

**SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I
BRODOGRADNJE**

**POSLIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDIJ
ELEKTROTEHNIKE I INFORMACIJSKE TEHNOLOGIJE**

KVALIFIKACIJSKI ISPIT

**TERMOELEKTRIČNI GENERATORI U
SUSTAVIMA RECIKLIRANJA ENERGIJE**

Ivan Škalic

Split, rujan 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TERMOELEKTRIČNI GENERATORI.....	2
2.1. Osnovni princip rada.....	2
2.2. Materijali izrade i efikasnost	4
2.3. Višestupanjski (kaskadni) TEG-ovi.....	8
3. Utjecaj ostalih komponenti sustava na efikasnost pretvorbe.....	11
3.1. MPPT metode i DC-DC pretvarači primjenjivi na TEG-ove.....	11
3.2. Toplinski kontakti otpor i sustav hlađenja	21
4. PRIMJENA TEG-ova	28
5. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA	37
POPIS OZNAKA I KRATICA	42
SAŽETAK.....	44

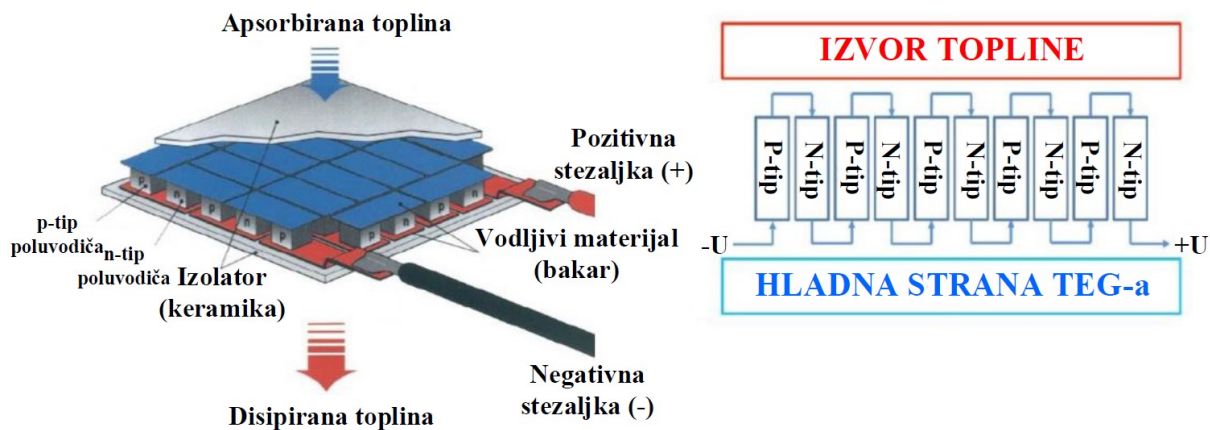
1. UVOD

Termoelektrični generatori (TEG-ovi, engl. *Thermoelectric Generators*) su poluvodički uređaji koji pretvaraju toplinsku energiju u električnu. Karakterizira ih dug radni vijek tijekom kojeg nema potrebe za održavanjem, iz razloga što ne sadrže pokretne dijelove, niti zahtijevaju radni plin tijekom rada, što pak dovodi do njihovog nečujnog rada. Pouzdani su, a zbog svojih dimenzija primjenjivi su u raznim područjima, od sustava gdje je iznos generirane snage u μW do sustava gdje se snaga generira u kW. Razlog zbog kojeg TEG-ovi nisu češće korišteni je njihov mali iznos efikasnosti pretvorbe, najčešće 5-8%, zbog čega pronalaze primjenu u samo određenim, specifičnim područjima [1, 2]. Pretvorba toplinske energije u električnu se zasniva na Seebeckovom efektu za kojeg je zaslužan njemački fizičar Thomas Johann Seebeck, koji je ustanovio da se na krajevima spoja različitih metala generira određeni iznos napona, ako se ti krajevi nalaze na različitim temperaturama [3]. Kasnijim istraživanjima došlo se do zaključka da je najveći iznos generiranog napona ostvariv upotrebom poluvodiča, jer vodiče karakterizira mali iznos Seebeckovog koeficijenta, dok s druge strane izolatore karakterizira veliki iznos tog koeficijenta, ali posjeduju mali iznos električne vodljivosti. Iz navedenog možemo zaključiti da idealan materijal za TEG-ove treba imati što veći iznos električne vodljivosti, a što manji iznos toplinske vodljivosti, što predstavlja najveći problem u istraživanjima na području materijala iz razloga što su ta dva parametra povezana. Parametar koji daje poveznicu električne i toplinske vodljivost te iznosa Seebeckovog koeficijenta i koji definira kvalitetu poluvodičkog materijala po pitanju pretvorbe se naziva faktor izvrsnosti i označava se slovom Z (K^{-1}). Trenutno najčešće upotrebljavani poluvodički materijal za izradu TEG-ova Bi_2Te_3 ima navedeni faktor ~ 1 . Osim što efikasnost pretvorbe ovisi ponajprije o karakteristikama materijala TEG-a, ona u određenoj mjeri ovisi i o dizajnu tog TEG-a te cjelokupnog sustava [4]. S obzirom da generirana snaga ne ovisi isključivo o količini toplinske energije, već o ostvarenom temperaturnom gradijentu ΔT na krajevima TEG-a i protoku topline kroz njega, u cilju generiranja maksimalnog iznosa snage potrebno je izvršiti temperaturnu i električnu prilagodbu TEG-a. Iznos unutarnjeg električnog otpora je promjenjiva veličina ovisna o iznosu temperaturnog gradijenta na krajevima TEG-a, a u svrhu prilagodbe se koristi jedna od MPPT (engl. *Maximum Power Point Tracking*) metoda najčešće primjenom DC-DC pretvarača [5], dok je svrha temperaturne prilagodbe generiranje maksimalnog gradijenta na krajevima TEG-a i pri takvoj analizi je potrebno poznavati iznose toplinskih otpora svih komponenti u sustavu.

Ovaj rad se sastoji od ukupno 5 poglavlja, od kojih su 3 tematska, a ostali su uvod i zaključak. Prvo tematsko poglavlje analizira pojave u modulu prilikom rada, a to su Seebeckov, Peltierov, Thomsonov i Jouleov efekt, te njihov utjecaj na iznos generirane snage. Također su spomenuta i dosadašnja istraživanja na temu korištenih poluvodičkih materijala i efikasnosti pretvorbe, te je napravljena usporedba između segmentiranih i kaskadnih (višestupanjskih) TEG-ova. Drugo tematsko poglavlje analizira utjecaj ostalih komponenti sustava na efikasnost pretvorbe, a to se odnosi na korištene MPPT metode i DC-DC pretvarače, utjecaj kontaktnog toplinskog otpora i sustava za disipaciju toplinske energije koja nije pretvorena u električnu energiju, a koja ima negativan utjecaj na iznos ostvarenog temperaturnog gradijenta. Većina MPPT metoda koje se koriste kod TEG-ova je prvotno razvijena za fotonaponske panele i zatim uz neke preinake ili bez njih primijenjena na TEG-ove. Primjena TEG-ova u sustavima male potrošnje energije je analizirana u posljednjem poglavlju, gdje uglavnom pronalaze primjenu za napajanje IoT (engl. *Internet of Things*) ili medicinskih senzora, te za povećanje efikasnosti sklopova.

2. TERMOELEKTRIČNI GENERATORI

TEG-ovi su poluvodički uređaji koji pretvaraju toplinsku energiju u električnu, a rad im se zasniva na poluvodičima p i n-tipa koji su električki spojeni serijski, a termalno paralelno. S vanjske strane TEG-a najčešće se nalaze keramičke ploče koje štite termoparove između sebe, kako ne bi došlo do njihovog fizičkog oštećenja uslijed sile pritiska veće od dozvoljene. Izgled TEG-a, kao i shematski prikaz unutarnjeg spoja poluvodiča je prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Izgled unutarnje strukture TEG-a [6]

Rad TEG-ova možemo promatrati kroz 4 fizikalne pojave koji se odvijaju u njima, a to su Seebeckov efekt, Peltierov efekt, Thomsonov efekt i Jouleov efekt zagrijavanja. Navedene pojave zajedno s jednadžbama za njihovo računanje će biti objašnjene u nastavku teksta. Osim tih pojava, naglasak u ovom poglavlju je na svojstvima i materijalima koje koristimo pri izradi termoparova i kako navedeni utječu na efikasnost pretvorbe. Na kraju poglavlja su predstavljeni segmentirani i višestupanjski (kaskadni) TEG-ovi, te su navedeni njihovi prednosti i nedostaci, a ujedno je napravljena i usporedba performansi u odnosu na 1-stupanjske TEG-ove.

2.1. Osnovni princip rada

Slobodni nosioci naboja kod poluvodiča su elektroni ili šupljine, ovisno o kojem se tipu poluvodiča radi. Ako se krajevi poluvodiča nalaze na različitim temperaturama, kao posljedicu toka topline sa mjesta temperature višeg iznosa prema mjestu temperature manjeg iznosa, dolazi i do gibanja slobodnih nosioca naboja. Ukoliko zatvorimo strujni krug sa poluvodičem od istog materijala, tada će ukupna struja u toj petlji biti jednaka 0, zbog toga što će se u oba poluvodiča generirati jednaka količina slobodnih nosioca naboja, ali u suprotnim smjerovima i zbog toga dolazi do njihovog poništavanja. Ali ako koristimo poluvodiče s različitim brojem slobodnih nosioca naboja, tada će generirana struja u jednom poluvodiču prevladati onu u drugom i u toj zatvorenoj petlji će proteći određeni iznos struje. Generirani napon otvorenog kruga kojeg tada možemo mjeriti je posljedica Seebeckovog efekta [7].

Iznos generiranog napona otvorenog kruga termopara je jednak:

$$U_{OC} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

gdje je:

α – iznos Seebeckovog koeficijenta,

ΔT – temperaturna razlika ostvarena na krajevima poluvodiča.

Ekvivalentni električni krug za stacionarno stanje temperaturnog gradijenta je naponski izvor sa serijski spojenim unutarnjim električnim otporom. Kao što smo već spomenuli, termopar se sastoji od poluvodiča p-tipa i poluvodiča n-tipa električki spojenih u seriju i termalno paralelno, a termoparovi se nalaze između dvije keramičke ploče, od kojih jedna predstavlja toplu stranu (engl. *hot side*), a druga hladnu stranu (engl. *cold side*). Poveznica između generiranog napona otvorenog kruga U_{OC} i ostvarene temperaturne razlike ΔT za TEG je dana izrazom [8]:

$$U_{OC} = n \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (T_{toplo} - T_{hladno}) = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

gdje je:

n – broj termoparova,

α_p i α_n (ili ∂_p i ∂_n) – apsolutni iznosi Seebeckovih koeficijenata za poluvodič p i n tipa,

T_{toplo} i T_{hladno} – temperatura tople i hladne strane.

Seebeckov koeficijent za poluvodič p-tipa je pozitivan, a za n-tip negativan, a izražava se u jedinici $\mu V/K$. Dobri termoelektrični materijali imaju taj koeficijent između 100-300 $\mu V/K$ za jedan termopar [9]. Bilo bi poželjno da je iznos Seebeckovog koeficijenta što veći, ali to nije slučaj u praksi. Iznos tog koeficijenta ovisi o materijalu izrade poluvodiča.

Suprotan efekt Seebeckovom je Peltierov, koji kaže da će se jedan spoj dvaju različitih poluvodiča zagrijati, a drugi ohladiti, ukoliko kroz njih protječe struja iz vanjskog električnog kruga [10]. O polaritetu struje ovisi koji će se spoj zagrijavati, a koji hladiti. Iznos topline koja će biti apsorbirana na toploj strani, odnosno otpuštena na hladnoj strani iznosi:

$$Q_p = \pi \cdot I \quad (2.3)$$

gdje je:

π – iznos Peltierovog koeficijenta,

I – iznos struje kroz poluvodiče.

Preformuliranjem jednadžbe (2.3) za TEG dobijemo sljedeći izraz:

$$Q_p = n \cdot \pi_{pn} \cdot I = n \cdot (\pi_p - \pi_n) \cdot I \quad (2.4)$$

gdje su π_p i π_n Peltierovi koeficijenti p-tipa i n-tipa poluvodiča.

Jouleov efekt nastaje zbog konačnog iznosa električnog otpora termoparova, zbog čega se protjecanjem struje kroz njih oni zagrijevaju i tako proizvede dodatnu toplinsku energiju koja nije poželjna. Iznos generirane topline uslijed zagrijavanja termoparova je dan izrazom:

$$Q_J = I^2 \cdot R_g \quad (2.5)$$

gdje je R_g električni otpor termopara [11].

Thomsonov efekt je neželjeni efekt zagrijavanja poluvodiča zbog protjecanja električne struje kroz njega uslijed temperaturne razlike na krajevima. Iznos generirane toplinske energije je jednak:

$$Q_\tau = \tau \cdot I \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

gdje je τ Thomsonov koeficijent izražen u V/K. Utjecaj ovog efekta je dosta manji u odnosu na Jouleov efekt zagrijavanja, ali svejedno u literaturi postoji niz radova koji analiziraju taj utjecaj na performanse TEG-ova, pogotovo pri višim temperaturama [12, 13].

2.2. Materijali izrade i efikasnost

Gornja granica efikasnosti termoelektrične pretvorbe je određena Carnotovim kružnim procesom i definirana izrazom:

$$\eta_c = \Delta T / T_{toplo} \quad (2.7)$$

Računanje efikasnosti TEG-o je inače dosta složen postupak, ali u konačnici se svodi da najviše ovisi o korištenim materijalima izrade TEG-a, kao i o ostvarenom temperaturnom gradijentu na krajevima [14].

$$\eta = \frac{W_{elek}}{Q_{toplo}} = \frac{\Delta T}{T_{toplo}} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_{hladno}}{T_{toplo}}} \quad (2.8)$$

gdje je:

\bar{T} – srednja vrijednost temperature tople i hladne strane,

Z – faktor izvrsnosti.

Autori radova u literaturi često miješaju pojmove malog i velikog slova Z , gdje se kod korištenja malog slova radi o faktoru izvrsnosti materijala, dok se prilikom korištenja velikog slova radi o faktoru izvrsnosti uređaja. S obzirom da su u većini slučajeva njihovi iznosi približno jednaki, tako se u literaturi najčešće izjednačavaju i jedan i drugi pojam [15]. Iz jednadžbe (2.8) vidljivo je da efikasnost TEG-a ovisi o faktoru izvrsnosti, čiji iznos određuje koliko se možemo približiti gornjoj granici efikasnosti (2.7). Računanje tog parametra je složen proces s obzirom da ovisi o temperaturno ovisnim veličinama:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \quad (2.9)$$

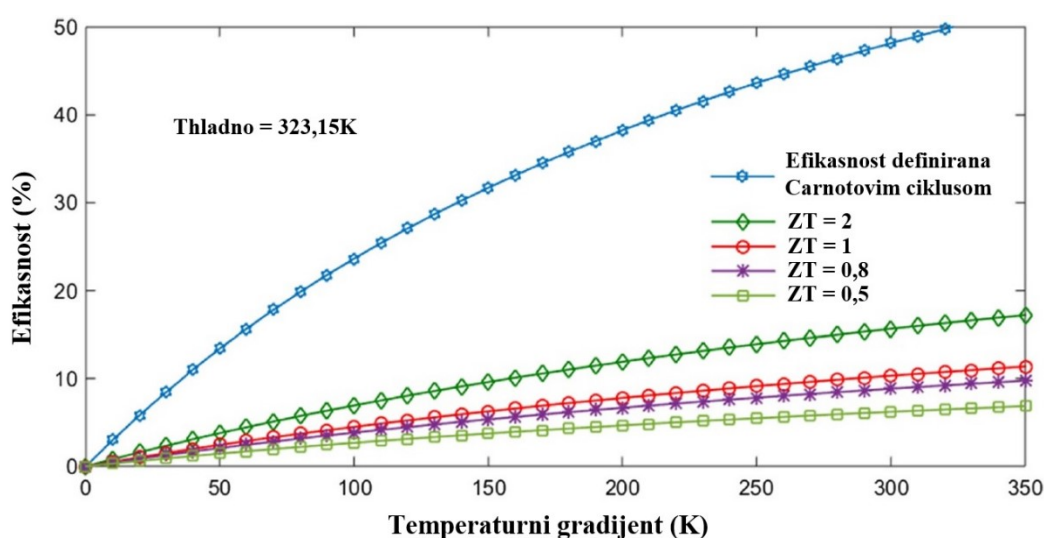
gdje je:

σ – električna provodnost,

κ – koeficijent toplinske vodljivosti.

