

# SENZORJI TLAKA ZA MEDICINSKO IN INDUSTRIJSKO UPORABO

<sup>1</sup>Marko Pavlin, <sup>1</sup>Darko Belavič, <sup>2</sup>Matej Možek

<sup>1</sup>HIPOT-RR, d.o.o., Šentjernej, Slovenija

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Slovenija

**Ključne besede:** senzor, senzor tlaka, piezouporovni senzorji, pametni senzorji, debeloplastna tehnologija

**Izvleček:** Družba HIPOT-HYB že vrsto let proizvaja, poleg hibridnih debeloplastnih vezij, tudi senzorje tlaka za medicinsko in industrijsko uporabo. Razvoj tehnologije in zahteve trga usmerjajo tudi razvojno dejavnost. V prispevku bo predstavljena raziskovalno-razvojna dejavnost na področju senzorjev tlaka. Njeni dosežki na tem področju bodo ilustrirani z nekaterimi značilnimi primeri, njene usmeritve pa bodo prikazane na primeru pametnega senzorja tlaka.

## Pressure Sensors for Medical and Industrial Applications

**Key words:** sensor pressure sensor, piezoresistive pressure sensor, smart sensor, thick-film technology

**Abstract:** Through many years of experience in thick film technology and pressure sensors many medical and industrial pressure sensor applications were developed and produced in the HIPOT-HYB company. For illustration few medical and industrial applications of pressure sensors are described. In all cases the sensor elements were gauge silicon piezoresistive pressure sensors with a periphery made in thick film technology. In this contribution we demonstrated that silicon pressure sensors in chip form in combination with thick film technology could be successfully used in pressure sensor applications. Special attention must be paid to assembling and packaging aspects in the production of pressure sensors. In our case, the silicon pressure sensor die is bonded onto a ceramic substrate with polymeric adhesives and encapsulated with polymeric materials. The mechanical and thermo-mechanical properties of the materials for assembly and housing have a crucial influence on the properties. Another important aspect in the production of pressure sensors is miniaturisation. The goal is achieved by the use of smaller or more complex components, which concentrate more functionality in a smaller volume. An example is shown with the pressure-switch example. The research, development and design activities on the field of the smart sensor are also introduced.

### 1 Uvod

Po podatkih Intechno Consulting, Basel, Švica je bila vrednost svetovnega trga senzorjev leta 2001 približno 31 milijard EUR z letno rastjo okoli 6 %. Pomembnejša področja uporabe senzorjev so procesna industrija, stroji in naprave, avtomobilska industrija, itd. V zadnjih letih je avtomobilska industrija z 28-odstotnim deležem postala glavni uporabnik senzorjev in s tem prehitela procesno industrijo, ki je imela pred 10 leti največji, 30-odstotni delež. Delež senzorjev za uporabo v medicini se je tudi povečal od 6 % leta 1991 na 10 % v letu 2001. Glede na tip senzorjev pa največji tržni delež pripada senzorjem tlaka.

Tehnološke poti razvoja na področju senzorjev gredo v dveh smereh. Prva je miniaturizacija v t. i. Mikro-elektromehanske sisteme (MEMS), druga pa je v pametne (smart) senzorje. Mikrosistemske tehnologije za izdelavo MEMS so v največji meri polprevodniške. Uporabljajo pa se tudi keramične (C-MEMS) in hibridne (H-MEMS) tehnologije za izdelavo t. i. mezo- in mikro-elektromehanskih sistemov (M&MEMS). Kombinacija MEMS in modernih elektronskih in informacijskih tehnologij pa je ponudila novo kvaliteto pri uporabi senzorjev. Tako imenovani pametni senzorji so sposobni samodiagnostike in samokalibracije, njihovo delovanje pa se lahko krmili (vklop/izklop, merilno območje, merilna veličina,...). Taki senzorji tudi aktivno sodelujejo pri

procesih, so hitro zamenljivi in se jih lahko priredi za komunikacijo v različnih mrežah (CAN, internet, ...).

