

Analiza uticaja Peltijevog efekta na efikasnost termoelektričnih generatora u samonapajajućim sistemima

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

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

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

Jana Vračar Zlatković
Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
jana.vracar@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0001-9094-1135

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

Vesna Paunović
Katedra za mikroelektroniku
Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu
Niš, Srbija
vesna.paunovic@elfak.ni.ac.rs;
ORCID: 0000-0002-6615-4673

Abstrakt—Termoelektrični generator (TEG) priključen na električno opterećenje generiše nižu vrednost napona nego kada je u uslovima otvorenog kola usled dejstva Peltijevog efekta. U ovom radu je eksperimentalnim merenjima analiziran uticaj ovog efekta na efikasnost TEG-ova u okviru kompaktnih sklopova sa hladnjakom pri uslovima prirodnog hlađenja. Sklopove sačinjava minijaturni TEG u kombinaciji sa hladnjacima izrađenim od aluminijuma, keramike alumine, mikroporozne keramike i bakarne pene. Određene su minimalne temperaturne razlike pri kojima sklopovi obezbeđuju kontinualno funkcionisanje integrisanog kola za upravljanje energijom, a posledično i rad samonapajajućeg sistema čiji su sastavni deo. Dodatno, za sve sklopove je određeno relativno smanjenje vrednosti napona predatog opterećenju pri maksimalnoj razmatranoj temperaturnoj razlici između tople strane TEG-a i ambijenta.

Ključne reči—Peltijev efekat, sklop termoelektrični generator-hladnjak, samonapajajući sistem

I. UVOD

Karakteristika samonapajajućih sistema je da električnu energiju za svoje funkcionisanje dobijaju adekvatnom konverzijom iz nekog drugog oblika energije dostupne u neposrednoj okolini. U prisustvu toplotne energije, u većini ovakvih sistema se koriste minijaturni termoelektrični generatori (TEG-ovi) [1]. Princip njihovog rada se bazira na Zebekovom efektu kod koga se temperaturna razlika na suprotnim stranama TEG-a pretvara u električni napon. Dovoljna vrednost temperaturne razlike se često obezbeđuje kontinualnim izvorom zagrevanja tople strane TEG-a i primenom aktivnog ili pasivnog odvođenja toplote sa hladne strane TEG-a. Kao najjednostavniji pasivan metod hlađenja se koriste hladnjaci različitih geometrija izrađeni od aluminijuma ili adekvatnih alternativnih materijala [2]. U novijim realizacijama samonapajajućih sistema, standardni hladnjaci se kombinuju sa materijalima koji menjaju agregatno stanje (Phase Change Materials - PCM) kako bi se povećala efikasnost hlađenja i/ili zagrevanja TEG-a [3].

Priključivanjem izvoda TEG-a koji generiše napon na opterećenje, kroz formirano električno kolo protiče električna struja čija vrednost zavisi od vrednosti priključenog otpora i unutrašnje otpornosti TEG-a. Samo proticanje struje kroz termoelektrične parove dovodi do pojave dodatnih efekata (Peltijev, Džulov i Tomsonov) koji se suprotstavljaju Zebekovom efektu [4]. Pokazano je da Džulov i Tomsonov efekat ne utiču značajno na vrednost generisanog termoelektričnog napona. Sa druge strane, Peltijev efekat smanjuje vrednost generisanog napona usled smanjenja temperaturne razlike koja postoji na stranama TEG-a [5]. Kvantitativni uticaj Peltijevog efekta je uslovljen karakteristikama samog generatora, termičkim uslovima u kojima on funkcioniše, kao i vrednošću priključenog opterećenja.

U ovom radu je analiziran uticaj Peltijevog efekta na vrednost napona predatog opterećenju od strane sklopova kod kojih se za odvođenje toplote sa hladne strane izabranog TEG-a koriste različiti pasivni hladnjaci. Zadati termički uslovi uključuju predefinisanu vrednost temperature tople strane TEG-a i prirodno hlađenje sa pridruženog hladnjaka. Razmatran je uticaj Peltijevog efekta na vrednost minimalne temperaturne razlike između tople strane TEG-a i okoline neophodne za primenu sklopova kao izvora napajanja u termoelektričnim sistemima. Takođe je analiziran njegov uticaj na efikasnost sklopova pri višim primenjenim temperaturnim razlikama. Rezultati su bazirani na eksperimentalnim merenjima realizovanim za sklopove koji sadrže pogodan TEG i sedam različitih hladnjaka.

