

Efikasnost ravnih mikroporoznih hladnjaka u termoelektričnim samonapajajućim sistemima

Aleksandra Stojković

Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš,
Srbija
aleksandra.stojkovic@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0002-0690-0718

Jana Vračar

Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš,
Srbija
jana.vracar@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0001-9094-1135

Miloš Marjanović

Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš,
Srbija
milos.marjanovic@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0002-2230-2646

Aneta Prijic

Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš,
Srbija
aneta.prijic@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0001-9094-7967

Zoran Prijic

Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš,
Srbija
zoran.prijic@elfak.ni.ac.rs; ORCID:
0000-0002-0443-7475

Apstrakt—Mikroporozni hladnjaci ravne geometrije, izrađeni od keramike alumine ili metalne pene, nalaze primenu u sistemima gde je neophodno odvođenje toplote unutar limitiranog prostora. U ovom radu je analizirana efikasnost ovakvih hladnjaka u sprezi sa termoelektričnim generatorima sa ciljem napajanja čvorova bežičnih senzorskih mreža pri uslovima prirodnog hlađenja. Utvrđeno je da su za hladan start i kasniji kontinualan rad čvorova upotrebom ravnih mikroporoznih hladnjaka neophodne minimalne temperaturne razlike između izvora toplote i ambijenta u opsegu (20 - 28) °C, sa snagom predatom opterećenju do 0,5 mW.

Ključne reči — Mikroporozni hladnjak; termoelektrični generator; samonapajajući sistem; prirodno hlađenje; radijacija.

I. UVOD

Mikroporozni hladnjaci se izrađuju od materijala koji poseduju pore otvorenog tipa čime se obezbeđuje veća dodirna površina strukturnog materijala sa okolnim fluidom. Ovakvi materijali poseduju niži toplotni kapacitet po jedinici zapremine i veću količinu disipirane toplote u jedinici vremena. Geometrija mikroporoznih hladnjaka je ravna ili sa jednostavnim rebrima tako da su oni niskoprofilni i laki. To ih čini pogodnim za odvođenje viška toplote u sistemima gde prevladava prirodno hlađenje (bez dodatno stvorenog strujanja okolnog fluida) unutar limitiranog prostora. Jedan od često korišćenih mikroporoznih materijala za hladnjake je keramika alumina čime je postignuta električna izolovanost, elektromagnetna kompatibilnost i eliminisan efekat antene. Ovakvi hladnjaci često nalaze primenu u uređajima široke potrošnje, poput LED i LCD TV uređaja, matičnih ploča računara, digitalnih kamera i adaptera napajanja [1]. Mikroporozna struktura karakteriše i hladnjake od bakarne pene kod kojih postoji dodatna prevlaka od bakar-oksida radi povećanja emisivnosti pene. Njihova oblast primene su kablovski modemi, ruteri, LED TV i set-top-box uređaji [2].

Termoelektrični samonapajajući sistemi, poput čvorova bežičnih senzorskih mreža (eng. Wireless Sensor Networks - WSNs) se napajaju pretvaranjem toplotne energije iz neposredne okoline u električnu, najčešće primenom minijaturnih termoelektričnih generatora (TEG-ova) [3]. Ovi generatori svoj

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije (Ev. br. 451-03-65/2024-03/200102).

rad zasnivaju na Zebekovom (Seebeck) efektu i zahtevaju postojanje odgovarajuće temperaturne razlike na svojim suprotnim stranama. Da bi se obezbedila adekvatna razmena toplote između tople i/ili hladne strane TEG-a i okoline, koriste se različiti hladnjaci ili izmenjivači toplote. Mikroporozni hladnjaci takođe nalaze primenu u ovakvim sistemima. Njihova efikasnost u procesu razmene toplote zavisi od karakteristika materijala, geometrije i dimenzija, kao i veličine kontaktne površine TEG-hladnjak [4].

U ovom radu je analizirana efikasnost komercijalno dostupnih mikroporoznih hladnjaka ravne geometrije u okviru sklopova sa TEG-om pri uslovima prirodnog hlađenja. Materijali hladnjaka su mikroporozna keramika alumina [1] i sinterovana bakarna pena [2]. Uz ove mikroporozne, dodatno je posmatran i standardan aluminijumski hladnjak sa ekstrudiranim niskoprofilnim stubićima uporedivih sveobuhvatnih dimenzija. Odziv sklopova na toplotnu pobudu je eksperimentalno praćen pri uslovima otvorenog kola i pod odgovarajućim opterećenjem. Osnovni parametri za procenu efikasnosti su generisan napon otvorenog kola kao i napon i snaga predati opterećenju pri definisanim temperaturnim razlikama. Performanse sklopova su analizirane i primenom numeričkih simulacija za uslove stacionarne termičke pobude. Njima je omogućeno razmatranje doprinosa pojedinih mehanizama disipacije toplote sa sklopa. Cilj analize je procena mogućnosti da ovakvi nestandardni hladnjaci budu primenjeni u termoelektrično napajanim čvorovima bežičnih senzorskih mreža. Oni bi omogućili realizaciju kompaktnih WSN čvorova smanjenih ukupnih dimenzija.