Splošna usmerjenost na področju senzorjev je tudi zniževanje cen. Najbolj se to pozna pri proizvajalcih senzorjskih elementov. Zaradi tega le-ti povečujejo obseg proizvodnje, inovirajo tehnologije in standardizirajo izdelke. V veliki meri cenovna usmerjenost vpliva tudi na naslednjo stopnjo, ki jo imenujemo senzorski modul. tega v minimalnem obsegu sestavljajo: senzorski element, elektronika za procesiranje senzorskega signala in ohišje. Proizvajalci imajo zato večjo fleksibilnost pri izbiri sestavnih delov, razvoju, konstrukciji in sestavi senzorskih modulov. Cenovna usmerjenost na nivoju sistemov pa je zelo odvisna od področja uporabe.

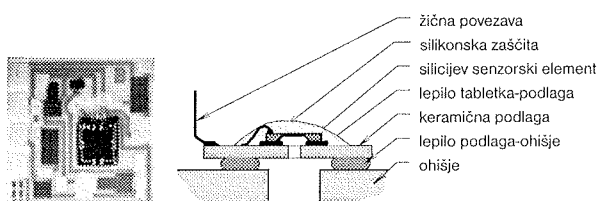
Industrijski partner, HIPOT-HYB, Proizvodnja hibridnih vezij, d.o.o., Šentjernej, je podjetje, ki proizvaja hibridna debeloplastna vezja ter medicinske in industrijske senzorje tlaka. V manjši meri izdeluje tudi senzorje temperature in sile. HIPOT-HYB trži pretežno na razvitih zahodnih trgih, kjer ustvari 75 % prihodkov od prodaje. V programski strukturi je najpomembnejši program medicinskih senzorjev tlaka s 60-odstotnim deležem, sledijo hibridna debeloplastna vezja s 37, 3-odstotni delež pa je bil leta 2001 nov program industrijskih senzorjev tlaka. Podjetje razvija in izdeluje široko paleto različnih senzorjev tlaka: enostavne pasivne senzorje, temperaturno kompenzirane in kalibrirane pasivne sen-

zorje, z dodatkom aktivnih elektronskih komponent pa tudi industrijske pretvornike tlaka in pametne senzorje.

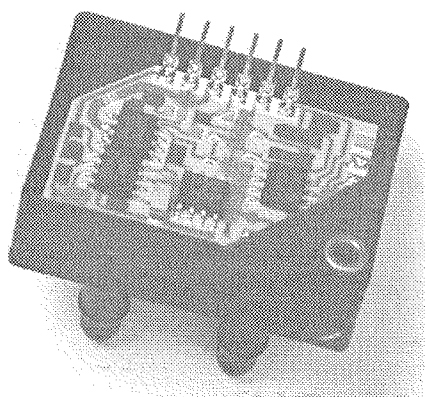
V nadaljevanju bo prikazano nekaj rezultatov raziskovalno-razvojnega dela in nekaj senzorjev tlaka za uporabo v medicini in industriji.

## 2 Konstrukcija senzorja tlaka

Za izdelavo hibridnih senzorjev tlaka uporabljamo kupljen gol silicijev piezoupornostni senzor tlaka kot senzorski element ter hibridno debeloplastno tehnologijo za montažo senzorskega elementa ter izdelavo kompenzacijskega in umerjevalnega elektronskega vezja (slika 1) /1/. Poleg tega se hibridna debeloplastna tehnologija uporablja tudi za izdelavo elektronskega vezja za procesiranje senzorskega signala (slika 2) /2,3,4,5,6/.



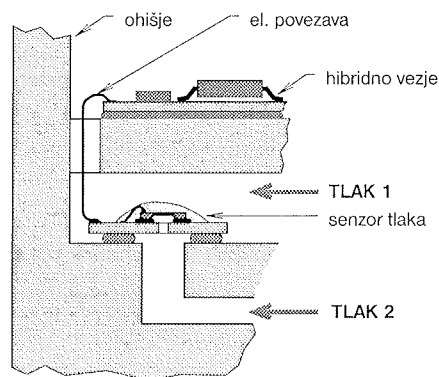
Slika 1: Silicijev piezoupornostni senzor tlaka, integriran v debeloplastno umerjevalno vezje. Na levi je prikazana fotografija izdelka, na desni pa shematsko njegov presek.