Mjerna jedinica faktora izvrsnosti je recipročna vrijednost temperature K^{-1} , tako da se u praksi češće upotrebljava bezdimenzionalni parametar $Z\bar{T}$ (u daljnjem tekstu ZT):

$$Z\bar{T} = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \bar{T} \quad (2.10)$$



Slika 2.2. Efikasnost pretvorbe za različite temperaturne gradijente i faktore izvrsnosti [1]

Najčešće korišteni TEG-ovi u posljednjem desetljeću su napravljeni od materijala Bi_2Te_3 koji imaju vrijednost faktora izvrsnosti u intervalu 0,5-0,8, što daje efikasnost pretvorbe od svega nekoliko posto. Plan u narednom vremenskom periodu je povećati vrijednost ovog parametra, čime bi efikasnost pretvorbe dosegala iznos od 10% (slika 2.2). Osim pregleda trenutno najčešće korištenih materijala, u radu su prikazane i primjene TEG-ova u industriji [1].

Izazov prilikom proizvodnje materijala sa što većim iznosom faktora izvrsnosti je u ostvarenju:

- velikog iznosa električne provodnosti σ ,
- velikog iznosa Seebeckovog koeficijenta α ,
- malog iznosa koeficijenta toplinske vodljivosti κ .

Brojnik izraza (2.9) se naziva faktor snage (engl. *Power Factor*) i na njega je moguće utjecati (povećati ga) razvojem novih vrsta termoelektričnih materijala, uključujući nanomaterijale, te unaprjeđenjem postojećih materijala kroz proces dopiranja. Na koeficijent toplinske vodljivosti je moguće utjecati mehaničkim legiranjem (engl. *solid-state alloying*), razvojem materijala sa intrinzično malim iznosima toplinske vodljivosti, te procesom nanostrukturiranja [16].

Koeficijent toplinske vodljivosti kod poluvodiča jednak je izrazu:

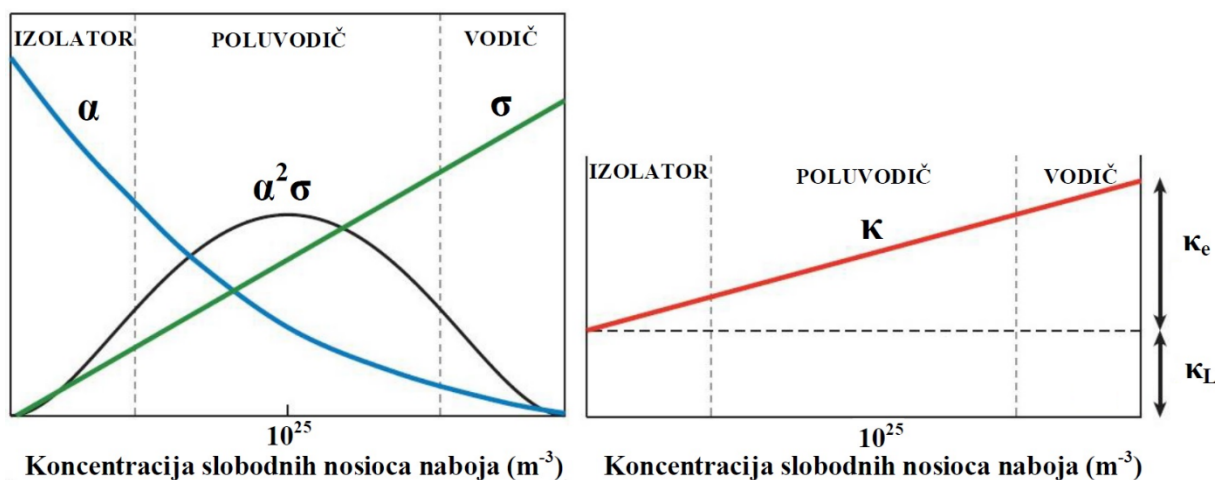
$$\kappa = \kappa_e + \kappa_L \quad (2.11)$$

gdje je:

κ_e – toplinska energija koju prenose elektroni i šupljine,

κ_L – toplinska energija fonona koji putuju kroz rešetku materijala.

Postoji takva poveznica između koeficijenta toplinske vodljivosti i električne provodnosti da s povećanjem električne provodnosti, povećavamo i toplinsku vodljivost, te najčešće smanjujemo Seebeckov koeficijent. Iako promjenom koncentracije nosioca naboja možemo donekle utjecati na električnu vodljivost, zadiranje u toplinsku vodljivost predstavlja izazov, pogotovo promjena κ_L parametra koji je usko povezan s kristalnom rešetkom materijala [3].



Slika 2.3. Promjena parametara α , σ i κ povećanjem nosioca naboja [3]

Autori u radu [17] spominju čitav niz termoelektričnih materijala s prikazom njihovih kristalnih rešetki te ponašanjem uslijed prisutnosti temperaturnog gradijenta na njima, isto tako se navodi čitav niz primjena TEG-ova i TEC-ova (engl. *Thermoelectric cooler*) u industriji.

Utjecaj geometrije i raznih oblika poluvodičkih materijala na generiranu izlaznu snagu i iznos efikasnosti je razmatran u [18] i [19]. Autori su na osnovu simulacije u ANSYS-u i MATLAB-u korištenjem metode konačnih elemenata zaključili da poprečni presjek i promjena dužine termopara utječe na generiranu snagu i efikasnost, a njihov iznos je prikazan u [20]:

$$R_g = \frac{l_p}{\sigma_p A_p} + \frac{l_n}{\sigma_n A_n} \quad (2.12)$$

$$\kappa = \frac{\kappa_p A_p}{l_p} + \frac{\kappa_n A_n}{l_n} \quad (2.13)$$

gdje je:

l_p i l_n – visina p i n-tipa poluvodiča u termoparu,

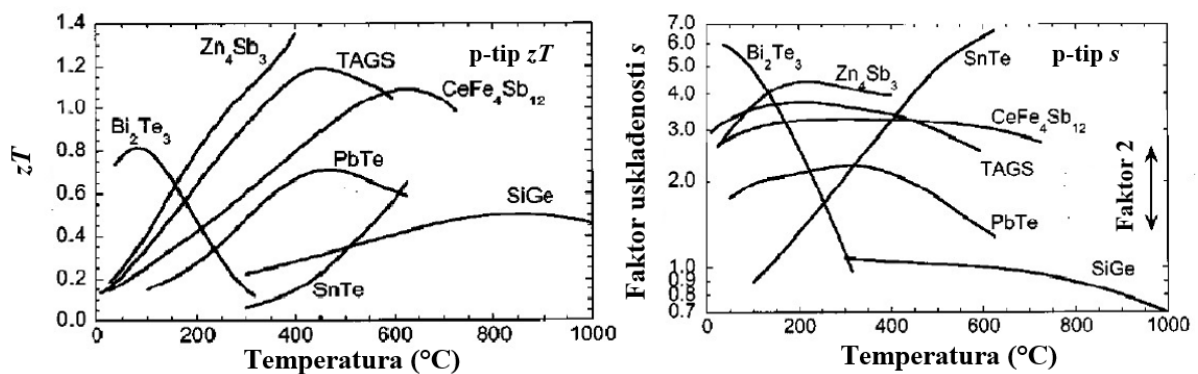
A_p i A_n – površina poprečnog presjeka poluvodiča p i n-tipa.

Kao što smo već naveli, za visoku efikasnost termoelektrične pretvorbe potreban je što veći iznos temperaturnog gradijenta i što veći iznos faktora izvrsnosti, a s obzirom da su α , κ , i σ temperaturno ovisni parametri, u pravilu ne upotrebljavamo samo jedan materijal pri izradi, već kombiniramo više različitih [21, 22]. Kombinacijom materijala koji pokazuju bolja svojstva pri višim tj. nižim temperaturama, možemo dizajnirati TEG koji pronalazi primjenu u širokom temperaturnom rasponu s visokim iznosom efikasnosti pretvorbe. Prilikom odabira materijala potrebno je uzeti u obzir njihovu termoelektričnu usklađenost, a maksimalna efikasnost će se dogoditi u trenutku kada je omjer gustoće električne struje i toplinskog toka (engl. *heat flux*) pri vođenju (2.14) jednak iznosu faktora usklađenosti s (engl. *compatibility factor*) (2.15).

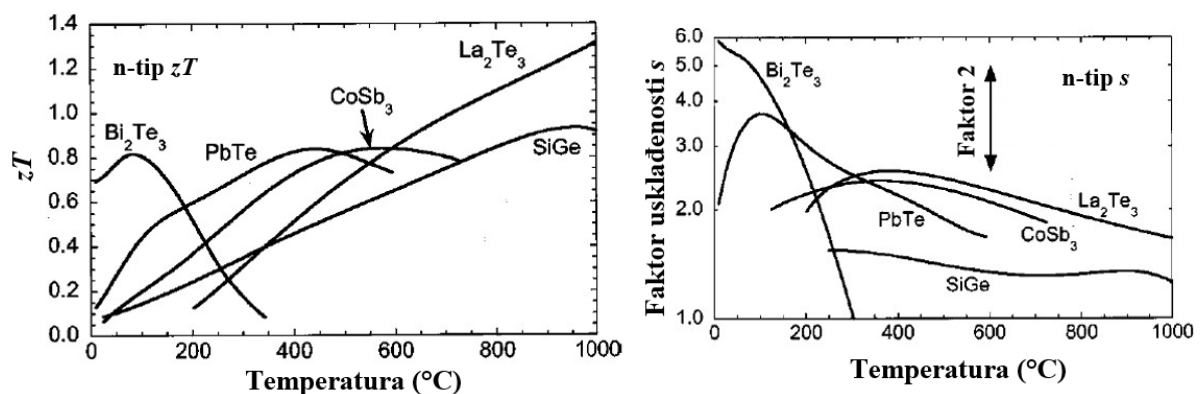
$$u = J / (\kappa \nabla T) \quad (2.14)$$

$$s = (\sqrt{1 + zT} - 1) / (\alpha T) \quad (2.15)$$

Autori radova su pokušali odabrati materijale koji osim visokog iznosa faktora izvrsnosti imaju i sličan iznos faktora usklađenosti. Ako se navedeni faktor razlikuje 2 puta ili više, za taj slučaj segmentacija materijala neće biti uspješna. Na slikama 2.4 i 2.5 prikazane su krivulje faktora usklađenosti i faktora izvrsnosti kod najčešće korištenih materijala prilikom izrade TEG-ova, posebno za p-tip poluvodiča i za n-tip poluvodiča, a sve u ovisnosti o temperaturi tople strane.



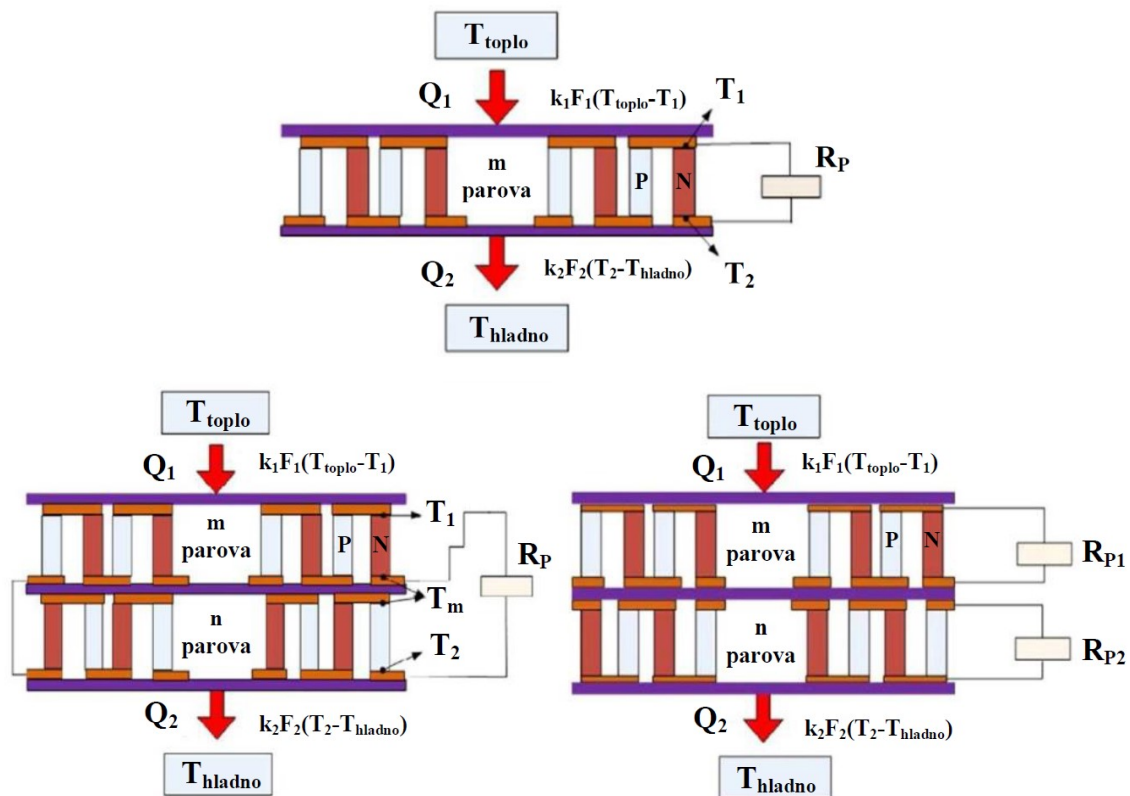
Slika 2.4. Faktor izvrsnosti i faktor usklađenosti u ovisnosti o temperaturi za p-tip [21]



Slika 2.5. Faktor izvrsnosti i faktor usklađenosti u ovisnosti o temperaturi za n-tip [21]

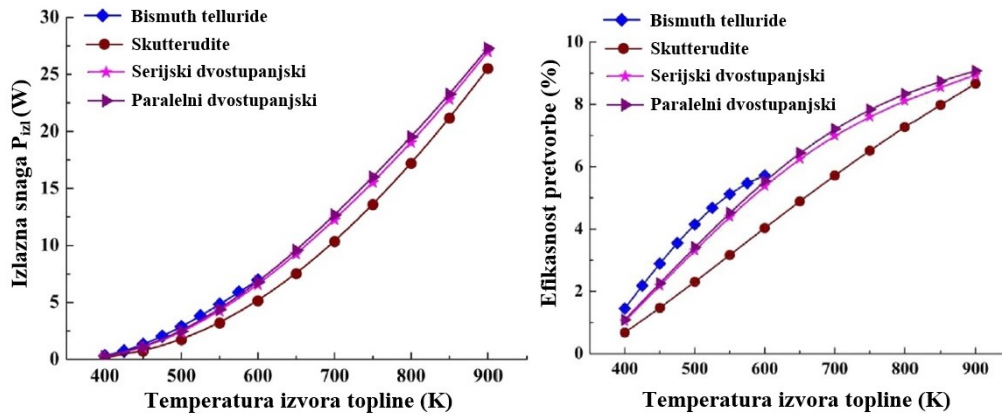
2.3. Višestupanjski (kaskadni) TEG-ovi

Problem nekompatibilnosti faktora usklađenosti kod 1-stupanjskih (engl. *single-stage*) TEG-ova moguće je riješiti primjenom višestupanjskih ili kaskadnih (engl. *multi-stage*) TEG-ova, gdje svaka kaskada predstavlja nezavisni krug. Autori su u [23] usporedili performanse 1-stupanjskih i višestupanjskih TEG-ova za različite temperaturne gradijente, gdje su kaskadni TEG-ovi išli do ukupno 4 razine, a kaskade su bile spojene serijski ili paralelno (svaka za sebe). Zaključak je da je efikasnost termoelektrične pretvorbe do temperature tople strane od 600K (uz temperaturu hladne strane od 300K) više-manje jednaka. Razlika u efikasnosti se primijeti kada temperatura tople strane naraste na temperature iznad 600K, tada efikasnost 1-stupanjskog TEG-a opada, a ona od kaskadnih TEG-ova ostaje konstantna, pri čemu kaskadni TEG-ovi u paralelnom spoju ipak pružaju nešto bolju efikasnost u odnosu na serijski spojene kaskade. Do sličnih zaključaka se došlo i u [24], gdje su autori uspoređivali efikasnost pretvorbe između 1-stupanjskih i 2-stupanjskih (serijskog i paralelnog spoja) TEG-ova napravljenih od različitih materijala (slika 2.6). Korišteni materijali su Bismuth Telluride Bi_2Te_3 koji se najčešće koristi pri nižim temperaturama tople strane i materijal za srednje temperature Skutterudite.