II. TEORIJA

Napon koji generiše TEG zavisi od broja termoelektričnih parova koji ga sačinjavaju N , ukupnog Zebekovog koeficijenta termoparova α_{pn} i temperaturne razlike između njegove tople T_h i hladne strane T_c prema relaciji:

$$V_{TEG} = N\alpha_{pn}(T_h - T_c) . \quad (1)$$

Ovaj rad je finansiran od strane Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije (Ev. br. 451-03-137/2025-03/200102).

Ova vrednost napona postoji između izvoda TEG-a u uslovima otvorenog kola (važi $V_{oc}=V_{TEG}$). Povezivanjem izvoda TEG-a (unutrašnje otpornosti R_{TEG}) na potrošač otpornosti R_L , kroz njih protiče struja:

$$I_{TEG} = I_L = V_{TEG} / (R_{TEG} + R_L), \quad (2)$$

dok je napon na potrošaču:

$$V_L = R_L I_L = V_{TEG} - R_{TEG} I_L. \quad (3)$$

U kolu sa opterećenjem, vrednost generisanog napona V_{TEG} je smanjena u odnosu na V_{oc} , usled Peltijevog efekta. Posledično je i vrednost napona V_L manja od one koja bi se teorijski dobila na osnovu napona generisanog pri otvorenom kolu V_{oc} i naponskog razdelnika formiranog otpornostima R_{TEG} i R_L :

$$V_{L(ok)} = \frac{R_L}{R_L + R_{TEG}} \cdot V_{oc}. \quad (4)$$

Peltijev efekat dovodi do oslobađanja toplotnog fluksa Q_{hPelt} sa tople i apsorpciju Q_{cPelt} na hladnoj strani TEG-a:

$$Q_{hPelt} = N \alpha_{pn} T_h I_{TEG}, \quad (5)$$

$$Q_{cPelt} = N \alpha_{pn} T_c I_{TEG}. \quad (6)$$

Kada se kontinualnim izvorom zagrevanja temperatura T_h održava konstantnom, Peltijev efekat ima značajan uticaj na povećanje T_c . To dovodi do efektivnog smanjenja temperaturne razlike $T_h - T_c$ i napona V_{TEG} , a u krajnjem slučaju i do smanjenja napona V_L . Na osnovu (6) je evidentno da će ovaj efekat biti izraženiji kod TEG-ova sa većim brojem termoelektričnih parova, većom vrednošću ukupnog Zebekovog koeficijenta i nižom vrednošću unutrašnje otpornosti. Dodatno, njegov uticaj je izraženiji pri višim temperaturama ambijenta i nižim vrednostima opterećenja. Kompenzacija Peltijevog efekta je uslovljena sposobnošću pridruženog hladnjaka da disipira apsorbovani toplotni fluks Q_{cPelt} na hladnoj strani TEG-a.

III. REALIZACIJA EKSPERIMENTA

A. Analizirani sklopovi

Na osnovu teorijskih razmatranja vezanih za Peltijev efekat, kao pogodan za analizu je izabran komercijalni „minijaturni“ TEG GM200-127-14-16 koji sadrži 127 termoelektričnih parova i ima spoljašnje dimenzije (40×40×3,8) mm [6]. Vrednost njegovog Zebekovog koeficijenta na sobnoj temperaturi je 420 $\mu V/K$ a izmerena unutrašnja otpornost je 2,1 Ω . Karakteristični parametri ovog TEG-a su dati u Tabeli I.

Izbor hladnjaka koji sačinjavaju razmatrane sklopove je određen površinom njihove osnove preko koje se termoprovodnom trakom pričvršćuju za hladnu stranu TEG-a. Izabrano je sedam komercijalno dostupnih niskoprofilnih hladnjaka izrađenih od eloksiranog aluminijuma [7], keramike alumine [8], mikroporozne keramike [9] i sinterovane bakarne pene [10]. Hladnjaci od aluminijuma i alumine sadrže veći broj ekstrudiranih stubića dok su hladnjaci od mikroporoznih materijala sa manjim brojem rebara ili ravne geometrije. Povećanje efektivne slobodne površine kod mikroporoznih materijala omogućavaju međusobno povezane otvorene pore, a poroznost je 30% kod keramike i 63% kod bakarne pene. Geometrijski parametri izabranih hladnjaka su dati u Tabeli II.