II. ANALIZIRANI SKLOPOVI

Razmatrano je 9 sklopova koji uključuju 2 minijaturna TEG-a u kombinaciji sa 5 mikroporoznih i jednim aluminijumskim hladnjakom. Primarno su selektovani TEG-ovi pogodni za samonapajajuće sisteme. Kriterijumi za izbor su bili površina spoljašnjih ploča, dimenzije i broj termoelektričnih parova i unutrašnja električna otpornost [5].

Izbor hladnjaka je uslovljen površinom ploča TEG-ova kako bi se obezbedio efikasan prenos toplote između hladne strane TEG-a i okoline. Hladnjaci su niskoprofilni, pri čemu su mikroporozni ravne geometrije, a aluminijumski sa ekstrudiranim stubićima. Sve komponente su komercijalno dostupne i njihovi karakteristični parametri su dati u Tabeli I-Tabela III. Hladnjaci su svojom osnovom prilepljeni za hladnu stranu TEG-a pomoću termoprovodne adhezivne trake. Pregled analiziranih sklopova TEG-hladnjak je dat u vidu eksperimentalne matrice u Tabeli IV. Kombinacije TEG-hladnjak su izabrane tako da je omogućena analiza uticaja međusobnog odnosa površine ploča TEG-a i baze hladnjaka na dobijene rezultate.

TABELA I. KARAKTERISTIČNI ELEKTRIČNI, GEOMETRIJSKI I PARAMETRI MATERIJALA RAZMATRANIH TEG-OVA [5], [6]

Parametar	TEG GM200-71-14-16 (TEG1)	GM200-127-14-16 (TEG2)
Broj termoelektričnih parova - N	71	127
Spoljne dimenzije (mm)	30×30×3,4	40×40×3,4
Unutrašnja električna otpornost na 25 °C - R_{TEG} (Ω)	1,19	2,1
Maksimalna snaga - P_{max} (W)	2,82	4,73
Maksimalna struja - I_{max} (A)	1,23	1,19
Maksimalni napon - V_{max} (V)	2,3	3,98
Maximalna radna temperatura - T_{max} (°C)	200	
Dimenzije termoelektričnog elementa (mm)	1,4×1,4×1,6	
Dimenzije Cu kontakta (mm)	4,2×1,4×0,3	
Debljina ploče od alumine (mm)	0,8	
Ukupan Zebekov koeficijent termoelektričnog para α_{pm} (μV/K)	$1,22 \cdot 10^{-5} \times T^3 - 0,021 \times T^2 + 10,23 \times T - 1081$	
Specifična električna otpornost termoelektričnog para (10^{-5} Ω·m)	$-1,48 \cdot 10^{-5} \times T^2 + 0,017 \times T - 2,78$	
Specifična termička provodnost termoelektričnog para (W/m·K)	$3,96 \cdot 10^{-5} \times T^2 - 0,026 \times T + 5,84$	

TABELA II. GEOMETRIJSKI PARAMETRI RAZMATRANIH HLADNJAKA

Oznaka hladnjaka	Geometrija	Materijal	Dimenzije L×W×H (mm)
CCI11 (HS1)	100 stubića	aluminijum	40×40×5
MPC303025T (HS2)	ravan	mikroporozna keramika	30×30×2,5
MPC404025T (HS3)	ravan	mikroporozna keramika	40×40×2,5
LPH007 (HS4)	ravan	bakarna pena	30×30×5
LPH009 (HS5)	ravan	bakarna pena	40×40×2,5
LPH0010 (HS6)	ravan	bakarna pena	40×40×5

TABELA III. PARAMETRI MATERIJALA RAZMATRANIH HLADNJAKA

Parametar	Materijal		
	Aluminijum	Mikroporozna keramika	Bakarna pena
Gustina (kg/m ³)	2700	1800	3320
Specifična termička provodnost (W/m·K)	201	125	45
Specifični toplotni kapacitet (J/kg·K)	900	670	385
Poroznost (%)	-	30	63
Permeabilnost protoka fluida (m ²)	-	$0,54 \cdot 10^{-10}$	$5,32 \cdot 10^{-8}$
Emisivnost	0,85	0,6	0,7

