

Realizacija sistema za precizno merenje malih težina

Predrag Petronijević, Vujo Drndarević

Apstrakt—U ovom radu je prikazan postupak realizacije sistema za precizno merenje malih težina korišćenjem programabilnog sistema na čipu. Projektovani merni sistem baziran je na programabilnom sistemu na čipu CY8C5568AXI-060 familije PSoC-5, a implementacija laboratorijskog modela sistema izvršena je korišćenjem razvojne pločice CY8CKIT-050 i senzora sile sa mernim trakama CZL601. Realizovani sistem je testiran u temperaturnom opsegu od 10 °C do 50 °C i ostvareni rezultati pokazuju da je preciznost sistema bolja od $\pm 0.5\%$ za težine od 0.1 do 5 kg.

Ključne reči—merni sistem; senzor sile; temperaturna kompenzacija; linearizacija; PSoC;

I. UVOD

U mnogim oblastima nauke i tehnike, kao što su npr. farmacija, tehnologija i dr., zahteva se velika tačnost merenja malih težina. Na primer, ako se doza primenjenog preparata prepisuje na osnovu težine, onda neprecizno određivanje težine može biti opasno. Takođe, ako se za laboratorijski eksperiment koriste određene količine komponenti, greška u merenju može dovesti do nebezbednog eksperimenta ili neočekivanog rezultata. U ovom radu analizirane su mogućnosti realizacije sistema za precizno merenje malih težina, reda kilograma, korišćenjem programabilnog sistema na čipu. Na osnovu izvršenih analiza projektovana je i u vidu laboratorijskog modela realizovana digitalna vaga korišćenjem programabilnog sistema na čipu CY8C5568AXI-060 familije PSoC-5 [1].

Hardver sistema za merenje težine, kao i kod većine drugih mernih sistema, u sebe uključuje analogna i digitalna kola koja se najčešće realizuju korišćenjem zasebnih integrisanih komponenti - pojačavača, analogno-digitalnih konvertora, mikroprocesora ili mikrokontrolera i drugih pomoćnih kola. U novije vreme, na tržištu su se pojavili programabilni sistemi na čipu (*Programmable System on Chip* – PSoC) u vidu programabilnih integrisanih kola koja na jednom čipu sadrže analogne i digitalne programabilne blokove i ćelije, memoriju i snažan mikroprocesor. Korišćenjem PSoC čipa omogućena je jednostavna i veoma fleksibilna realizacija kompletnog mernog sistema na jednom čipu. Primer jedne takve realizacije opisan je u [2].

Predrag Petronijević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: predrag.petronijevic@edepro.com).

Vujo Drndarević – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: vujo@etf.rs).

Programabilna hardverska osnova kako analognih tako i digitalnih blokova raspoloživih u okviru PSoC čipa pružila je mogućnost da se efikasno kompenzuju nesavršenosti senzora i analognih kola, kao i da se značajno proširi funkcionalnost mernog sistema. Pri tome, posebna pažnja posvećena je problemima temperaturne kompenzacije senzora i linearizaciji statičke karakteristike prenosa sistema. Za razvoj softvera u ovom radu je korišćeno razvojno okruženje PSoC Creator 2.1 [3].

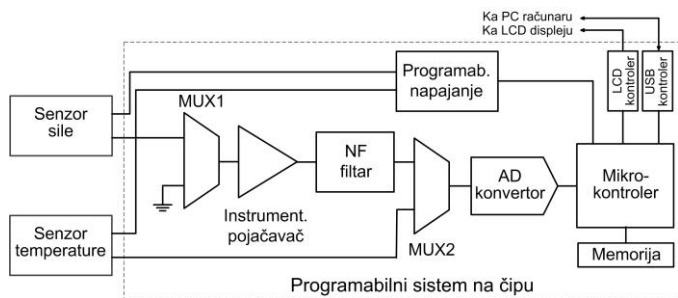
Rad je podeljen u šest celina. Nakon uvoda, u drugom poglavlju je predstavljena arhitektura mernog sistema. Sistem je prikazan preko blok šeme i detaljno je objašnjen postupak redukcije ofseta senzora i instrumentacionog pojačavača. U trećem poglavlju prikazana je i opisana električna šema sistema za merenje težine u čijem središtu se nalazi programabilni sistem na čipu PSoC-5. Postupak linearizacije i temperaturne kompenzacije mernog sistema je dat u četvrtom poglavlju. Definisani su parametri kalibracione funkcije sistema na osnovu eksperimentalnih rezultata merenja i grafički prikazana zavisnost relativne greške merenja pre i posle kompenzacije. Peto poglavlje se odnosi na realizaciju softvera koji se koristi za redukciju ofseta senzora i instrumentacionog pojačavača, filtriranje, linearizaciju i temperaturnu kompenzaciju sistema kao i prikaz rezultata na LCD displeju. U šestom poglavlju su izneti zaključci.

