

Razvoj bežičnog transmitera vakuuma na bazi MEMS senzora sa termobaterijama

Danijela V. Randelović, *Member, IEEE*, Vladislav J. Jovanov, Miloš F. Frantlović, Miloš D. Vorkapić

Apstrakt — U ovom radu su predstavljeni početni rezultati razvoja bežičnog transmitera namenjenog za merenje vakuuma sa ugrađenim termalnim senzorom koji je razvijen u IHTM-CMTM-u. Za ostvarenje ovog cilja objedinjeni su rezultati dosadašnjeg istraživanja koji obuhvataju teorijske i eksperimentalne rezultate istraživanja MEMS senzora sa termobaterijama, dizajn transdjuserskog kućišta transmitera i projektovanje neophodne elektronike.

Ključne reči — analitički model, bežična komunikacija, MEMS senzor sa termobaterijama, transmiter vakuuma

I. UVOD

TERMALNI senzori sa termobaterijama su sve više zastupljeni na tržištu MEMS senzora. Glavna prednost ove vrste senzora je što se mogu primenjivati u različitim oblastima. Neke od mogućih primena ovih mikrosenzora su [1]: detekcija IC zračenja (pojedinačni senzori ili u okviru termovizijskih uređaja), precizno određivanje efektivne vrednosti naizmernih napona i struja (termalni konvertor), merenje brzine protoka fluida, merenje ubrzanja, merenje nagiba, detekcija vakuuma, hemijski i biološki senzori.

Senzori sa termobaterijama su predmet dugogodišnjeg teorijskog i eksperimentalnog proučavanja u IHTM-CMTM-u [2-6]. Proces izrade senzora je kompatibilan sa sopstvenom MEMS tehnologijom razvijenom u CMTM-u za silicijumske senzore pritiska. Celokupan proces izrade je detaljno objašnjen u referenci [6]. Korišćenjem tehnika zapreminskog mikromašinstva silicijuma izrađuje se čip sa tankom dijafragmom na kojoj se nalazi 60 p⁺Si/Al termoparova. Po 30 termoparova je vezano serijski u dve nezavisne termobaterije sa zasebnim izlazima da bi se obezbedila multifunkcionalnost senzora. Dijafragma čipa je višeslojna struktura koja se sastoji od spaterovanog silicijum-dioksida debljine 1 μm i sloja rezidualnog n-Si koji može biti različite debljine od 20 μm do ispod 5 μm. Gotov čip se postavlja na kućište TO-8 pri čemu se odgovarajući kontakti sa čipa bonduju na električne priključke kućišta, čime se formira termalni senzor.

Ovaj rad je delimično finansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta TR-11025.

D. V. Randelović, IHTM – Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Beograd, Njegoševa 12, Srbija (tel: 381-11-2638188; faks: 381-11-2182995; e-mail: danijela@nanosys.ihtm.bg.ac.yu).

V. J. Jovanov, M. F. Frantlović, M. D. Vorkapić, IHTM – Centar za mikroelektronske tehnologije i monokristale, Beograd, Njegoševa 12, Srbija

Razlikuju se dva tipa senzora u zavisnosti od kojeg je materijala izrađen grejač na sredini čipa: A-tip sa Al grejačem i P-tip sa p⁺Si grejačem. Kod senzora A-tipa otpornost grejača je oko 5 Ω, dok je kod senzora P-tipa otpornost grejača oko 6 kΩ.