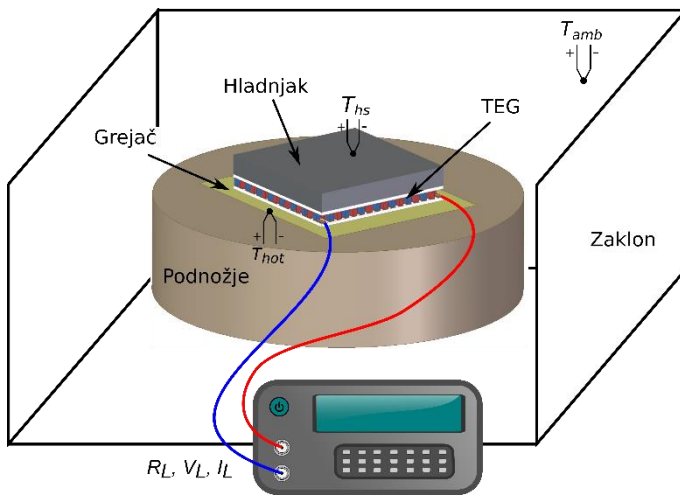
TABELA IV. EKSPERIMENTALNA MATRICA RAZMATRANIH SKLOPOVA

Hladnjak TEG	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5	HS6
TEG1	*	*	*	*		*
TEG2	*		*		*	*

III. EKSPERIMENT

A. Postavka

Šematski prikaz eksperimentalne postavke koja obezbeđuje automatizovanu kontrolu radnih uslova sklopa, kao i merenje relevantnih temperatura i napona na opterećenju je dat na Sl. 1.



Sl. 1. Šematski prikaz eksperimentalne postavke (dimenzije nisu proporcionalne).

Na grejač je termoprovodnom adhezivnom trakom pričvršćen sklop u horizontalnom položaju. Oko aparature je zaklon koji uspostavlja uslove prirodnog hlađenja (bez cirkulacije bočnog okolnog vazduha). Grejač obezbeđuje konstantnu temperaturu tople strane TEG-a (T_{hot}) koja se zadaje po predefinisanim vrednostima od nekoliko desetina °C višim od temperature okoline (T_{amb}). Temperatura površine hladnjaka (T_{hs}) se prati kao kontrolni parametar pošto direktan pristup hladnoj strani TEG-a i merenje njene temperature (T_{cold}) nisu mogući. Za električne izvode TEG-a je vezano programabilno aktivno opterećenje koje istovremeno ima ulogu potrošača promenljive vrednosti (R_L) i multimetra koji meri napon predat opterećenju od strane TEG-a (V_L) i struju kroz opterećenje (I_L). Sve vrednosti temperature od interesa se prate pomoću računaram vođenih digitalnih multimetara.

B. Procedura

Eksperimentalno merenje se odvija u koracima:

1. Postavljanje temperature grejača na predefinisano vrednost i praćenje vrednosti temperature T_{hot} i napona otvorenog kola (V_{oc}) do postizanja stanja termičke ravnoteže od najmanje 30 minuta;
2. Uključivanje aktivnog opterećenja postavljanjem R_L na vrednost od 5 Ω i merenje napona na opterećenju (V_L) i struje kroz opterećenje (I_L) u trajanju od 2 minuta;
3. Smanjenje vrednosti R_L za 1 Ω i novo merenje V_L i I_L ;
4. Ponavljanje koraka 3. do vrednosti $R_L=2$ Ω ;
5. Isključenje aktivnog opterećenja i čekanje da se sistem vrati u stabilno stanje otvorenog kola;
6. Povratak na korak 1. sa novom vrednošću T_{hot} .

Predefinisane vrednosti T_{hot} su određene temperaturama karakterističnim za termoelektrične samonapajajuće sisteme u uslovima prirodnog hlađenja. Vrednosti R_L odgovaraju opsegu vrednosti ulazne otpornosti tipičnog kola za upravljanje energijom u samonapajajućim sistemima u aktivnom režimu rada (npr. LTC3108) [7].