II. ARHITEKTURA SISTEMA

Kao senzorski element u savremenim sistemima za merenje težine najčešće se koriste merne trake povezane tako da obrazuju Vitstonov merni most [4]. S obzirom na to da je ukupna promena otpornosti mernih traka mala i da ne prelazi 0.1% nominalne vrednosti otpornosti, na izlazu mernog mosta se dobija merni signal niskog nivoa pomešan sa eksternim šumom. Ovaj signal je neophodno pojačati pomoću instrumentacionog pojačavača i filtrirati, da bi se povećala rezolucija merenja.

Pojačani merni signal, čiji opseg odgovara opsegu napona na ulazu analogno-digitalnog konvertora, konvertuje se u digitalni koji se dalje obrađuje digitalno i rezultat merenja prikazuje na lokalnom displeju i/ili prosleđuje računaru. Na sl. 1 je prikazana blok šema sistema za merenje težine kod koga je omogućena kompenzacija ofseta i temperaturna kompenzacija.

Jedan od osnovnih izvora greške koji značajno doprinosi ukupnoj grešci mernog sistema odnosi se na ofset i drift pojačavača [5]. Navedeni izvori greške posebno dolaze do izražaja kada je pojačanje pojačavača veliko, kao što je slučaj u posmatranom sistemu.



Sl. 1. Blok šema sistema za merenje težine

Za efikasnu kompenzaciju naponskog ofseta pojačavača uspešno se koristi CDS (*Correlated Double Sampling*) tehnika [6]. Navedeni princip primenjen je za kompenzaciju ofseta instrumentacionog pojačavača u kolu sa sl. 1, a u njegovoj implementaciji korišćen je multiplexer MUX1 koji ima dva diferencijalna ulaza.

Drugi značajan izvor greške merenja posledica je temperaturne osetljivosti senzora sile. Za kompenzaciju ove nesavršenosti mora se meriti temperatura, za šta je potrebno koristiti odgovarajući senzor. Na osnovu izmerene temperature i kalibracionih podataka za senzor sile, vrši se kompenzacija uticaja promene temperature na tačnost merenja. Povezivanje signala senzora sile i senzora

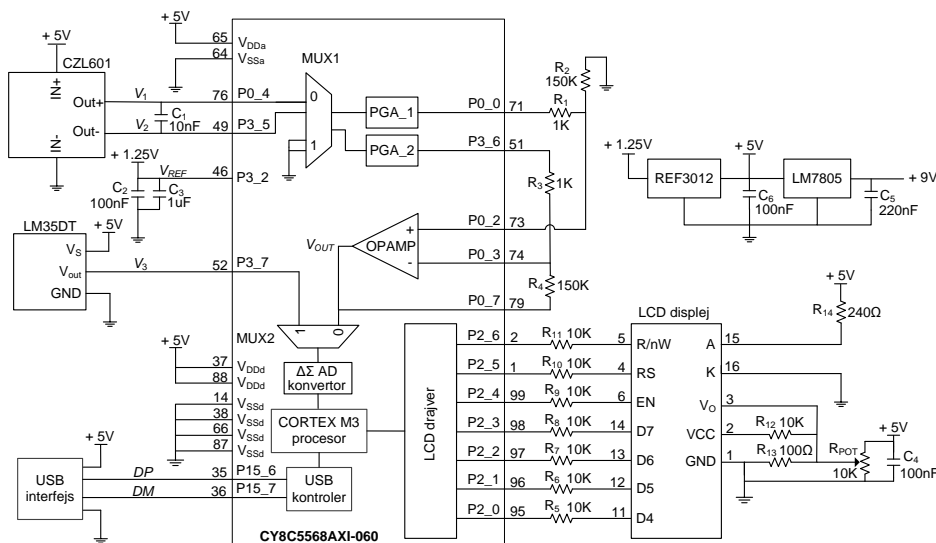
temperature na ulaz AD konvertora vrši se preko dvoulaznog multiplexera MUX2.