Multifunkcionalnost IHTM-CMTM termalnih senzora sa termobaterijama je potvrđena i u praksi pošto su oni uspešno testirani za sledeće primene: 1) merenje brzine protoka gasovitih supstanci, 2) merenje efektivne vrednosti naizmernih napona i 3) merenje vakuuma. Pod terminom "merenje vakuuma" podrazumeva se da senzor vrši merenje pritiska nižih od atmosferskog. Nastavak istraživanja u CMTM-u, vezan za ovu problematiku, obuhvata usavršavanje dizajna senzora sa ciljem poboljšanja njegovih performansi kao i razvoj transmitera na bazi termalnih senzora. Krajnji cilj je da se dobije gotov proizvod namenjen za industrijske primene. Na osnovu eksperimentalno verifikovanih primena senzora sa termobaterijama odlučeno je da se započne razvoj transmitera vakuuma. Ova primena je odabrana jer je procenjeno da je realizacija odgovarajućeg transmitera najkompatibilnija sa tehnologijama, postojećom laboratorijskom opremom i gotovim proizvodima već razvijenim u IHTM-CMTM-u.

U ovom radu će najpre biti reči o karakteristikama senzora sa termobaterijama kao merača vakuuma, predviđenom dizajnu transdjuserskog kućišta transmitera, kao i o zahtevima koje mora da ispunjava transmitterska elektronika.

II. KARAKTERISTIKE SENZORA VAKUUMA

Senzor sa termobaterijama se može koristiti za merenje svih onih fizičkih veličina ili detekciju supstanci koje imaju uticaja na promenu temperaturnog gradijenta koji se formira na čipu [1]. Temperaturni gradijent na čipu se kod IHTM-CMTM senzora generiše propuštanjem električne struje kroz grejač senzora, a zavisi od razmene toplote na samom čipu i toplotne interakcije između čipa i okolnog gasa. Temperaturna razlika uspostavljena na čipu se usled Zebekovog efekta pretvara u izlazni napon termobaterije.

Smanjenjem pritiska okolnog gasa smanjuje se i toplotna interakcija čipa sa okolinom, čime se smanjuju gubici, pa dolazi do povećanja temperaturne razlike na čipu [7]. Drugim rečima, izlazni napon termobaterija raste sa smanjenjem pritiska okolnog gasa i zato se senzor sa termobaterijama može koristiti kao merač vakuuma.

Analiza rada senzora sa termobaterijama kao merača vakuuma [5] je uspešno izvršena adaptacijom postojećeg

analitičkog 1D modela [6] tako što je uvedena zavisnost specifične toplotne provodnosti gasa od pritiska $\lambda_{gas}(p)$. Pri određivanju $\lambda_{gas}(p)$ uzeti su u obzir rezultati Eriksonove grupe [8]. Zavisnost specifične toplotne provodnost gasa od pritiska je data sledećom relacijom [5]:

$$\lambda_{gas}(p) = \left(\frac{1}{\lambda_{vp}} + \frac{1}{\gamma_{np} p} (d_1^{-1} + d_2^{-1}) \right)^{-1}, \quad (1)$$

gde je: d_1 - rastojanje od gornje površi čipa do kapice kućišta i d_2 - rastojanje između donje površi dijafragme čipa i baze kućišta. Parametri λ_{vp} i γ_{np} odgovaraju oblastima visokog, odnosno niskog pritiska, respektivno, i njihove vrednosti se mogu izračunati na osnovu sledećih izraza [8]:

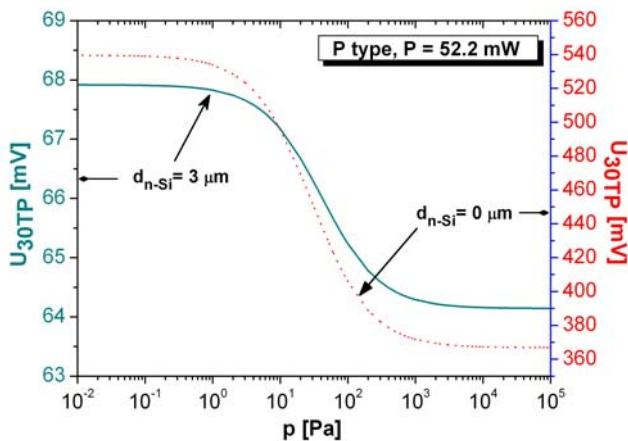
$$\lambda_{vp} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{c}{\sigma_0} \sqrt{k_B T_a M}, \quad \gamma_{np} = \frac{c}{3} \sqrt{\frac{8M}{\pi k_B T_a}}, \quad (2)$$

gde je $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Bolcmanova konstanta, c je specifična toplota, M masa molekula, σ_0 je površina poprečnog preseka rasejanja molekula gasa, dok je T_a temperatura ambijenta.