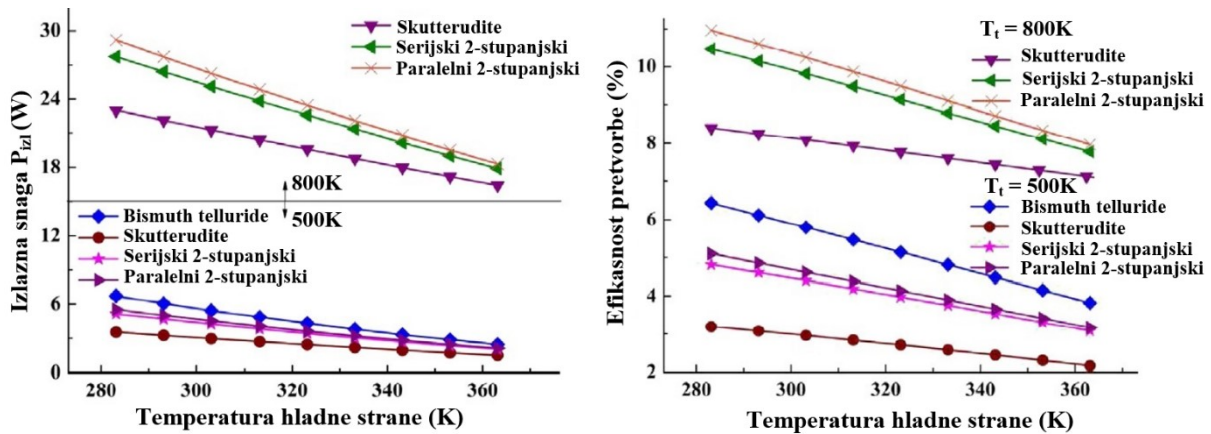


Slika 2.6. Prikaz 1-stupanjskog TEG-a, te paralelni i serijski spoj 2-stupanjskog TEG-a [24]

Istraživanje efikasnosti TEG-ova je izvršeno tako da je topla strana TEG-ova spojena na ispušni sistem motora sa unutarnjim izgaranjem, gdje temperatura varira između 400 i 900K, dok je hladna strana TEG-a pričvršćena na sustav rashladne tekućine automobila i ona iznosi 353,15K. Graf efikasnosti pretvorbe i pretvorene snage u ovisnosti o temperaturi tople strane su prikazani na slici 2.7, gdje je vidljivo da 1-stupanjski TEG od Bi_2Te_3 posjeduje najbolje performanse, ali mu je nedostatak što je ograničen na rad do temperature od 600K. Isti ti grafovi za dvije različite temperature tople strane uz promjenjivu temperaturu hladne strane su prikazani na slici 2.8.

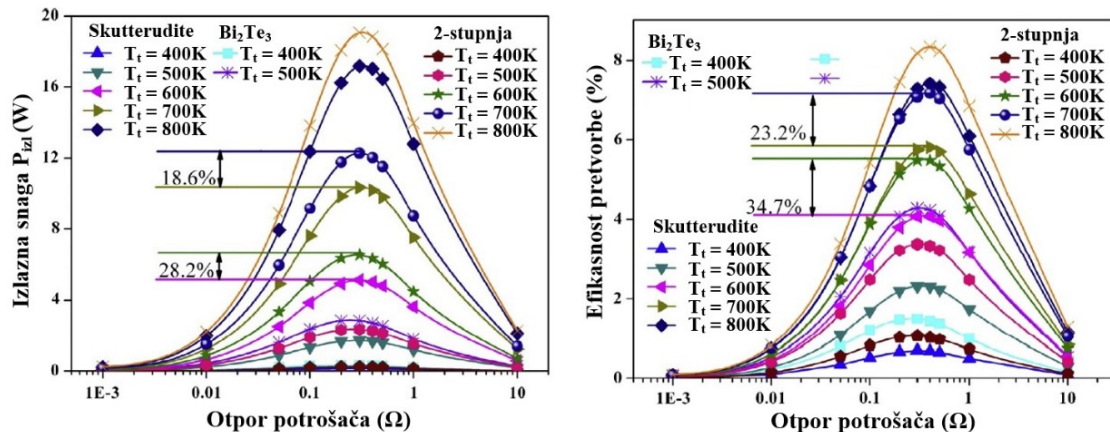


Slika 2.7. Generirana izlazna snaga i efikasnost pretvorbe u ovisnosti o temperaturi tople strane uz fiksnu temperaturu hladne strane [24]



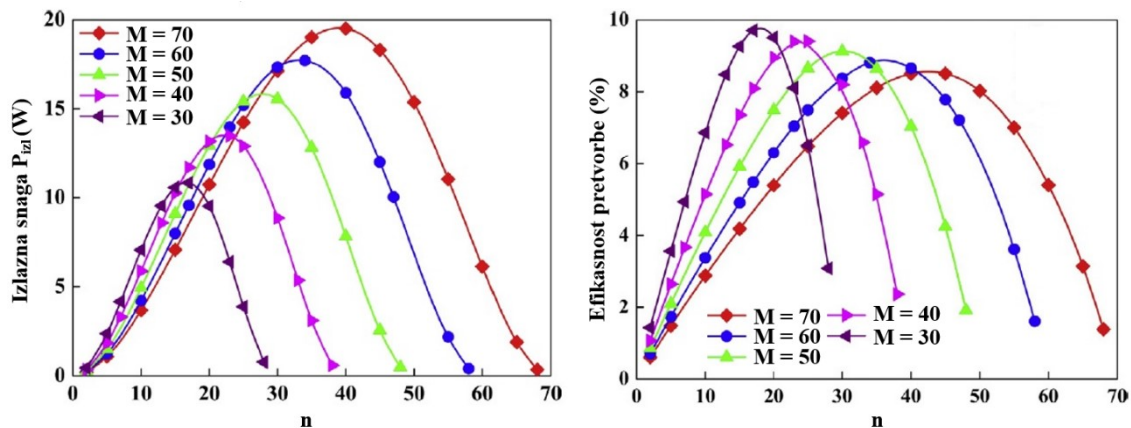
Slika 2.8. Generirana izlazna snaga i efikasnost pretvorbe u ovisnosti o temperaturi tople strane i promjenjivoj temperaturi hladne strane [24]

Osim navedenog istraživanja, isti autori su proširili istraživanje tako da su mjerili utjecaj iznosa otpora opterećenja na efikasnost pretvorbe i iznos generirane snage kod 1-stupanjskih i 2-stupanjskih TEG-ova u serijskom spoju [25]. Grafovi su prikazani na slici 2.9.



Slika 2.9. Ovisnost generirane snage i efikasnosti pretvorbe za 1-stupanjske i 2-stupanjske TEG-ove od različitih materijala [25]

Analizirao se i omjer broja termoparova između kaskada koji pruža najbolje performanse. Za navedenu primjenu najveći iznos generirane snage je ostvaren kada je omjer broja termoparova donje razine n i ukupnog broja termoparova M jednak iznosu 0,56. Efikasnost pretvorbe opada s porastom ukupnog broja termoparova, ali za određeni fiksni ukupni broj termoparova, može se odrediti optimalan broj termoparova donje razine s kojim će TEG imati najveću efikasnost, eksperimentalna analiza je pokazala da je iznos tog omjer 0,6.



Slika 2.10. Generirana snaga i efikasnosti pri omjerima ukupnog broja termoparova M i broja termoparova donje razine n [25]

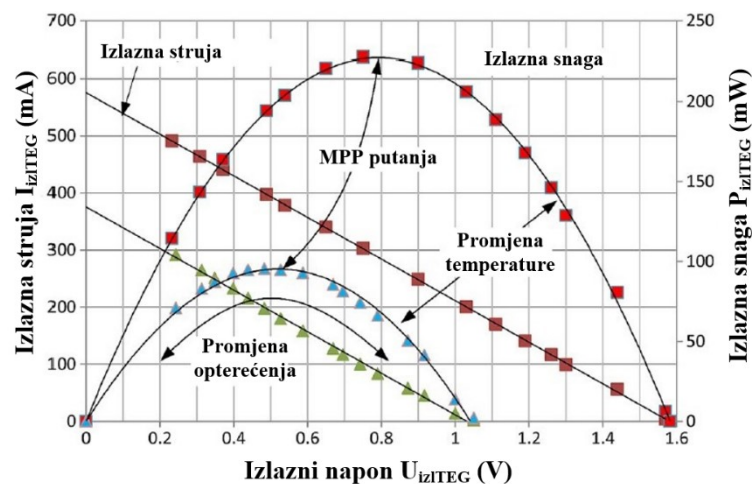
Zaključak je da za različite omjere dobijemo maksimalne iznose apsorbirane toplinske energije Q_{max} , efikasnosti η_{max} i generirane električne energije P_{max} . Odnosno, ako govorimo o omjeru broja termoparova gornje razine m i donje razine n , po pitanju efikasnosti idealno bi bilo da je taj omjer u intervalu 0,6-0,9, a s obzirom na generiranu električnu snagu da je između 0,8-0,9. Slična analiza utjecaja omjera broja termoparova kaskada je napravljena i u [26], gdje su autori došli do istih zaključaka. Osim navedenog, izrađen je analitički model za određivanje izlazne snage i efikasnosti pretvorbe u ovisnosti o iznosu izlazne struje.

3. Utjecaj ostalih komponenti sustava na efikasnost pretvorbe

Efikasnost termoelektrične pretvorbe osim o korištenim materijalima i geometriji TEG-a, ovisi i o karakteristikama ostalih komponenti sustava. Ovo poglavlje analizira dosadašnja istraživanja i utjecaj tih komponenti na efikasnost pretvorbe. Ponajprije se to misli na primjenu jedne od niza poznatih MPPT metoda, najčešće implementirane pomoću DC-DC pretvarača, a zatim i na odabir optimalnog hladila (sustava hlađenja), utjecaja kontaktnog toplinskog otpora i ostalih faktora. Iz rezultata je vidljivo da svaka pojedina stavka ima u određenoj mjeri utjecaj na iznos generirane snage i efikasnost pretvorbe energije.

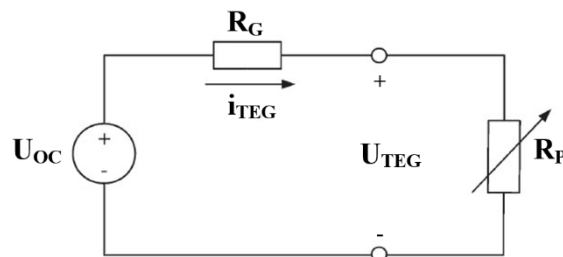
3.1. MPPT metode i DC-DC pretvarači primjenjivi na TEG-ove

S obzirom da je $P-U$ karakteristika TEG-ova nelinearna, sve metode izvorno osmišljene za pronalazak točke maksimalne snage kod fotonaponskih (FN) panela su uz sitne preinake (ili bez njih) primjenjive i na TEG-ove. Strujno-naponska ($I-U$) karakteristika i karakteristika snage TEG-a u ovisnosti o promjeni temperaturnog gradijenta i iznosa potrošača je prikazana na slici 3.1. Osim navedenog, na slici možemo primijetiti i promjenu unutarnjeg električnog otpora R_G u ovisnosti o promjeni temperaturnog gradijenta na krajevima TEG-a.



Slika 3.1. Strujno-naponska karakteristika te graf generirane snage u ovisnosti o promjeni temperaturnog gradijenta ($\Delta T = 85^{\circ}\text{C}$ i $\Delta T = 54^{\circ}\text{C}$) i promjeni potrošača [27]

S obzirom da je ovisnost struje o naponu linearna, u stacionarnom stanju za konstantni ΔT , TEG možemo predstaviti Theveninovim ekvivalentom naponskog izvora i unutarnjeg otpora R_G [28]. Na slici 3.2 je prikazan električni model TEG-a u stacionarnim uvjetima.



Slika 3.2. Theveninov ekvivalent TEG-a pri konstantnom ΔT [27]

Snaga generirana na potrošaču iznosi:

$$P_{izl} = i_{TEG}^2 R_P = \frac{U_{OC}^2}{\frac{R_G^2}{R_P} + 2R_G + R_P} \quad (3.1)$$

gdje je:

$$i_{TEG} = \frac{U_{OC}}{R_G + R_P} \quad (3.2)$$

Za pronaci vrijednost otpora potrošača pri kojemu će generirana snaga biti maksimalnog iznosa potrebno je derivirati nazivnik izraz (3.1) po vrijednosti otpornika potrošača.

$$\frac{\partial}{\partial R_P} \left(\frac{R_G^2}{R_P} + 2R_G + R_P \right) = 0 \quad (3.3)$$

$$1 - \frac{R_G^2}{R_P^2} = 0 \quad (3.4)$$

Iz (3.4) je moguće zaključiti kako će maksimalna generirana snaga na potrošaču biti za slučaj:

$$R_G = R_P \quad (3.5)$$

Odnosno kada je generirani napon na potrošaču jednak:

$$U_{TEG} = 1/2 U_{OC} \quad (3.6)$$

Kako je unutarnji električni otpor TEG-a dinamički promjenjiva veličina, prvenstveno ovisna o temperaturnom gradijentu, tako se javlja potreba za korištenjem MPPT-a.

Realizacija MPPT-a se u pravilu izvodi korištenjem DC-DC pretvarača priključenog između TEG-a i potrošača. Iz (3.7-3.9) moguće je vidjeti kako pretvarači mijenjaju iznos svoje ulazne impedancije u ovisnosti o omjeru signala-pauze kontrolnog PWM (engl. *Pulse-Width Modulation*) signala. Pritom čemu Boost pretvarač (engl. *step-up converter*) kontrolira prividnu impedanciju na način da je smanjuje u odnosu na stvarno opterećenje, dok Buck pretvarač (engl. *step-down converter*) povećava prividnu impedanciju u odnosu na stvarno opterećenje, a Buck-Boost pretvarač ima sposobnost transformacije impedancije unutar cijelog kvadranta izlaznih karakteristika [29].

$$R_{ulaznoBOOST} = R_P \cdot (1 - D)^2 \quad (3.7)$$

$$R_{ulaznoBUCK} = \frac{R_P}{D^2} \quad (3.8)$$

$$R_{ulaznoBB} = R_P \cdot \left(\frac{1 - D}{D} \right)^2 \quad (3.9)$$

gdje je:

D – omjer signala-pauze PWM signala i računa se po formuli $D = t_{on}/T$.

