrane u ovom radu poslužiće blok šema na slici 1, gde se na nivou blok šema može sagledati principijelne razlike između klasičnih MPS (slika 1.a) i inteligentnih MPS (slika 1.b).



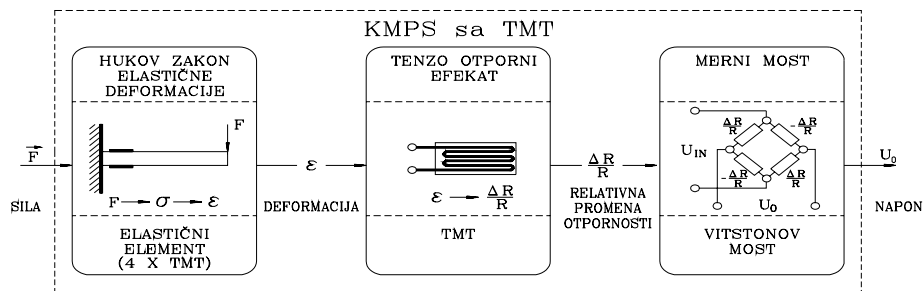
Sl. 1. Strukturni model: (a) klasičnih MPS (KMPS) i (b) inteligentnih MPS (IMPS).

Klasični MPS sa tenzometarskim trakama (TMT) integrišu čitav niz transformacija analognih (A/A) fizičkih veličina: silu (masu) u mehanički napon, mehanički napon u elastičnu deformaciju, elastičnu deformaciju u promenu električne otpornosti, promenu otpornosti u promenu intenziteta električnog napona [2]. 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) obavljaju 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 1.b, mnogo složeniju strukturu od klasičnih MPS, u kojoj se uočava prisustvo i analognih i digitalnih (informacioni i upravljački) signala kao i hardverskih i softverskih struktura [3].

Na slici 2. dat je fenomenološki i strukturni model klasičnog MPS sa TMT. MPS sa TMT je složen elektromehanički merni sistem koji, u sebi, objedinjuje transformacije nekoliko fizičkih veličina: silu F u mehaničko naprezanje σ , odnosno deformaciju ε (R. Hooke, 1678.), deformaciju ε u relativnu promenu električnog otpora $\Delta R/R$ (W. Thomson alias Lord Kelvin, 1856.), potom promenu otpora $\Delta R/R$ u promenu električnog napona U (C. Wheatstone, 1843.). Mada su fizički zakoni koji leže u osnovi funkcionisanja klasičnih MPS sa TMT poznati već više od jednog veka, praktične realizacije ovih fenomena počinju tek sredinom prošlog veka.



Sl. 2. Fenomenološki i strukturni model klasičnog MPS sa TMT.

Osnovna funkcija MPS je transformacija sile u električni signal odnosno digitalni kod (informaciju). Specifičnost ovog merenja je da se sila kao ulazna vektorska veličina F izražava pomoću skalarne veličine, vrednošću intenziteta električnog napona U_0 , odnosno brojem digitalnih podeljaka D_0 . Iz ove činjenice proizilazi i veliki broj problema vezanih za raspodelu i prenos dejstva merene sile. Napadna tačka sile i prisustvo parazitnih sila i momenata imaju značajnog uticaja na tačnost merenja sile [4]. Takođe i ambijentni uslovi, pre svih temperatura, utiču na merni signal MPS [5].

Pojednostavljeno klasični MPS se sastoji od: elastičnog elementa [6], TMT i Vitstonovog mosta. Realno tu je još ceo niz konstruktivnih mehaničkih elemenata koji omogućavaju prihvatanje i vođenje merene sile, sprečavanje parazitnih sila i momenata, zaštitu MPS od negativnih spoljnjih uticaja (temperature, pritiska, vlage), ali i od mehaničkih udara i preopterećenja. Tu su još i dodatni elektronski elementi za temperaturnu kompenzaciju nule i osetljivosti MPS [7].

XI.2. KOMPENZACIJA GREŠKE PUZANJA

Istraživanja merno-tehničkih karakteristika MPS pokazuje da je karakteristika puzanja, definisana varijacijom mernog signala tokom vremena pri opterećenju sa konstantnom silom, predstavlja limitirajuću karakteristiku u podizanju tačnosti merenja sile i mase. Zato je kompenzacija greške usled puzanja od suštinskog značaja za problematiku MPS. U razvoju MPS u Institutu, ovom metrološkom problemu je posvećena posebna pažnja, što je rezultiralo i značajnim rezultatima na planu podizanja tačnosti merenja sile i mase [8],[9].

Kao i svaki drugi skup ideja i tehnike kompenzacije grešaka MPS mogu se klasifikovati na različite načine. Za potrebe ovog rada prihvaćiće se podela na tri klase kompenzacije [10]:

- 1) Konstruktivna kompenzacija,
- 2) Naknadna kompenzacija, i
- 3) Monitorska kompenzacija.

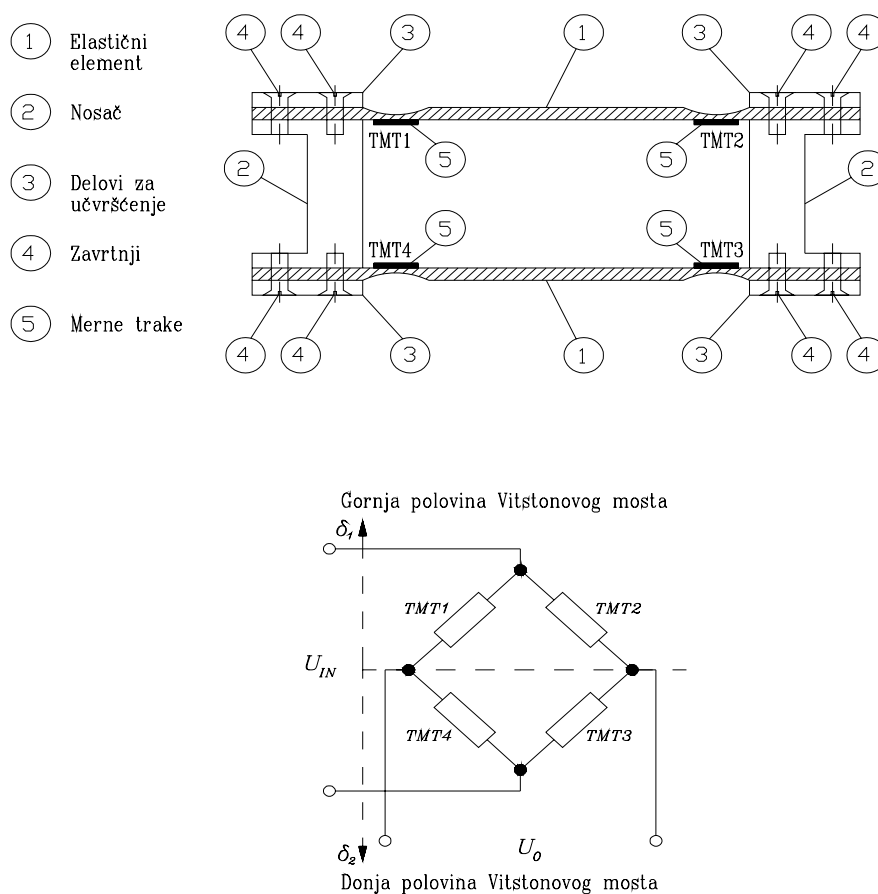
1. Konstruktivna kompenzacija se odnosi na tradicionalni oblik kompenzacije senzora i mernih pretvarača i obuhvata načine fizičke organizacije i realizacije u cilju maksimiziranja osetljivosti MP na dejstvo merene veličine i smanjenje uticaja remećućih veličina. Osnovna manifestacija konstruktivne kompenzacije je princip simetrije koji se sreće kod izrade klasičnih MPS. Princip simetrije primenjuje se kako u konstrukciji mehaničke strukture tako i u električnom delu klasičnog MPS. Konstruktivna kompenzacija primenjuje se uobičajeno za smanjenje greške nelinearnosti, smanjenje parazitnih osetljivosti, ali i za korekciju greške puzanja.

2. Posle primene konstruktivne kompenzacije na nivou dizajna ostaju neizbežni efekti višeg reda koji se pojavljuju kao zaostale greške čija veličina varira između pojedinačnih individualnih senzora pošto oni prođu proizvodni proces. Metode koje se primenjuje neposredno na svakom pojedinačnom senzoru u cilju daljeg smanjenja preostalih grešaka spadaju u klasu naknadne kompenzacije. Kao izražen predstavnik ove klase kompenzacije u trećoj glavi će se prikazati kompenzacija uticaja temperature na nulu i osetljivost klasičnih MPS sa TMT. Greška puzanja klasičnih MPS je specifičan primer kod koga se, nakon više ili manje uspešne strukturne kompenzacije, samo specijalnim merama može sprovesti naknadna kompenzacija. O originalnim rešenjima ovog problema biće više reči u tekstu koji sledi.

3. Treća klasa kompenzacionih metoda, monitorska kompenzacija, je imanentna konceptu inteligentnih MPS. Ako je problem, što generalno i jeste, temperaturni uticaj na karakteristike MPS, inteligentan pristup je da se meri temperatura i greške usled temperature numerički koriguju na osnovu podataka dobijenih u procesu kalibracije. Osnovno oruđe ove kompenzacije je, prema tome, višesenzorski način rada. Višesenzorski način rada može se, u principu, uspešno primeniti i na kompenzaciju najvećeg broja drugih uticajnih fizičkih veličina.