TABELA I. KARAKTERISTIČNI ELEKTRIČNI, GEOMETRIJSKI I PARAMETRI MATERIJALA TEG-A GM200-127-14-16 [6]

Parametar	Vrednost
Maksimalna snaga - P_{max} (W)	4,73
Maksimalna struja - I_{max} (A)	1,19
Maksimalni napon - V_{max} (V)	3,98
Maksimalna radna temperatura - T_{max} (°C)	200
Dimenzije termoelektričnog elementa (mm)	1,4×1,4×1,6
Unutrašnja električna otpornost na 25 °C - R_{TEG} (Ω)	2,1
Ukupan Zebekov koeficijent termoelektričnog para α_{pn} ($\mu V/K$)	$1,22 \cdot 10^{-5} \times T^3 - 0,021 \times T^2 + 10,23 \times T - 1081$
Specifična električna otpornost termoelektričnog elementa ρ ($10^{-5} \Omega m$)	$-1,48 \cdot 10^{-5} \times T^2 + 0,017 \times T - 2,78$

TABELA II. GEOMETRIJSKI PARAMETRI RAZMATRANIH HLADNJAKA

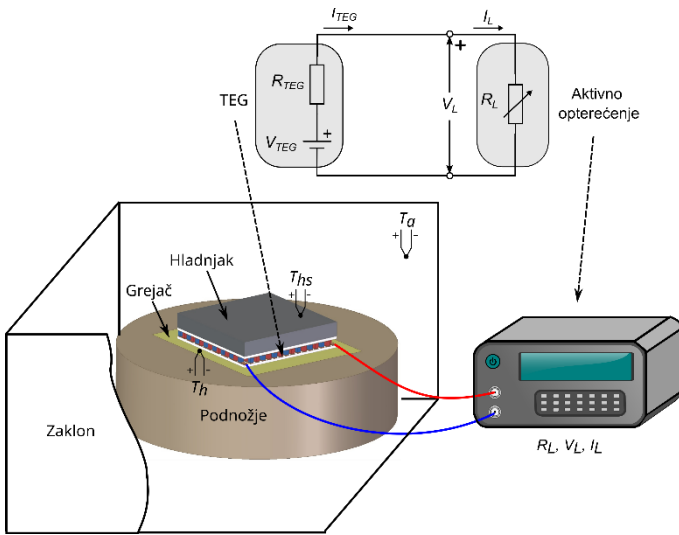
Oznaka hladnjaka	Materijal	Geometrija	Dimenzije L×W×H (mm)
HS1	aluminijum	110 stubića	40×40×10
HS2	aluminijum	100 stubića	40×40×5
HS3	alumina	121 stubić	42×42×12
HS4	mikroporozna keramika	7 niskih rebara	40×40×5,25
HS5	mikroporozna keramika	ravan	40×40×2,5
HS6	bakarna pena	ravan	40×40×5
HS7	bakarna pena	ravan	40×40×2,5

B. Eksperimentalna postavka

Formirani sklop se toplom stranom TEG-a postavlja na grejač koji održava stalnu predefinisiranu vrednost T_h . Oko strukture je zaklon koji obezbeđuje uslove prirodnog hlađenja sklopa ka ambijentu koji je na temperaturi T_a . S obzirom da merenje temperature hladne strane TEG-a T_c nije moguće bez narušavanja strukture sklopa, kao kontrolna vrednost se prati temperatura hladnjaka T_{hs} . Vrednosti svih temperatura od interesa se prate računom vođenim termometrima. Električni izvodi TEG-a se vezuju za programabilno električno opterećenje. Ono ima ulogu promenljivog potrošača R_L i multimetra koji meri napon otvorenog kola V_{oc} , napon na opterećenju V_L i struju u kolu ($I_L=I_{TEG}$). Šema eksperimentalne postavke koja obezbeđuje automatizovanu kontrolu radnih uslova i merenje odgovarajućih električnih veličina je data na Sl. 1.