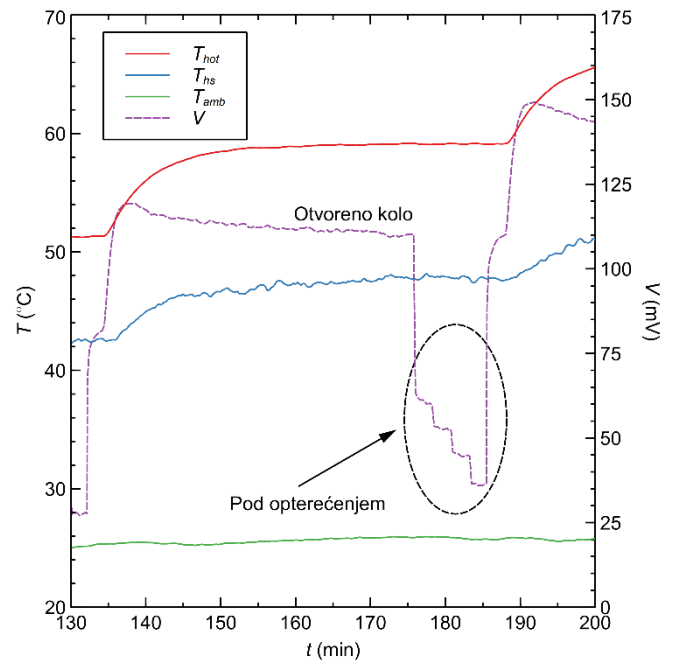
Opterećenje je redno vezano za TEG tako da električne veličine zadovoljavaju relaciju:

$$\begin{aligned} V_L = R_L I_L = V_{TEG} - R_{TEG} I_L = \\ = N \alpha_{pn} (T_{hot} - T_{cold}) - R_{TEG} I_L, \end{aligned} \quad (1)$$

gde N predstavlja broj termoelektričnih parova, α_{pn} ukupan Zebekov koeficijent termoelektričnog para, a R_{TEG} unutrašnju električnu otpornost TEG-a.

C. Primer rezultata eksperimentalnog merenja

Eksperimentalno izmerene vrednosti temperatura, napona otvorenog kola i napona na opterećenju za sklop TEG2-HS6 pri $T_{hot}=60$ °C su prikazane na Sl. 2. Slične zavisnosti se dobijaju za ostale vrednosti T_{hot} , kao i za ostale sklopove iz eksperimentalne matrice.



Sl. 2. Izmerene vrednosti temperatura i napona za sklop TEG2-HS6 i $T_{hot}=60$ °C.

Grejač obezbeđuje iznenadnu termičku pobudu koja odgovara uslovima hladnog starta u samonapajajućim sistemima. Time se stvara temperaturna razlika između tople i hladne strane TEG-a i generiše napon otvorenog kola $V_{oc}=V_{TEG}$. U početku se uočava premašnje napona koje je posledica termičke inertnosti sklopa [8]. Sa zagrevanjem sklopa i punjenjem njegovih termičkih kapacitivnosti napon lagano opada i ulazi u stanje termičke ravnoteže [9].

Uključivanjem aktivnog opterećenja kroz kolo protiče struja I_L i vrednost merenog napona opada prema relaciji (1). Napon koji generiše TEG pri postojećem opterećenju je manji od V_{oc} usled smanjene temperaturne razlike između tople i hladne strane prouzrokovane Peltijevim efektom [6]. Ovaj efekat je posledica proticanja struje i izraženiji je pri većim razlikama $\Delta T=T_{hot}-T_{amb}$ i manjim vrednostima opterećenja R_L .

IV. SIMULACIJE

A. Postavka

Simulaciona postavka je ustanovljena za sklop i okruženje koje odgovara eksperimentalnoj postavci sa Sl. 1. Elementi su geometrijski modelirani u CAD softveru i uvezeni u softver za numeričku multifizičku simulaciju metodom konačnih elemenata. TEG i hladnjak su detaljno modelirani dok su modeli grejača i podnožja pojednostavljeni. Simulacije stacionarnog