Pri merenju vakuuma okolni gas je vazduh i stoga je opravdano da se koriste odgovarajući parametri azota [9]. Uzimanjem u obzir uticaj $\lambda_{gas}(p)$ na odgovarajuće parametre analitičkog 1D modela, izlazni Zebekov napon senzora se može predstaviti kao [5]:

$$U_i = N\alpha\Delta T(p) \quad (3)$$

gde parametri N i α predstavljaju broj, odnosno Zebekov koeficijent termoparova, respektivno.



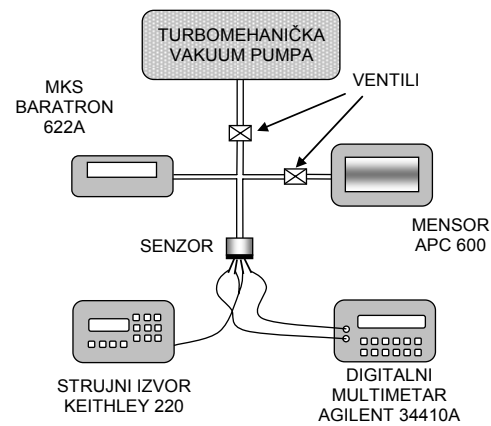
Sl. 1. Teorijska zavisnost izlaznog napona jedne termobaterije P-tipa senzora od pritiska vazduha za različite debljine rezidualnog n-Si.

Na slici 1. prikazana je teorijska zavisnost izlaznog napona jedne termobaterije senzora P-tipa od pritiska na sobnoj temperaturi [5]. Vidi se da se izlazni napon praktično ne menja za $p \geq 1$ kPa i za $p \leq 1$ Pa, pa se senzor prema ovom modelu može koristiti za merenje vakuuma u opsegu od 1 Pa do 1 kPa. Širina radnog opsega je određena toplotnom provodnošću okolnog gasa, pa za različite gasove može biti širi ili uži [9]. Na radni opseg se takođe može uticati posebnim dizajnom senzora [7]. Za nulti izlaz senzora (ofset) uzima se vrednost napona pri $p \geq 1$ kPa. Sa grafika se vidi da razlika izlaznog napona pri pritiscima

$p_{min} = 1$ Pa i $p_{max} = 1$ kPa (koristan signal) iznosi nekoliko milivolti za $d_{n-Si} = 3 \mu\text{m}$. U slučaju kada nema rezidualnog sloja n-Si koristan signal senzora se penje na više od 100 milivolti. Problem je što se i ofset povećava sa oko 64 mV na nekoliko stotina milivolti. Pri merenju vakuuma termobaterije senzora se mogu vezati redno, čime se koristan signal duplira, ali se time duplira i ofset.

III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Za praktičnu realizaciju transmitera potrebno je poznavati eksperimentalnu zavisnost izlaznog napona termobaterijama od pritiska vakuuma za svaki senzor koji se ugrađuje u transmiter. Drugi faktor koji može uticati na karakteristike senzora je temperatura ambijenta, što se vidi iz gornjih formula. Stoga je odlučeno da se snimi zavisnosti izlaznog napona senzora od pritiska vakuuma na dve različite temperature. Da bi se obavila karakterizacija senzora vakuuma razvijen je merni sistem koji je šematski prikazan na slici 2.