Tokom eksperimentalnog merenja, kontinualno se registruju vrednosti temperatura T_h , T_{hs} i T_a , kao i vrednosti $V_{oc}=V_{TEG}$ u uslovima otvorenog kola, odnosno V_L i I_L u kolu sa opterećenjem R_L . Pojednostavljena procedura merenja prati korake:

1. Dovođenje temperature grejača na predefinisiranu vrednost T_h uz praćenje vrednosti napona otvorenog kola V_{oc} ;
2. Postavljanje R_L na vrednost od 5 Ω i merenje V_L i I_L ;
3. Dekrementiranje vrednosti R_L za 1 Ω i merenje V_L i I_L ;
4. Ponavljanje koraka 3. do uslova $R_L=2 \Omega$;
5. Vraćanje sistema u stanje otvorenog kola;
6. Povratak na korak 1. sa novom vrednošću T_h .

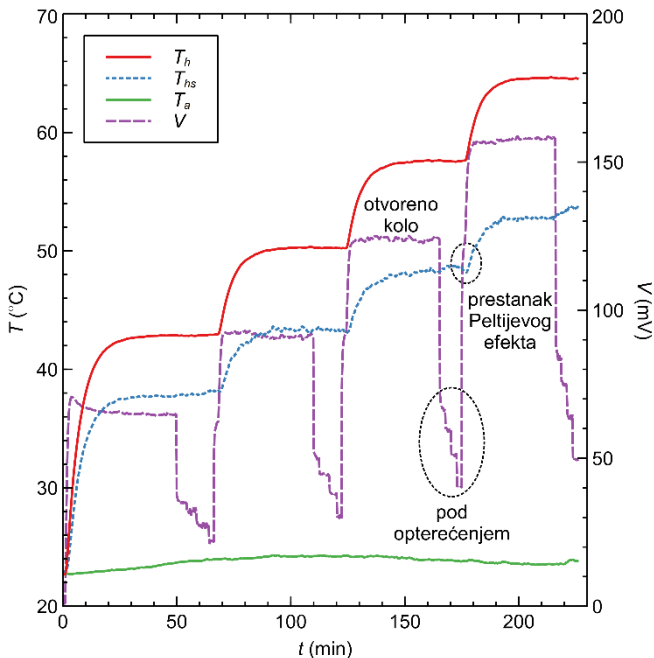


Sl. 1. Šematski prikaz i ekvivalentno električno kolo eksperimentalne postavke (dimenzije nisu proporcionalne).

Vrednosti T_h su postavljene tako da se temperaturna razlika između tople strane TEG-a i ambijenta nalazi u opsegu tipičnom za primene termoelektričnih samonapajajućih sistema u uslovima prirodnog hlađenja. Vrednosti R_L u opsegu (2-5) Ω su definisane ulaznom otpornošću kola za upravljanje energijom na koje se tipično vezuju izvodi TEG-a (npr. LTC3108 sa ulaznim transformatorom odnosa transformacije 1:100) [11]. Konkretna vrednost ove otpornosti pri funkcionisanju kola zavisi od vrednosti njegovog ulaznog napona [12].

C. Rezultati eksperimentalnog merenja

Izmerene vrednosti praćenih temperatura, napona otvorenog kola i napona na opterećenju za sklop sa hladnjakom od mikroporozne keramike HS4 su prikazane na Sl. 2. Slične zavisnosti se dobijaju i za ostale razmatrane sklopove.



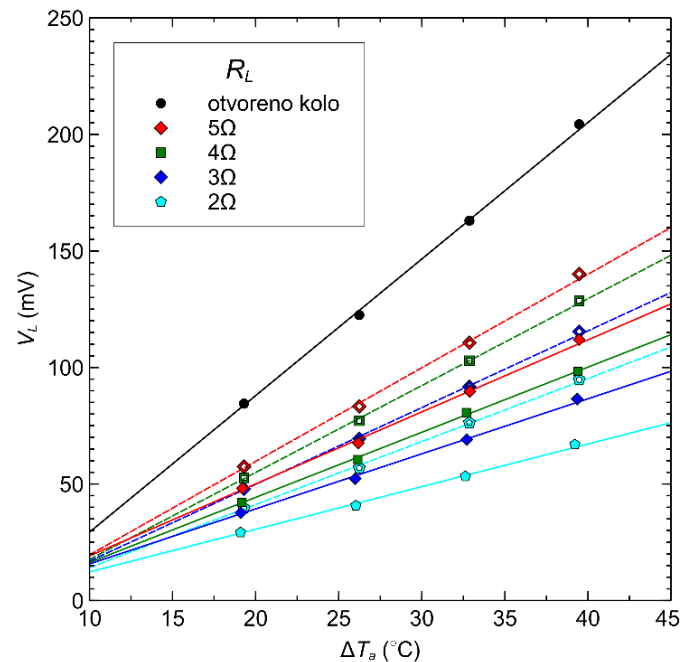
Sl. 2. Izmerene vrednosti temperatura i napona za sklop sa hladnjakom od mikroporozne keramike HS4