X1.2.1. Metoda uparivanja polumostova

Metoda upravljanja polumostova je originalno rešenje razvijeno u Institutu sa ciljem da se, pored konstruktivne, omogući i naknadna kompenzacija greške puzanja dp MPS platformskog tipa [11]. Platformski pretvarači predstavljaju posebnu klasu pretvarača koje odlikuje visoka neosetljivost na parazitne sile i momente. Zahvaljujući ovoj osobini, moguće je realizovati elektromehaničke vage sa samo jednim pretvaračem na mernoj platformi. Pored osnovne ideje o jednostavnijoj mehaničkoj obradi pojedinih delova MPS za konstrukciju prikazanoj na slici 3., postignute su i druge značajne pogodnosti. Postavljanje, lepljenje i ožičavanje traka je neuporedivo lakše i kvalitetnije nego kod drugih konstrukcija MPS. Za merne gibnjeve, od kojih u prvom redu zavise merne karakteristike MPS, može se koristiti materijal posebnog kvaliteta, dok se za ostale delove MPS koristi standardni konstrukcioni materijal.



Sl. 3. MPS sa TMT iz više delova a) konstrukcija, b) električna šema (δ_1 je greška puzanja gornje polovine mosta (TMT1 i TMT2) a δ_2 je greška puzanja donje polovine mosta (TMT3 i TMT4)).

Prva serija pretvarača je bila bazirana na specijalnom čeliku “Thermelast 4002” firme “Vakuumschmelze”, a kasnije je ovaj specijalni i vrlo skupi materijal uspešno zamenjen čelikom domaće produkcije. Korišćene su metalne folijske TMT različitih proizvođača i različitih tipova (Hottinger, tip LG11-3/350 i LG11-6/350; BLH, tip FAQ-18S-35SGL; Vishay, tip MA-06-T007X-350 i TK-06-T008X-350, gde X označava odgovarajući kod puzanja).

Izrada pretvarača od više delova, pri čemu svaki gibanj nosi dve TMT koje čine polovinu Vitstonovog mosta, ukazala je na mogućnost podešavanja puzanja metodom upravljanja polumostova. Studijom puzanja moguće je projektovati pozitivno i negativno puzanje MPS već samim izborom tipa TMT. Takođe je poznato da puzanje varira, kako zbog nesavršenosti tehnološkog postupka, tako i zbog promenljivosti tehnoloških parametara. Polumostovi (gibnjevi) će svaki pojedinačno imati određenu osetljivost O_i , i puzanje δ_i izmereno u odnosu na referentni polumost. Osetljivost i puzanje referentnog gibnja (r) može se odrediti na bazi tri merenja osetljivosti i puzanja u kombinaciji sa dva gibnja (a) i (b). Neka je prvo merenje kombinacija gibnja (a) i referentnog (r). Merenjem je utvrđena osetljivost O_1 i greška puzanja δ_1 . Drugo merenje

(O_2 I δ_2) predstavlja kombinaciju gibnja (r) i gibnja (b) dok je treće meranje (O_3 I δ_3) kombinacija gibnjeva (a) I (b). Na osnovu ova tri merenja, mogu se izračunati vrednosti osetljivosti i puzanja za svaki gibanj pojedinačno, prema jednačinama:

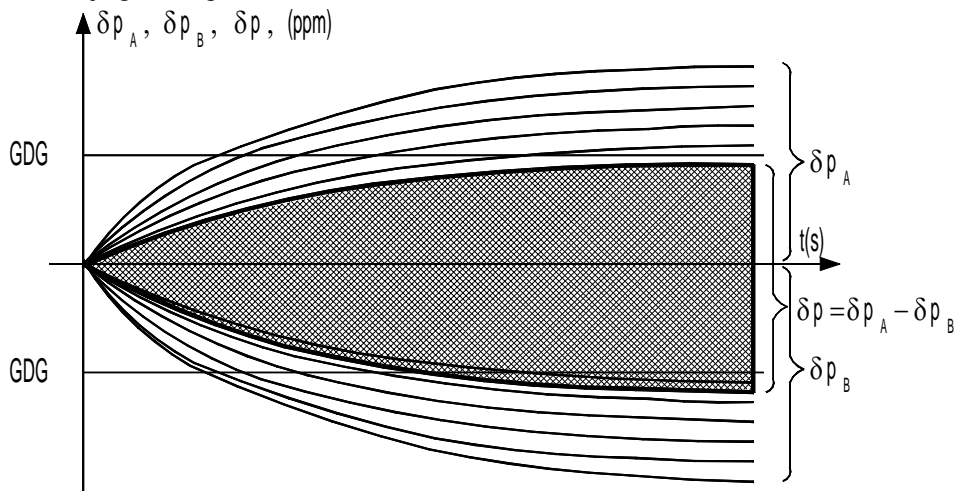
$$O_r = \frac{O_1 + O_2 - O_3}{2} \dots O_a = \frac{O_1 + O_3 - O_2}{2} \dots O_b = \frac{O_2 + O_3 - O_1}{2} \quad (1)$$

$$\delta_r = \frac{O_1\delta_1 + O_2\delta_2 - O_3\delta_3}{O_1 + O_2 - O_3} \dots \delta_a = \frac{O_1\delta_1 + O_3\delta_3 - O_2\delta_2}{O_1 + O_3 - O_2} \dots \delta_b = \frac{O_2\delta_2 + O_3\delta_3 - O_1\delta_1}{O_2 + O_3 - O_1} \quad (2)$$

Značajno pojednostavljenje jednačina (1) i (2) se postiže ako se uzme da je $O_1=O_2=O_3$ Ova pretpostavka je inače i sasvim realna (u praksi pojedinačne osetljivosti se međusobno ne razlikuju za više od 1%). Čak i međusobne razlike od 10% osetljivosti uticale bi tek u drugom redu veličine na veličine grešaka puzanja. Tako se umesto jednačine (2) mogu koristiti jednačine

$$\delta_r = \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \dots \delta_a = \delta_1 + \delta_3 - \delta_2 \dots \delta_b = \delta_2 + \delta_3 - \delta_1 \quad (3)$$

Greške puzanja, određene jednačinama (3) za svaki gibanj pojedinačno, pružaju mogućnost izbora gibnjeva čija kombinacija daje smanjeno puzanje kompletnog MPS, kao što je grafički prikazano na slici 4.



Sl. 4. Grafički prikaz metode uparivanja polumostova: kombinacija polumosta sa pozitivnom greškom puzanja iz skupa δp_A sa polumostom sa negativnom greškom puzanja iz skupa δp_B daje MPS sa smanjenom ukupnom greškom puzanja δp .

Kompenzacionom metodom koja je opisana u ovom poglavlju ostvaruju se tri značajna efekta: 1. smanjenje škartu u proizvodnji MPS zbog toga što pojedini gibnjevi imaju puzanje veće od dozvoljenog za datu klasu tačnosti; 2. mogućnost visoko serijske izradu MPS i u tehnološkim uslovima koji nisu optimalni i 3. izrada MPS sa ekstremno malom greškom puzanja.

X1.2.2. Softverska kompenzacija greške puzanja

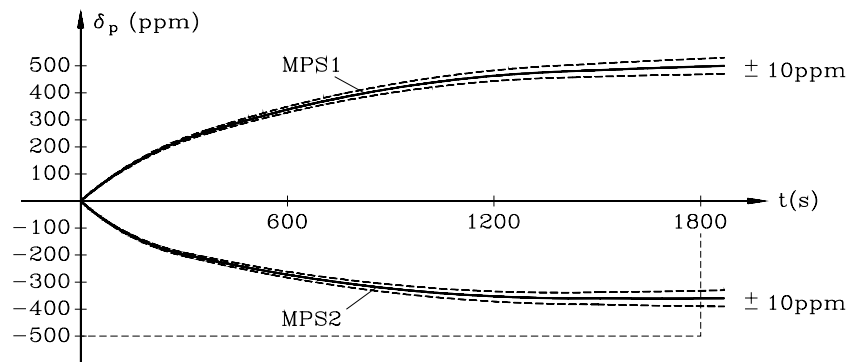
Na osnovu višegodišnjih istraživanja u Institutu [12], o prirodi i osobinama funkcije greške puzanja, za potrebe ovog rada, izneće se sledeće:

- Funkcija greške puzanja je funkcija više promenljivih : opterećenja (σ), vremena (t), temperature (T), predistorije opterećenja (h), vlažnosti (v) i efekata drugog reda (dr)

$$\delta_p = f(\sigma, t, T, h, v, dr) \quad (4)$$

Ovaj rad je ograničen na razmatranje dve najuticajnije promenljive, opterećenje σ i vreme t , uz pretpostavku da se druge promenljive mogu smatrati konstantnim.

- Funkcija greške puzanja je deterministička funkcija, sa dobrom ponovljivošću. Na slici 5. prikazani su rezultati ispitivanja ponovljivosti funkcije greške puzanja $\delta_p = f(t)$ slučajno izabranih uzoraka MPS. MPS₁, proizvodnje Hottinnger, Nemačka, ima pozitivnu grešku puzanja, a MPS₂, proizvodnje institut "Nikola Tesla", ima negativnu grešku puzanja. Ispitivanja sa primenjenom vrhunskom instrumentacijom pokazuju da se kod kvalitetnih klasičnih MPS, kao što je slučaj sa pomenutim MPS, standardna devijacija greške puzanja može proceniti na ± 10 ppm za sve tačke u toku vremenskog intervala od 30 minuta.