Za rad TEG-a u točki maksimalne snage potrebno je osigurati uvjet iz (3.5), a to je moguće tako da mijenjamo iznos omjera signala-pauze kontrolnog PWM signala DC-DC pretvarača, jer on prividno mijenja iznos otpora spojenog na njegovom izlazu (otpor potrošača). Osim navedenih najčešće korištenih pretvarača, u literaturi postoji niz pretvarača koji se koriste u kombinaciji s TEG-ovima. Njihov pregled, prednosti, nedostaci i primjene su prikazani u radu [30].

S obzirom na čitav niz raznih MPPT metoda u literaturi, u ovom radu ćemo se fokusirati na one najčešće korištene i objasniti ćemo njihove osnovne principe rada, a to su redom:

- metoda povremenog mjerenja napona otvorenog kruga (engl. *Fractional Open-Circuit Voltage Method*),
- metoda mjerenja struje kratkog spoja (engl. *Fractional Short-Circuit Current Method*),
- P&O metoda (engl. *Perturb and Observe Method*),
- metoda inkrementalne vodljivosti (engl. *Incremental Conductance Method*).

Osim navedenih, u literaturi često možemo naići na metodu neizrazite logike (engl. *Fuzzy Logic Method*) i metodu neuralnih mreža (engl. *Neural Network Method*), koje svrstavamo u direktne metode, ali one nisu tema istraživanja ovog rada. Svaka od navedenih metoda sadrži određene prednosti, nedostatke i mjesta primjene. Navedene metode je moguće razvrstati i s obzirom na efikasnost, mogućnost implementacije u analognoj ili digitalnoj tehnici, složenosti izvedbe, broju i vrsti potrebnih senzora, brzini konvergencije i na kraju krajeva, cijeni izvedbe [31, 32]. U Tablici 1. su nabrojane spominjane metode razvrstane prema poviše navedenim parametrima.

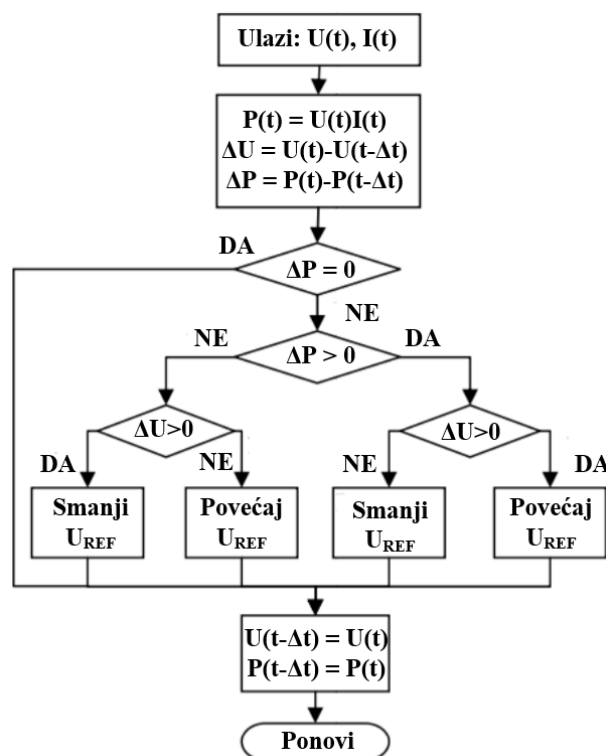
Tablica 1: Usporedba parametara različitih MPPT metoda [32]

	Analogno ili digitalno	Brzina konvergencije	Kompleksnost implementacije	Mjereni parametri
Otvoreni krug U_{oc}	A/D	Srednja	Niska	Napon
Kratki spoj I_{sc}	A/D	Srednja	Srednja	Struja
P&O	A/D	Promjenjiva	Niska	Napon, struja
Inkrementalna vodljivost	Digitalno	Promjenjiva	Srednja	Napon, struja
Neizrazita logika	Digitalno	Brza	Visoka	Ovisi
Neuralne mreže	Digitalno	Brza	Visoka	Ovisi

Općenito o spominjanim MPPT metodama primjenjivim na TEG-ove, zajedno s prednostima, nedostacima i dijagramima toka, osim u [28, 31, 32], moguće je pronaći i u [5, 33], s tim što je u radu [5] modelirana (Simulink, MATLAB) i eksperimentalno ispitana metoda P&O na TEG-ovima pri različitim temperaturnim gradijentima.

Zbog svoje jednostavnosti izvedbe i visoke efikasnosti, P&O metoda predstavlja jednu od najčešće korištenih metoda za dovođenje TEG-a u točku maksimalne snage. Dijagram toka ove metode je prikazan na slici 3.3 i obavlja se u sljedećim koracima:

1. izmjeri se izlazna struja $I(t)$ i izlazni napon TEG-a $U(t)$ i potom izračuna snaga $P(t)$
2. u određenim vremenskim trenucima dolazi do male promjene generiranog napona ΔU , shodno tome dolazi do promjene generirane struje ΔI i zatim se izračuna nova vrijednost generirane snage $P(t - \Delta t)$
3. vrši se usporedba vrijednosti početno izmjerenih napona ΔU i izračunatih snaga ΔP i na osnovu toga možemo donijeti zaključak u kojem dijelu karakteristike se nalazimo
4. za slučaj $\Delta P = 0$ nalazimo se u točki maksimalne snage
5. za sve ostale slučajeve dolazi ili do povećanja ili do smanjenja generiranog napona U_{REF}
6. ovaj ciklus se ponavlja s unaprijed definiranim periodom



Slika 3.3. Dijagram toka P&O metode [28]

Efikasnost metode u mnogočemu ovisi o generiranom šumu unutar sustava, kao i o preciznosti izračunatih vrijednosti struje i napona. Veličina naponskog inkrementa predstavlja kompromis između dinamičkog odziva metode (za slučaj nagle promjene ΔT) i oscilacija ustaljenog stanja [5]. Ako odaberemo relativno veliku vrijednost naponskog inkrementa, tada brže dolazimo do područja u okolini točke maksimalne snage, ali su oscilacije prevelike i na taj način dolazi do gubitka snage, u suprotnom, s malom vrijednošću naponskog inkrementa produžavamo vrijeme konvergencije, ali su oscilacije u okolini točke maksimalne snage manje. Smanjenje naponskog inkrementa nije poželjno u sustavima gdje je generirana snaga TEG-a približno jednakog reda veličine kao što je i potrošnja energije implementirane MPPT metode [34]. Navedena metoda se nije pokazala uspješnom kod praćenja točke maksimalne snage fotonaponskih panela za nagle promjene sunčevog zračenja, pa tako ni za nagle promjene temperaturne razlike kod TEG-ova [32, 35].

Korištenjem promjenjivog inkrementa moguće je ublažiti posljedice fiksnog inkrementa. Iako u literaturi postoji određen broj radova u kojima se promjenjivi inkrement primjenjuje kod P&O metode [36-38], uglavnom se takav inkrement koristi u metodi inkrementalne vodljivosti. Zbog toga ćemo ga detaljnije objasniti na metodi inkrementalne vodljivosti, s obzirom da princip rada ostaje isti, neovisno na kojoj je od ove dvije metode primijenjen.

Metoda inkrementalne vodljivosti je slična P&O metodi s tom razlikom što je moguća detekcija točke maksimalne snage. Prednost joj je što pruža bolje performanse u uvjetima naglih promjena temperaturnog gradijenta, a nedostatak je složenija izvedba [39]. Polazište metode je jednadžba (3.10), pri čemu izraz za snagu možemo rastaviti kao umnožak pripadajućeg iznosa napona i struje:

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(U \times I)}{dU} = I \frac{dU}{dU} + U \frac{dI}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{U} \cdot \frac{dP}{dU} = \frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} \quad (3.11)$$

U točki maksimalne snage vrijedi da je navedeni izraz (nagib tangente na krivulju) jednak:

$$\frac{dP}{dU} = 0 \quad (3.12)$$

Konačan izraz u točki maksimalne snage za dovoljno male inkrementalne pomake glasi:

$$0 = \frac{I}{U} + \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (3.13)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \quad (3.14)$$

Sama metoda je dobila ime po izrazu (3.14), s obzirom da se uspoređuje trenutna vodljivost sa inkrementalnom vodljivosti. Na osnovu usporedbe izmjerenih napona i struje zaključujemo u kojem se dijelu karakteristike nalazimo.

Ako vrijedi:

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \rightarrow \text{nalazimo se u točki maksimalne snage,}$$

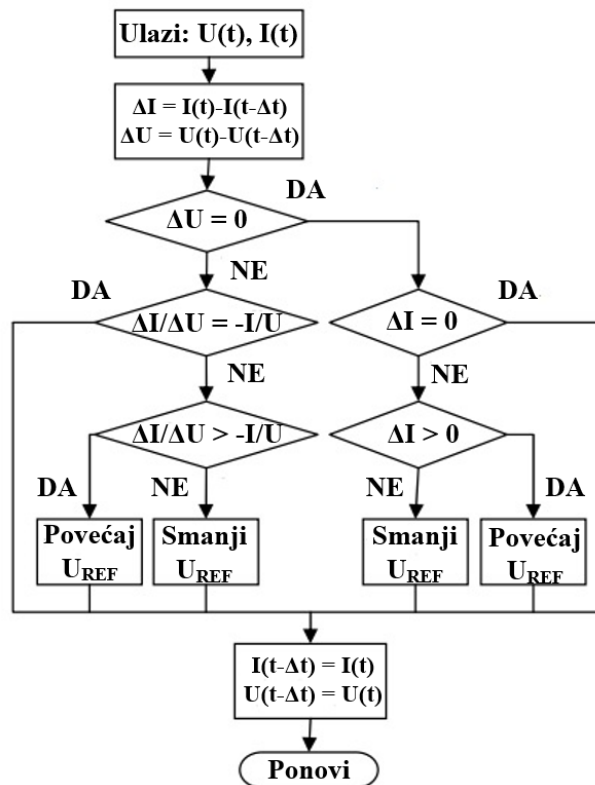
$$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} \rightarrow \text{nalazimo se lijevo od točke maksimalne snage,}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} \rightarrow \text{nalazimo se desno od točke maksimalne snage.}$$

U praksi postoji vrlo mala vjerojatnost da će se algoritam zaustaviti točno na graničnom uvjetu. Kako bi izbjegli oscilacije u okolini točke maksimalne snage, u praksi pretpostavljamo da smo dosegli maksimalnu snagu ako se rezultat nalazi unutar nekog definiranog iznosa pogreške [28]:

$$\left| \frac{I}{U} + \frac{\Delta I}{\Delta U} \right| < \varepsilon \quad (3.15)$$

Dijagram toka izvođenja metode s fiksnim korakom je prikazan na slici 3.4.



Slika 3.4. Dijagram toka metode inkrementalne vodljivosti s fiksnim korakom [28]

Jedno od mogućih unaprjeđenja metode je korištenje promjenjivog inkrementalnog koraka, na način da je korak veći što smo udaljeniji od točke maksimalne snage, a kako se približavamo navedenoj točki, korak je sve manji. Ovakvim rješenjem poboljšavamo dinamički odziv TEG-a i smanjujemo oscilacije u stacionarnom stanju [40].

Promjenjivi korak inkrementa je određen jednažbom:

$$D(k) = D(k - 1) \pm N \cdot \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (3.16)$$

gdje je:

$D(k)$ – omjer signala-pauze u vremenskom trenutku k ,

$D(k - 1)$ – omjer signala-pauze u prethodnom vremenskom trenutku,

N – koeficijent skaliranja,

$\left| \frac{dP}{dU} \right|$ – koeficijent nagiba tangente na krivulju maksimalne snage.

Iznos promjenjivog koraka inkrementa moguće je odrediti i na osnovu krivulje generirane snage u ovisnosti o podešenom omjeru signala-pauze. Tada jednažba (3.16) poprima sljedeći oblik:

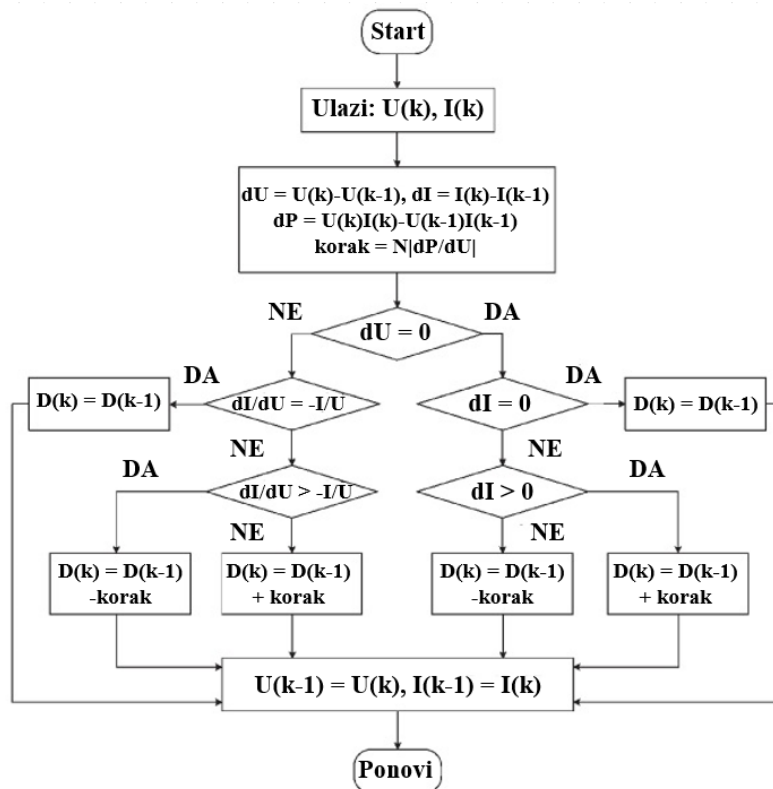
$$D(k) = D(k - 1) \pm N \cdot \left| \frac{\Delta P}{\Delta D} \right| \quad (3.17)$$

gdje je ΔD iznos koraka inkrementa omjera signala-pauze u prethodnom uzorkovanju, dok je koeficijent skaliranja parametar koji se u većini literature računa na isti način:

$$N < \Delta D_{max} / \left| \frac{dP}{dU} \right| \quad (3.18)$$

gdje je iznos varijable ΔD_{max} izabran relativno velik u odnosu na fiksni korak inkrementa, na taj način je dobiven dobar dinamički odziv sustava, a s nejednakosti je osigurana konvergencija metode. Ako navedeni kriterij iz jednažbe (3.18) ne može biti ispunjen, iznos promjenjivog koraka inkrementa poprima vrijednosti ΔD_{max} .

Dijagram toka s implementiranim promjenjivim korakom je prikazan na slici 3.5.

