

SENZORJI TLAKA S TOKOVNIM NAPA JANJEM

Marko Pavlin, Darko Belavič, Stojan Šoba,
HIPOT, Šentjernej, Slovenija
Slavko Amon, Uroš Aljančič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: senzori tlaka, napajanje s tokom konstantnim, senzori tlaka piezoupornostni, Wheatstone mostički, kompenzacije temperaturne, napajalniki tokovni, viri toka konstantnega, diode referenčne, reference napetostne precizne, offset napetost, izničenje offset-a, kompenzacija drift-a, odvisnost temperaturna občutljivosti tlačne, razpon delovanja, kompenzacija temperaturna razpona delovanja

Povzetek: Senzori tlaka so v današnjih dneh nepogrešljiv segment sensorike in predstavljajo velik del svetovnega trga senzorjev. Osnovna zgradba vsakega analognega senzorskega modula vsebuje napajanje senzora, temperaturno kompenzacijo in izhodno stopnjo z ojačevalnikom. V prvem delu je opisan tokovni napajalni vir s konstantnim izhodnim tokom. Sledi primer izračuna tolerance in temperaturnih premikov toka. V drugem delu je opisan in s primerom podkrepjen izračun temperaturne kompenzacije tlačnega senzora. Izračun upošteva, da ima mostična upornost večji temperaturni koeficient upornosti od absolutne vrednosti temperaturnega koeficienta tlačne občutljivosti.

Pressure Sensors with Constant Current Excitation

Key words: pressure sensors, constant current supply, piezoresistive pressure sensors, Wheatstone bridges, temperature compensations, current supplies, constant current sources, reference diodes, precise voltage references, offset voltage, offset nullifying, drift compensation, temperature dependence of pressure sensitivity, operating span, temperature compensation of operating span

Abstract: Pressure sensors estimated a significant part of the world sensor market. Basic analog sensor structure consist of at least pressure sensor and basic temperature compensation, which is described in the present paper. The constant current excitation is described followed by a tolerance analysis. Finally, a calculation for temperature compensation is defined.

1. Uvod

Osnovni element obravnavanega senzora tlaka je silicijev senzorski element (tabletk), ki je običajno sestavljen iz tanke silicijeve membrane pravokotne ali kvadratne oblike. Na membrani so s polprevodniškimi postopki izdelani štirje upori, ki imajo piezoupornostno lastnost in so tako izdelani, da se pri pojavu mehanskih sil, ki nastanejo zaradi delovanja tlaka na membrano dvema poveča upornost, dvema pa zmanjša. Upori so vezani v wheatstonov mostiček, ki je ponavadi na eni strani razklenjen, tako da ima vezje pet priključnih sponk. Tabletk je pritrjena na keramični substrat, za električno povezavo pa skrbijo zlate žičke, ki so pribondirane na obeh straneh. Piezoupornostni efekt ima temperaturno odvisnost, ki se pozna pri temperaturni spremembi tlačne občutljivosti. Potek odvisnosti je negativen, v nasprotju s temperaturno odvisnostjo same upornosti, ki je pozitivna. Idealna situacija bi bila, če bi bila oba poteka enaka, le nasprotnih predznakov.

Pri napajanju senzorskega elementa s konstantnim tokom bi se zaradi spremembe temperature zmanjšala tlačna občutljivost, ki je sicer proporcionalna napajalni napetosti mostiča. Istočasno bi se povečala mostična upornost za enak delež, kar bi pri konstantnem napajalnem toku pomenilo tudi enak delež povečanja napajalne napetosti. Zaradi tega bi se sicer zvišala tlačna občutljivost, vendar se oba vpliva ravno kompenzirata in posredno ostane tlačna občutljivost nespremenjena. V resnici imajo mostički temperaturni koeficient mostične upornosti malo večji od absolutne vrednosti temperaturnega koeficienta tlačne občutljivosti. Zaradi tega dodamo vzporedni upor mostičku, ki omogoči pravo temperaturno kompenzacijo.