Kompletan merni sistem, koji sadrži kola za kondicioniranje, analognu obradu, konverziju i digitalnu obradu signala, uključujući i komunikacione funkcije, može se realizovati na jednom čipu, kao što je označeno na sl. 1.

III. REALIZACIJA MERNOG SISTEMA

Za realizaciju mernog sistema koga, kao što se vidi sa sl. 1 čine senzor sile, kompenzacioni temperaturski senzor i programabilni sistem na čipu, korišćen je programabilni sistem na čipu CY8C5568AXI-060 familije PSoC-5. Ovo integrisano kolo sadrži sva potrebna programabilna analogna i digitalna kola, 32-mikroprocesor sa SRAM, EEPROM i Flash memorijama, interfejsna i komunikaciona kola.

Za merenje sile koristi se elastični pretvarač CZL601 koji sadrži četiri merne trake u mostnoj šemi [7]. Nominalna vrednost signala na izlazu senzora sile je 2 mV/V, a maksimalna dozvoljena težina koju je moguće meriti pomoću ovog senzora je 5 kg. Ovaj pretvarač sile izabran je zbog njegove veoma povoljne cene, uz relativno dobre karakteristike. U realizaciji laboratorijskog modela mernog sistema, čija je električna šema data na sl. 2, korišćena je razvojna pločica PSoC-5 Development Kit [8].



Sl. 2. Sistem za precizno merenje malih težina realizovan korišćenjem programabilnog sistema na čipu CY8C5568AXI-060

Resursi raspoloživi na PSoC-5 čipu su iskorišćeni za kondicioniranje analognog mernog signala, analogno-digitalnu konverziju, mikroprocesorsku obradu mernih podataka, prikaz rezultata merenja na lokalnom LCD displeju i komunikaciju sa personalnim računarem preko USB magistrale.

Kako je diferencijalni izlazni signal iz senzora sile CZL601 veoma mali i kreće se u opsegu od nekoliko mV, izvršeno je pojačanje ovog signala. Pojačanje je ostvareno pomoću instrumentacionog pojačavača koji je realizovan korišćenjem integrisanih komponenata unutar PSoC čipa, pojačavača

PGA_1 i PGA_2 koji imaju jedinično pojačanje, operacionog pojačavača OPAMP i četiri eksterna otpornika R_1 - R_4 . Sprega senzora sile sa instrumentacionim pojačavačem je izvršena pomoću dvokanalnog multiplexera MUX1 sa diferencijalnim ulazima, koji omogućuje primenu CDS tehnike za kompenzaciju ofseta pojačavača.

Selektovanjem kanala 0 multiplexera MUX1 na ulaz instrumentacionog pojačavača se dovodi diferencijalni signal sa mernog mosta, te je

$$V_{out}[0] = (V_1 + V_{ofset} - V_2) \cdot G, \quad (1)$$

gde je sa V_{offset} označen napon ofseta a sa G naponsko pojačanje instrumentacionog pojačavača, pri čemu je $R_1=R_3$ i $R_2=R_4$ i pojačavači PGA_1 i PGA_2 imaju jednako pojačanje.

Selektovanjem kanala 1 multipleksera MUX1 dobija se

$$V_{out}[1] = V_{offset} \cdot G. \quad (2)$$

Oduzimanjem (2) od (1) daje

$$V_{out} = (V_1 - V_2) \cdot G, \quad (3)$$

čime je eliminisan ofset iz mernog signala.

Signal se nakon pojačanja preko analognog multipleksera MUX2 dovodi na ulaz 20-bitnog delta-sigma AD konvertora. Ovaj AD konvertor vrši konverziju brzinom 10 odmeraka u sekundi i ima opseg napona na ulazu od V_{SSA} do V_{REF} , gde je V_{REF} interna referenca AD konvertora koja iznosi $V_{DDA}/4 = 1.25$ V. Drugi kanal multipleksera MUX2 se koristi za povezivanje izlaza senzora temperature.

Za merenje temperature koristi se poluprovodnički senzor LM35DT čija je osetljivost $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ i tačnost $\pm 0.75\%$ u opsegu od -55°C do 150°C .

Upravljanje sistemom, digitalna obrada signala, prikaz rezultata merenja na LCD displeju i komunikacija sa PC računarom se vrši pomoću ARM Cortex M3 procesora.