Sistem koji je u stanju termičke ravnoteže na temperaturi T_a , toplotno se pobuđuje dovođenjem grejača, a time i tople strane TEG-a, na predefinisano vrednost temperature T_h . U zavisnosti od termičke inertnosti sklopa, odnosno vrednosti termičke difuzivnosti materijala hladnjaka, na hladnoj strani TEG-a se određenom brzinom uspostavlja vrednost temperature T_c . Ovaj proces odgovara uslovima hladnog starta u samonapajajućim sistemima. Temperaturna razlika između tople i hladne strane TEG-a dovodi do generisanja napona otvorenog kola $V_{oc}=V_{TEG}$. Ovaj napon u početku pokazuje premašenje koje je posledica termičke inertnosti sklopa. Nakon inicijalnog premašenja, napon lagano opada i dostiže vrednost koja odgovara stanju termičke ravnoteže [13].

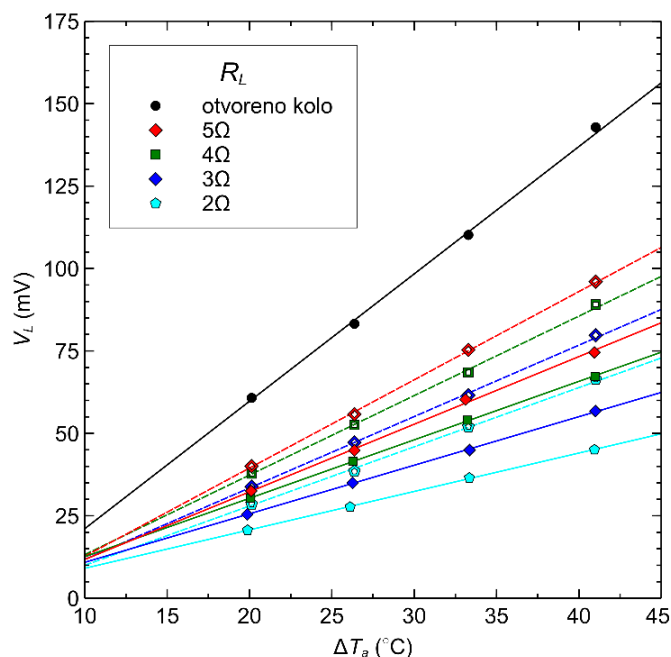
Pod opterećenjem se na izvodima TEG-a meri napon V_L koji prati relaciju (3), a na osnovu ekvivalentnog električnog kola sa Sl. 1. Pri isključenju aktivnog opterećenja prestaje dejstvo Peltijevog efekta i sklop se vraća u stanje otvorenog kola. Ovo uslovljava porast temperature T_c a time i T_{hs} , što je naznačeno na Sl. 2.

IV. DISKUSIJA REZULTATA

Na osnovu vremenskih dijagrama poput onog sa Sl. 2, dobijene su zavisnosti napona V_{oc} i V_L od temperaturnih razlika između tople strane TEG-a i ambijenta $\Delta T_a = T_h - T_a$ za sve razmatrane sklopove. Ove zavisnosti su prikazane na Sl. 3 i Sl. 4 za sklopove sa hladnjacima HS1 i HS6, respektivno. Zavisnosti ekvivalentnog oblika se dobijaju i za ostale razmatrane sklopove.



Sl. 3. Zavisnosti napona V_L od $\Delta T_a = T_h - T_a$ dobijene eksperimentalno (pune linije) i na osnovu relacije (4) (isprekidane linije) za sklop sa HS1.