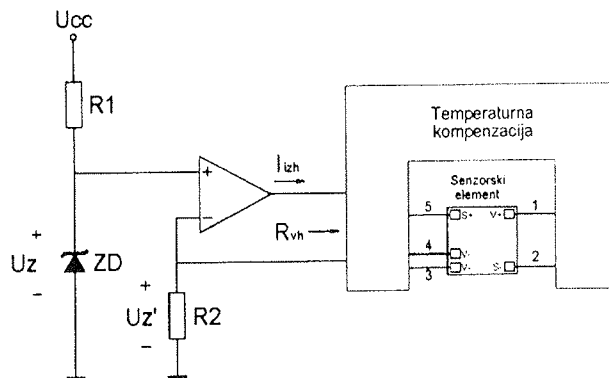
2. Napajanje senzora

Kot je že v uvodu omenjeno, je senzorski mostič napajan s konstantnim tokovnim virom, ki je prikazan na sliki 1. Izhodni tok določa upor R_2 . Če zanemarimo ofsetno napetost operacijskega ojačevalnika, je izhodni tok enak:

$$I_{ZH} \approx \frac{U_Z}{R_2} \quad (1)$$

Pri tem velja, da je $U_Z \gg U'Z$. Pri napajalnih napetostih od 5V naprej moramo paziti, da operacijski ojačevalnik ne pride v nasičenje. Zaradi tega je priporočljivo uporabiti čim nižjo referenčno napetost U_Z .

Na upor R_2 je napetost $U'Z$, k tej napetosti se prišteva še napetost $R_{VH} \cdot I_{ZH}$. Vendar skupna napetost ne sme presežati najvišje izhodne napetosti operacijskega



Slika 1 Shema tokovnega napajalnika za senzor tlaka

ojačevalnika pri danem napajanju:

$$I_{ZH} \cdot (R_{VHMAX} + R_2) < U_{IZHMAX}(U_{CC}) \quad (2)$$

Vhodna upornost senzorja R_{VHMAX} je najvišja vhodna upornost, ki jo kompenziran senzor doseže znotraj delovnega temperaturnega področja. Najvišja izhodna napetost operacijskega ojačevalnika je odvisna od napajalne napetosti in od njegove vrste. Najvišja je, kadar uporabimo t.im. rail-to-rail operacijski ojačevalnik. Izhod takega ojačevalnika gre zelo blizu napajalne napetosti, v področje nekaj deset mV od napajalne napetosti.

Tipičen primer:

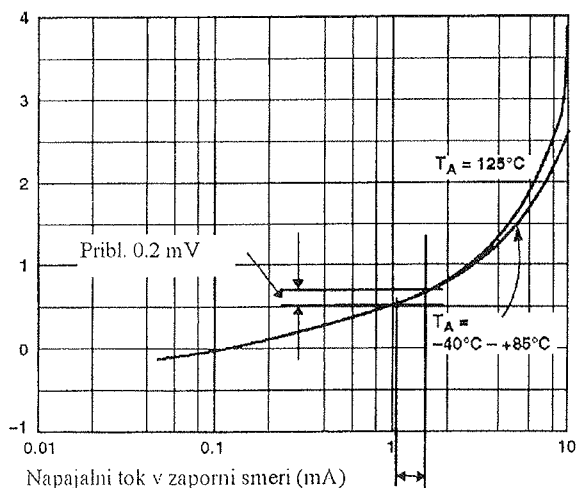
Uporabimo referenčno diodo AD1580 z izhodno napetostjo 1,225 V. Senzor tlaka je SM5102, z ustrezno kompenzacijo. Najvišja vhodna upornost kompenzirane senzorja je 3,5 kΩ. Napajalni tok naj bo 1 mA. Zanima nas vpliv temperaturnih sprememb na napajalni tok. Operacijski ojačevalnik je OP279.

Sprememba upora R_1 zanemarljivo vpliva na referenčno napetost. Na sliki 2 je prikazana sprememba izhodne napetosti v mV glede na spremembo napajalnega toka. Sprememba upora R_1 je v razredu 0,1%. Napajalni tok referenčne diode je enak U_{CC}/R_1 .

Vpliv spreminjajoče napajalne napetosti je veliko večji, saj sprememba U_{CC} iz 5V na 12V pomeni spremembo referenčne napetosti pri napajalnem toku 1 mA za približno 0,2 mV. Iz zgornje slike vidimo, da so spremembe manjše, kadar uporabimo večji upor R_1 (manjši napajalni tok). Optimalna vrednost upora $R_1 = 10$ kΩ, kar pomeni razpon napajalnih tokov referenčne diode od 0,5 mA do 1,2 mA.

Upor R_2 ima vrednost 1,225 kΩ. Izhodni tok je proporcionalen temu uporu. Zaradi tega mora biti stabilen, ker vsaka sprememba upora R_2 pomeni enak delež (v %) spremembe toka.