Sl. 5. Rezultati ispitivanja ponovljivosti funkcije greške puzanja $\delta_p = f(t)$ za dva različita MPS.

Teorijska razmatranja procesa mehaničke relaksacije, procesa termičke relaksacije i procesa viskoznog puzanja, kao i eksperimentalna istraživanja prirode greške puzanja izložena u prethodnom tekstu daju nam za pravo da pretpostavimo da se greška puzanja klasičnog MPS može korigovati uvođenjem jedne eksponencijalne funkcije F_k tipa [12]:

$$F_k = a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) \quad (5)$$

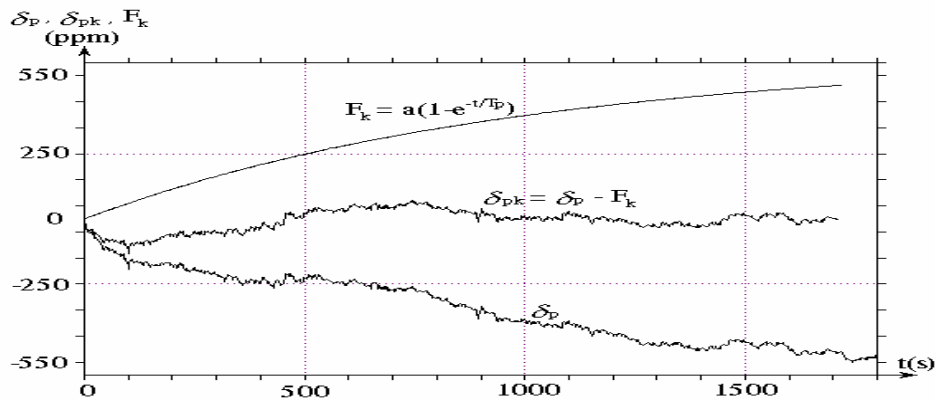
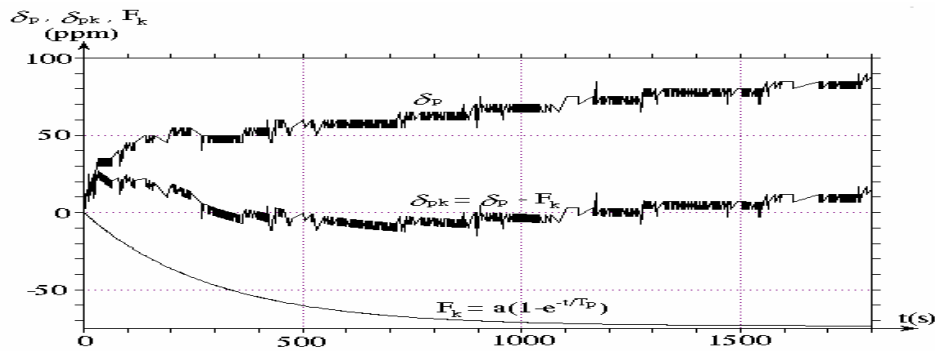
puzanja $\delta_{pk} = \delta_p - F_k$ bude minimalna.

Kao optimizacioni kriterijum primenjen je metod najmanjih kvadrata kod koga je minimizacija sume kvadrata odstupanja izvršena uz pretpostavku da je rasipanje rezultata posledica grešaka u merenju izlaznog signala sa MPS na bazi TMT. Hardverske i softverske strukture mernog sistema prikazanog na slici 10. su iskorišćene

za merenje greške puzanja δ_p , određivanje parametara a i T_p kompezacione funkcije F_k , kao i za određivanje kompenzovane greške puzanja δ_{pk} .

Primenljivost predloženog metoda je proveravana na dva različita tipa klasičnih MPS (različiti materijal elastičnog elementa, drugačije TMT, različita tehnologija izrade):

- MPS₁ sa TMT, japanske proizvodnje, tip C2G1-6K za nominalno opterećenje od 5kg, klase tačnosti C, sa 3000 podeoka.
- MPS₂ sa TMT, proizveden u Institutu "Nikola Tesla", tip MPS-2 za nominalno opterećenje od 2kg, klase tačnosti C, sa 1000 podeoka.



Sl. 8. Rezultati softverske kompenzacije greške puzanja primenom analitičke eksponencijalne funkcije: a) MPS₁, tip C2G1-6K: $\delta_{pmax} = 90ppm$, $a = 73.56ppm$, $T_p = 294.4s$, $\delta_{pkmax} = 30ppm$, b) MPS₂, tip MPS-2: $\delta_{pmax} = -550ppm$, $a = -621.4ppm$, $T_p = 981.2s$, $\delta_{pkmax} = -150ppm$.

Pretvarači su opterećivani konstantnim mehaničkim opterećenjem, tegovima klase M1, pod stabilnim normalnim uslovima spoljne sredine. Greška puzanja merena je pomoću digitalnog kompenzatora DK-38, rezolucije od 5ppm i kratkotrajne stabilnosti (48h) bolje od 10ppm. Digitalni kompenzator DK-38 i PC računar povezani su standardnim paralelnim interfejsom IEEE-488. Snimljene su kratkotrajne greške puzanja (u vremenskom intervalu od 30 minuta) i metodom najmanjih kvadrata određeni parametri funkcije $F_k(a, T_p)$:

- za MPS₁, tip C2G1-6K: $a = 73.56 ppm$ i $T_p = 294.4s$;
- za MPS₂, tip MPS-2: $a = -621.4ppm$ i $T_p = 981.2s$.

Sračunata greška puzanja δ_{pk} za virtuelne inteligentne MPS, date su na slikama 8.a i 8.b. Analiza rezultata pokazuje da je, u celom vremenskom intervalu od 1800s, δ_{pk} za više od tri puta manja od početne greške puzanja δ_p .

XI.3. MERENJE SILE I MASE SA PROŠIRENIM MERNIM OPSEGOM

U principu, merenje neke fizičke veličine u širokom opsegu merenja je složen metrološki zadatak [12], posebno ako se želi obezbediti približno ista tačnost u celom opsegu merenja. Širina mernog opsega direktno je povezana je sa širinom merne skale, rezolucijom i tačnošću merenja, a takođe i sa varijacijom greške usled uticajnih veličina. Rešenje ovog problema nije uvek samo promeni mernog opsega i skale na mernom instrumentu već se često zahteva i promenu mernog instrumenta pa i same metode merenja. Kod merenja električnih veličina kao na primer: struje i napona ovaj problem se relativno lakše rešava promenom opsega merenja, odnosno promenom otpornosti šenta ili predotpora. Ali čak i tu postoje ograničenja u pogledu širine mernog opsega. Za merenje vrlo velikih struja (reda kiloampera) potrebni su dodatni strujni merni transformatori, odnosno za merenje visokog napona (reda kilovolta) naponski merni transformatori. Merenje vrlo malih struja (reda pikoampera i malih napona reda mikrovolta) zahtevaju posebne merne instrumente i specijalne merne metode.

Kod merenja neelektričnih veličina električnim putem problem je još složeniji i a težina njegovog rešavanja varira od veličine do veličine i od slučaja do slučaja. Najčešće rešenje je u većem broju mernih pretvarača jedne fizičke veličine u električni signal različitog nazivnog opsega merenja, koji bi trebalo da se fizički menjaju tokom samog procesa merenja, a to najčešće i nije izvodljivo. Kada se radi o merenju mase i sile električnim putem u strukturi mernih uređaja pojavljuje dodatno i prijemnik mehaničke sile, odnosno opterećenja (mase), što dodatno usložnjava rešavanje problema merenja sile i mase u širem opsegu merenja.

Pre nego što se u radu izlože neke mogućnosti rešavanja ovog problema, trebalo bi pogledati: koliko je ovaj metrološki problem zaista realan i značajan? Kod savremenih instrumenata i uređaja za merenje električnih veličina, uglavnom postoji mogućnost automatske promene opsega merenja, što obezbeđuje veću tačnost i pouzdanost merenja, a rad sa takvim instrumentima je neuporedivo efikasniji i komforniji. Elektrodinometri, kidalice i prese imaju takođe potrebu merenja sile u širokom opsegu merenja. Tako ovi uređaji imaju po pravilu više mernih opsega sa nazivnim vrednostima koje stoje najčešće u odnosu 1: 2: 5: 10. Ako je realizacija jednog takvog uređaja za merenje sile sa jednim mernim pretvaračem sile (MPS), onda je teško moguće obezbediti istu tačnost za sve ove opsege merenja, obzirom da su metrološke karakteristike MPS definisane na opseg merenja. Slično je i sa vagama kod kojih se merenje mase bazira na merenju sile, odnosno na primeni MPS, najčešće sa tenzometarskim trakama. Primena više elektronskih vaga često je neizvodljiva kao što je to slučaju univerzalnog poštanskog šaltera, koji ima ograničen prostor i radnu površinu pulta pa jednostavno nema mesta za dve vage.