Sl. 4. Zavisnosti napona V_L od $\Delta T_a = T_h - T_a$ dobijene eksperimentalno (pune linije) i na osnovu relacije (4) (isprekidane linije) za sklop sa HS6.

Na slikama su istovremeno prikazane i zavisnosti napona V_L koje se dobijaju analitičkim putem na osnovu napona otvorenog kola i relacije (4) - $V_{L(ok)}$. Napominje se da su pri proračunu uzete u obzir temperaturna zavisnost otpornosti R_{TEG} i konkretna vrednost otpornosti aktivnog opterećenja R_L pri realizaciji merenja. Uočava se značajno odstupanje izmerenih vrednosti V_L u odnosu na proračunate. Ovo ukazuje na nemogućnost tačnog određivanja vrednosti napona na opterećenju na osnovu napona generisanog na TEG-u u uslovima otvorenog kola.

Relativno smanjenje napona na opterećenju usled Peltijevog efekta:

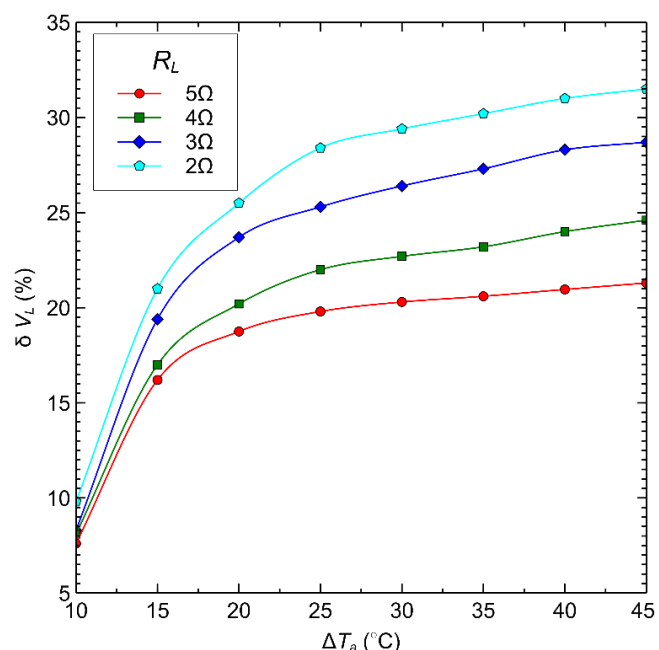
$$\delta V_L = \frac{V_{L(ok)} - V_L}{V_{L(ok)}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

u zavisnosti od temperaturne razlike ΔT_a i otpornosti R_L je određeno za sve sklopove. Kao ilustrativni primer, na Sl. 5 je data zavisnost za sklop sa hladnjakom od metalne pene HS6.

Saglasno relacijama (2) i (6), uticaj Peltijevog efekta raste sa temperaturom kojoj je sklop izložen i izraženiji je pri nižim vrednostima otpornosti opterećenja. Blaža zavisnost pri većim temperaturnim razlikama je uslovljena većom vrednošću generisanog napona i smanjenom sposobnošću hladnjaka da disipira dodatno generisanu toplotu pri većim vrednostima T_h . Kod ovog sklopa sa Sl. 5, smanjenje V_L je u opsegu od 7% do 32%. Za sve razmatrane sklopove, najmanje smanjenje od 2% pokazuje sklop sa HS1 pri $R_L=5\Omega$ i $\Delta T_a=10^\circ\text{C}$. Najveći uticaj od 33% se uočava kod sklopa sa HS7 pri $R_L=2\Omega$ i $\Delta T_a=45^\circ\text{C}$. Ovi rezultati su u saglasnosti sa razmatranjima datim u [5].

Smanjenje vrednosti V_L pri manjim ΔT_a , odnosno nižim generisanim naponima, je značajno zbog postavljanja graničnih termičkih uslova pod kojima razmatrani sklop može da obezbedi funkcionisanje kola za upravljanje energijom a samim tim i samonapajajućeg čvora. Specificirana minimalna vrednost

ulaznog napona za kontinualan rad kola LTC3108 je 20 mV [12]. Toj vrednosti napona odgovara ulazna otpornost od 5Ω . Na osnovu zavisnosti V_L od ΔT_a (poput Sl. 3 i Sl. 4) pri $R_L=5\Omega$, za sve sklopove su određene minimalne temperaturne razlike $\Delta T_{a(min)}$ koje obezbeđuju $V_L=20\text{ mV}$. Ove vrednosti su prikazane u Tabeli III.