IV. LINEARIZACIJA I TEMPERATURNNA KOMPENZACIJA SISTEMA

Kao što je već napomenuto, dominantni izvori grešaka mernog sistema vezani su za sam senzor, pri čemu su ofset, nelinearnost i temperaturna osetljivost dominantni. Za postizanje što veće tačnosti merenja izvršena je kompenzacija ofseta i linearizacija statičke karakteristike senzora. Za potrebe kompenzacije temperaturne osetljivosti merni sistem je kalibrisan u raspoloživom temperaturnom opsegu od 10°C do 50°C .

Na osnovu eksperimentalno utvrđenih rezultata snimanja statičke karakteristike prenosa senzora na različitim temperaturama, određena je kalibraciona funkcija, odnosno aproksimaciona funkcija kojom se određuje zavisnost indikacije merene veličine od signala na izlazu senzora. Kalibraciona funkcija je izražena u obliku polinoma četvrtog stepena po dve promenljive

$$F(x, T) = \sum p_{ij} \cdot x^i \cdot T^j, \quad (4)$$

gde su $i, j \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, parametri p_{ij} koeficijenti polinoma, x napon na izlazu senzora i T izmerena temperatura. Za određivanje koeficijenata polinoma koristi se metoda najmanjih kvadrata.

Prenosna statička karakteristika mernog sistema snimljena je korišćenjem jedanaest poznatih referentnih vrednosti težine u opsegu od 0 do 5 kg. Merenja su obavljena u temperaturnom opsegu od 10°C do 50°C , pri čemu je temperatura menjana u skokovima od 10°C . U tabeli I dat je jedan primer rezultata merenja koja su izvršena na temperaturi 25°C . U ovoj tabeli

sa F_{REF} je označena referentna vrednost težina koje se mere, T_{REF} je zadata vrednost temperature na kojoj se vrši merenje, izmerene vrednosti napona na izlazu senzora označene su sa x , izmerena temperatura je T i izračunate vrednosti merene težine označene su sa $F(x, T)$. Prilikom snimanja statičke karakteristike prenosa izvršena je kompenzacija ofseta mernog senzora i instrumentacionog pojačavača.

TABELA I
REZULTATI MERENJA NA TEMPERATURI 25°C

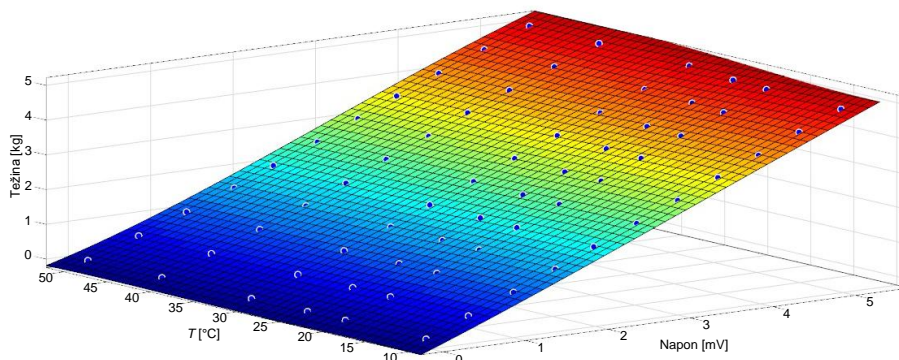
n	F_{REF} [kg]	x [mV]	T [$^\circ\text{C}$]	$F(x, T)$ [kg]
1	0.000	0.000	24.30	-0.001
2	0.500	0.560	24.40	0.490
3	1.000	1.127	24.44	1.014
4	1.500	1.653	24.45	1.520
5	1.994	2.120	24.51	1.978
6	2.494	2.633	24.49	2.488
7	2.994	3.133	24.41	2.987
8	3.494	3.640	24.43	3.489
9	3.976	4.133	24.44	3.972
10	4.476	4.643	24.36	4.491
11	4.976	5.173	24.40	4.959

Na osnovu eksperimentalno dobijenih rezultata merenja u posmatranom opsegu merene veličine i temperature, određeni su koeficijenti kalibracione funkcije čije vrednosti su date u tabeli II.