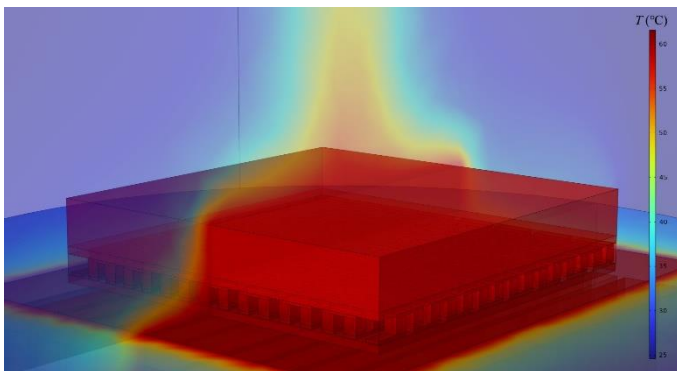
stanja za definisanu termičku pobudu su realizovane primenom spregnutih modula za elektro-termičku i analizu dinamike fluida. Granice simulacionog domena su postavljene tako da ispunjavaju uslov prirodnog hlađenja – dno i bočne stranice su zidovi bez klizanja a otvor na gornjoj strani je na konstantnom pritisku i bez povratnog laminarnog protoka fluida. Prenos toplote se odvija putem provođenja kroz čvrste i mikroporozne strukture, laminarnim strujanjem zagrejanog fluida pod dejstvom gravitacije i radijacijom. Termoprovodna adhezivna traka, usled male debljine, predstavlja idealan termički kontakt. Termičko opterećenje sistema je određeno postavljanjem konstantnog dotoka toplote sa grejača, a električno opterećenje predstavlja eksterni otpornik vezan za izvode TEG-a. Inicijalna simulaciona mreža je dodatno poboljšana u okolini dodirne površine hladnjaka sa okolinom. Rezultati simulacije koji se analiziraju su raspodela temperature unutar sklopa i okolnog fluida, raspodela strujanja fluida iznad hladnjaka, učešće pojedinih mehanizama prenosa toplote sa sklopa, kao i vrednost napona na električnom opterećenju.

B. Parametri

Za simulaciju elemenata sklopa upotrebljeni su geometrijski i parametri materijala TEG-a i hladnjaka dati u Tabeli I i Tabeli III, respektivno. Termoelektrični elementi TEG-a su od dopiranog Bi_2Te_3 čiji su ukupan Zebekov koeficijent, specifična električna otpornost i specifična termička provodnost temperaturno zavisni parametri [6]. Kod struktura sa otvorenim porama je značajan izbor modela za proračun efektivne termičke provodnosti i specifičnog toplotnog kapaciteta, kao i modela protoka fluida kroz pore. Kao najpogodniji su usvojeni modeli bazirani na teoriji efektivnog medijuma (EMT) i Darsijevom zakonu koji uzimaju u obzir vrednosti koeficijenta poroznosti i permeabilnosti protoka fluida poroznog materijala [10].

C. Primer rezultata simulacije

Rezultat simulacije za sklop TEG2-HS6 pri temperaturnoj razlici od $\Delta T = T_{hor} - T_{amb} = 35^\circ\text{C}$ za slučaj otvorenog kola je prikazan na Sl. 3. Vidljiva je raspodela temperature unutar elemenata sklopa kao i jasno definisan oblik perjanice uslovljen strujanjem okolnog fluida u uslovima prirodnog hlađenja.

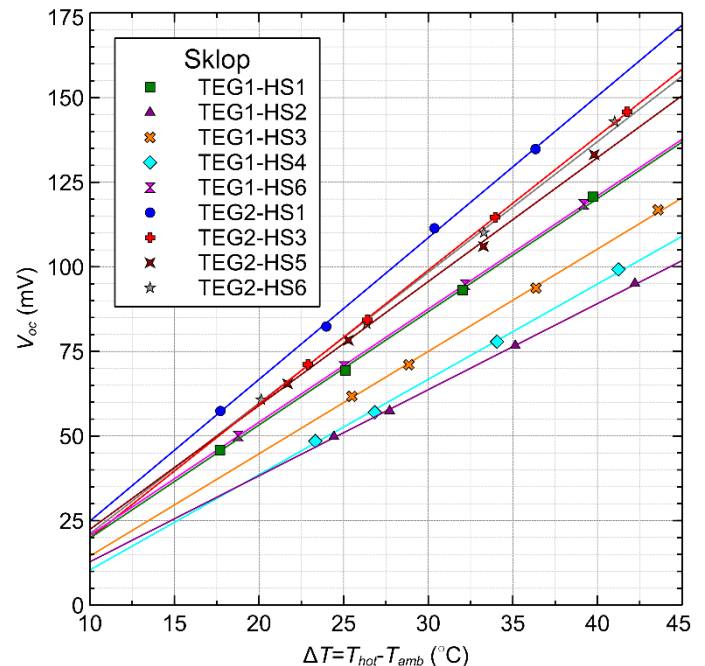


Sl. 3. Raspodela temperature na sklopu TEG2-HS6 i okolnom fluidu dobijena simulacijom pri $\Delta T = T_{hor} - T_{amb} = 35^\circ\text{C}$ i pri otvorenom kolu.