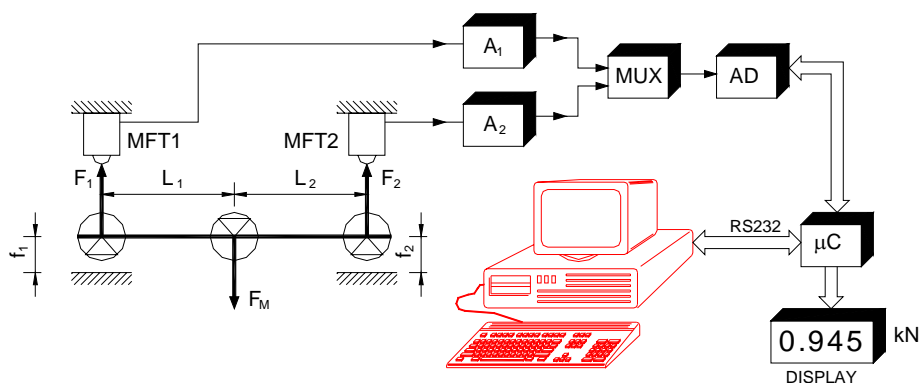
XI.3.1. Elektronski dinamometar sa više opsega merenja

Rešavanje nekog metrološkog zadatka u vidu realizovanog mernog uređaja ili instrumenta može se posmatrati iz više aspekata. Metrološkog aspekta, koji u prvom planu ima opseg, tačnost i efikasnost merenja, Operativni aspekt usmeren je primenljivost, pouzdanost i celovitost rešenja, jednostavnost rukovanja i održavanja realizovanog uređaja ili instrumenta. Rešenje se takođe može posmatrati sa fizičkog i ekonomskog aspekta, koji takođe utiču na kvalitet i uspešnost datog rešenja.

U rešavanju problema merenje sila u proširenom opsegu merenja postoje više mogućnosti. Jedna je primena jednog MPS takve klase tačnosti da isti i kod najnižeg opsega merenja još uvek ispunjava zahtevanu tačnost. Druga mogućnost jedan MPS sa redukcijom merene sile pomoću sistema poluga. Treća je mogućnost primene više MPS, pri čemu se merena sila dovodi na MPS odgovarajućeg opsega merenja. U ovom radu dat je prikaz rešenja elektrodinamometra sa dva MPS primenjenog na uređajima za merenje sile razvlačenja (kidalice). Klasa tačnosti ovih uređaja najčešće je I i II i definisana je relativnom greškom merenja u celom opsegu merenja. Širina mernog opsega ovih uređaja definisana odnosom minimalne i maksimalne merene sile iznosi i do 1: 100, pa je sasvim izvesno da se to ne može ostvariti samo sa jednim MPS.

U konkretnom primeru kidalice klase 1 za sile opsega merenja od 1kN do 100 kN primenjena su dva MPS nazivnih vrednosti: 10 kN i 100 kN. Standardno rešenje merenja sile istezanja sa dva MPS je ustvari merenje sa jednim odgovarajućim MPS koji se zaviso od očekivane merene sile priključuje u merno kolo. Ovakvo rešenje može da obezbedi zahtevanu tačnost merenja, ali je isto u operativnom smislu problematično, jer zahteva fizičku zamenu MPS, zbog čega se smanjuje efikasnost i pouzdanost merenja. Svako priključivanje MPS u elektronsko kolo mernog uređaja podrazumeva određeno vreme potrebno za stabilizaciju, podešavanje nule i kalibraciju uređaja.

Rešenje koje je primenjeno u konkretnom primeru kidalice prevazilazi ove probleme. Na slici 9. dat je blok dijagram uređaja za merenje sile razvlačenja sa dva MPS.



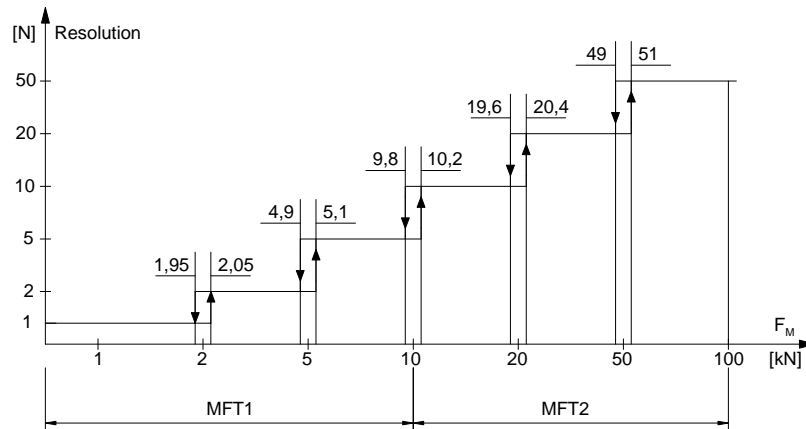
Sl.9. Blok šema elektronskog dinamometra sa dva MPS

Kao što se sa slike 9 može sagledati merena sila razvlačenja F_M istovremeno deluje na oba MPS izazivajući u istim sile reakcije F_1 i F_2 . Vrednosti ovih sila određene su odnosom krakova L_1 i L_2 . U slučaju kada je $L_1 = L_2$ biće jednake i ove sile, odnosno $F_1 = F_2 = F_M/2$. Kako su MPS različite nazivne sile odnosa 1:10, to će i ugibi f_1 i f_2 biti u istom odnosu. Konstruktivno se tako podesi da već preko 10 % preopterećenja MPS manje nazivne sile isti se osloni na postolje i tako se isključi iz daljeg opterećivanja. U statičkom smislu sistem grede sa dva oslonca postaje sada jedna poluga sa kracima L_1 i $(L_1 + L_2)$. Sila u većem pretvaraču F_2 korespondira sa merenom silom F_M na isti način kao u prethodnom slučaju a što se vidi prema jednačini:

$$F_2 = \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cdot F_M = \frac{1}{2} \cdot F_m \quad (6)$$

Razmatrani slučaj nije u potpunosti statički sistem, već MPS imaju određenu elastičnu deformaciju koja rezultira ugibima f_1 i f_2 , te će usled različitih ugiba doći do određenog zakošenja spregova sila. Kako su ovi ugibi za nazivne sile reda 0,5 mm, a kraci L_1 , L_2 reda 100 mm, analiza pokazuje da je za ovaj ugao zakošenja vrlo mali, odnosno $\cos\alpha = 0,99987$, a to znači da u tom iznosu utiče i na grešku merenja koja je prema ovom računu manja od 0,013 % i može se zanemariti u odnosu na deklarisanu relativnu grešku merenja od 1 %. Ova takođe potvrđuje i korektnost ovakve koncepcije primene dva MPS. Ovakvo rešenje elektrodinamometra za merenje sile razvlačenja omogućuje veću efikasnost merenja, bolju operativnost kroz jednostavniji i komforniji rad sa kidalicom. Zahvaljujući savremenoj mikroracunarskoj i mikroelektronskoj tehnologiji moguće je značajno popraviti i tačnost i pouzdanost merenja sile.

Kao što je već istaknuto oba MPS su stalno prisutna u mernom kolu elektronskog elektrodinamometra. Mikrokontroler neprekidno nadgleda rad oba merna kanala i prema utvrđenom programu vrši nuliranje i kalibraciju u fazi pripreme za merenje, a u procesu merenja obradu mernih signala u smislu automatskog pojačanja, filtriranja i usrednjavanja. Mikrokontroler na bazi obrađenih rezultata merenja vrši izbor aktuelnog MPS ali i rezolucije merenja. To znači da se može ostvariti zahtevana tačnost merenja u jedinstvenom opsegu merenja od 1kN do 100 kN, menjajući automatski tokom procesa merenja rezoluciju merenja. Na slici 10. prikazan je dijagram promene rezolucije merenja u zavisnosti od merene sile.



Sl.10. Dijagram promene rezolucije merenja u funkciji merene sile

Kao što se sa slike 10 može uočiti grafik rezolucije se nešto razlikuje za porast odnosno smanjenje merene sile. Da bi automatska promena rezolucije merenja, kao i izbora aktuelnog MPS bila korektna potreban je određeni histerezis u grafiku odlučivanja sa širinom većom od mogućih grešaka merenja u tom delu opsega merenja.

Mikrokontroler takođe obezbeđuje funkcionalnu vezu elemenata elektronskog dinamometra: tastature, displeja, pojačavača, A/D konvertora, ali i vezu sa upravljačkim sistemom kidalice. Kod mehaničkog prekida uzorka zaustavlja se rad kidalice, a takođe

i kod prekoračenja opsega merenja sile. Mikrokontroler obezbeđuje i serijsku komunikaciju elektronskog dinamometra i PC, što celom rešenju daje dodatni kvalitet.