Podobno je s temperaturnim driftom operacijskega ojačevalnika. Absolutna vrednost ofseta je tipično 4 mV, drift pa znaša 4 mV/°C. Izračunajmo sedaj skupno napako tokovnega vira. Najprej definirajmo izhodni tok.



Slika 2 Vpliv napajalnega toka na spremembo zaporne napetosti

$$I_{ZH} = [U_z(T, U_{CC}) + U_{ofs}(T)] [R_2(T)] \quad (3)$$

Opazujemo največje spremembe. U_z ima začetno toleranco ± 10 mV. Zaradi napajalne napetosti se lahko spremeni za 0,2 mV, zaradi temperature pa ± 50 ppm/°C, oz ± 60 mV/°C. K temu prištejmo še 4 mV ofseta in 4 mV/°C njegovega drifta. Prišteti moramo še ± 100 ppm/°C zaradi upora R_2 . Skupno odstopanje izhodnega toka znaša tako $\pm 1,16\%$. To odstopanje ne upošteva tolerance upora R_2 . Temperaturni drift toka znaša 152 ppm/°C. Prvi podatek ni kritičen za senzorske aplikacije, ker tudi 5% fiksno odstopanje pomeni le spremembo napajalnega toka od enega do drugega senzorja, ki se da tudi nastaviti z aktivnim doravnovanjem upora R_2 . Drift pa je lahko bolj kritičen, posebno kadar želimo dobiti boljše rezultate pri temperaturni kompenzaciji. Idealno je, kadar lahko senzor med meritvami za izračun kompenzacije napajamo kar z istim tokovnim virom kot se kasneje uporabi v končnem izdelku. Morebitni drifti toka se tako upoštevajo v izračunu, celoten senzor pa ima na koncu manjši drift.

3. Temperaturna kompenzacija

Sprememba temperature okolice spremeni štiri parametre senzorja:

- ničelno napetost (ofset),
- tlačno občutljivost (G),
- razpon (S) in
- mostično upornost (R_B).

Ničelna napetost predstavlja izhodno napetost senzorja kadar na senzor ni obremenjen (ni priključen tlak).

Tlačna občutljivost je normaliziran razpon izražen v mV razpona na volt mostične napetosti na enoto priključenega tlaka. Tipična vrednost je okrog 30 mV/V na poln obseg pri senzorjih za srednje tlake od nekaj 100mbar do nekaj barov.

Razpon predstavlja razmerje izhodne napetosti mostiča proti spremembi tlaka. Za nek senzor je razpon S enak produktu tlačne občutljivosti G in mostične napetosti U_B .

$$S = GU_B \quad (4)$$

Temperaturna sprememba razpona je odvisna od načina napajanja senzorja. Kadar mostič napajamo s konstantno napetostjo je temperaturni koeficient razpona TK_S negativen, razpon pa je proporcionalen tlačni občutljivosti. Tipična vrednost temperaturni koeficient razpona v tem primeru je okrog $-0,22\%/^{\circ}\text{C}$. Razmere se spremenijo kadar senzor napajamo s konstantnim tokom in je napajalna napetost odvisna od mostične upornosti R_B .

$$S = GR_B I \quad (5)$$

Mostična upornost ima pozitiven temperaturni koeficient. Tipična vrednost temperaturnega koeficienta mostične upornosti TK_{R_B} je $+0,28\%/^{\circ}\text{C}$. Za uspešno

temperaturno kompenzacijo razpona mora biti izpolnjen pogoj:

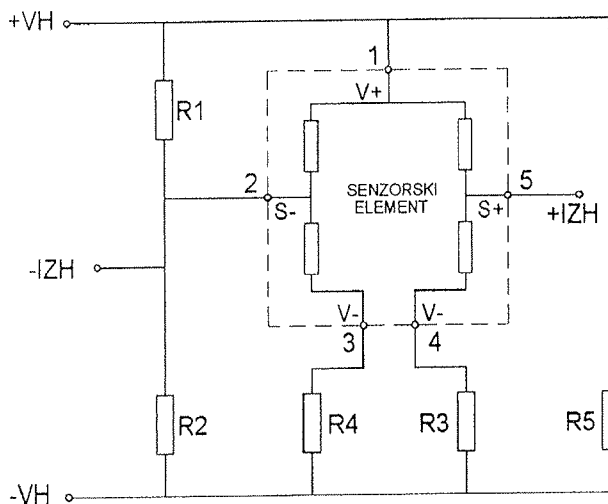
$$TK_{RB} \geq |TK_S| \quad (6)$$

Oba temperaturna vpliva se superponirata, tako da je pri napajanju s konstantnim tokom preostali temperaturni koeficient razpona približno 0,06%/°C. Tako je temperaturna odvisnost mostične upornosti ključnega pomena pri temperaturni kompenzaciji tlačnega senzorja.