V. DISKUSIJA REZULTATA

Za analizu efikasnosti izabranih hladnjaka je razmatrana zavisnost napona V_{oc} od temperaturne razlike $\Delta T = T_{hor} - T_{amb}$ prikazana na Sl. 4. Opseg ΔT je karakterističan za termoelektrične samonapajajuće sisteme malih dimenzija koji

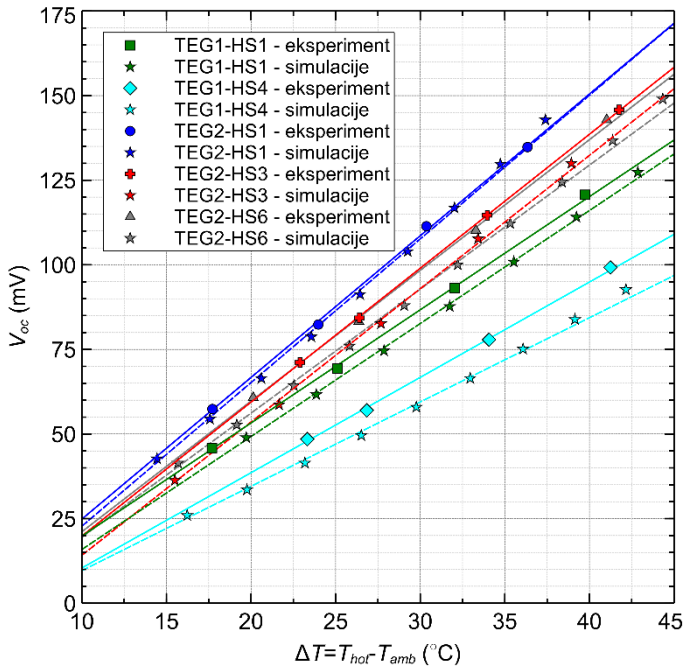
rade u uslovima prirodnog hlađenja. Kao što je očekivano, aluminijumski hladnjak za oba TEG-a daje najviše vrednosti napona jer poseduje veliki broj stubića. Međutim, ovo poboljšanje je do 15 % u odnosu na posmatrane ravne hladnjake uporedivih dimenzija. Interesantno je da aluminijumski hladnjak i hladnjak od bakarne pene dimenzija (40×40×5) mm u kombinaciji sa TEG-om čija je osnova (30×30) mm obezbeđuju skoro identične napone V_{oc} (sklopovi TEG1-HS1 i TEG1-HS6) dok se u kombinaciji sa TEG-om osnove (40×40) mm ovi naponi razlikuju za 10% (sklopovi TEG2-HS1 i TEG2-HS6). Zaključuje se da struktura sa međusobno povezanim otvorenim porama dobro zamenjuje niskoprofilne stubiće aluminijumskog hladnjaka kada je izvor toplote lokalizovan na delu osnove hladnjaka. Istovremeno, ravan hladnjak od mikroporozne keramike pokazuje do 12 % slabije performanse od aluminijumskog hladnjaka iako poseduje 2 puta manju visinu. Ovo dokazuje opravdanost njegove primene, što je u skladu sa razmatranjima prikazanim u radu [12].



Sl. 4. Izmerene vrednosti napona otvorenog kola (V_{oc}) u zavisnosti od temperature razlike $\Delta T = T_{hor} - T_{amb}$ za razmatrane sklopove.

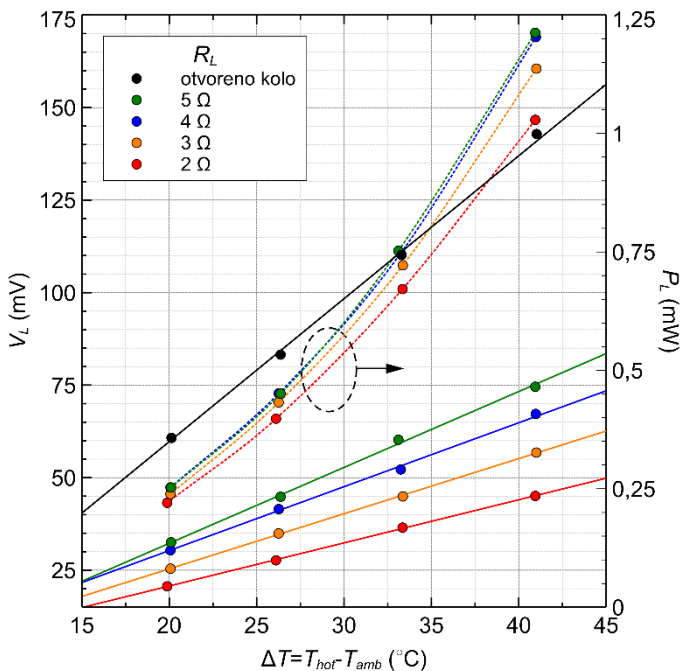
Poređenje rezultata eksperimentalnih merenja i simulacija, datih kroz zavisnosti napona V_{oc} od temperaturne razlike $\Delta T = T_{hor} - T_{amb}$, za odabrane sklopove je prikazano na Sl. 5. Rezultati simulacije dobro prate rezultate eksperimentalnih merenja. Maksimalno odstupanje je 11 % kod hladnjaka od bakarne pene zbog nemogućnosti softvera da adekvatno simulira efekte indirektno radijacije kod ovakvih materijala. Naime, ustanovljeno je da na rezultat simulacije značajno utiče efekat radijacije (u ovom slučaju čak do 30 %), kako putem direktnog zračenja površine ka ambijentu, tako i putem indirektnog zračenja od jedne ka drugoj površini [11]. Napominje se da su vrednosti emisivnosti materijala hladnjaka iz Tabele III određene eksperimentalno, primenom kalibrisanog termopara K-tipa i FLIR i7 termovizijske kamere.