TABELA II
VREDNOSTI KOEFICIJENATA KALIBRACIONE FUNKCIJE DEFINISANE U OBLIKU POLINOMA ČETVRTOG REDA

Koeficijent	Vrednost
p_{00}	-1.350E-01
p_{10}	9.175E-01
p_{01}	2.714E-02
p_{20}	2.986E-02
p_{11}	6.565E-04
p_{02}	-1.699E-03
p_{30}	-4.804E-03
p_{21}	9.623E-04
p_{12}	-1.945E-04
p_{03}	4.183E-05
p_{40}	2.948E-04
p_{31}	-1.549E-04
p_{22}	8.275E-06
p_{13}	1.963E-06
p_{04}	-3.518E-07

Na sl. 3 je prikazan dijagram zavisnosti indikacije vrednosti merene težine u funkciji napona na izlazu senzora i u funkciji temperature ambijenta.



Sl. 3. Dijagram zavisnosti indikacije vrednosti merenih težina u zavisnosti od napona na izlazu senzora i temperature ambijenta

Relativna greška pune skale δF [%FS] data je izrazom

$$\delta F[\%FS] = \frac{F(x_n, T_n) - F_{REFn}}{\max(F)}, \quad (5)$$

gde je sa n označen redni broj vrednosti referentne težine u tabeli eksperimentalnih rezultata a $\max(F)$ je maksimalna vrednost težine koja se može meriti, koja za korišćeni senzor iznosi 5 kg.

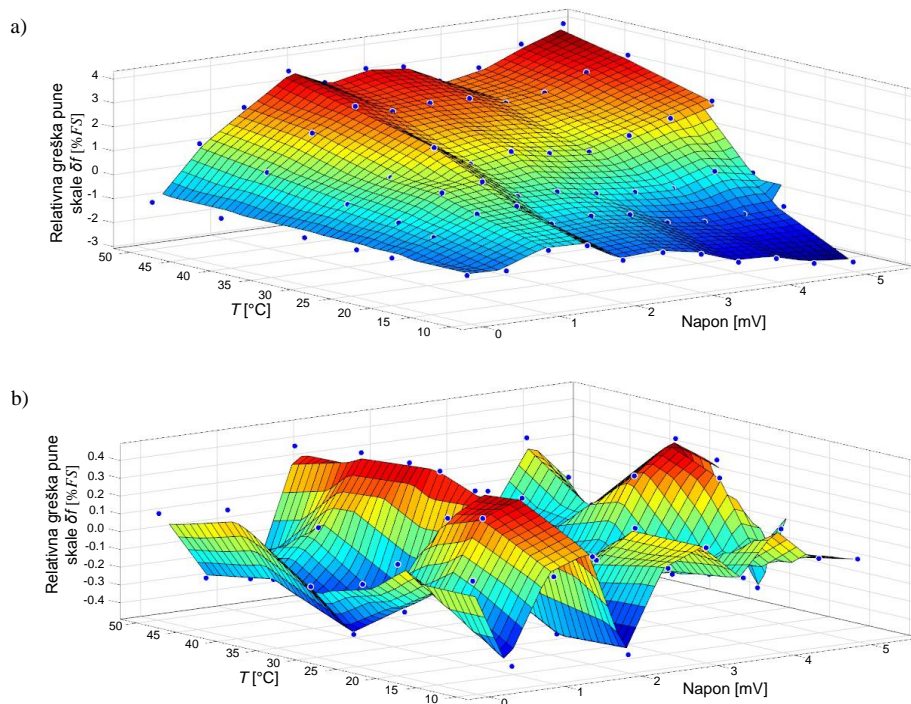
Ako se u posmatranom mernom sistemu ne vrši temperaturna kompenzacija i linearizacija funkcije prenosa,

onda se kalibraciona funkcija može predstaviti izrazom

$$G(x, T) = p_0 + p_1 \cdot x(T_s), \quad (6)$$

gde je $T_s = 25$ °C, $p_0 = -0.054687$ i $p_1 = 0.9709$, pri čemu su koeficijenti p_0 i p_1 određeni metodom najmanjih kvadrata.

Na sl. 4 je prikazana zavisnost relativne greške kalibracione funkcije od napona na izlazu senzora i temperature ambijenta pre i posle kompenzacije.