3.1. Kompenzacija ničelne napetosti

Kot smo že omenili, je ničelna napetost ali ofset enak izhodni napetosti, kadar na senzor ni priključen tlak. Poseben primer so absolutni senzorji, pri katerih moramo upoštevati, da tudi kadar niso priključeni, so izpostavljeni zračnemu tlaku. Torej jih moramo postaviti v vakuum, da bi izmerili ničelno izhodno napetost. V praksi tega ne počnemo, ampak izmerimo izhodno napetost pri dveh tlakih (od katerih je eden ponavadi zračni) in izračunamo ofset. Seveda pri tem naredimo nekaj napak. Imamo štiri merilne rezultate (dve napetosti in dva tlaka), ki imajo vsi svojo netočnost. Grobo lahko ocenimo, da ima izračunani ofset absolutnega senzorja štirikrat večji pogrešek od izmerjenega pri relativnih senzorjih tlaka. Poleg omenjenih pogreškov moramo upoštevati še nelinearnost senzorja, ki vpliva na končni rezultat izračuna. Za bolj točne meritve lahko izmerimo senzor v treh ali več točkah in njegov odziv interpoliramo z nelinearno interpolacijo. Dokaj enostavna je polinomska interpolacija s kvadratično funkcijo skozi tri točke.

Na sliki 3 je prikazana električna shema temperaturne kompenzacije mostiča. Za izničenje ofseta skrbita upora R_3 in R_4 . Kadar je ofset pozitiven je točka 5 na višjem potencialu kot točka 2. V tem primeru moramo dodati (ali povečati) upornost v vejo med točkama 2 in 3. Kadar je ofset negativen je točka 2 na višjem potencialu od točke 5 zato moramo povečati upornost med točkama 4 in 5.



Slika 3 Kompenzacija tokovno napajanega senzorskega mostiča

Ničelna napetost ima neko vrednost pri konstantni temperaturi. Poleg tega ima tudi nek temperaturni potek, ki je ponavadi linearen. Izničenje teh temperaturnih odvisnosti dosežemo z uporoma R_1 in R_2 . Kadar je temperaturni koeficient ofseta pozitiven, narašča napetost v točki 5 hitreje kot v točki 2. Ta temperaturni vpliv zmanjšamo, če dodamo upor R_1 . Zaradi tega upora bo potencial v točki 2 počasneje naraščal s temperaturo. V primeru negativne temperaturne spremembe ofseta moramo dodati upor R_2 . Vedno uporabimo le enega od obeh uporov. Na hibridnem debeloplastnem vezju to dosežemo s prerezom tistega upora, ki ga ne rabimo. Podobno je z uporoma R_3 in R_4 . Eden je vedno kratko sklenjen, drug pa ima neko upornost.

Dodajanje uporov R_1 in R_2 spremeni začetni ofset. To spremembo moramo upoštevati v izračunu. Sam izračun je precej obsežen, zato si oglejmo le končni rezultat. Senzor izmerimo pri dveh tlakih in dveh temperaturah. Izmerimo izhodne napetosti (štiri spremenljivke) in pri obeh temperaturah še mostično napetost. Skupaj imamo torej šest vhodnih spremenljivk:

Tabela 1 Izmerjene vrednosti

	$T=T_1$	$T=T_2$
$p=p_1$	U_{11}, U_{B1}	U_{12}, U_{B2}
$p=p_2$	U_{21}	U_{22}

V tabeli 1 so prikazane izmerjene vrednosti. Izhodna napetost mostiča je U_{ij} . Indeks i predstavlja tlak, indeks j pa temperaturo. Merimo tudi mostično napetost U_{Bj} . Mostič je napajan s konstantnim tokom I_B . Zaradi preglednejšega zapisa si pri izračunu uporov pomagamo s pomožnimi spremenljivkami.

$$\alpha = \frac{U_{11} + U_{B1}}{I_B} \quad (7)$$

$$\beta = \alpha - \frac{4U_{11}(U_{11} + U_{B1})}{I_B(U_{B2} + 2U_{11})} \quad (8)$$

$$\chi = \frac{U_{12} + U_{B2}}{I_B} \quad (9)$$

$$\delta = \chi - \frac{4U_{12}(U_{12} + U_{B2})}{I_B(U_{B2} + 2U_{12})} \quad (10)$$