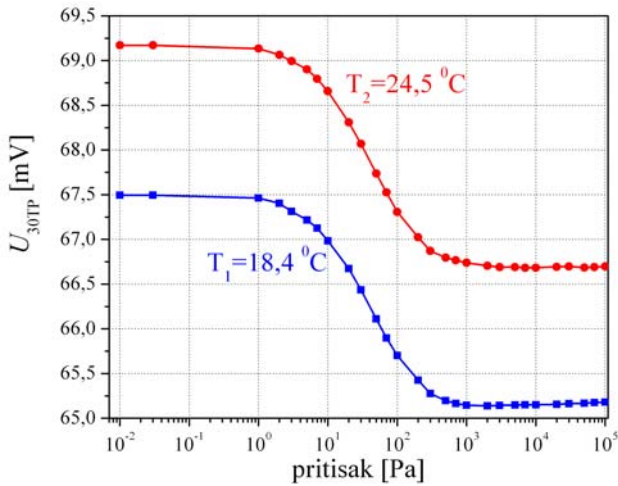


Sl. 2. Šematski prikaz mernog sistema za snimanje zavisnosti izlaznog napona termalnog senzora od pritiska.

Strujni izvor služi za napajanje grejača senzora čime se stvara temperaturni gradijent na čipu. Za senzore A-tipa struja napajanja iznosi 100 mA, a za senzora P-tipa 3 mA, čime se postiže da je snaga grejača približno ista za obe vrste senzora. Na početku merenja turbomehantička vakuum pumpa izvakuira sistem i vrednost pritiska se očitava pomoću merača sa jonskim izvorom. Nakon uspostavljanja najnižeg pritiska uključuje se automatska akvizicija podataka na digitalnom multimetru, da bi se potom zatvorio ventil prema turbomehantičkoj pumpi. Pritisak u sistemu tada počinje da raste, jer zbog neidealnih spojeva vazduh polako curi u sistem cevi. Očitavanje pritiska u rasponu od 1 Pa do 200 Pa se vrši pomoću MKS Baratron 622A. Da bi se znalo koji podatak iz memorije digitalnog multimetra odgovara određenom pritisku meri se i vreme od početka akvizicije podataka do očitavanja, odnosno zadavanja izabranih vrednosti pritiska. Kada pritisak u sistemu dostigne vrednost od oko 200 Pa, otvara se ventil prema kalibratoru Mensor APC 600, pomoću kojeg se dalje generišu i kontrolišu odabrane vrednosti pritiska u opsegu od 200 Pa, pa sve do 10^5 Pa.

Merenja su obavljena sa senzorom P-tipa, čija je debljina dijafragme $2,9 \mu\text{m}$, na dve različite temperature

ambijenta: 18,4 °C i 24,5 °C. Temperatura ambijenta je merena pomoću uređaja TESTO 735. Ovo je urađeno sa ciljem da se utvrdi na koji način temperatura ambijenta utiče na zavisnost izlaznog napona senzora od pritiska vakuuma. Na osnovu dobijenih mernih podataka nacrtani su grafici zavisnosti izlaznog napona od pritiska i temperature koji su prikazani na slici 3.



Sl. 3. Eksperimentalna zavisnost izlaznog napona termobaterije od pritiska za dve različite temperature.

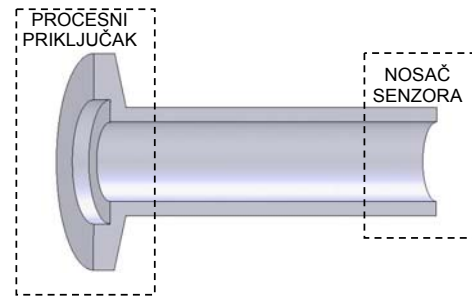
Eksperimentalno snimljene zavisnosti izlaznog napona termobaterije od pritiska potvrđuju da se senzori mogu koristiti za merenje vakuuma u opsegu od 1 Pa do 10³ Pa, kao što teorijski model predviđa. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da promena temperature okoline izaziva promenu vrednosti ofseta i korisnog signala. Stoga je pri digitalnoj kompenzaciji potrebno aproksimirati eksperimentalnu karakteristiku senzora odgovarajućim analitičkim funkcijama koje će uzeti u obzir zavisnost izlaznog napona od pritiska i uticaj temperature na ofset i korisni signal.