Sl. 4. Zavisnost relativne greške δf [%FS] kalibracione funkcije od napona na izlazu senzora i temperature ambijenta pre (a) i posle (b) kompenzacije

Maksimalna relativna greška pune skale kalibracione funkcije u zavisnosti od napona na izlazu senzora i temperature ambijenta nakon izvršene temperaturne kompenzacije i linearizacije statičke karakteristike senzora primenom polinoma četvrtog stepena je bolja od ± 0.45 % pune

skale. Ako se u posmatranom mernom sistemu ne vrši temperaturna kompenzacija i linearizacija funkcije prenosa već se ona predstavi optimalnom pravom linijom definisanom pomoću (6) onda relativna greška merenja iznosi ± 3.98 %, što

znači da je skoro za red veličine veća od greške koja se javlja kod temperaturno kompenzovanog i linearizovanog sistema.

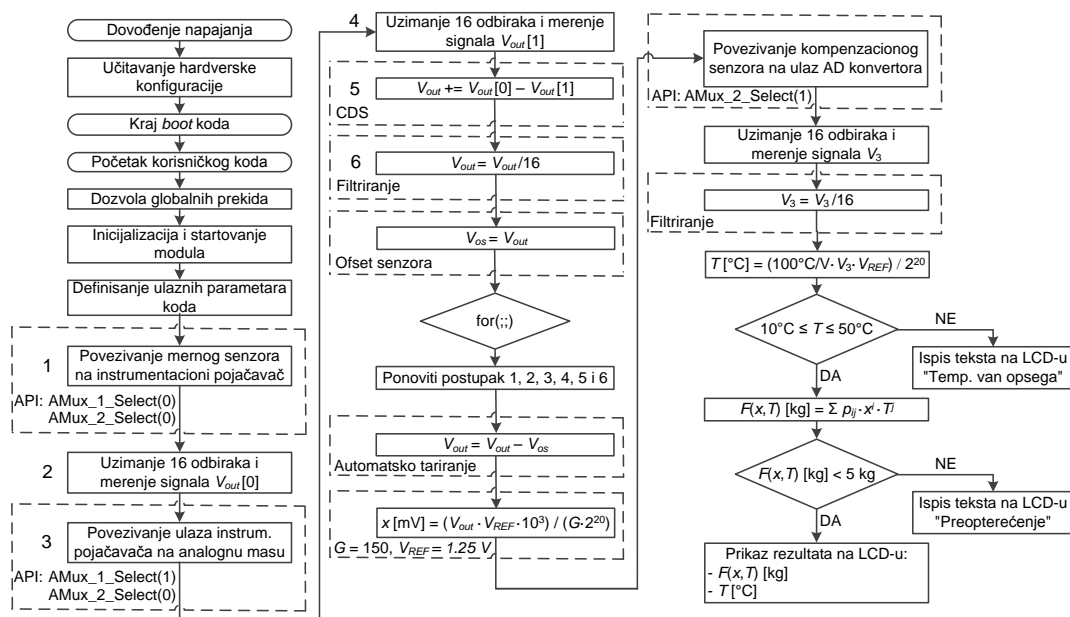
V. REALIZACIJA SOFTVERA

Realizacija zahtevanih mernih i korisničkih funkcija i programiranje PSoC-5 čipa izvršena je u razvojnom okruženju PSoC Creator 2.1. Mikrokontrolerski program je realizovan korišćenjem C programskog jezika. Konfigurisanje parametara korišćenih komponenata unutar PSoC-5 čipa i dozvola globalnih prekida je omogućena korišćenjem API (*Application Programming Interface*) funkcija 32-bitnog

ARM Cortex M3 procesora koje se pozivaju u glavnom programu.

U glavnom programu, koji je pomoću dijagrama toka prikazan na sl. 5, definisane su numeričke metode za:

- Redukciju ofseta senzora,
- Redukciju ofseta instrumentacionog pojačavača,
- Filtriranje signala senzora sile i temperature,
- Linearizaciju i temperaturnu kompenzaciju sistema.



Sl. 5. Dijagram toka glavnog programa mernog sistema

Startovanjem programa prvo se određuje vrednost signala sa mernog senzora kada je vaga neopterećena. Oduzimanjem ove vrednosti od vrednosti signala opterećene vage eliminiše se ofset senzora. Na ovaj način je primenom računarskog algoritma omogućeno automatsko tariranje sistema.

Za redukciju ofseta instrumentacionog pojačavača se koristi CDS metoda, koja je opisana u trećem poglavlju. Filtriranje signala sa mernog i kompenzacionog senzora se vrši softverski, primenom FIR filtra propusnika niskih učestanosti koji je realizovan kao *Moving Average* filtar, pri čemu se vrši usrednjavanje 16 sukcesivnih odbiraka signala.