Realizovane numeričke simulacije omogućavaju uspostavljanje standardizovane procedure za predviđanje karakteristika novoprojektovanih sklopova TEG-hladnjak.



Sl. 5. Izmerene i simulirane vrednosti napona otvorenog kola (V_{oc}) u zavisnosti od temperature razlike $\Delta T = T_{hot} - T_{amb}$ za pojedine sklopove.

Napon i snaga predati opterećenju različitih vrednosti za sklop TEG2-HS6 u funkciji temperature razlike $\Delta T = T_{hot} - T_{amb}$ prikazani su na Sl. 6. Električna snaga generisana iz toplotne energije i predata opterećenju je do 1,25 mW za sve vrednosti opterećenja. Ove vrednosti snage su dovoljne za funkcionisanje WSN čvora koji sadrži odgovarajuće kolo za upravljanje energijom (npr. LTC3108).



Sl. 6. Izmerene vrednosti napona (V_L) i snage (P_L) na opterećenju u zavisnosti od temperature razlike $\Delta T = T_{hot} - T_{amb}$ za sklop TEG2-HS6.

Kao što je pomenuto, vrednosti napona na opterećenju su niže od onih određenih naponom V_{oc} i naponskim razdelnikom koji čine otpornici $R_{TEG} - R_L$ usled Peltijevog efekta. Za ovaj sklop smanjenje iznosi do 10 %. Eksperimentalno je utvrđeno da je za startovanje oscilacija i podizanje vrednosti napona kod kola LTC3108 neophodan ulazni napon od 60 mV [9], [13]. Dodatno, kontinualan rad kola zahteva minimum 20 mV [7]. Shodno tome, temperaturna razlika koja daje napon otvorenog kola od 60 mV treba da obezbedi i 20 mV na prikačenom opterećenju. Sa Sl. 6 se vidi da $\Delta T = 20$ °C obezbeđuje $V_{oc} = 60$ mV i vrednosti V_L veće od 20 mV za sve vrednosti opterećenja. Stoga, minimalna temperaturna razlika za sklop TEG2-HS6 kako bi se upotrebio za napajanje WSN čvora iznosi 20 °C. Zavisnosti slične onim predstavljenim na Sl. 6 su ekstrahovane za sve razmatrane sklopove. Dobijene vrednosti ΔT_{min} za $V_{oc} = 60$ mV i $V_L = 20$ mV su date u Tabeli V. Uočava se da za TEG1 (sa manjim brojem termoelektričnih parova) kritičan uslov predstavlja hladan start sistema. Kod TEG2 minimalna temperaturna razlika neophodna za pouzdan hladan start WSN čvora istovremeno obezbeđuje i uslov njegovog kontinualnog rada pod opterećenjem. Neophodne minimalne temperaturne razlike za generisanje ovih vrednosti napona su u opsegu (20 - 28) °C sa snagom na opterećenju do 0,5 mW. Ove vrednosti temperaturnih razlika su uporedive sa onim za sklop sa standardnim aluminijumskim hladnjakom sa ekstrudiranim niskoprofilnim stubićima bliskih sveobuhvatnih dimenzija.