IV. RAZVOJ TRANSMITERA VAKUUMA

Realizacija transmitera započinje projektovanjem zaštitnog transducerskog kućišta u koje se ugrađuje senzor. Transducersko kućište ima za cilj da zaštiti senzor od mehaničkih uticaja i da olakša priključivanje transmitera na industrijske instalacije, odnosno merne sisteme. U slučaju da je okolina štetna po senzor, transducersko kućište se projektuje tako da je senzor u potpunosti zaštićen od okoline. Transducersko kućište se standardno izrađuje od različitih vrsta metala ili plastike.

Na slici 4. je predstavljen mogući dizajn transducerskog kućišta transmitera vakuuma koje treba da zaštiti senzor od mehaničkih uticaja i da omogući priključenje na vakuumske sisteme. Zato je izabrano da procesni priključak transmitera bude NW 16-KF, pa se uz pomoć odgovarajuće zaptivke i klampe transducer može povezati u bilo koji vakuumski sistem. Telo transducerskog kućišta transmitera je cilindrično i otvoreno čime se omogućava da senzor sa termobaterijama toplotno interaguje sa gasom iz vakuumskog sistema. Nosač senzora treba da je prilagođen TO-8 kućištu, čime se omogućava zavarivanje

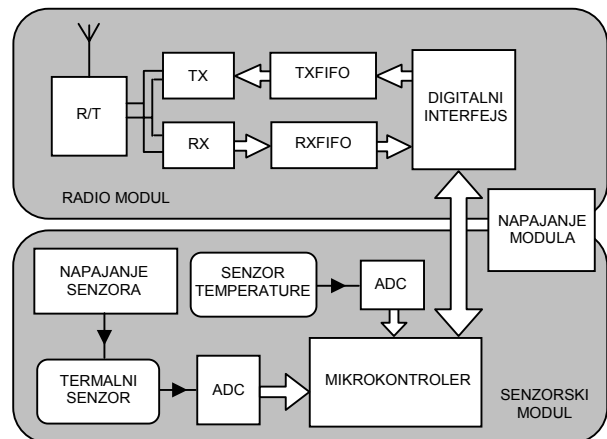
senzora za transducersko kućište i obezbeđuje zaptivanje celokupnog vakuumskog sistema.



Sl. 4. Poprečni presek mogućeg oblika transducerskog kućišta transmitera vakuuma.

Transducer (sa zavarenim termalnim sensorom) treba odgovarajućim električnim kablovima i priključcima povezati sa elektronskim sklopom. U IHTM-CMTM-u je već razvijen bežični sistem za merenje nivoa tečnosti [10] i ovaj sistem će biti osnova za izradu elektronskog sklopa bežičnog transmitera vakuuma.

Elektronski sklop transmitera vakuuma treba da obezbedi napajanje senzora, očitavanje i kompenzaciju izlaznog napona senzora, kao i bežičnu komunikaciju sa mernim ili upravljačkim sistemom, što može biti i običan personalni računar. Elektronski sklop se može realizovati u dva funkcionalna dela: radio modul sa komunikacionim elementima i senzorski modul u kojem se nalaze senzor i svi elementi potrebni za obradu signala. Na slici 5. je prikazan blok dijagram mogućeg elektronskog sklopa transmitera vakuuma.



Sl. 5. Blok dijagram elektronskog sklopa transmitera vakuuma.