Linearizacija i temperaturna kompenzacija sistema je izvršena primenom numeričke metode. Na osnovu rezultata merenja određena je kalibraciona funkcija sistema u vidu polinoma četvrtog stepena.

Rezultati merenja prikazuju se na lokalnom LCD displeju i preko USB interfejsa prosleđuju personalnom računaru.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen postupak realizacije sistema za precizno merenje malih težina korišćenjem programabilnog sistema na čipu i ekonomičnog senzora sile sa mernim trakama. Kompletan elektronski deo sistema, koji obuhvata

kola za kondicioniranje, konverziju i pojačanje signala, digitalnu obradu signala, prikaz i komunikacione funkcije, realizovan je korišćenjem samo jednog čipa, CY8C5568AXI-060 iz PSoC-5 familije. Izbor, konfiguracija korišćenih analognih i digitalnih komponenata i rutiranje signala unutar PSoC-5 čipa se vrši na jednostavan i brz način u okviru raspoloživog razvojnog okruženja PSoC Creator 2.1.

U radu su dati ostvareni rezultati koji se odnose na maksimalnu relativnu grešku merenja pune skale pre i posle kompenzacije sistema za opseg temperature od 10 °C do 50 °C. Postignuti rezultati nakon opisane metode za linearizaciju i temperaturnu kompenzaciju pokazuju da je tačnost mernog sistema bolja od ±0.5% za težine od 0.1 do 5 kg. Ostvarena tačnost je za skoro red veličine bolja od tačnosti posmatranog sistema kod koga nije sprovedena temperaturna kompenzacija i linearizacija.

Funkcionalna ispitivanja realizovanog sistema pokazuju da sistem ispunjava sve funkcionalne zahteve pri čemu su merne karakteristike u najvećoj meri određene karakteristikama korišćenog senzora sile. S obzirom na to da je u realizaciji čitavog mernog sistema korišćen programabilni sistem na čipu koji sadrži programabilne analogne i digitalne komponente i 32-bitni mikrokontroler, omogućena je automatizovana

rekonfiguracija sistema, čime se na jednostavan i brz način može izmeniti ili proširiti funkcionalnost ili sistem prilagoditi merenju drugih fizičkih veličina.

ZAHVALNICA

Rad je delimično finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja R. Srbije preko projekta TR-33022.

LITERATURA

- [1] "PSOC Programmable System on Chip", Cypress Semiconductor, available at: <http://www.cypress.com>
- [2] Colm Slattery, Mariah Nie, "A Reference Design for High-Performance, Low-Cost Weigh Scales", Cypress Semiconductor, available at: <http://www.cypress.com/file/111801/download>
- [3] "PSoC Creator Integrated Design Environment - IDE", Cypress Semiconductor, available at: <http://www.cypress.com>
- [4] V. Drndarević, Akvizicija memih podataka pomoću personalnog računara, Institut VINČA, ISBN 86-7306-032-X, Beograd 1999.
- [5] Rong Wu, Johan H. Huijsing, Kofi A. A. Makinwa, "Precision Instrumentation Amplifiers and Read-Out Integrated Circuits", Springer, 2013.
- [6] C. Enz, G. Temez, "Circuit techniques for reducing the effects of op-amp imperfections", *Proceedings of the IEEE*, November 1996., volume 84, page 1584-1614.

- [7] "Load cell CZL601", South China Sea Electronic Measuring Technology Co., available at: <http://www.sah.rs/senzori/CZL601.html>
- [8] CYCKIT/050 PSoC5 Development Kit, Cypress Semiconductor, available at: <http://www.cypress.com/documentation>.

ABSTRACT

This paper presents a method of realization of the system for accurate measurement of small weights by using a programmable system on chip. The designed system is based on a programmable system on chip CY8C5568AXI-060 of PsoC-5 family and the implementation of a laboratory model of the system was performed by using evaluation board CY8CKIT-050 and load cell with strain gauges CZL601. The implemented system has been tested in a temperature range from 10 °C to 50 °C and the achieved results show that the accuracy of the system is better than $\pm 0.5\%$ for weights of 0.1 to 5 kg.

Implementation of the System for Accurate Measurement of Small Weights

Predrag Petronijević, Vujo Drndarević