Slika 2: Industrijski senzor tlaka. Vidno je elektronsko vezje za procesiranje senzorskega signala, izdelano v hibridni debeloplastni tehnologiji.

Na lastnosti senzorjev tlaka pa pomembno vpliva tudi konstrukcija in izbira materiala za sestavne dele /7,8,9/. Značilna konstrukcija senzorjev (modulov) tlaka je izvedena v dveh delih. Prvi je senzorski element z ustrežno periferijo, drugi pa elektronsko vezje za procesiranje senzorskega signala. Oba dela pa sta potem vgrajena v ohišje, ki je lahko plastično ali kovinsko ter s priključnimi cevki ali z možnostjo vgradnje v standardna kovinska cevna ohišja. Detajl ene izmed značilnih konstrukcij senzorjev tlaka je prikazan na sliki 3.

Posebno pozornost posvečamo izbiri materialov za ohišja in sestavne dele ter nadzoru proizvodnega procesa. Pri tem je pomembna predvsem skladnost mehanskih, termomehanskih in kemičnih lastnosti sestavnih delov /10,11,12/. V tabeli 1 so podani temperaturni razteznostni koeficienti uporabljenih materialov. Procesi izdelave senzorja pa morajo biti taki, da ne puščajo zaostalih mehanskih napetosti v sestavnih delih.



Slika 3: Detajl ene izmed značilnih konstrukcij senzorjev tlaka

Tabela 1: Primerjava temperaturnih razteznostnih koeficientov materialov, uporabljenih pri konstrukciji senzorja tlaka

Material	Temperaturni razteznostni koeficient ( $10^{-6}/K$ )
Epoxy	60÷80
Polyester	80÷130
Mehko lepilo (gel)	200÷400
Keramična podlaga	6÷7
Silicijev senzorski element	3÷4

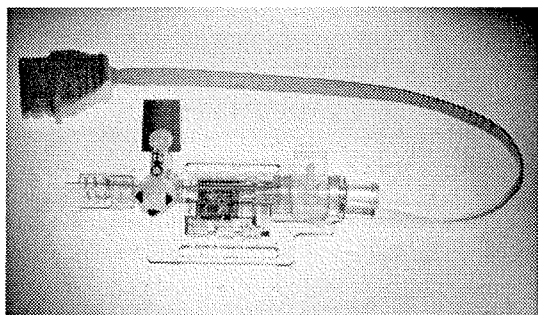
Pri izdelavi senzorjev tlaka praviloma uporabljamo senzorske elemente (silicijeve ali keramične), ki delujejo na osnovi piezoupornostnega efekta. Štirje senzorski upori na membrani so vezani v Wheatstonov mostič, ki je napajen s konstantnim tokom ali napetostjo, izhodna napetost pa je v področju mV. To je osnova, ki jo nadgradimo najprej s temperaturno kompenzacijo, da izničimo vpliv neželenih veličin (temperature). Temu sledi ojačevalnik z diferencialnim vhodom, ki je individualno kalibriran za vsak senzorski element posebej. Izhodna napetost je v standardnem področju od 0,5V do 4,5V. Namesto napetostnega izhoda lahko izdelamo tudi tokovni izhod za tokovne zanke od 4mA do 20mA ali pa digitalni vmesnik. Večjo stopnjo integracije pa dosežemo z uporabo ASIC (Application Specific Integrated Circuit) /13,14/.

Področja tlakov, ki jih obvladujemo z našimi senzorji so od 2 mbar do 10 bar. Temperaturno področje delovanja je od -20 °C do +80 °C. V temperaturnem področju od 0 do 50

°C pa zagotavljamo točnost 1 %. Napajalne napetosti so od 5 V naprej.