Za napajanje senzora sa termobaterijama potreban je izvor konstantne struje. Kao što je rečeno, senzori P-tipa imaju grejač velike otpornosti i napajaju se strujom jačine nekoliko mA. Da bi snaga grejača kod senzora A-tipa bila ista, kao kod senzora P-tipa, njihova struja napajanja mora biti oko 35 puta veća, odnosno treba da iznosi više desetina mA, što je teže postići pomoću integrisanih komponenti. Zbog toga za izradu transmitera treba koristiti samo senzore P-tipa. Signal sa senzora se digitalizuje 24-bitnim Delta-Sigma A/D konvertorom. Da bi se izvršila temperaturna kompenzacija karakteristike termalnog senzora potreban je i senzor temperature, koji služi za

merenje temperature ambijenta. Izlaz sa senzora temperature se takođe digitalizuje.

Mikrokontroler ima višestruku ulogu u celokupnom elektronskom sklopu. Njegov najvažniji zadatak je da na osnovu izmerenih vrednosti temperature okoline i izlznog napona senzora sa termobaterijama izračuna vrednost pritiska vakuuma. U neizbrisivoj memoriji elektronskog sklopa su uskladišteni parametri kompenzacije, koji su dobijeni matematičkom analizom snimljenih karakteristika konkretnog senzora. Mikrokontroler komunicira sa svim podsistemima elektronskog sklopa, kao što su A/D konvertori i radio modul. On takođe omogućuje realizaciju komunikacionog protokola između elektronskog sklopa i mernog ili upravljačkog sistema.

Radio modul ostvaruje bežičnu komunikaciju elektronskog sklopa transmitera sa mernim ili upravljačkim sistemom posredstvom radio talasa. U IHTM-CMTM se radi na razvoju transmitera sa bežičnom komunikacijom, zato što bežični prenos podataka omogućuje postavljanje merne opreme na mesta do kojih je teško, nepraktično ili nemoguće sprovesti kablove za napajanje i prenos podataka. Za realizaciju bežičnog transmitera vakuuma koristio bi se Bluetooth komunikacioni sistem.

Radio modul koji je izabran za ovu primenu sadrži mikrokontroler, sav potreban hardver i softver potreban za Bluetooth komunikaciju i minijaturnu antenu. Upravljački sistem je u našem slučaju PC računar opremljen USB/Bluetooth adapterom, sa namenski napisanom Windows aplikacijom koja služi za prikaz primljenih podataka i za upravljanje radom transmitera. Bluetooth tehnologija omogućuje integritet podataka i zaštitu od ometanja i prislušivanja. Pošto Bluetooth uređaji imaju jedinstvene adrese, radio modul je podešen tako da komunicira samo sa jednim uređajem (USB/Bluetooth adapter) i da u slučaju prekida veze automatski ponovo uspostavlja vezu kada se za to steknu uslovi.

Pri korišćenju Bluetooth sistema za bežičnu telemetriju dolaze do izražaja ograničenja te tehnologije: mali domet (reda veličine 10 metara) i mali broj uređaja koji mogu biti istovremeno u jednoj mreži. Ovo je posledica osnovne namene Bluetooth sistema, a to je umrežavanje ličnih komunikacionih i audio uređaja. Postoje i drugi komunikacioni standardi i sistemi koji omogućuju prevazilaženje pomenutih ograničenja, a najaktuelniji je ZigBee, koji je specijalizovan upravo za senzorske mreže.

V. ZAKLJUČAK

Preliminarni rezultati razvoja transmitera vakuuma na bazi postojećih senzora sa termobaterijama i ranije razvijenog elektronskog sklopa za merenje nivoa tečnosti pokazali su za ovo rešenje pogodni senzori P-tipa. Eksperimentalni rezultati su pokazali da je pri digitalnoj kompenzaciji karakteristike senzora potrebno koristiti odgovarajuće analitičke funkcije koje će modelovati zavisnost izlznog napona od pritiska i uticaj temperature na ofset i korisni signal. Za prvu generaciju transmitera vakuuma biće iskorišćen Bluetooth komunikacioni sistem i specijalno dizajnirano transdjusersko kućište.