X1.3.2. Elektronska vaga sa više opsega merenja

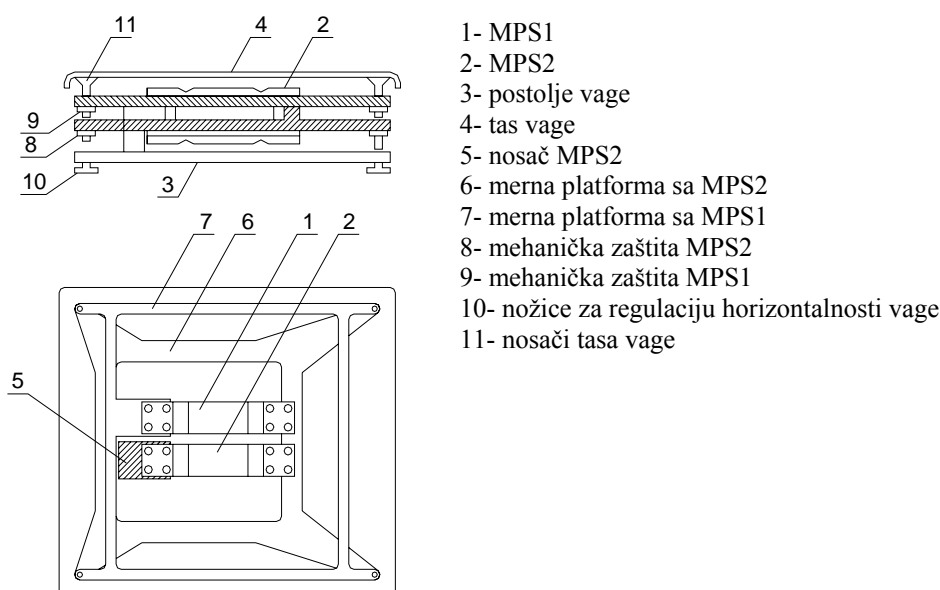
Jedno od obeležja savremene metrologije mase su i elektronske vage sa MPS. Ove vage našle su široku primenu, posebno u trgovini (klasa tačnosti III) gde su skoro potpuno istisle mehaničke vage iz upotrebe. Prodor elektronskih vaga nije lak i jednostavan, već zbog činjenice da su mehaničke vage vrlo tačna i pouzdana merila. Dozvoljena relativna greška za vage klase III kreće se od 0,1 % do 0,01 %. Malo je tipova MPS koji mogu ispuniti ove zahteve tačnosti, pa su i zbog toga MPS na bazi tenzometarskih traka dominantni u primeni. Za razliku od dinamometara kod koga se već prijemnikom opterećenja definiše vrsta opterećenja, odnosno merena sila, kod vaga prijemnik opterećenja (sile) je cela površina merne platforme.

Sve do pojave MPS platformskog tipa, smatralo se da elektronska vaga mora imati najmanje tri MPS. Razvojem MPS platformskog tipa na bazi tenzometarskih traka otvoren je put elektronskim vagama sa jednim MPS. U okviru razvoja elektronske vage za pisma „Tensopost“ u elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla“ razvijena je originalna konstrukcija MPS platformskog tipa, koji je u potpunosti ispunjavao metrološke zahteve [13]. Međutim, za potrebe univerzalne poštanske vage opsega merenja 2kg i 20 kg bilo je od samog početka jasno da se ovaj zahtev ne može ostvariti sa jednim MPS.

Realizacija univerzalne poštanske vage sa dva merna pretvarača u početnoj verziji podrazumevala je dve nezavisne merne platforme, sa zajedničkim elektronikom kolima koji obrađuje dva nezavisna merna signala. Praktično bila je to elektronska vaga sa dva merna kanala, odnosno dva opsega merenja. Takvo rešenje vage posmatrano sa metrološkog, operativnog i ekonomskog aspekta bilo je dobro, ali sa fizičkog aspekta, za dve nezavisne merne platforme jednostavno nije bilo mesta u okviru raspoloživog prostora šalterskog mesta.

Rešenje je potraženo u mehaničkoj sprezi dva MPS [14]. Kod rešavanja problema merenja sile na kidalici primenjena je paralelna mehanička veza dva MPS. Takvo rešenje je bilo moguće jer je kod kidalice konstruktivno definisan vektor merene silom, odnosno pravac, smer i napadna tačkom. Kod vaga, sa opterećivanjem unutar merne platforme vage (tas) koja je kruto povezana MPS to jednostavno ne bi moglo, jer bi sistem bio potpuno statički neodređen. Međutim, mehanička redna veza dva MPS za razliku od paralelne veze je statički sasvim korektna. Šta zapravo predstavlja redna veza MPS?

Analogno strujnom kolu ista sila dolazi na jedan i drugi MPS. Kako su to MPS za različite nazivne vrednosti opterećenja, tačnije odnosa 1:10, postavlja se problem opterećivanja takve kompozicije MPS, jer bi u korektnom izboru nazivnih vrednosti pretvarača, pretvarač manjeg opsega merenja bio značajno preopterećen. Rešenje je pronađeno kao i kod kidalice u zaštiti tog MPS od mehaničkog preopterećenja. Na slici 11. prikazan je mehanički sklop merne platforme univerzalne poštanske vage.



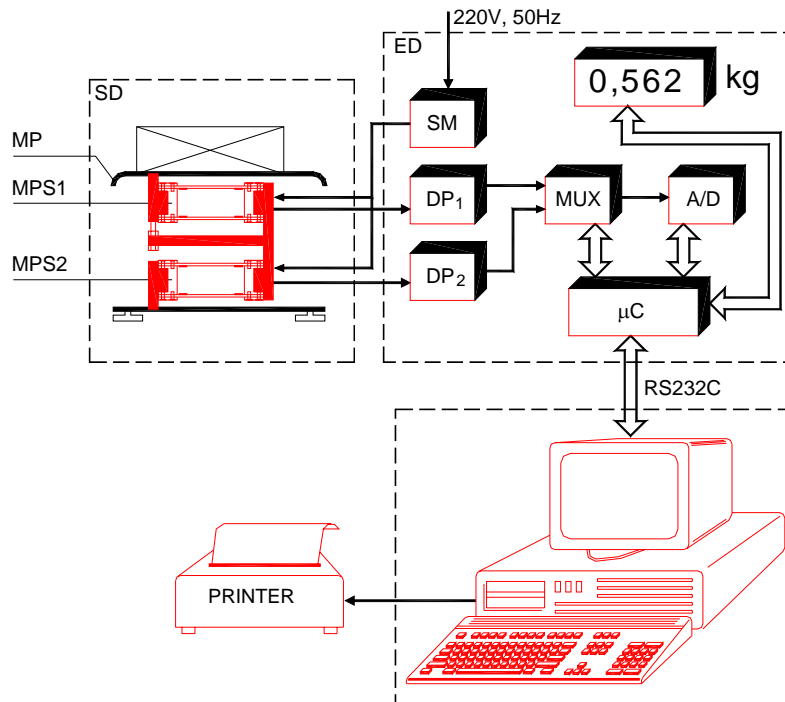
- 1- MPS1
- 2- MPS2
- 3- postolja vage
- 4- tas vage
- 5- nosač MPS2
- 6- merna platforma sa MPS2
- 7- merna platforma sa MPS1
- 8- mehanička zaštita MPS2
- 9- mehanička zaštita MPS1
- 10- nožice za regulaciju horizontalnosti vage
- 11- nosači tase vage

Sl. 11. Mehanički sklop merne platforme sa dva merna pretvarača

Kao što se vidi sa slike MPS 2 većeg opsega merenja (20 kg) jednim krajem je mehanički spojen sa postoljem vage, a drugim krajem sa MPS 1, manjeg opsega merenja (2 kg). Drugi kraj MPS 1 u čvrstoj je mehaničkoj vezi sa mernom platformom vage. Postavljanjem pisma ili paketa na mernu platformu, oba MPS opterećena su istom silom. Obradom elektronskih signala utvrđuje se koji od MPS je aktuelan za datu merenu masu. Ukoliko merena masa prelazi opseg merenja MPS 1, elektronika će kao ispravan uzeti merni signal sa MPS 2, jer će MPS biti u stanju mehaničke zaštite od preopterećenja pa mu i merni signal neće biti validan. Ovaj kratak opis principa rada univerzalne vage ukazuje da ovakvo rešenje merne platforme zahteva tzv. "inteligentnu" elektroniku [15]. Na slici 12. prikazana je blok šema primenjene elektronike kod univerzalne poštanske vage.

Struktura univerzalne poštanske vage podeljena je na senzorski (SP) i elektronski deo (EP). Senzorski deo vage obuhvata mernu platformu sa dva MPS. Elektronski deo sadrži nekoliko elektronskih modula: modul napajanja (SM), dva diferencijalna predpojačavača (DP), multiplexer (MUX), A/D konvertor, mikrokontroler. Ključni elemenat ove vage je mikrokontroler (μC) koji prema namenski razvijenom softveru upravlja i kontroliše rad svih ostalih elementa vage. Primenjene savremene elektronske komponente odlikuju se visokim stepenom integracije, pa je tako u jednom čipu integrisana skoro sva elektronska kola potrebna za funkcionisanje ovakve elektronske vage kao što su: DP, MUX, ADC, μC . Praktični aspekti ovakvog rešenja elektronskog dela vage ogledaju se u:

- poboljšanje metroloških karakteristika,
- poboljšanje operativnih karakteristika,
- poboljšanje fizičkih karakteristika,
- smanjenje uticaja elektromagnetnih smetnji,
- smanjenje cene koštanja vage.