### 3 Senzorji tlaka za uporabo v medicini

V medicini obstajajo vse večje zahteve po točnem spremljanju določenih vitalnih človekovih funkcij pri velikem številu pacientov. Ta smer je še posebej opazna v zelo razvitih državah, kot so: ZDA, Nemčija, Japonska in druge države EZ. Več desetletij je že v uporabi različna nadzorna (monitorska) oprema, ki omogoča v povezavi z ustreznimi senzorji trajno spremljanje človekovih vitalnih funkcij. Tak primer je tudi invazivno merjenje krvnega tlaka pri pacientih v intenzivni negi in merjenje znotrajmaterničnega tlaka pri nosečnicah. Oboje lahko merimo v principu z istim tipom senzorja, ki pa mora biti prirejen specifični uporabi. Posebnost senzorjev tlaka za medicinsko uporabo je proizvodnja v klinično čistih prostorih in uporaba biokompatibilnih materialov in drugih specifikacijah, ki jih določa standard AAMI. Senzorji, ki so se uporabljali prej, so bili namenjeni za večkratno uporabo. Vzporedno z naraščajočim strahom za krvno okužbo so se v zadnjem desetletju začeli uporabljati senzorji za enkratno uporabo. Tak tip senzorjev je ustvaril novo tržišče, ki dosega samo na področju krvnih senzorjev tlaka že okrog 30 milijonov kosov. Od tega podjetje HIPOT-HYB izdeluje 1,2 milijona kosov senzorjev za invazivno merjenje krvnega tlaka (slika 4) pri pacientih v intenzivni negi.



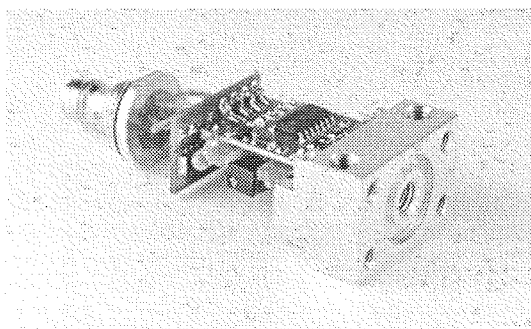
Slika 4: Sensor za invazivno merjenje krvnega tlaka pri pacientih v intenzivni negi

### 4 Razvojna pot vakuumskega stikala

Vakuumsko ali tlačno stikalo je posebna izvedba senzorja tlaka. Referenčno napetost in napetost ojačenega senzorskega signala, ki pomeni izmerjeni tlak, primerjamo v elektronskem vezju (komparatorju), ki izvede električni preklon. S spreminjanjem referenčne napetosti je možno tudi nastavljanje, pri kateri velikosti tlaka bo stikalo preklopilo.

Za znanega kupca smo pred leti po naročilu razvili vakuumsko stikalo (slika 5), ki je bilo takrat najmanjše komercialno dosegljivo vakuumsko stikalo na trgu. Z nadaljnjim razvojno-raziskovalnim delom pa se je evolucija tega izdel-

ka nadaljevala v smeri nadaljnje miniaturizacije (slika 6) kakor tudi v smeri enostavnejših proizvodnih postopkov.



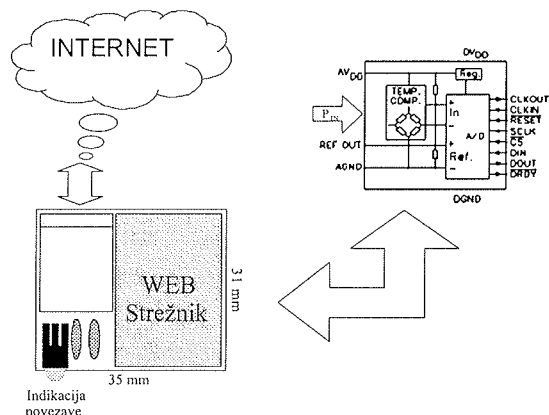
Slika 5: Konvencionalno vakuumsko stikalo