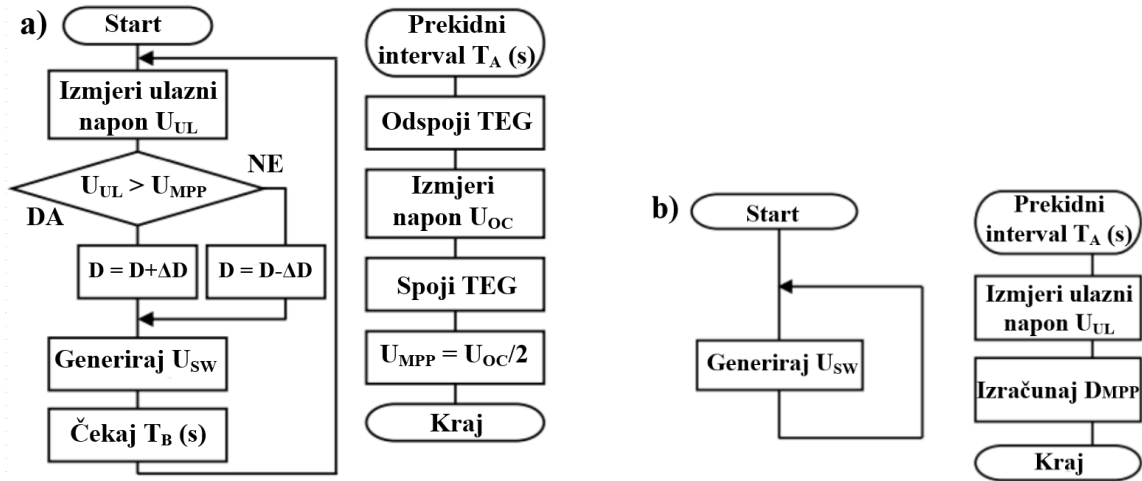


Slika 3.5. Dijagram toka metode inkrementalne vodljivosti s promjenjivim korakom [40]

S obzirom da je strujno-naponska karakteristika TEG-ova približno linearna, vrijednosti napona i struje koji će rezultirati radom u točki maksimalne snage su određeni izrazima:

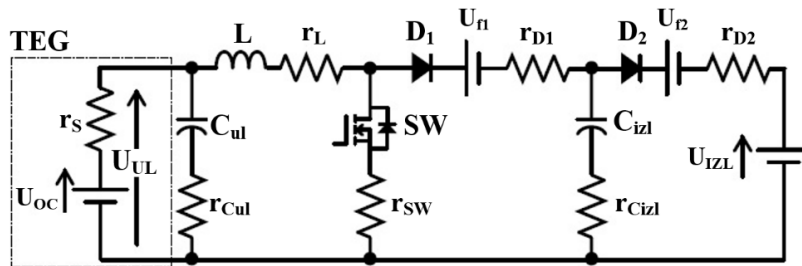
$$U_{MPP} = \frac{U_{oc}}{2} \quad (3.19)$$

$$I_{MPP} = \frac{I_{sc}}{2} \quad (3.20)$$



Slika 3.7. a) dijagram toka konvencionalne metode mjerenja napona otvorenog kruga i b) predloženi dijagram toka nove MPPT metode [42]

Shema sa Boost pretvaračem je prikazana na slici 3.8. Za realizaciju navedene metode potrebno je poznavati sve serijske otpore zavojnica, kondenzatora, sklopki, dioda, kao i napon propusne polarizacije dioda. Na osnovu navedenih parametara moguće je dobiti analitički izraz za napon otvorenog kruga u ovisnosti o kontrolnom PWM signalu.



Slika 3.8. MPPT metoda mjerenja napona otvorenog kruga implementirana pomoću Boost DC-DC pretvarača [42]

$$\frac{U_{OC} - U_{UL}}{r_s} = \frac{U_{OC} - (U_{f1} + U_{f2} + U_{IZL})(1 - D)}{r_s + r_L + r_{SW}D + r_{D1}(1 - D) + r_{D2}(1 - D)^2} \quad (3.21)$$

Supstitucijom $U_{UL} = U_{MPP} = U_{OC}/2$ i $D = D_{MPP}$ dobivamo sljedeći izraz:

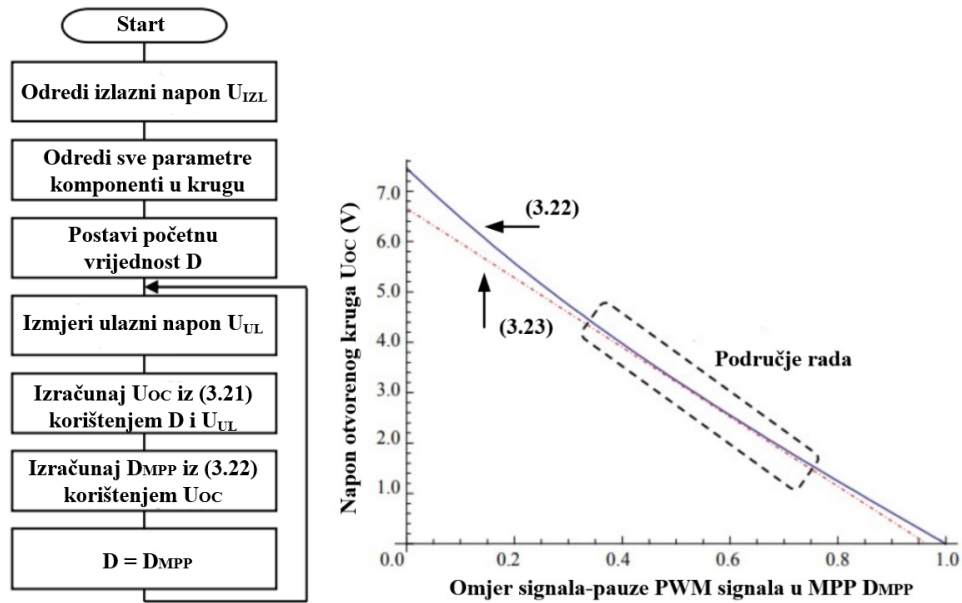
$$U_{OC} = \frac{2r_s(U_{f1} + U_{f2} + U_{IZL})(1 - D_{MPP})}{r_s - r_L - r_{SW}D_{MPP} - r_{D1}(1 - D_{MPP}) - r_{D2}(1 - D_{MPP})^2} \quad (3.22)$$

S obzirom da je jednačba (3.22) računski zahtjevna, tako je računanje D_{MPP} pojednostavljeno na način da su krivulju ovisnosti napona otvorenog kruga o omjeru signala-pauze PWM signala aproksimirali tangentom u točki srednje vrijednosti napona otvorenog kruga očekivanog iznosa

temperaturnog gradijenta (slika 3.9). S tim je metoda izgubila na efikasnosti, ali je postignuta ušteda energije mikrokontrolera koji sada D_{MPP} računa po jednađbi:

$$D_{MPP} = -0,1547U_{OC} + 0,987 \quad (3.23)$$

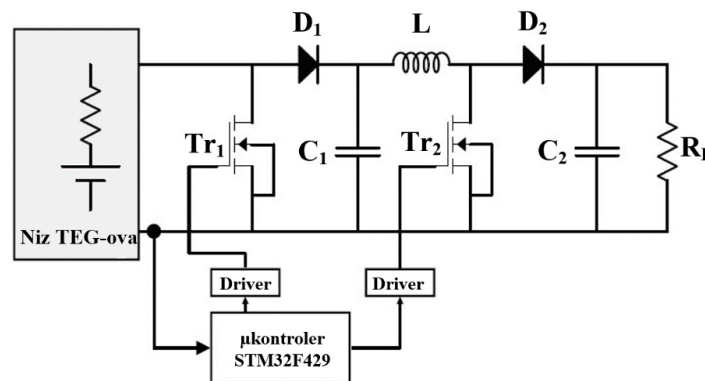
Na slici 3.9 je prikazan dijagram toka prilikom određivanja parametra D_{MPP} .



Slika 3.9. Dijagram toka pri određivanju D_{MPP} -a i $U_{OC} = f(D_{MPP})$ za (3.22) i (3.23) [42]

Navedena metoda pokazuje odlične karakteristike u praćenju točke maksimalne snage, relativna pogreška je ispod 1%, dok je potrošnja snage mikrokontrolera manja za 0,67mW u odnosu na konvencionalnu metodu.

Metodu praćenja točke maksimalne snage na principu mjerenja struje kratkog spoja su prikazali autori u [43], a shema je na slici 3.10.



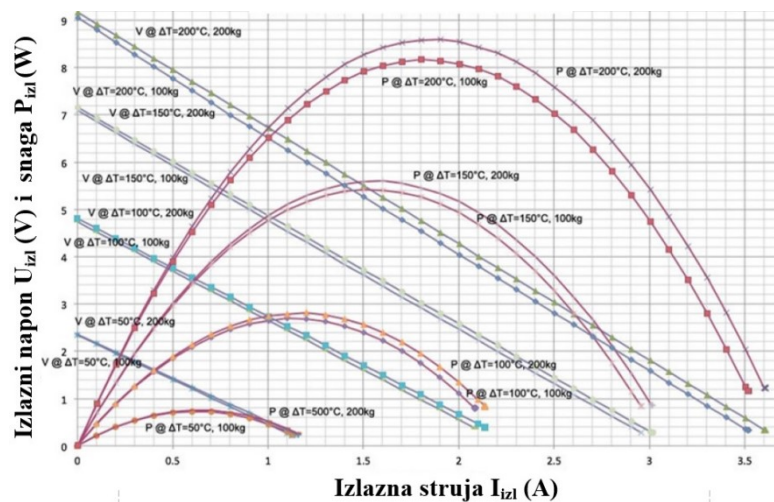
Slika 3.10. Shema realizacije MPPT-a mjerenjem struje kratkog spoja I_{SC} i korištenjem Boost DC-DC pretvarača [43]

Struja kratkog spoja se mjeri u trenutku kada dođe do zatvaranja tranzistora Tr_1 , dioda D_1 ima zadaću da onemogući pražnjenje ulaznog kondenzatora C_1 , koji pak u tim trenucima napaja ostatak kruga. Na taj način je omogućeno mjerenje struje kratkog spoja bez odspajanja TEG-a od pretvarača. Dijagram toka metode je jednostavan i nema potrebe za njegovim navođenjem, a za različite temperaturne gradijente ova metoda je pokazala efikasnost veću od 95,5%.

Osim navedenih radova koje smo spomenuli, u literaturi postoji još čitav niz radova koji se temelje na ovom principu praćenja točke maksimalne snage, međutim više-manje se radi o sličnim konceptima rada s tek sitnim preinakama. Tako je u radu [44] realizirana MPPT metoda korištenjem SEPIC (engl. *Single ended primary inductor converter*) bez mikrokontrolera, s tim da su u predloženoj shemi korištene isključivo diskretne komponente. Slična metoda mjerenja napona otvorenog kruga kao u [41] je predložena i u [45], s tim što je u radu dodatno prikazan proces nadopunjavanja olovnog akumulatora po ciklusima.

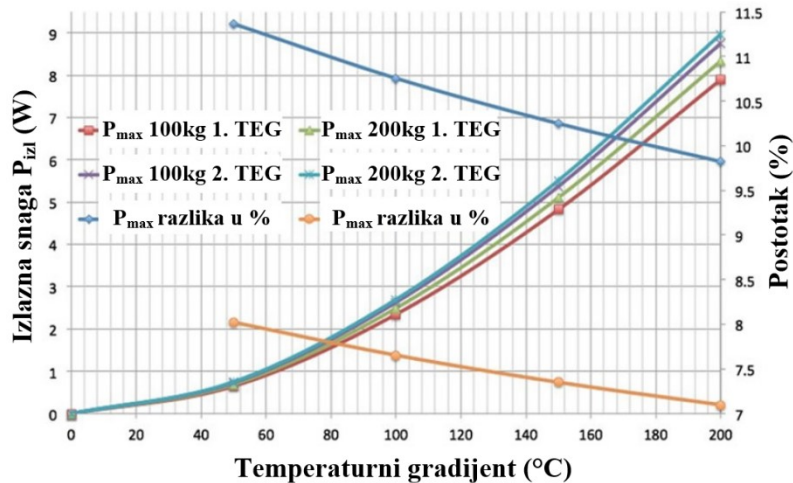
3.2. Toplinski kontakti otpor i sustav hlađenja

Autori su u [46] dizajnirali sustav koji im omogućava mjerenje električne snage TEG-a u ovisnosti o iznosu mehaničke sile pritiska (engl. *clamping force*) na njega, koji se pak nalazi između sustava izvora topline i vodeno hlađenog sustava s druge strane. Utjecaj navedene sile na iznos generirane snage i na strujno-naponsku karakteristiku TEG-a za različite gradijente (50°C , 100°C , 150°C i 200°C) i različite sile pritiska (100kg i 200kg) je prikazan na slici 3.11. Rezultati grafa su očekivani s obzirom da veća sila pritiska smanjuje toplinski otpor sustava i odstupanja u karakteristikama su vidljiva.



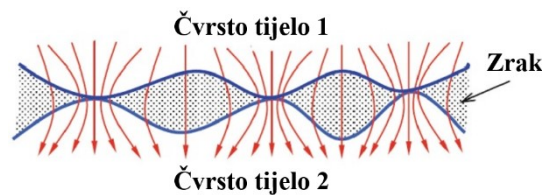
Slika 3.11. Ovisnost sile pritiska i temperaturnog gradijenta na karakteristike TEG-a [46]

U radu je prikazan i matematički model koji dosta precizno aproksimira rezultate izmjerene za graf na slici 3.11. Daljnjim mjerenjem (slika 3.12) je prikazana razlika u karakteristikama TEG-ova istog modela, iako su mjerenja za oba slučaja izvršena u identičnim uvjetima. Rezultati su pokazala odstupanje generirane snage u intervalu od 7-11,5% za 2 ista modela TEG-a, s tim da je odstupanje manje što je iznos sile pritiska veća. Maksimalna teoretska sila pritiska koju TEG izrađen od materijala Bi_2Te_3 može izdržati ovisi o tlačnoj čvrstoći termoelektričnog materijala i ta je vrijednost približno jednaka 10N/mm^2 ili $\sim 1600\text{kg}$ kod TEG-a dimenzija $40\times 40\text{mm}$.



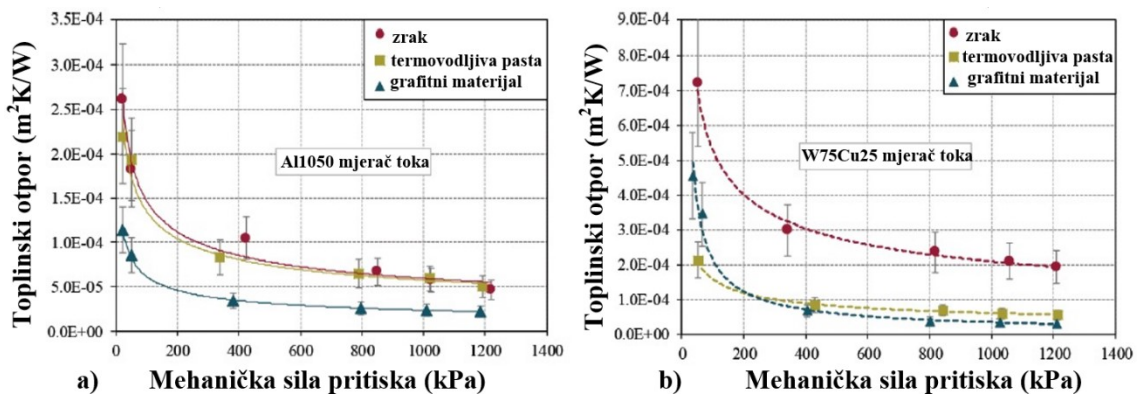
Slika 3.12. Razlika karakteristika istih modela TEG-ova u identičnim uvjetima mjerenja [46]

Analiza utjecaja različitih materijala u funkciji smanjenja kontaktnog toplinskog otpora između TEG-a i izmjenjivača topline je napravljena u [47], slika 3.13. U tom radu je i razmatran utjecaj različitih vrsta izolatorskih materijala na smanjenje neželjenog toplinskog zračenja i prelaska topline na hladnu stranu TEG-a u slučaju malog razmaka između izmjenjivača topline.