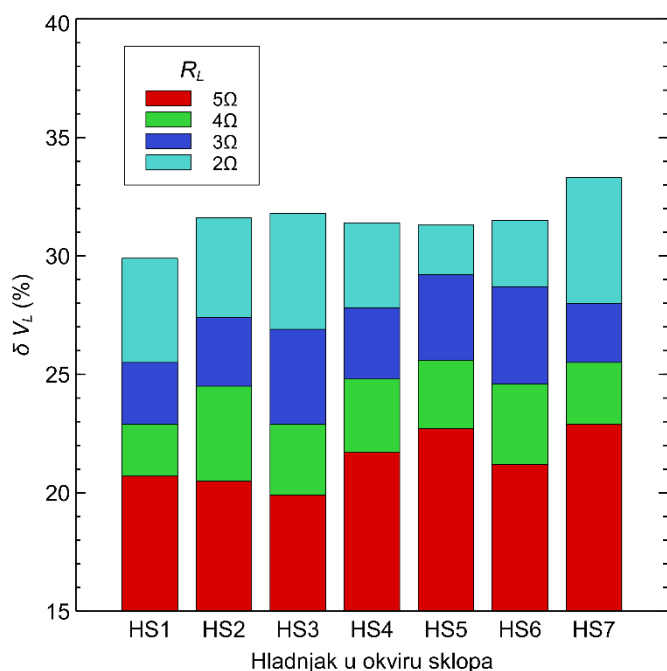
Sl. 5. Relativno smanjenje napona na opterećenju usled Peltijevog efekta u zavisnosti od ΔT_a i R_L , za sklop sa hladnjakom HS6.

TABELA III. MINIMALNE TEMPERATURNE RAZLIKE KOJE OBEZBEĐUJU $V_L=20\text{ mV}$ BEZ I SA RAZMATRANJEM PELTIJEVOG EFEKTA

Sklop	$\Delta T_{a(min)}$ bez Peltijevog efekta	$\Delta T_{a(min)}$ sa Peltijevim efektom
HS1	10	10
HS2	11	13
HS3	10	12
HS4	11	12
HS5	12	13
HS6	13	14
HS7	13	14

Uticaj Peltijevog efekta kod sklopa sa aluminijumskim hladnjakom HS1 nije uočljiv, što je posledica efikasnog odavanja toplote sa velikog broja visokih ekstrudiranih stubića. Kod hladnjaka HS2, koji ima manji broj nižih stubića, efekat uslovljava za 2°C veće $\Delta T_{a(min)}$. Isto povećanje postoji za hladnjak od keramike alumine HS3. Iako geometrijski blizak hladnjaku HS1, ovaj hladnjak ima nisku toplotnu difuzivnost i sporije se oslobađa dodatne količine toplote. Osim toga, ovaj hladnjak ima nešto veću površinu osnove od površine TEG-a i time je delimično izložen direktnom dotoku toplote sa grejača. Uticaj Peltijevog efekta na sklopove sa mikroporoznim hladnjacima HS4-HS7 je veoma sličan usled njihovih bliskih efikasnosti po pitanju disipiranja toplote koja do njih stiže kondukcijom kroz TEG.

Vrednosti δV_L za maksimalnu vrednost razmatranih temperaturnih razlika ($\Delta T_a = 45^\circ\text{C}$), a pri različitim vrednostima R_L , su date na Sl. 6 u vidu kumulativnog stubastog grafikona za sve sklopove. Pri ovoj temperaturnoj razlici, usled više vrednosti T_c , Peltijev efekat je najizraženiji. Pri $R_L = 2\ \Omega$ kroz kolo teče najveća vrednost I_L tako da je δV_L maksimalno. Kao što je već navedeno, HS1 najbolje disipira dodatnu toplotu i sklop sa njim pokazuje δV_L od približno 30%. HS7 ima najmanje dimenzije, i u ovom slučaju najnižu efikasnost, tako da je kod sklopa sa njim δV_L oko 33%. Interesantno je da sklopovi sa HS2-HS6 pokazuju veoma bliske vrednosti δV_L što je uslovljeno njihovim karakteristikama hlađenja koje sa porastom Q_{cPelt} postaju skoro uniformne. Treba napomenuti da se usled Peltijevog efekta uslov maksimalnog prenosa snage, odnosno maksimalne vrednosti napona na potrošaču, ostvaruje pri vrednostima opterećenja većim od unutrašnje otpornosti TEG-a [5]. Za izabrani TEG je to pri vrednosti R_L između $2\ \Omega$ i $3\ \Omega$.