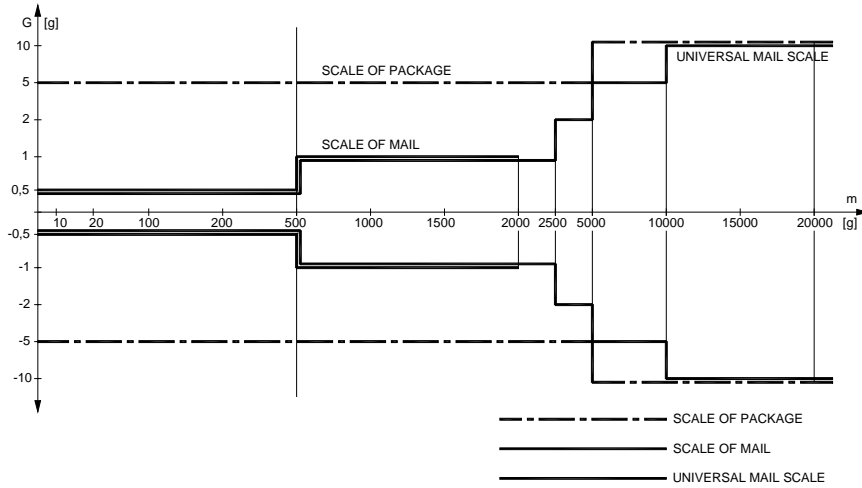
Sl.12. Blok šema elektronske univerzalne poštanske vage

Kod ovakvih rešenja elektronskog merenja mase, primenjeni softver je jednako važan kao i ugrađeni hardver. U konkretnom slučaju univerzalne poštanske vage uloga softvera je vrlo značajna jer omogućava:

- automatski izbor mernog opsega i promene rezolucije merenja,
- automatsko tariranje vage, odnosno dovođenje pokazivanja vage na nulu u slučaju neopterećene merne platforme,
- automatsku kontrolu mehaničkog umirenja vage,
- prikaz rezultata merenja na displeju vage,
- transfer rezultata merenja do PC,

Univerzalna poštanska vaga povezana je sa PC preko serijskog interfejsa RS 232C. PC opslužuje ukupan rad univerzalnog poštanskog šaltera, a u okviru toga prijem i otpremu poštanskih pošiljki (pisma i paketa).

Ovakvo rešenje univerzalne poštanske vage rešava problem merenja mase poštanskih pošiljki u vrlo širokom opsegu merenja sa ujednačenom relativnom greškom merenja. Na slici 13. prikazane su granice dozvoljene apsolutne greške za univerzalnu vagu i za dve pojedinačne vage (pismonosna i paketska) u funkciji merene mase.



Sl.13. Granice dozvoljene apsolutne greške unutar mernog opsega

Očigledna je prednost na strani univerzalne poštanske vage, kod koje su uže granice dozvoljene apsolutne greške merenja u odnosu na dve klasične pojedinačne vage mernih opsega od 2 kg i 20 kg. Primena univerzalne vage povoljnija je ne samo u metrološkom već i u drugim aspektima, kao što su: operativni, fizički i ekonomski aspekt. Ova vaga čiji je izgled prikazan na slici 14. nalazi se već više godina u uspešnoj praktičnoj primeni na šalterima pošta širom Srbije.



Sl.14. Izgled univerzalne poštanske vage "Tensolux"

Prikazana originalna rešenja merenja sile i mase u proširenom opsegu merenja su u metrološkom i tehničkom smislu korektna rešenja, potvrđena u praksi. Primena mikroracunara kod elektrodinamometara i elektronskih vaga nesumnjivo doprinosi podizanju tačnosti, pouzdanosti i efikasnosti merenja. Prikazana rešenja merenja sile i mase mogu naći primenu i za rešavanje drugih sličnih metroloških problema, kao što su

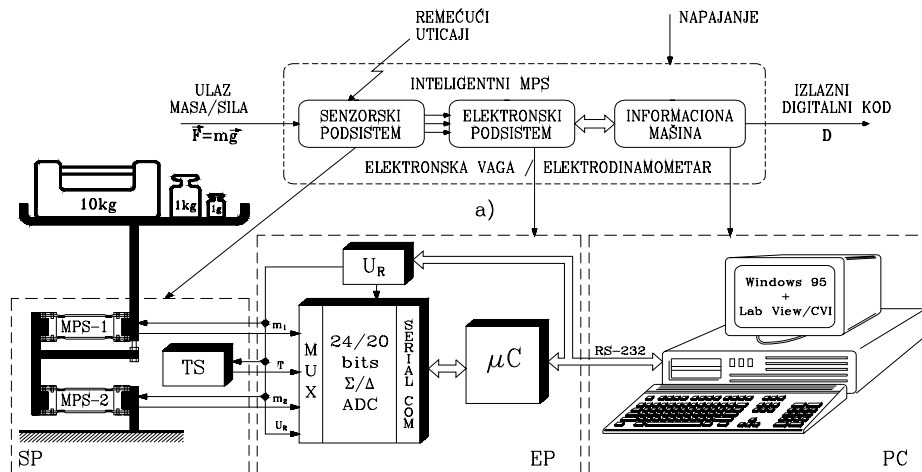
na primer: vage za brojanje komada, merenje pritiska i momenta u proširenom opsegu merenja.

XI.4. VIRTUELNI UREĐAJI – VIŠEFUNKCIONALNA MERILA

Razvoj u oblasti električnih merenja krajem dvadesetog veka je karakterisan tesnim povezivanjem metroloških i informacionih podsistema. Polazeći od analogne, preko digitalne i mikroprocesorske do inteligentne instrumentacije, savremena instrumentacija prolazi kroz fazu takozvane “virtuelne instrumentacije”. Mada ne postoji opšta saglasnost oko preciznog definisanja značenja ovog pojma, on se može koristiti za kompleksne merne sisteme bazirane na PC računaru sa značajnim softverskim resursima kao ključnim elementom sistema. U ovom delu rada promovise se novi, originalni koncept višefunkcionalnih elektronskih vaga (VEV) realizovanih kao periferija PC računara u tehnologiji virtuelnih instrumenata. Ovaj koncept je baziran na višegodišnjim istraživanjima u oblasti MPS [16] i elektronskih vaga [17], kompjuterski potpomognutih mernih sistema [18].

XI.4.1. Hardverska struktura

Tradicionalni pristup razvoju i proizvodnji bilo mehaničkih ili elektronskih vaga, je vaga za specifične primene, kao što je slučaj trgovačkih, poštanskih, medicinskih i drugih vaga. Istraživanja u ovoj oblasti rezultovala su uvođenjem novog koncepta elektronskih vaga kao PC baziranih virtuelnih instrumenata [19]. Ovaj koncept se karakteriše činjenicom da izbor aplikacije određuje funkciju mernog instrumenta. Na slici 15. data je generalna struktura savremene elektronske vage, a osnovna ideja je da se realizuje što više aplikacija sa minimalno neophodnim promenama u hardveru i softveru.



Sl. 15. Uz objašnjenje koncepta višefunkcionalnih virtuelnih elektronskih vaga (VEV):
a) blok šema generalne strukture, b) VEV kao periferija PC računara.

Ovo podrazumeva obezbeđenje što je moguće šireg mernog opsega, visoke tačnosti (autokalibracija, sistemska kalibracija, softverska kompenzacija grešaka), fleksibilnosti u izboru rezolucije i brzine merenja, mogućnosti promena i proširenja funkcija i karakteristika.

Na slici 15. je prikazana pojednostavljena blok šema elektronske vage za opseg do 20 kg, koja se sastoji od senzorskog dela (SP), elektronskog dela (EP) i PC računara. Senzorski deo sadrži dva MPS sa TMT (MPS-1 i MPS-2), koji su mehanički povezani na red unutar jednog kućišta tako da mehanički povećavaju opseg merenja deset puta, i temperaturnog senzora (TS) namenjenog za primenu monitorske temperaturne kompenzacije. Elektronski deo ima četiri ulaza: dva za MPS (m_1 i m_2), jedan za temperaturni senzor (T) i jedan za referentni napon (U_R), a centralni deo predstavlja mostni analogno-digitalni pretvarač (ADC) baziran na Δ/Σ modulacionoj tehnici. Ovako koncipiran sistem omogućava realizaciju većeg broja aplikacija uz primenu jedinstvenog hardvera i neophodne minimalne promene u softveru [20].

Savremeni ADC su ustvari kompletni ulazni moduli za jednosmerno ili naizmenično napajane mernih pretvarača: sile, pritiska, momenta i dr. Baziranih na mosnim spregama. ADC prihvata signale direktno iz pretvarača, a kao izlaz daje serijski digitalni kod. Serijski interfejs ovog čipa može se konfigurisati u trožičnu vezu i kompatibilan je sa mikrokontrolerima i digitalnim procesorima signala. Ovakvi čipovi poseduje takođe opcije samokalibracije i sistemске kalibracije, koja omogućava 24-bitnu rezoluciju, tačnost konverzije od oko 16 do 18 bita pri izlaznoj brzini konverzije od 1000 Hz do 50 Hz, respektivno. Promena nule i osetljivosti sa temperaturom su, tipično, manje od 5 do 2ppm/°C, respektivno. Korišćenje integrisanih kola ovog tipa, karakterisanih veoma velikim stepenom integracije, omogućava visoku tačnost, pouzdanost, smanjenu osetljivost na delovanje elektromagnetnih smetnji, fleksibilnost i široko područje primene. PC je standardne konfiguracije i omogućava primenu Windows operativnog sistema. Veza između vage i PC ostvarena je pomoću standardnog serijskog interfejsa RS-232.