Slika 3.13. Prikaz toplinskog otpora uslijed nesavršenosti površina materijala [47]

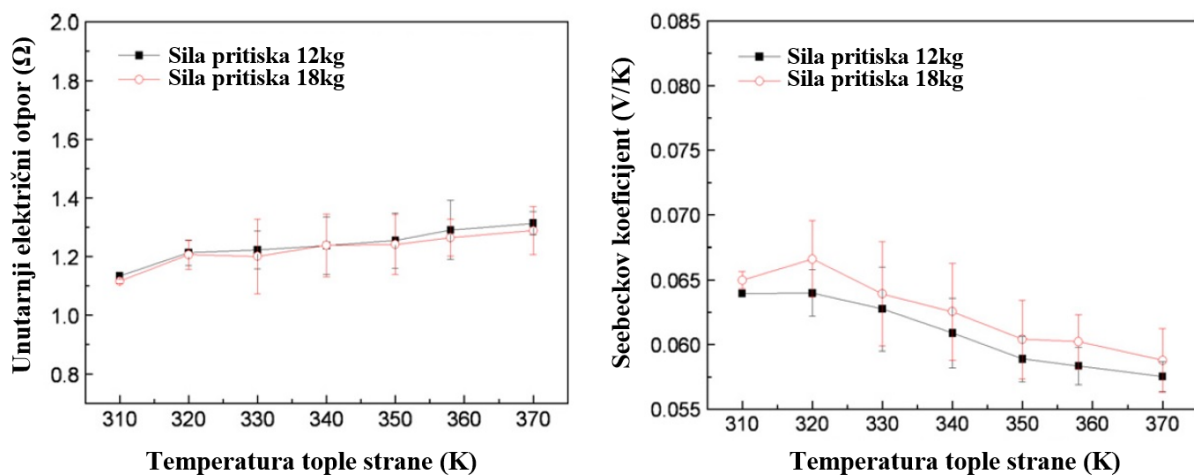
Za određenu konfiguraciju rezultati su pokazali da smanjenjem iznosa kontaktnog toplinskog otpora za 10% uzrokuje povećanja generirane snage za 8%, zbog toga se u ovom radu pristupilo analizi materijala koji se koriste u tu svrhu. Analizirao se kontaktni toplinski otpor za tri različita slučaja, bez ikakvog materijala, grafitni materijal i termovodljiva silikonska pasta u ovisnosti o sili pritiska. Rezultati pokazuju da je pri malim iznosima sile pritiska kontaktni otpor najveći, povećanjem iznosa sile kontaktni otpor se smanjuje i to najviše za grafitni materijal, a zaključak autora je da se termovodljiva pasta istisne pri velikoj sili pritiska i zbog toga pokazuje lošija svojstva u odnosu na primjenu grafitnog materijala.



Slika 3.14. Toplinski otpor termovodljivog kontaktnog materijala u ovisnosti o sili pritiska za: a) aluminijsko sučelje i b) leguru bakar-volfram [47]

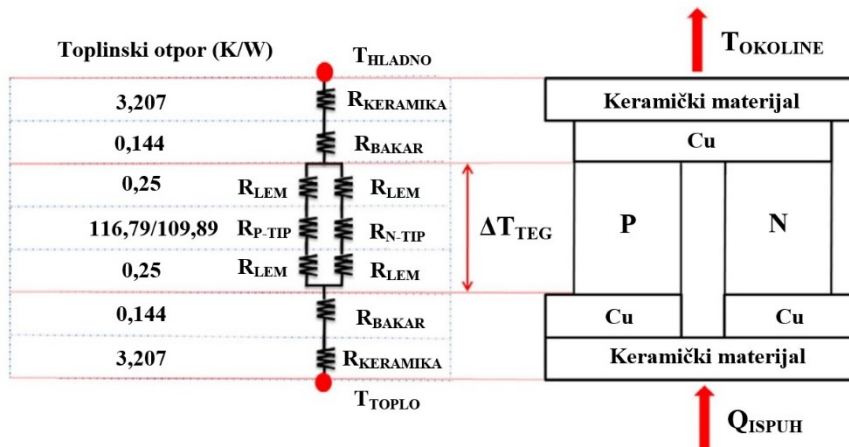
Rezultati povezani s analizom preskoka topline u slučaju malog razmaka između izmjenjivača topline (smanjena efikasnost TEG-a) pokazuju da zrak predstavlja dobar temperaturni izolator, a rezultati su to bolji što je razmak između izmjenjivača veći. Gubitak toplinske energije nastao na ovaj način nije beznačajan i on u mjerenjima iznosi 20-30%, stoga se u radu [48] zaključuje kako je parametar ulazne toplinske energije TEG-a teško mjerljiv zbog velikog rasipanja topline prije no što ona dođe do samih termoparova. Osim navedenog, u radu je napravljena numerička toplinska analiza, te je naglašen negativan utjecaj velikog toplinskog otpora keramičkih ploča na efikasnost pretvorbe. Autori su u radu [49] dali pregled raznih materijala koji se koriste za smanjenje kontaktnog toplinskog otpora kod srednjih temperatura (između 600 i 900K).

Proizvođači TEG-ova u specifikacijama često navode parametre kao što su maksimalna snaga P_{max} , maksimalna struja I_{max} , efikasnost η i slične parametre pri određenim temperaturama, ali iznose faktora izvrsnosti, Seebeckov koeficijent ili koeficijent toplinske vodljivosti nećemo pronaći (eventualno budu navedeni samo za određeno temperaturno područje). Tako je u radu [50] provedena analiza mjerenja stvarnog Seebeckovog koeficijenta i unutarnjeg električnog otpora za različite temperaturne gradijente i pri različitim silama pritiska. Istraživanje se temelji na numeričkoj analizi, a potom i na eksperimentalnim mjerenjima. Mjerenjem strujno-naponske karakteristike i ovisnosti snage o naponu na potrošaču, izračunate su vrijednosti Seebeckovog koeficijenta i unutarnjeg električnog otpora (slika 3.15). Rezultati su pokazali da unutarnji otpor ne ovisi o sili pritiska, iako se njegov iznos blago povećava s povećavanjem temperature tople strane. Iznos Seebeckovog koeficijenta ovisi o sili pritiska, porastom sile pritiska, raste i njegov iznos, a ima tendenciju pada s porastom temperature. Iznosi izmjerenog i od strane proizvođača dobivenog Seebeckovog koeficijenta se razlikuju za više od 30%, a iznosi sile pritiska su bili 12kg i 18kg tj. $0,423\text{kg/cm}^2$, te $0,634\text{kg/cm}^2$, a ΔT je u rasponu do 30K.



Slika 3.15. Promjena unutarnjeg električnog otpora i iznosa Seebeckovog koeficijenta s promjenom temperaturnog gradijenta i iznosa mehaničke sile pritiska [50]

Autori su u istom radu napravili usporedbu iznosa izmjerenog Seebeckovog koeficijenta i onog dobivenog kada se u obzir uzme temperaturni gradijent samo na krajevima termopara. Prikaz termalne otporne mreže je prikazan na slici 3.16, dok su rezultati usporedbe prikazani na 3.17. Iz grafa je vidljivo da se rezultati dobiveni za ova dva slučaja značajno razlikuju, upravo zbog negativnog utjecaja keramičkih ploča.

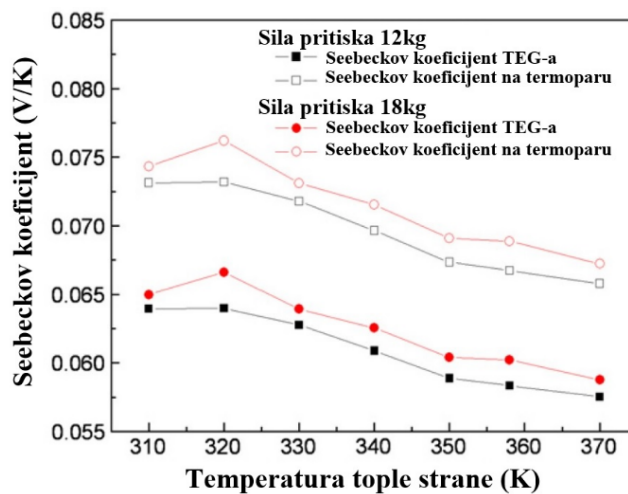


Slika 3.16. Termalna otporna mreža sustava [50]

$$\Delta T_{TEG} = \frac{(R_{N-TIP} + 2R_{LEM}) // (R_{P-TIP} + 2R_{LEM})}{2(R_{KER} + R_{CU}) + (R_{N-TIP} + 2R_{LEM}) // (R_{P-TIP} + 2R_{LEM})} \cdot (T_t - T_h) \quad (3.24)$$

Jednadžba (3.24) je određena na osnovu slike 3.16. Poznavanjem i uvrštavanjem parametara dobijemo da je temperaturni gradijent na krajevima termoparova jednak:

$$\Delta T_{TEG} = 0,8742(T_t - T_h) \quad (3.25)$$



Slika 3.17. Usporedba iznosa Seebeckova koeficijenta na krajevima TEG-a i termopara [50]

Nastavak na poviše navedeni rad je u [51], gdje su autori aproksimirali koeficijente korištenjem linearne i kvadratne jednadžbe:

$$R_G(T_t) = a_1 T_t + a_2 \quad (3.26)$$

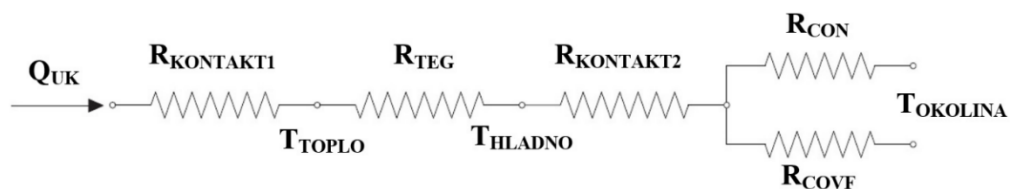
$$\alpha(T_t) = b_1 T_t^2 + b_2 T_t + b_3 \quad (3.27)$$

Predloženi numerički model i iznosi koeficijenta dosta dobro aproksimiraju eksperimentalno dobivene rezultate. Autori su dodatno proširili istraživanje na način da su pomoću ovog modela aproksimirali i karakteristike generirane snage u ovisnosti o vrijednosti otpora potrošača i sile mehaničkog pritiska, te su zaključili da iznos sile također utječe na vrijednost generirane snage.

Istraživanje na temu utjecaja sile pritiska i nejednolike temperature u serijskom spoju šest TEG-ova duž ispušnog sistema automobila je prikazano u [52]. Rezultati su pokazali da je generirana snaga manja za 2,6%, odnosno 8,1% kada je sila pritiska 120kg tj. 60kg, u odnosu na početni iznos sile pritiska od 180kg za TEG modul dimenzija 50x50mm. Slična analiza sa jednakim zaključcima je napravljena i u [53], s tim što su istraživanje dodatno proširili utjecajem oblika hladila na generiranu snagu, o čemu će biti govora u nastavku rada. Autori su u radu [54] osim mjerenja točnog iznosa toplinske energije koja sudjeluje u pretvorbi, istraživali i ovisnost sile pritiska na generiranu snagu dobivenu pretvorbom. Korišteni TEG-ovi u mjerenju su TEHP1-12656-0.3 (Thermonamic®, Kina) i model INBC1-127.0HTS (Watronix®, SAD). Proizvođač za prvo spomenuti TEG navodi kako je optimalni iznos sile pritiska 400kg, a u mjerenjima je on mijenjan u rasponu od 50kg do 400kg za modul dimenzija 56x56mm. Rezultati su pokazali da je snaga generirana veća za 20-25% u slučaju poštivanja preporučenog pritiska od strane proizvođača, a slični rezultati su ostvareni i u radu [55] za TEG dimenzija 40x40mm, gdje se iznos sile pritiska mijenjao u rasponu do 700kPa (~114kg).

Na generiranu snagu i efikasnost sustava osim prethodno navedenih parametara, utječe i dizajn sustava za disipaciju toplinske energije hladne strane TEG-a. Tako u praksi i literaturi postoji niz metoda koje možemo koristiti u tu svrhu. Osim najčešće korištenog pasivnog hladila, česta je i upotreba hladila aktivno hlađenog ventilatorom, vodenog hlađenja, korištenjem fazno promjenljivih materijala (PCM, engl. *phase change material*), te metode toplinske cijevi (engl. *heat pipe cooling*), a ovisno o opravdanosti upotrebe odlučujemo se za jednu od metoda [56].

Autori su u radu [57] napravili usporedbu performansi sustava za tri različite metode disipacije topline na hladnoj strani TEG-a. Protok topline u takvom sustavu od izvora topline do hladila zajedno sa svim toplinskim otporima u krugu je prikazan na slici 3.18. Model je napravljen na principu 1-D protoka topline koji se spominje i koristi u većini literature, a zatim su mjerenja izvedena eksperimentalno i rezultati su uspoređeni.



Slika 3.18. Termalna otporna mreža sustava [57]

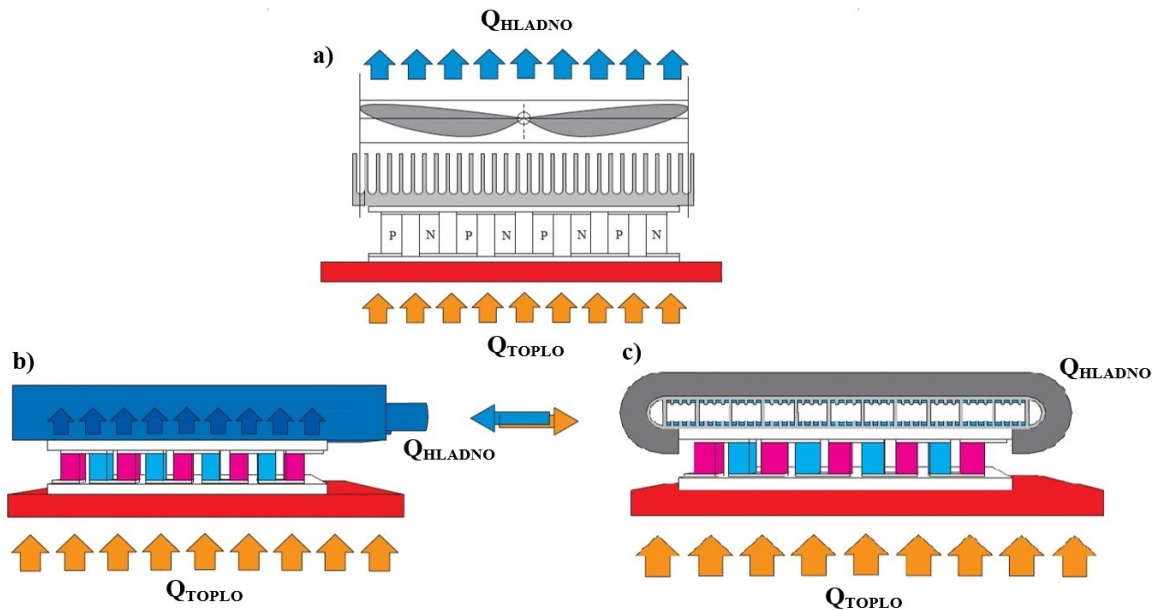
gdje su:

$R_{KONTAKT1}$, $R_{KONTAKT2}$ – toplinski kontaktni otpor između površina,

R_{TEG} – toplinski otpor TEG-a,

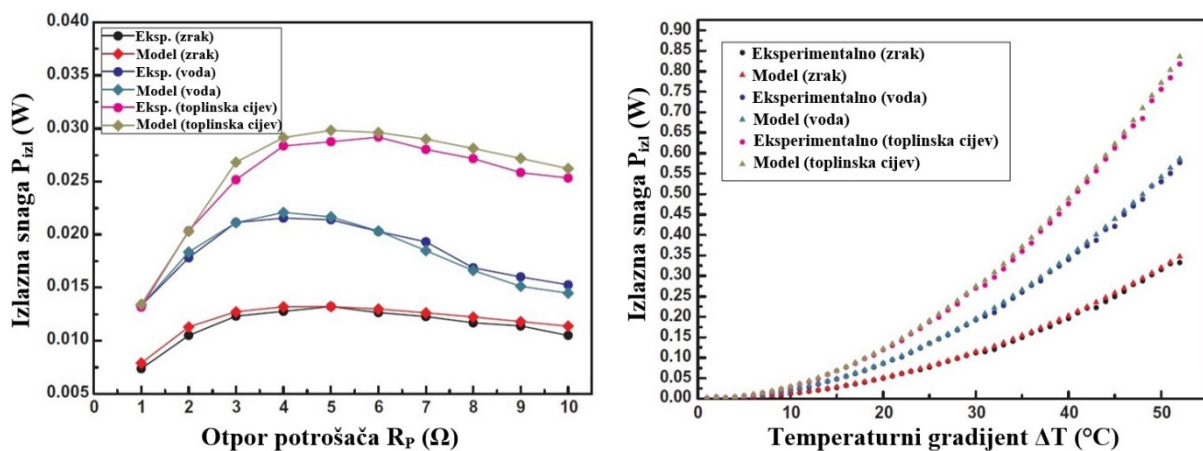
R_{CON} , R_{COVF} – ukupan toplinski otpor sustava hlađenja.