TABELA V. MINIMALNE TEMPERATURNE RAZLIKE KOJE OBEZBEĐUJU $V_{oc} = 60$ mV i $V_L = 20$ mV ZA RAZMATRANE SKLOPOVE

Sklop	ΔT_{min} za $V_{oc} = 60$ mV (°C)	ΔT_{min} za $V_L = 20$ mV (°C)
TEG1-HS1	22	17
TEG1-HS2	28	17
TEG1-HS3	25	18
TEG1-HS4	27	21
TEG1-HS6	22	15
TEG2-HS1	18	18
TEG2-HS3	20	20
TEG2-HS5	20	20
TEG2-HS6	20	19

VI. ZAKLJUČAK

Dobijeni eksperimentalni i rezultati simulacije ukazuju da ravni mikroporozni hladnjaci, izrađeni od keramike alumine ili metalne pene, mogu biti uspešno iskorišćeni za odvođenje toplote sa hladne strane TEG-ova implementiranih u WSN čvorove kao izvor napajanja. U opsegu temperaturnih razlika karakterističnim za termoelektrične samonapajajuće sisteme u uslovima prirodnog hlađenja, oni obezbeđuju napone dovoljne za hladan start i kasniji kontinualan rad kola za upravljanje energijom. Minimalne temperaturne razlike između izvora zagrevanja i ambijenta neophodne za generisanje ovih vrednosti napona su u opsegu (20 - 28) °C pri čemu se opterećenju predaje snaga do 0,5 mW. Razmatrani sklopovi zauzimaju manje od $(40 \times 40 \times 10)$ mm³ i omogućavaju kompaktan dizajn WSN čvorova u uslovima gde dominira prirodno hlađenje unutar ograničenog prostora.

LITERATURA

- [1] AMEC Thermasol, <https://amecthermasol.co.uk/datasheets/MPC%20Ceramic%20Series.pdf>.
- [2] Versarien Technologies Ltd, <http://www.versarien-technologies.co.uk/wp-content/uploads/2015/04/VTL-LowProfileHeatsink-DATASHEET-MARCH2015fv.pdf>.
- [3] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi, M. Ismail, „A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications“, *Energy Reports*, vol. 6, Suppl. 7, pp. 264-287, 2020.
- [4] M. Baldry, V. Timchenko, C. Menictas, „Optimal design of a natural convection heatsink for small thermoelectric cooling modules“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, 114062, Sept., 2019.
- [5] European Thermodynamics Ltd, <https://www.europanthermodynamics.com/>.
- [6] M. Liao, Z. He, C. Jiang, X. Fan, Y. Li, F. Qi, „A three-dimensional model for thermoelectric generator and the influence of Peltier effect on the performance and heat transfer“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 133, pp. 493-500, March, 2018.
- [7] „LTC3108 ultralow voltage step-up converter and power manager.“ Linear Technology Corporation, 2019, data sheet, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3108.pdf>
- [8] N. Nguyen, K. Pochiraju, „Behavior of thermoelectric generators exposed to transient heat sources“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1, pp.1-9, March, 2013.
- [9] M. Marjanović, A. Prijić, B. Randjelović, Z. Prijić, „A transient modeling of the thermoelectric generators for application in wireless sensor network nodes“, *Electronics-MDPI*, vol. 9, 1015, June, 2020.
- [10] J. Wang, J. Carson, M. North, D. Cleland, „A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 17-18, pp. 3075-3083, Aug. 2006.
- [11] A. Sarkar, S. Mahapatra, „Role of surface radiation on the functionality of thermoelectric cooler with heat sink“, *Applied Thermal Engineering*, vol. 69, no. 1-2, pp. 39-45, Aug. 2014.
- [12] M. Marjanović, A. Stojković, J. Vračar, A. Prijić, Z. Prijić, „Effectiveness of Microporous Ceramic Heatsinks in Thermal Energy Harvesting Systems“, *Proc. of the 33rd MIEL 2023*, Niš, Serbia, pp. 1-4, October 2023.
- [13] J. Vračar, M. Marjanović, A. Stojković, Z. Prijić, A. Prijić, Lj. Vračar, „Application of a Low-Voltage Step-Up Circuit for Thermal Energy Harvesting Under Natural Convection“, *Proc. of the 6th IcETRAN 2019*, Silver Lake, Serbia, pp. 564-569, June 2019.

ABSTRACT

Microporous heatsinks of a flat design, made of ceramics alumina or metal foam, are applied in systems where heat dissipation within the limited space prevails. This paper investigates the effectiveness of these heatsinks assembled with thermoelectric generators for powering wireless sensor network nodes in natural cooling conditions. Cold boot and subsequent continual operation of nodes incorporating flat microporous heatsinks require minimal temperature differences between the heat source and the ambient in the range (20 - 28) °C. These conditions provide power delivered to the load up to 0.5 mW.

EFFECTIVENESS OF FLAT MICROPOROUS HEATSINKS IN THERMAL ENERGY HARVESTING SYSTEMS

Aleksandra Stojković, Jana Vračar, Miloš Marjanović,
Aneta Prijić, Zoran Prijić