X1.4.2. Softverske strukture

Pojava i stalan razvoj PC računara omogućio je da se različite vrste vaga realizuju preko jednog univerzalnog hardvera bez smanjenja performansi vage za svaku posebnu primenu. PC računar, sa svojim značajnim hardverskim i softverskim resursima, ima značajne prednosti nad mikrokontrolerima, posebno u oblasti statičkih i sporo promenljivih merenja. I pisanje programa za PC u višim programskim jezicima je znatno efikasnije u odnosu na pisanje programa u assembleru za mikrokontrolere. Testiranje, korekcija i izmene programa su takođe mnogo jednostavnije. U realizaciji koncepta VEV usvojen je kriterijum efikasnosti programiranja, tako da su samo najosnovnije programske rutine, kao što su konfiguracija hardvera, ulaza i izlaza i kalibracija nule i osetljivosti, napisane u assembleru na nivou ADC. Ostatak programa je napisan u programskom paketu LAB View / CVI za Windows 95. Ovaj programski paket je namenjen za realizaciju i programiranje virtuelnih instrumenata. On kombinuje sve karakteristike objektnog i grafičkog programiranja koji pojednostavljaju i ubrzavaju pisanje specifičnih aplikacija. PC računar je preko serijskog interfejsa RS-232 povezan sa mikrokontrolerom u elektronskom delu vage, kao što je prikazano na slici 5.10.b. Preko ove veze PC računar šalje komande kontroleru i prima rezultate merenja. U zavisnosti od tipa vage ekran računara se koristi kao univerzalni displej. Na slici 16. prikazan je izgled ekrana PC računara sa glavnim menijem, podmenijem aplikacija i realizacijom VEV kao trgovačke vage. Iz glavnog menija mogu se pozivati podprogrami za konfiguraciju, kalibraciju i aplikacije.

Konfiguracija se ostvaruje i na nivou ACD i na nivou PC a svi konfiguracioni registri na ACD su pristupačni PC računaru preko serijske veze. Moguće je podesiti interne parametre ACD, kao što su broj ulaznih kanala, parametri digitalnog filtra, parametri serijske komunikacije, kao i sadržaj kontrolnih, statusnih i test registara.

Ukupne performanse određenog tipa vage u velikom stepenu zavise od načina i efikasnosti sprovedene kalibracije. Savremeni ACD podržavaju veliki broj kalibracionih opcija a dve najvažnije su interna i sistemska kalibracija. Kalibracione sekvence su od odlučujuće važnosti za kratkotrajnu i dugotrajnu stabilnost vage. Kalibracioni blok na nivou PC računara sadrži značajne algoritme za kompenzaciju specifičnih grešaka vaga, kao što su histogramaska analiza šuma, analiza linearnosti i histerezisa, softverska kompenzacija greške puzanja, softverska monitorska kompenzacija uticaja temperature. Na kraju, sa podešenim kalibracionim parametrima, obavlja se procedura potpune verifikacije sa ciljem da se odredi ukupna merna nesigurnost ili dozvoljene granice grešaka za datu aplikaciju.

Statističke tehnike, kao što je opisano u četvrtom poglavlju, koriste se za analizu efekata šuma i njegovu kompenzaciju. U slučaju da se utvrdi da prisutni šum ima normalnu raspodelu primenjuje se tehnika usrednjavanja.

Softverske tehnike kompenzacije greške nelinearnosti su se razvijale preko metoda pretraživanja tabela do primene veoma kompleksnih algoritama numeričke analize. U ovom radu je usvojen kriterijum postizanja zahtevane tačnosti primenom što je moguće jednostavnijeg numeričkog algoritma. Vaga pruža mogućnost izbora između tri metode linearizacije:

- višeintervalna linearna interpolacija sa 11 kalibracionih tačaka,
- linearizacija i kalibracija u tri tačke
- linearizacija pomoću Langranžovog interpolacionog polinoma sa maksimalno 11 kalibracionih tačaka

Nova i veoma atraktivna oblast istraživanja koja je povezana sa konceptom inteligencije je mogućnost softverske kompenzacije greške puzanja. Primenjena je metodologija koja je detaljno izložena u četvrtom poglavlju.

U delu koji opisuje hardverske strukture date su određene sugestije koje se tiču zahtevane tačnosti u merenju temperature kao glavnog remećućeg faktora. U vagi je primenjen najjednostavniji softverski algoritam za temperaturnu kompenzaciju, a to je linearna interpolacija u celom radnom opsegu temperature. Ukoliko postoje oštriji zahtevi, ili u pogledu nivoa tačnosti ili što se tiče proširenog opsega radne temperature, ili u slučaju da postoje izraženi nelinearni efekti kod grešaka izazvanih promenom temperature, preporučuje se primena višeintervalne linearne ili interpolacije uz pomoć polinoma, kao što je prikazano na kraju četvrtog poglavlja.

Na slici 16. je prikazan ekran PC računara kao višefunkcionalne virtuelne vage sa koga se mogu uočiti prednosti grafičkog programiranja. Izabrana je opcija trgovačke vage. Pored glavnog menija i podmenija aplikacija na ekranu je otvorena aplikacija trgovačke vage sa tri virtuelna displeja za: a) merenu masu (kg) b) jediničnu cenu (din./kg), c) ukupnu cenu (din.). Na desnoj strani panela trgovačke vage su grafički tasteri sa označenim nekim proizvodima čije su cene memorisane. Klikom na odgovarajući taster jedinična cena proizvoda koji je u pitanju se automatski unosi i obračunava se ukupna cena. Naravno da se jedinične cene mogu ukucati i ručno sa numeričkog dela PC tastature. Bilo kakva izmena parametara kao što je broj cifara koji iskazuju masu, jediničnu ili ukupnu cenu, broj i raspored tastera sa memorisanim cenama, u konceptu virtuelnog instrumenta je vrlo lako izvodljiva. Ovakve promene, koje mogu biti diktirane zahtevima tržišta, bi kod klasičnog koncepta zahtevale mesece rada praćene ulaganjem značajnih materijalnih sredstava. I ostale aplikacije realizovane u ovakvom konceptu takođe imaju svoje specifičnosti:

- poštanske vage imaju ugrađenu rutinu za kontrolu stabilnosti merenog rezultata unutar 0,2 digita tako da je onemogućeno indiciranje ili štampanje mernog rezultata dok se oscilatorni proces ne završi.



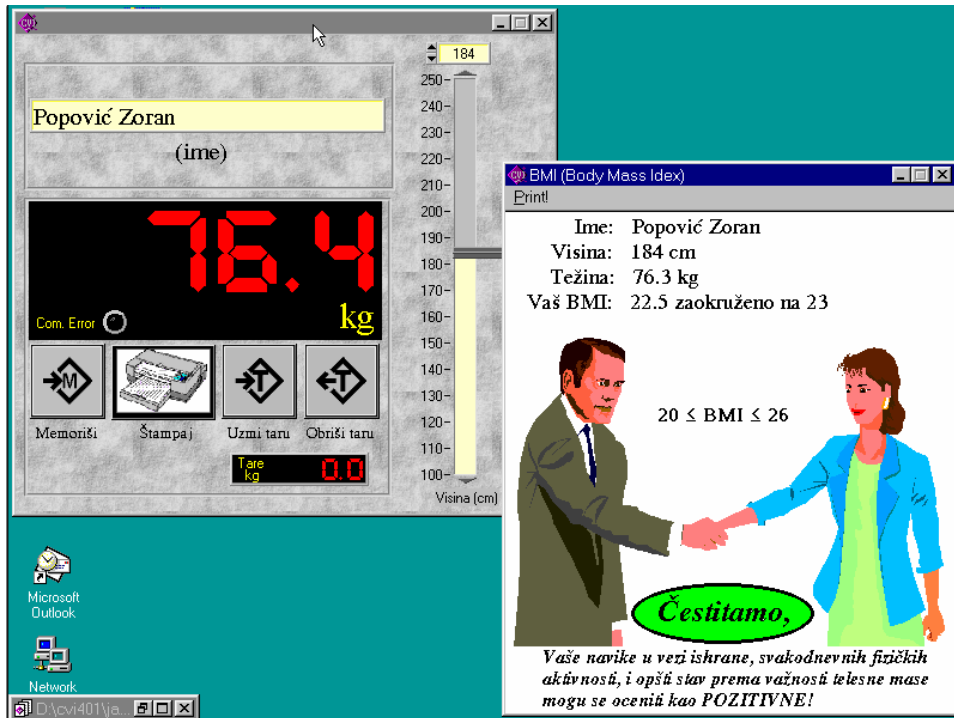
Sl. 16. Izgled ekrana PC monitora kao displeja višefunkcionalne vage.

- vage za brojanje komada su karakterisane činjenicom da se relativno mala referentna masa (referentni broj komada) primenom statističkih tehnika meri sa povećanom tačnošću.
- vaga za određivanje vlažnosti, koja po apsolutnoj metodi radi u uslovima dugotrajnog procesa sušenja i smanjenja mase uzorka usled isparenja, karakteriše se mogućnošću primene softverske metode za korekciju greške puzanja
- medicinske vage karakteriše mogućnost merenja mase pacijenata uz dodatno procesiranje merenih podataka, a u slučaju vaga za bebe značajno je korišćenje tehnika digitalnog filtriranja koje omogućavaju merenje mase u prisustvu značajnijih dinamičkih sila.

Primena VEV kao medicinske vage, u opciji određivanja indeksa telesne mase (BMI), prikazana je na slici 17. BMI je postao, poslednjih godina, jedan od popularnih medicinskih pokazatelja dijetetsko-higijenskih navika čoveka. U konkretnom primeru je primenjena jedna jednostavna formula za sračunavanje BMI:

$$BMI = \frac{m}{h^2} \quad (7)$$

gde je m masa tela u kilogramima a h visina u metrima. Na slici 17. prikazana je jedna originalno dizajnirana varijanta korisničkog interfejsa na ekranu PC monitora za slučaj merenja BMI pomoću vage VEV. Na vagi je izmeren Popović Zoran, sa telesnom masom od 76.3kg, visok 1.84m, čiji je BMI≈23, pa softverski paket, na ekranu PC monitora ispisuje grafički prikaz o pozitivnim higijensko-dijetetskim navikama.