Sustav temeljen na pasivno ili aktivno hlađenom (upotrebom ventilatora) aluminijskom hladilu je najčešće upotrebljavan sustav hlađenja zbog svoje jednostavnosti izvedbe. Osim tog sustava, analiziralo se i vodeno hlađeni sustav, te hlađenje korištenjem toplinske cijevi (slika 3.19).



Slika 3.19. a) aktivno zračno hlađenje ventilatorom i b) vodom, te c) hlađenje korištenjem toplinske cijevi [57]

Rezultati su u prvom redu pokazali da predloženi matematički model dosta dobro aproksimira eksperimentalno dobivene rezultate. Pri čemu se metoda hlađenja korištenjem toplinske cijevi pokazala kao najboljom po pitanju generirane snage, dok je aktivno hlađenje zrakom pokazalo najlošije rezultate (slika 3.20).



Slika 3.20. Generirana snaga u ovisnosti o vrijednosti otpora opterećenja i temperaturnog gradijenta na krajevima TEG-a [57]

U radu je napravljen još čitav niz mjerenja, a jedno od njih prikazuje ovisnost generirane snage o brzini protoka rashladne tekućine kroz izmjenjivač topline. Maksimalna generirana snaga i efikasnost se pojavljuju pri brzini rashladne tekućine od $\sim 0,12\text{m/s}$, a nakon čega dolazi do pada iznosa generirane snage uslijed smanjenja temperaturnog gradijenta. Autori su u radu razmatrali potrošnju energije uređaja koji se koriste za aktivno hlađenje, te su zaključili da je generirana snaga to veća što je potrošnja pomoćnih uređaja koji osiguravaju hlađenje veća.

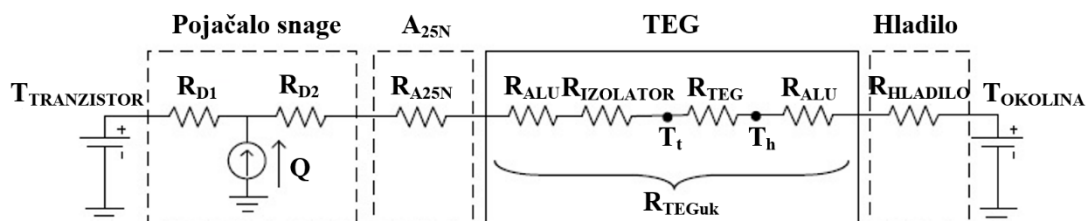
Autori su u radu [56] izveli niz parametara koji definiraju razne sustave hlađenja, tako su npr. za aktivno hlađenje upotrebom ventilatora i pasivno hlađenje prirodnim strujanjem zraka izveli izraze na koji način geometrija samog hladila i strujanje zraka utječu na iznos generirane snage.

Parametri koji definiraju ostale metode hlađenja su također izvedeni. Utjecaj geometrije hladila kod primjene na ispušnom sistemu, zajedno sa iznosom sile pritiska i ulogom aktivnog hlađenja je analizirana u [53], a rezultati su pokazali da krilca hladila bitno utječu na performanse TEG-a, ali do određenog broja, iznad kojeg generirana snaga više ne raste proporcionalno njihovom broju. Matematički model na osnovu kojeg je moguće odabrati TEG i hladilo s optimalnim karakteristikama za određene uvjete primjene je prikazan u [58]. Model je razvijen na način da je temperatura u sustavu zamijenjena električnim potencijalom, tok topline električnom strujom dok električni otpor predstavlja toplinski otpor TEG-a, izvora topline i hladila. Eksperimentalni i matematički dobiveni rezultati pokazuju da je maksimalna snaga generirana kada je tok topline kroz TEG najvećeg iznosa, a to je za slučaj korištenja hladila s najmanjim iznosom toplinskog otpora. Osim navedene analize, prikazan je i primjer odabira optimalnog TEG-a pri određenim uvjetima primjene. U radovima [59] i [60] objašnjen je princip temperaturne prilagodbe i kako je moguće utjecati na nju. Za efikasan sustav pretvorbe energije, osim električne prilagodbe tj. prilagodbe iznosa potrošača unutarnjem otporu, potrebno je obaviti i temperaturnu prilagodbu. Problem koji nastaje je mali iznos toplinskog otpora TEG-a u usporedbi s toplinskim otporom tople i hladne strane (hladila) kod primjene na ljudskom tijelu. Zbog toga se na TEG-u generira mali iznos temperaturnog gradijenta koji loše utječe na generiranu snagu (slika 3.21). Autori su pokazali da je na iznos toplinskog otpora TEG-a moguće utjecati promjenom visine p i n -tipa poluvodiča u termoparu, međutim to povećanje ujedno i povećava iznos unutarnjeg električnog otpora TEG-a, što pak negativno utječe na iznos maksimalne generirane snage [61].

4. PRIMJENA TEG-ova

Porastom korištenja mobilnih (nosivih) uređaja i senzora male snage, raste i potreba za istraživanjem na temu njihovog napajanja. Termoelektrični generatori su već pronašli primjenu u sustavima koji generiraju veliku količinu otpadne toplinske energije (npr. u ispušnom sistemu automobila), ali u ovom poglavlju se razmatra njihova primjena u sustavima gdje se generiraju male količine otpadne toplinske energije. Napredak u tehnologiji je doveo do toga da moderni bežični senzori rade sa snagom od otprilike $130\mu\text{W}$, dok je recimo za rad ručnog kvarcnog sata potrebno $20\text{-}40\mu\text{W}$, tako da iako TEG-ovi generalno imaju malu efikasnost, energija dobivena pretvorbom se ipak može iskoristiti u praksi [62, 63]. Najčešća upotreba TEG-ova u sustavima male snage je u medicinske svrhe korištenjem topline ljudskog tijela, dobivenom električnom energijom je moguće napajati određene senzore i uređaje za kontrolu vitalnih životnih funkcija. Mjerenjima je pokazano da se navedenom metodom može generirati snaga od $10\text{-}30\mu\text{W}/\text{cm}^2$ za 24-satno razdoblje pri prosječnim temperaturama okoline [64]. Za navedenu primjenu važno je dizajnirati fleksibilne TEG-ove i kondenzatore kako korisniku ne bi stvarali nelagodu kod korištenja. Iako u praksi postoji niz njihovih primjena, mi smo spomenuli one za koje smatramo da su nam bitne zbog budućeg rada, a to su korištenje TEG-ova za napajanje senzora IoT mreže i ostalih senzora male potrošnje i za povećanje efikasnosti pojačala snage i ostalih elektroničkih sklopova prikupljanjem otpadne toplinske energije prilikom njihovog rada.

Autori su u radu [65] pomoću TEG-ova prikupljali toplinsku energiju generiranu kod pojačala snage E klase u krugu odašiljača (1W, 2,45GHz). Tehnologija izrade pojačala, kao i zahtjevi na linearnost dovode do generiranja velike količine topline u takvim krugovima. Autori su u radu korištenjem TEG-ova pokušali što veći dio te otpadne energije pretvoriti u korisnu električnu energiju koja bi poslužila za napajanje raznih senzora u okolini sklopa. Korištenjem analogije između električne i toplinske energije, razvijen je termalni model na osnovu kojeg je simulirana pretvorba toplinske energije (slika 4.1). Analiza je napravljena pod pretpostavkom stacionarnog stanja, tako da kondenzatori koji bi simulirali dinamičke promjene temperature u krugu nisu uključeni u model.



Slika 4.1 Termalni model sustava [65]

gdje je:

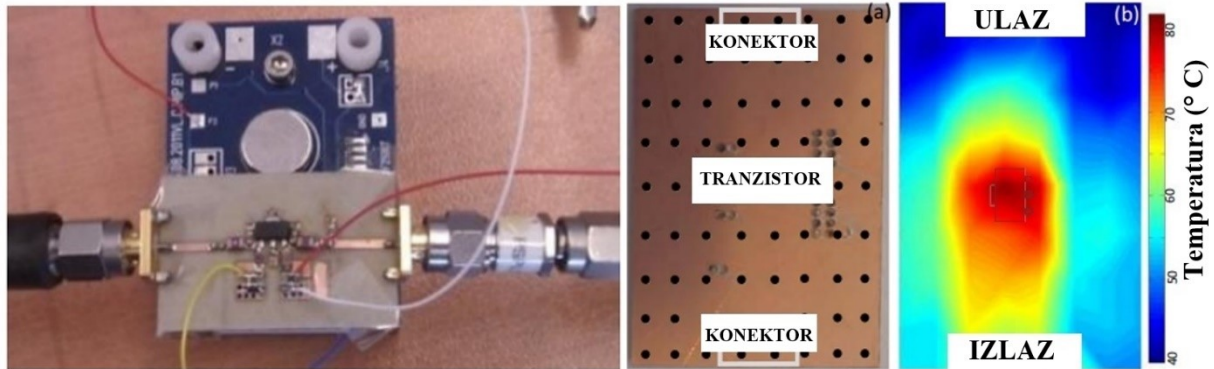
R_{D1} i R_{D2} – toplinski otpor tranzistora s obzirom na okolinu i na podlogu,

R_{A25N} – kontaktni toplinski otpor i toplinski otpor podloge,

R_{TEGuk} – ukupan toplinski otpor TEG-a,

$R_{HLADILO}$ – toplinski otpor hladila.

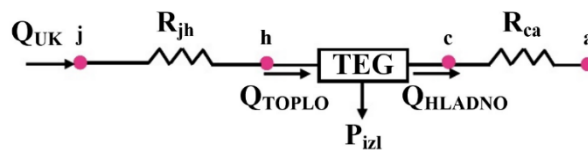
Iznosi navedenih toplinskih otpora su pronađeni u priručnicima koji daju proizvođači pojedinih komponenti. Zagrijavanje pojačala i raspodjela temperature je prikazana na slici 4.2, vidljiva je neravnomjerna raspodjela temperature na pojačalu, na način da je temperatura najveća u okolini tranzistora i iznosi 355,4K (82,4°C).



Slika 4.2. Prikaz eksperimentalno izrađenog pojačala i raspodjele temperature u radu [65]

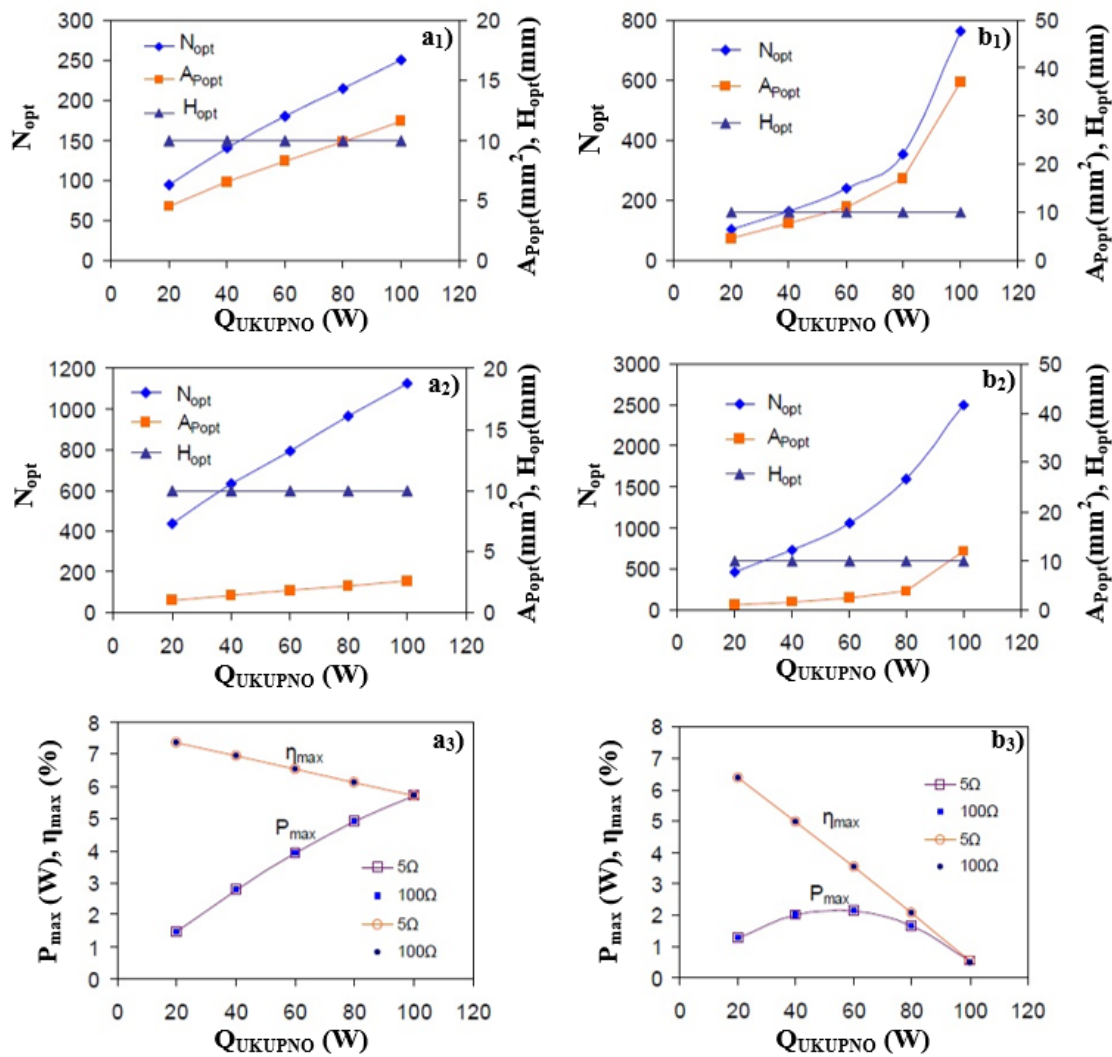
Nakon spajanja TEG-a i hladila u sustav, poremeti se toplinska ravnoteža i tada temperatura na toploj strani iznosi 313,1K, a na hladnoj strani 305,9K. Rezultati pokazuju odstupanje u iznosu simulirane i izmjerene efikasnosti sustava, a kao razlog autori navode veliki iznos kontaktnog toplinskog otpora koji kod simulacije nije uzet u obzir. Osim toga, zaključak je da na efikasnost pretvorbe osim odabira optimalnog TEG-a utječu i sve ostale komponente sustava.

Autori su u radu [66] analizirali problem neefikasnosti baznih stanica širokopojasnih mreža i došli na ideju pretvorbe otpadne toplinske energije generirane na tranzistorima pojačala snage korištenjem TEG-ova. U radu je razmatran utjecaj geometrije TEG-a, broja, visine i poprečnog presjeka termoparova, utjecaj hladila i vanjskog opterećenja na efikasnost pretvorbe. Razvijen je matematički model na osnovu kojeg je izvršena simulacija utjecaja poviše navedenih faktora (slika 4.3).