Sedaj določimo serijsko upornost, ki jo moramo dodati v eno od vej senzorja in ki že vključuje tudi korekcijo zaradi spremembe ofseta zaradi dodanega paralelnega upora.

$$R_s = \frac{\alpha + \chi - \sqrt{(\alpha + \chi)^2 - 4 \frac{\alpha\beta(\delta - \chi) - \chi\delta(\beta - \alpha)}{\delta - \beta}}}{2} \quad (11)$$

Od predznaka izračunane vrednosti upora R_S je odvisno kateri upor bomo dodali:

Tabela 2 Določanje serijskih kompenzacijskih uporov za ofset

Predznak	Vrednosti uporov	
$R_S \geq 0$	$R_4 = R_S, R_3 = 0 \Omega$	(12)
$R_S < 0$	$R_3 = R_S, R_4 = 0 \Omega$	(13)

Paralelni kompenzacijski upor izračunamo iz enačbe 14.

$$R_P = \frac{\alpha\beta - \beta R_S}{\beta - \alpha + R_S} \quad (14)$$

Podobno kot pri serijskem uporu tudi pri paralelnem predznak določa njegovo lego. V tabeli 3 je postopek določanja lege upora za kompenzacijo temperaturnega koeficienta ničelne napetosti.

Tabela 3 Določanje lege paralelnega upora

Predznak	Vrednosti uporov	
$R_S \geq 0$	$R_2 = R_P, R_1 = \infty \Omega$	(15)
$R_S < 0$	$R_1 = R_P, R_2 = \infty \Omega$	(16)

3.2. Temperaturna kompenzacija razpona

Za uspešno temperaturno kompenzacijo mora biti izpolnjen pogoj (6). Idealno bi bilo, če bi veljal enačaj, ko se oba temperaturna koeficienta ravno ujameta. V resnici je TK_{RB} vedno malo večji. Zaradi tega moramo zmanjšati izhodno upornost tokovnega generatorja z uporom R_5 (glej sliko 3). Pri tej kompenzaciji se pokaže glavna prednost tokovnega napajanja. Upor R_5 je tipično okrog šestkrat večji od mostične upornosti. Ker je upor vezan vzporedno z mostičem pride do zmanjšanja razpona na približno 83%. Če bi želeli isti učinek pri napajanju s konstantno napetostjo, bi morali upor R_5 vezati zaporedno. Razpon bi se tako zmanjšal na približno 16%. Slabost, ki se pojavi pri konstantnem toku pa je temperaturna nelinearnost razpona, ki je veliko večja kot pri napajanju s konstantno napetostjo.

Za izračun upora R_5 moramo poznati razpona in mostični upornosti pri obeh temperaturah. Iz izmerjenih vrednosti določimo vse štiri veličine.

$$U_{S1} = U_{21} - U_{11} \quad (17)$$

$$U_{S2} = U_{22} - U_{12} \quad (18)$$

$$R_{B1} = \frac{U_{B1}}{I_B} \quad (19)$$

$$R_{B2} = \frac{U_{B2}}{I_B} \quad (20)$$

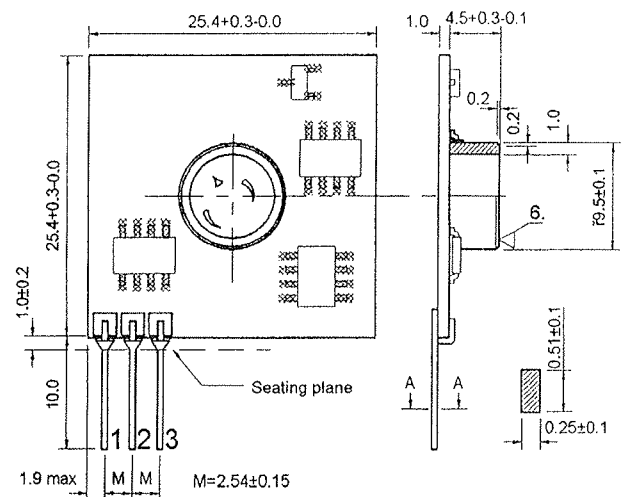
Vrednost kompenzacijskega upora R_5 določa enačba 21.