Slika 6: Miniaturno vakuumsko stikalo (levo) in ultraminiaturno vakuumsko stikalo (desno)

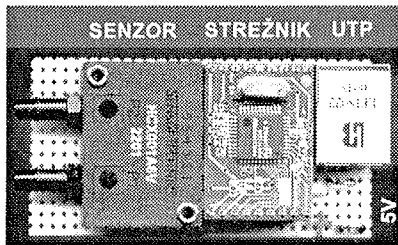
### 5 Pametni senzor tlaka

Nadgradnja senzorjev tlaka so t. i. pametni senzorji tlaka /15/. Napetost ojačenega senzorskega signala se pretvori v digitalno informacijo, ki se v nadaljevanju procesira z uporabo digitalnih tehnologij, ki omogoča široke možnosti različnih tipov in nivojev "pameti". Taki senzorji imajo poleg digitalnega vmesnika tudi možnost samokalibracije, prilaganja na proces, konfiguriranja v živo in celo direktne priključitve na omrežje in v internet. Poleg novih lastnosti pa pametni senzorji omogočajo visoko stopnjo avtomatizacije proizvodnje in poenostavljeno izdelavo, ker ni potrebno analogno umerjanje.



Slika 7: Shematski prikaz delovanja tlačnega pretvornika z integriranim strežnikom

Pametni senzorji so sedaj na nivoju prototipov, ki so nastajali v sodelovanju s HIPOT-RR in Fakulteto za elektrotehniko. Do sedaj smo razvili tri tipe pametnih senzorjev: osnovni model s procesorjem MAX1458, kompleksnejši model s procesorjem ADUC816 in tlačni pretvornik z integriranim strežnikom (sliki 7 in 8).



Slika 8: Prototip senzorja tlaka z integriranim strežnikom

## 6 Sklep

Senzorji tlaka, izdelani v hibridni tehnologiji za medicinsko in industrijsko uporabo, temeljijo na kompatibilnih tehnologijah in materialih, kjer je predvsem pomembna skladnost mehanskih in termo-mehanskih lastnosti silicijevega senzorskega elementa in keramične podlage. Razvoj pa gre v smeri uporabe različnih polprevodniških mikro elektromehanskih sistemov (MEMS), integriranih v različno periferijo (elektronika, aktorika, mikromehanika, mikrofluidika, ...). Za izdelavo omenjene periferije pa je primerna keramična LTCC (Low Temperature Cofiring Ceramics).

Poleg tega nadgradnja senzorjev tlaka v pametne senzorje odpira nove tržne možnosti in vpliva na način proizvodnje.

## Zahvale

Zahvaljujemo se industrijskemu partnerju, družbi HIPOT-HYB, d.o.o., Šentjernej, ki je dovolila objavo prispevka.

Zahvaljujemo se Ministrstvu za šolstvo, znanost in šport Republike Slovenije za sofinanciranje aplikativnega raziskovalnega projekta L2-3025 z naslovom Tehnologije silicijevih senzorjev tlaka.

Avtorji prispevka se zahvaljujemo tudi vsem drugim sodelavcem pri različnih raziskovalnih in razvojnih projektih, ki so bili osnova za nekatere rezultate, prikazane v prispevku.