Paralelno se radi na razvoju buduće generacije termalnih senzora sa poboljšanim performansama koji će biti ugrađeni u naredne generacije transmitera. Istovremeno se planira i uvođenje komunikacionog standarda ZigBee koji je razvijen za senzorske mreže.

ZAHVALNOST

Želimo da se zahvalimo saradnicima iz grupe akademika Nikole Konjevića, sa Fizičkog fakulteta u Beogradu, na ustupanju mernog uređaja MKS Baratron 622A.

LITERATURA

- [1] G. C. M. Meijer, A. W. Herwaarden, *Thermal Sensors*, Bristol, IOP Publishing 1994.
- [2] D. Randjelović, Z. Djurić, R. Petrović, Ž. Lazić, T. Danković, "Micromachined Experimental Structure for Optimization of Multilayer p+Si/(metal, semiconductor) Thermopile IR Detectors and Thermal Converters", Proc. 22nd MIEL Conference 2000, Vol. 2, Niš, Serbia, May 14-17, pp. 595-598.
- [3] D. Randjelović, G. Kaltsas, Ž. Lazić, M. Popović, "Multipurpose Thermal Sensor Based on Seebeck Effect", Proc. 23rd MIEL Conference 2002, Vol. 2, Niš, Serbia, May 12-15, pp. 261-264.
- [4] D. Randjelović, V. Jovanov, D. Tanasković, M. Matic, "Nova generacija višenamenskih MEMS senzora sa termoparovima - analitički model i detekcija vakuuma", Proc. 51st ETRAN Conference 2007, Herceg Novi - Igalo, June 4 - 8, pp. MO3.4-1-4.
- [5] D. Randjelović, V. Jovanov, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matic, "Vacuum MEMS Sensor Based on Thermopiles - Simple Model and Experimental Results", Proc. 26th MIEL Conference 2008, Vol. 2, Niš, Serbia, May 11-14, pp. 367-370.
- [6] D. Randjelović, A. Petropoulos, G. Kaltsas, M. Stojanović, Ž. Lazić, Z. Djurić, M. Matic, "Multipurpose MEMS Thermal Sensor Based on Thermopiles", Sensors and Actuators A, Vol. 141, 2008, pp. 404-413.
- [7] A. W. van Herwaarden, "Thermal vacuum sensors based on integrated silicon thermopiles", Ph.D. Thesis Delft University of Technology, The Netherlands, 1987.
- [8] P. Eriksson, J. A. Anderson, G. Stemme, "Thermal Characterization of the Surface Micromachined Silicon Nitride Membranes for Thermal Infrared Detectors", IEEE J. Microelectromech. Syst., Vol. 6, 1997, pp. 55-61.
- [9] D. Randjelović, V. Jovanov, Ž. Lazić, M. Matic, "Uticaj vrste i sastava okolnog gasa na odziv IHTM-CMTM senzora sa termoparovima", Proc. 52nd ETRAN Conference 2008, Palić, June 8-12, pp. MO2.4-1-4.
- [10] M. P. Frantlović, I. M. Jokić, D. A. Nešić, "A Wireless System for Liquid Level Measurements", 8th Conference TELSIKS 2007, Septembar 26-28, Niš, Serbia

ABSTRACT

This paper presents preliminary results considering development of wireless transmitter for vacuum measurement with incorporated thermal sensor developed at IHTM-CMTM. In order to achieve this goal it was necessary to combine results of our previous theoretical and experimental research regarding MEMS thermopile sensors, design of transducer package for the transmitter and development of the required signal processing circuits.

DEVELOPMENT OF WIRELESS VACUUM TRANSMITTER BASED ON MEMS THERMOPILE SENSORS

D.V. Randelović, V.J. Jovanov, M.F. Frantlović,
M.D. Vorkapić