$$R_5 = \frac{R_{B2} U_{S1} - R_{B1} U_{S2}}{U_{S2} - U_{S1}} \quad (21)$$

4. ZAKLJUČEK

Prikazan je bil primer izračuna kompenzacije, ki mu sicer manjka še analiza točnosti in temperaturne linearnosti. V praksi se je izkazalo, da so tokovno napajani, temperaturno kompenzirani senzorji tlaka, temperaturno bolj nelinearni od napetostno napajanih. Na prvi pogled bi lahko preko dualnega vezja ugotovili, da bi morale biti razmere iste za obe vrsti senzorjev, vendar je razmerje oz. razlika temperaturnih koeficientov upornosti in tlačne občutljivosti pri eni in drugi vrsti različna. Teoretične vrednosti, pod katere se v komercialnem 50°C temperaturnem obsegu ne da priti so okrog 0,4% FSO. Praktična meja pa je malo slabša, nekje okrog 0,75%.

Pri proizvodnji senzorjev tlaka, ki je eden od proizvodnih programov podjetja HIPOT-HYB d.o.o. Šentjernej, uporabljamo omenjeno metodo pri nekaterih izdelkih. Eden takih izdelkov je senzor tlaka za merjenje absolutnega tlaka v področju od 0 do 1 bar. Senzor je izdelan na keramičnem sustratu velikosti $25,4 \times 25,4 \times 1 \text{ mm}^3$ v hibridni debeloplastni tehnologiji s silicijevim senzorskim elementom. Posebnost omenjenega izdelka z oznako EST2139 je tudi ta, da senzor ne potrebuje posebnega ohišja, s priključkom za tlak. Senzor, ki je prikazan na sliki 4 ima tri zunanje priključke, za napajanje, GND in napetostni izhod. Senzorju sta dodana še napajalno vezje in ojačevalnik, tako da dobimo ob napajalni napetosti 5 V standardno izhodno napetost od 0,5 V do 4,5 V.



Slika 4 Senzor tlaka EST2139 s tokovnim napajanjem in napetostnim izhodom 0,5 V do 4,5 V

Poleg omenjenega izdelka podjetje HIPOT-HYB, d.o.o. Šentjernej izdeluje tudi ostale senzorje, nekatere iz standardnega programa, večino pa po naročilu kupca. Za vse ostale informacije v zvezi s senzorji tlaka in nekaterih ostalih veličin ter debeloplastnimi hibridnimi vezji se obrnite na naše podjetje in z veseljem vam bomo pomagali pri izvedbi.

5. ZAHVALA

Zahvaljujemo se Ministrstvu za znanost in tehnologijo Republike Slovenije za podporo raziskovalnim institucijam, ki so sodelovale pri raziskovalnem delu.

Marko Pavlin, dipl.ing
Stojan Šoba, dipl.ing.
HIPOT, d.o.o.
Trubarjeva 7, 8310 Šentjernej, Slovenia
Tel.: +386 681 81 220
Fax: +386 681 81 370
E-mail: marko.pavlin@guest.arnes.si

6. VIRI

- /1/ M. Pavlin, "Temperaturne lastnosti piezouporovnih silicijevih senzorjev tlaka", Diplomaska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 1995
- /2/ U. Aljančič et al., "Temperature Dependencies of Silicone Pressure Sensor", MIEL-SD94 Proceedings, MIDEM, 1994, pp 157-162
- /3/ J. Bryzek, "Compensating Temperature Errors in Integrated Circuit Pressure Sensors", Chicago 1992
- /4/ Hipot-Hyb d.o.o. - interna dokumentacija
- /5/ Sensortech GmbH, "Pressure Sensors, Transducers and Transmitters", Handbook of integrated circuits pressure sensors from SenSym, 1997
- /6/ Analog devices Designer's CD Reference Manual, CD ROM, 1996
- /7/ M. Pavlin et al, Thick film sensor evaluation module, Proc. MIEL-97, Gozd Martuljek, 1997, 365-370
- /8/ D. Belavič et.al, Design of thick film hybrid circuits for sensor applications, Proc. MIEL-96, Nova Gorica, 1996, 237-242

Darko Belavič, dipl.ing.
HIPOT, d.o.o.
c/o Institut Jožef Stefan
Jamova 39, 1001 Ljubljana, Slovenia

prof. dr. Slavko Amon
mag. Uroš Aljančič
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenia

Prispelo (Arrived): 25.2.1998

Sprejeto (Accepted): 17.4.1998