## 7 Literatura

- /1/ D. Belavič, S. Šoba, M. Pavlin, D. Ročak, M. Hrovat, "Silicon pressure sensors with a thick film periphery", *Microelectronics International*, 15(1998)3, 26-30
- /2/ D. Belavič, M. Pavlin, M. Hrovat, "Evaluation of Thick Film Materials for Diffusion Patterning - Preliminary Results", *Proc. 34th Int. Conf. Microelectronics, Devices and Materials MIDEM-98*, Rogaska Slatina, 1998, 305-310
- /3/ D. Belavič, M. Hrovat, M. Pavlin, "Thick film materials for diffusion patterning technology", *Proc. The Fifth European Conference on MultiChip Modules*, London, Feb. 1-2,1999, 62-72
- /4/ M. Hrovat, D. Belavič, M. Pavlin, "Some results obtained with thick film diffusion patterning technology", *Proc. 35th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials and Workshop on Microsystems*, 13. - 15.10.1999, Ljubljana, 163-168
- /5/ D. Belavič, M. Pavlin, M. Hrovat, "Cheap MCM-C for sensor applications". *Proc. XXIII Conference of the International Microelectronics and Packaging Society, IMAPS POLAND'99*, Poland Chapter, Koszalin Kołobrzeg, 21. - 23.9.1999, 155-160.
- /6/ D. Belavič, M. Hrovat, M. Pavlin, "Thick-film Resistors and multi-layer diffusion patterning technology", *Proc. The 6th European Conference on MultiChip Modules*, London, 24. - 25.1.2000, 7-15
- /7/ D. Belavič, S. Šoba, M. Pavlin, S. Maček, M. Hrovat, D. Ročak, "Design of thick film hybrid circuits for sensor applications", *Proc. 24rd Int. Conf. Microelectronics MIEL-96 / 32st Symp. on Devices and Materials SD-96*, Nova Gorica, 1996, 237-242
- /8/ D. Belavič, S. Šoba, M. Pavlin, S. Gramc, D. Ročak, "Packaging technologies for thick film sensors", *IMAPS/NATO Advanced Research Workshop on Electronic packaging for high reliability, low cost electronics*, 10. - 13.5.1997, Bled
- /9/ J. S. Bergstrom, W. H. Teat, "Package evaluation for silicon pressure sensors", *Proc. Int. Symp. on Microelectronics ISHM'87*, Minneapolis, 1987, 89-94
- /10/ M. Pavlin, D. Ročak, S. Šoba, S. Amon, "Evaluation of polymer adhesives for use in silicone pressure sensor bonding on ceramic substrates", *Proc. 24rd Int. Conf. Microelectronics MIEL-96 / 32st Symp. on Devices and Materials SD-96*, Nova Gorica, 1996, 243-248
- /11/ S. Šoba, D. Belavič, M. Pavlin, I. Lahne, "Long term stability of pressure transducers", *Proceedings of 22-nd Conference of the International Microelectronics and Packaging Society, IMAPS, Poland chapter : Zakopane*, 1. - 3.10.1998. Krakov: The International Microelectronics and Packaging Society, 1999, 307-310
- /12/ D. Belavič, D. Ročak, J. Fajfar Plut, M. Hrovat, M. Pavlin, "An evaluation of stability of small size untrimmed and laser trimmed thick film resistors", *Proc. 23rd Int. Conf. Microelectronics MIEL-95 / 31st Symp. on Devices and Materials SD-95*, Terme Čatež,, 1995, 157-16
- /13/ M. Pavlin, S. Šoba, D. Belavič, "Cheap ASICs vs. Discrete Electronics in Sensors Applications", *Proc. 34th Int. Conf. Microelectronics, Devices and Materials MIDEM-98*, Rogaska Slatina, 1998, 257-262
- /14/ M. Pavlin, D. Belavič, S. Šoba, "ASICs for sensor applications", *Proc. 22nd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE'99*, 18. - 20.5.1999, Dresden, Nemčija, 268-273.
- /15/ M. Možek, S. Amon, D. Vrtačnik, D. Resnik, U. Aljančič, "Designing smart pressure sensors", *Proc. 37th Int. Conf. Microelectronics, Devices and Materials MIDEM-2001*, Bohinj, Slovenija, 10. - 12.10.2001, 179-186

Marko Pavlin, univ. dipl. inž. el.  
 HIPOT-RR, d.o.o.  
 Trubarjeva 7, 8310 Šentjernej, Slovenija  
 Tel.: +386 1 4773 479  
 Faks: +386 1 4263 126  
 E-pošta: marko.pavlin@guest.arnes.si

Prispelo (Arrived): 06.06.2002 Sprejeto (Accepted): 25.03.2003