Sl. 6. Relativno smanjenje napona na potrošaču usled Peltijevog efekta u zavisnosti od R_L za $\Delta T_a = 45^\circ\text{C}$ kod razmatranih sklopova.

V. ZAKLJUČAK

Uticaj Peltijevog efekta na efikasnost TEG-a kao izvora napajanja je uslovljen karakteristikama samog generatora i pridruženog hladnjaka u okviru sklopa, kao i vrednošću priključenog opterećenja. Peltijev efekat kod izabranog TEG-a podiže vrednost minimalne temperaturne razlike između njegove tople strane i ambijenta neophodne za rad u samonapajajućim sistemima do 2°C , u zavisnosti od upotrebljenog hladnjaka. Za maksimalnu vrednost razmatranih temperaturnih razlika relativno smanjenje napona pri opterećenju najmanje vrednosti je u opsegu od 30% do 33%. Pri većim temperaturnim razlikama, procenat smanjenja bi bio blizak ovim vrednostima. Naime, eksperimentalno je utvrđeno da zavisnost relativnog smanjenja napona na potrošaču od temperaturne razlike pri višim temperaturama ulazi u zasićenje uslovljeno karakteristikama hladnjaka.

LITERATURA

- [1] N. Jaziri, A. Boughamoua, 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.
- [2] 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.
- [3] R. Kandi, M. Sudharmini, A. Suryan, S. Nižetić, „State of the art and future prospects for TEG-PCM systems: A review, *Energy for Sustainable Development*, vol. 74, pp. 328-348, June 2023.
- [4] G. Min, „New formulation of the theory of thermoelectric generators operating under constant heat flux“, *Energy & Environmental Science*, vol. 15, pp. 356-367, Jan., 2022.
- [5] 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.
- [6] European Thermodynamics Ltd, <https://europeanthermodynamics.com/product-category/thermoelectric-generator/standard-thermoelectric-generator/>
- [7] European Thermodynamics Ltd, <https://europeanthermodynamics.com/product-cci-bga-heatsink/>
- [8] European Thermodynamics Ltd, <https://europeanthermodynamics.com/product-category/heat-sinks/ceramic/>
- [9] AMEC Thermasol, <https://amecthermasol.co.uk/datasheets/MPC%20Ceramic%20Series.pdf>.
- [10] Low profile metallic foam heat sinks, Versarien Technologies, <https://eu.mouser.com/datasheet/2/733/VTL-LowProfileHeatsink-DATASHEET-MARCH2015fv-552995.pdf>
- [11] T. Watson, J. Vincent, H. Lee, „Effect of dc-dc voltage step-up converter impedance on thermoelectric energy harvester system design strategy“, *Applied Energy*, vol. 239, pp. 898–907, April 2019.
- [12] „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>
- [13] 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.

ABSTRACT

A thermoelectric generator (TEG) connected to an electrical load generates a lower voltage value than in open circuit conditions due to the Peltier effect. This work analyzes the influence of this effect on the efficiency of the set of TEG-heatsink assemblies under natural convection by experimental measurements. Assemblies consist of a miniature TEG in combination with heatsinks made of aluminum, alumina ceramics, microporous ceramics, and copper foam. The minimum temperature differences necessary for the assemblies to ensure the proper operation of the circuit for energy management and, consequently, powering the energy harvesting system have been determined. Also, the relative decrease of the load voltage value for the maximum value of the considered temperature differences between TEG hot side and ambient has been calculated for all the assemblies.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE Peltier EFFECT ON THE EFFICIENCY OF THERMOELECTRIC GENERATORS IN ENERGY HARVESTING SYSTEMS

Aleksandra Stojković, Aneta Prijić, Miloš Marjanović, Jana Vračar Zlatković, Zoran Prijić, Vesna Paunović