Sl. 17. Primena VEV (aplikacija MEDICAL) kao medicinske vage

Već se na prvi pogled da zaključiti da je koncept VEV, zahvaljujući snažnim hardverskim i softverskim resursima PC računara, nadmoćan u razvoju i izradi vaga, u odnosu na klasični pristup projektovanju vaga određene namene. Koncept VEV primenljiv je kako za neautomatske vage (vage za trgovine), tako i za automatske vage (tračne vage, vage za pakovanje) [21]. Na bazi ovakvog koncepta moguće je rešavati i specijalne probleme merenja sila kao što su:

- merenje koeficijenta trenja metlica brisača [22],
- merenje brzine vetra [23],
- monitoring sistemi za geološka istraživanja, [24], [25],

XI.5. ZAKLJUČAK

Na osnovu obimne proučene literature kao i na bazi višegodišnjeg iskustva stečenog za vreme rada u predmetnoj oblasti, autori, na kraju, žele da ukažu na nekoliko opštih i važnih implikacija vezanih za oblast inteligentnih mernih pretvarača:

- Razvoj senzora kod bioloških sistema u prirodi je značajan faktor u razvoju viših vrsta. Kroz proces evolucije razvili su se takvi senzori kao što je na primer oko sokola ili nos psa. Međutim, čovek je, uprkos svom osrednje razvijenom sistemu senzora, postao dominantna biološka vrsta. Ovakav, na prvi pogled, oprečan sled događaja bio je moguć zahvaljujući razvoju inteligencije, kojom čovek može kompenzovati evidentna ograničenja u svom senzorskom sistemu. Inteligentni pretvarači su nova stepenica u tehnološkoj evoluciji, a po analogiji sa čovekom, mogu značajno doprineti poboljšanju karakteristika senzora i pretvarača u svim oblastima metrologije.

- U današnjem svetu brzina razvoja mikroelektronskih tehnologija, a posebno informacionih tehnologija, se stalno povećava. U oblasti senzora i pretvarača, kao i u mnogim drugim oblastima merenja, trendovi ukazuju da se treba pripremiti za situaciju u kojoj će cena “silikona” (hardvera) biti skoro zanemarljiva, a osnovu cene činiće “softverske” komponente kao što su dizajn, testiranje, marketing, usluge.
 - Autori sa zadovoljstvom konstatuju značajne perspektive daljih istraživanja, posebno u oblasti inteligentnih MPS sa TMT i virtuelnih elektronskih vaga. U budućnosti se, sa izvesnošću, može očekivati dalja integracija digitalnih mernih sistema i informacionih tehnologija. Zbog toga je značajno da se posveti veća pažnja razvoju koncepta virtuelnih instrumenata, pa naravno i virtuelnih vaga, počev od terminoloških definicija i razjašnjenja, preko usavršavanja tehničkih rešenja i rešavanja problema vezanih za aspekt zakonske metrologije.
- Bitno je istaći i ambijent u kome su prikazana istraživanja nastala i razvijala se. To je Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“ koji, u svom sedamdeset godina dugom postojanju, omogućava kontinuirano bavljenje određenim oblastima nauke.

LITERATURA

- [1] S.Škundrić, D.Kovačević, “Elektromehaničke vage”, monografija SMEITS, Beograd, 1995.
- [2] D.Kovačević, “Analiza i razvoj mernih pretvarača sile visoke klase tačnosti”, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1989.
- [3] D.Kovačević, “Inteligentni merni pretvarači sile na bazi tenzometarskih traka”, doktorska disertacija, Elektronski fakultet, Niš, 1999.
- [4] S.Škundrić, D.Kovačević, “Metode i postupci otklanjanja i smanjenja mehaničkih uticaja kod merenja mehaničke sile”, Zbornik radova 12. JUKEM, Beograd, 1986.
- [5] D.Kovačević, S.Škundrić, “Prilog konstrukciji mernih pretvarača sile visoke klase tačnosti”, Zbornik radova 12. JUKEM, Beograd, 1986.
- [6] D.Kovačević, S.Škundrić, “Analiza naprezanja elastičnog elementa metodom konačnih elemenata”, Zbornik radova Instituta „Nikola Tesla“, Vol.8, Beograd, 1990.
- [7] S. Škundrić, Merni pretvarač za merenje mase pismonosnih pošiljki., Zbornik radova JUKEM-a, s. 661-666, Split, 1988.
- [8] S.Škundrić, Merni pretvarač sile za poštanske vage, Zbornik radova Instituta "Nikola Tesla", Vol.7, Beograd, 1989.
- [9] D.Kovačević, S.Škundrić, B.Dimitrijević, “Strain Gauge Based Load Cells with the Possibility of Creep Error Correction“, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, Vol. 10, No. 1, Nis, 1997.
- [10] J.Brigneel, N.White, “Intelligent Sensor Systems“, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1996.
- [11] S. Škundrić, Rastavljivi merni pretvarač sile, Patent P-872/92, 1989.
- [12] D.Kovačević, S.Škundrić, B. Dimitrijević, S.Mikičić, “Strain Gauge Based Load Cells – the Possibility of Software Creep Error Compensation“, 16th International Conference on Mass and Force, IMEKO – TC3, Taejon, Korea, 1998.
- [13] S.Škundrić, Merenje sile električnim putem. Glasnik ZEPa, Vol.16, br.179, 1989.

- [14] S.Škundrić, D.Kovačević, "The Strain Gauge Based Load Cell with Bolted Spring Assembly", 12th International Conference on Mass and Force, IMEKO – TC3, Szeged, Hungary, 1990.
- [15] S.Škundrić, Elektromehanička vaga sa više opsega merenja., Zbornik radova instituta "Nikola Tesla" Vol.9, Beograd, 1992.
- [16] S. SKUNDRIC, "Electromechanical scales-intelligent mass measurement", ISAMEC, Ljubljana, 1990.
- [17] D.Kovačević, S.Škundrić, B. Dimitrijević, S.Mikičić, "Multifunctional Electronic Scale – a PC Based Approach", 10th International Conference on Electrical Measurement, IMEKO – TC4, Naples, Italy, 1998.
- [18] D.Kovačević, S.Škundrić, S.Vukovojac, B.Dimitrijević, "Computer-controlled System for Measuring Windshield Wiper Friction", 15th International Conference on Mass and Force, IMEKO – TC3, Madrid, Spain, 1996.
- [19] D.Kovačević, S.Škundrić, B. Dimitrijević, S.Mikičić, "Virtual Electronic Scale", 16th IMEKO World Congress, Vienna, Austria, 2000.
- [20] D.Kovačević, S.Škundrić, B. Dimitrijević, S.Mikičić, "Virtualne elektronske vage", II Kongres Metrologa, Novi Sad, 2002.
- [21] D.Kovačević, S. Škundrić, S.Vukovojac, Višekomponentni merni pretvarači sile., Zbornik radova instituta "Nikola Tesla" Vol.10, Beograd, 1993.
- [22] S.Škundrić, D.Kovačević, Procesno merenje protočne mase. Procesna tehnika, br.3, Beograd, 1995.
- [23] S.Škundrić, S. Vukovojac, N. Miladinović, S. Milosavljević, Merač brzine vetra, Zbornik radova Instituta "Nikola Tesla", Vol.17, str. 9-18, Beograd, 2005.
- [24] [24].M.Cvetković, D.Kovačević, S.Škundrić, Monitoring sistem laboratorije za geološka istraživanja. II Međunarodno Savetovanje za primenu matematičkih modela i računara u rudarstvu, Beograd, 1991.
- [25] M.Cvetković, S.Škundrić, D.Kovačević, Sistemi za merenje i praćenje geomehaničkih procesa na površinskom kopu. Poljsko-jugoslovenski simpozijum, 1992.

Pored autora ovog rada svoj doprinos su dali i zaslužni istraživači koji više ne rade aktivno u Institutu: Srboľjub Vukovojac, Dejan Ignjatić, Mladen Šubert, Slobodan Mikičić. U brojnim praktičnim realizacijama na stotine i hiljade pretvarača i vaga učestvovali su saradnici Instituta: Borivoje Stokić, Nenad Cakić, Živorad Urošević, Dragan, Nešić, Žarko Đorđević, Sava Stevančev, Živorad Gajić, Mileta Rajičić, Ljubiša Pantelić, Nikola Skorupan, Aleš Alojz i dr. Svima njima kao i ostalim saradnicima i institucijama, čija imena nisu spomenuta u ovom radu zbog ograničenog prostora, autori se iskreno zahvaljuju.

RESEARCH OF FORCE AND MASS MEASUREMENT BY STRAIN GAUGES

Dragan Kovačević, Slobodan Škundrić

Strain gauges based measurements of force and mass have been developed for a long time at the Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla" in Belgrade. The basic theoretical and structure models of both classical and intelligent force transducers and load cells are described. Two, hardware and software, originally developed creep error

compensation methods are outlined in details. Many practical realizations and applications of electrodynamicometers and electronic scale are described.