Slika 4.3. Model sustava za prikupljanje otpadne toplinske energije [66]

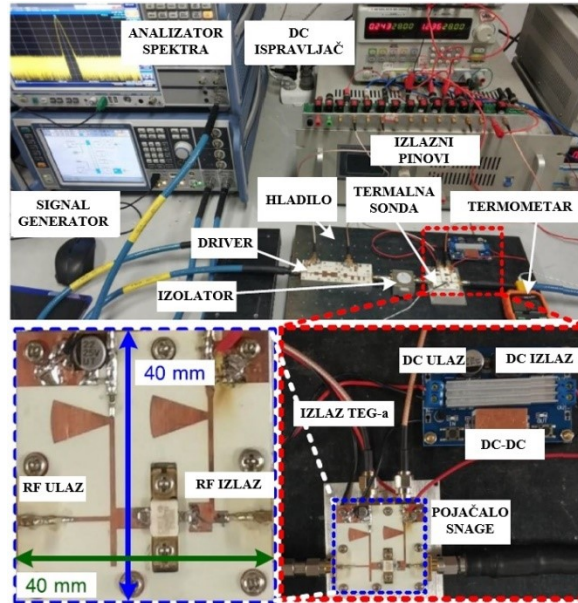
Mjerenja su se vršila tako da je promatran utjecaj geometrije TEG-a s obzirom na promjenjive iznose ukupnog toplinskog toka Q_{UK} , toplinskog otpora hladila R_{ca} i vanjskog opterećenja R_p . Iznos broja termoparova N se mijenjao u intervalu 25-2500, visina termopara H u rasponu od 0,01mm-10mm, iznos ukupnog toplinskog toka Q_{UK} od 20-100W, te toplinski otpor hladila R_{ca} u rasponu 0,1K/W do 1K/W, a iznos otpora opterećenja je iznosio 5Ω i 100Ω. Posljednji graf predstavlja generiranu snagu i efikasnost s obzirom na optimalnu geometriju TEG-a za dva tipa hladila (slika 4.4).



Slika 4.4. Optimalna geometrija TEG-a, efikasnost i generirana snaga u ovisnosti o ukupnom toku topline za parametar toplinskog otpora hladila a) 0,1K/W i b) 1K/W [66]

Rezultati su pokazali da s porastom visine termopara raste i temperaturni gradijent na njegovim krajevima, zbog toga je u svim mjerenjima kao optimalna visina proglašena ona maksimalna. S porastom toplinskog toka raste i broj potrebnih termoparova te njihov poprečni prosjek, to je prikazano na slici 4.4 i to za iznos otpora od 5Ω a1) i 100Ω a2). Zadnji graf prikazuje ovisnost generirane snage i efikasnosti pri optimalnoj geometriji TEG-a, vidljivo je da taj iznos opada s porastom toplinskog toka iz razloga što se smanjuje temperaturna razlika na krajevima TEG-a.

Slično istraživanje kao i u prethodnim radovima na temu pretvorbe otpadne toplinske energije na tranzistorima kod pojačala snage je prikazana i u radu [67]. Autori su u mjerenjima koristili RF pojačalo snage u klasi F (10W, 3,2-3,8GHz). Primjenom TEG-ova želi se postići toplinsko rasterećenje sklopa, kao i poboljšati efikasnost vraćanjem pretvorene električne energije u krug napajanja. Tranzistor korišten kod pojačala snage je CREE CG2H40010F, TEG je komercijalno dobavljan s oznakom TEC1-12703, a DC-DC pretvarač je realiziran korištenjem komponente LTC1871. Izgled eksperimentalne pločice, sustava za pretvorbu energije te korištena oprema se nalaze na slici 4.5.



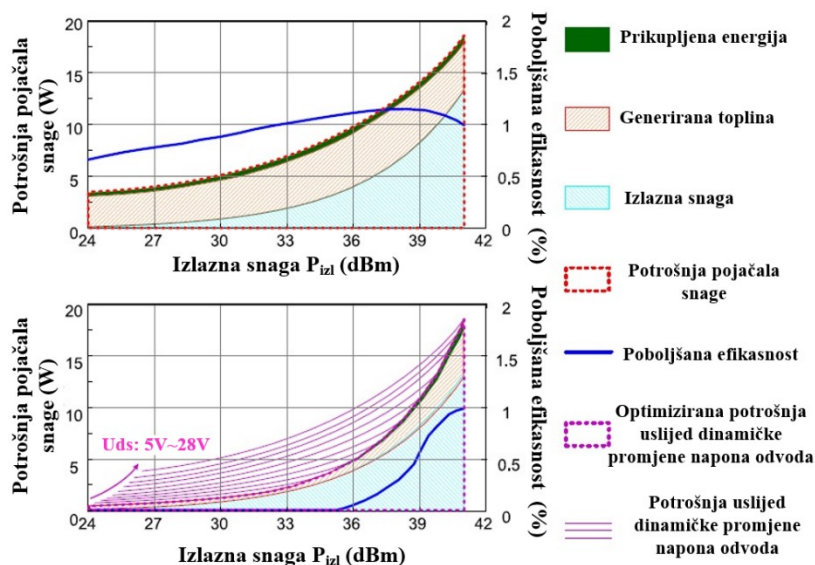
Slika 4.5. Eksperimentalna pločica, sustav za pretvorbu energije i korištena oprema [67]

Efikasnost pojačala nakon primjene sustava za pretvorbu energije sada iznosi:

$$\eta_I = \frac{P_{izl}}{P_{DC} - P_{TEG}\eta_D} \quad (4.1)$$

gdje je η_D efikasnost DC-DC pretvarača.

Osim termalne slike zagrijavanja i raspodjele temperature na tranzistorima pojačala i hladilu, u radu je još analiziran iznos uspješne pretvorene toplinske energije za slučaj rada pojačala pri maksimalnoj i dinamički promjenjivoj izlaznoj snazi (24-41,2dBm). Efikasnost je povećana za 0,9% kod promjenjive izlazne snage, dok je pri maksimalnoj izlaznoj snazi ona veća za 1,1%.



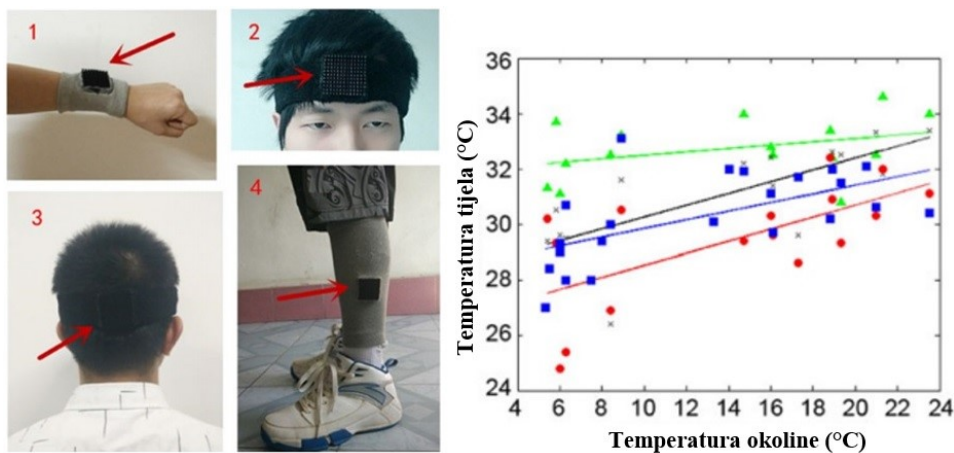
Slika 4.6. Raspodjela energije u sustavu pojačala u F klasi s korištenim TEG-om u klasičnom načinu rada i pri dinamičkoj promjeni napona odvoda [67]

Generiranje električne energije dobivene pretvorbom toplinske energije ljudskog tijela je izazovno zbog nekoliko razloga:

- niskog iznosa generiranog napona kojeg je teško direktno koristiti za napajanje uređaja, već ga je potrebno pretvoriti u odgovarajuću naponsku razinu, što pak s obzirom na njegov iznos predstavlja problem,
- niskog iznosa snage koja se u konačnici pohrani u spremnik energije s obzirom na potrošnju i efikasnost svih uređaja uključenih u sustav,
- prilagodba TEG-a korisniku na način da mu ne stvara osjećaj nelagode prilikom korištenja,
- visoki iznos cijene TEG-a u usporedbi s ostalim metodama napajanja.

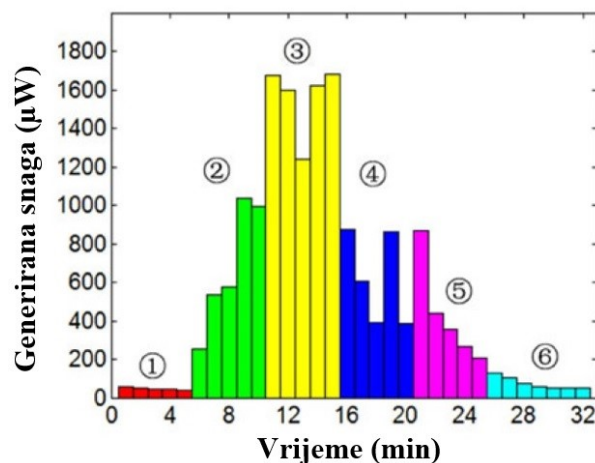
Od svih navedenih, problem malog iznosa generiranog napona predstavlja najveći problem, ali u praksi postoje pretvarači koji rade s ulaznim naponom od 20mV i to je najčešće donja granica napona koja je potrebna da bi sustav funkcionirao. U radu [68] su napravljena eksperimentalna mjerenja korištenjem TEG-ova pričvršćenih za potkoljenu čovjeka jer autori smatraju da je to područje najbolje u pogledu cirkulacije zraka za hlađenje TEG-a prilikom aktivnosti (hodanja, trčanja). Mjerenja su napravljena pri raznim iznosima temperature okoline i za razne intenzitete aktivnosti, a kao spremište energije je korišten kondenzator. Osim navedenih rezultata, u radu je napravljena i usporedba efikasnosti tri različita komercijalno dobavljiva Boost pretvarača za niske razine ulaznog napona (LTC3108, EH4205 sa EH300 i EH4295 sa EH300).

Autori su u radu [8] dizajnirali TEG-ove implementirane u odjeću i sportsku opremu sa svrhom napajanja senzora koji prate vitalne životne funkcije tijekom aktivnosti. Nekoliko faktora utječu na generiranu snagu, kao što su temperatura okoline i kože, vjetar, aktivnost čovjeka, korišteni TEG-ovi i način na koji su spojeni. Rezultati su pokazali da pojedini TEG pri temperaturnom gradijentu od 5°C može generirati do 250 μ W, u radu je osim TEG-ova, dizajniran i fleksibilni super kondenzator koji se zbog svoje fleksibilnosti u odnosu na standardne kondenzatore lako uklopi u odjeću i opremu. Generirana snaga i efikasnost TEG-ova je razmatrana za 4 područja ljudskog tijela i to zglob ruke (1), čelo (2), stražnji dio glave (3) i stražnji dio potkoljenice (4) (slika 4.7).



Slika 4.7. Četiri različita područja primjene TEG-a i ovisnost o temperaturi okoline (bez spojenog TEG-a) [8]

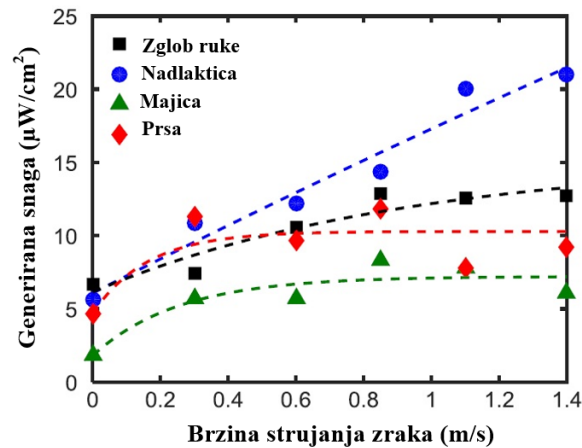
Na slici 4.7 je vidljivo kako je najveća temperaturna razlika ostvarena za zelenu liniju (stražnji dio glave) i crnu liniju (čelo), ali nakon primjene TEG-a rezultati su pokazali kako je najveća efikasnost pretvorbe za slučaj kada se TEG nalazi na stražnjem dijelu potkoljenice (ako je riječ o niskim iznosima temperature okoline), odnosno zglobu ruke i čelu pri višim temperaturama. Iako se pri početnim mjerenjima područje stražnjeg dijela glave činilo najboljim za primjenu, zbog velikog toplinskog otpora kose to područje je u radu pokazivalo najlošije rezultate. U radu su još analizirane performanse TEG-a za čitav niz raznih uvjeta i rezultati su pokazali da uslijed fizičke aktivnosti (hodanja, trčanja) generirana snaga dosegne višestruko veće iznose u odnosu kada se nalazimo u stanju mirovanja, što je za TEG primijenjen na čelu prikazano na slici 4.8.



Slika 4.8. Generirana snaga za šest različitih slučajeva fizičke aktivnosti korisnika [8]

Eksperiment je napravljen tako da je promatrana generirana snaga TEG-a pri različitim fazama fizičke aktivnosti. Tako 1. faza predstavlja mirovanje tj. sjedenje ($21,2^{\circ}\text{C}$), 2. faza je pješaćenje do staze za trčanje ($13,3^{\circ}\text{C}$), 3. faza su rezultati kod najveće fizičke aktivnosti tj. trčanja ($1,5^{\circ}\text{C}$), 4. faza predstavlja odmor i razgibavanje nakon trčanja ($1,5^{\circ}\text{C}$), 5. faza je period kod povratka ($13,3^{\circ}\text{C}$), a posljednja faza je opet stanje mirovanja. Autori su zaključili da na iznos generirane snage veći utjecaj ima brzina vjetra (hlađenje TEG-a), nego li povećano zagrijavanje ljudskog tijela tijekom fizičke aktivnosti. Slično istraživanje je napravljeno u [69], gdje su autori također analizirali primjenu TEG-a na razne dijelove ljudskog tijela, uključujući nadlakticu, zglob ruke, prsa i korištenja majice s ugrađenim TEG-ovima za prikupljanje energije gornjeg dijela tijela. Rezultati su pokazali da korištenjem fleksibilnih TEG-ova (zbog smanjenja toplinskog otpora) s optimiziranim izmjenjivačima topline možemo generirati do $6\mu\text{W}/\text{cm}^2$ u stanju mirovanja, te $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$ za vrijeme normalnog hoda, što je pak iznos energije dovoljan za napajanje senzora niske potrošnje snage kao što su akcelerometar, senzor zasićenosti kisikom ili pak EKG senzor, čija su potrošnje 10, 150 i $50\mu\text{W}$. Rezultati su pokazali da je najveća snaga generirana za slučaj kada je TEG pričvršćen za nadlakticu, potom za zglob i prsa, te je najlošiji slučaj kod korištenja majice s ugrađenim TEG generatorima. Isto tako, autori su zaključili da postoji velik utjecaj brzine strujanja zraka ili fizičke aktivnosti na iznos generirane snage (slika 4.9). U literaturi postoji još čitav niz radova gdje se ljudsko tijelo koristi kao izvor topline, a pretvorena energija za napajanje bežičnih senzora i uređaja u medicinske svrhe [64, 70-74]. Svi oni više-manje koriste fleksibilne TEG-ove malih dimenzija i istražuju problematiku toplinske prilagodbe TEG-a zbog velikih toplinskih otpora okoline i ljudske kože. Energija dobivena navedenom

pretvorbom je malog iznosa i potrebno je istovremeno raditi i na povećanju efikasnosti samog TEG-a, ali i na smanjenju potrošnje energije takvih uređaja.



Slika 4.9. Ovisnost položaja TEG-a i brzine strujanja zraka na generiranu snagu [69]

Bežične senzorske mreže se sastoje od uređaja koji obrađuju podatke te ih zatim odašilju ili pak primaju podatke koje obrađuju. Upravo su te dvije aktivnosti najzahtjevnije po pitanju potrošnje energije. Postoji još i stanje mirovanja koje karakterizira vrlo mala potrošnja energije, a čvorovi upravo u tom stanju provedu veliku većinu svog vremena i upravo zbog tog je njihova prosječna potrošnja energije relativno mala. S obzirom na eksponencijalni rast broja bežičnih senzora na mreži, javlja se potreba za istraživanjem novih vrsta napajanja za takve senzore i u tu svrhu se u novije vrijeme često koriste TEG-ovi [75]. Osim senzora koje smo već spomenuli i koji se koriste u medicinske svrhe, u praksi postoji još čitav niz primjene senzora niske razine potrošnje kao npr. pametni gradovi, potpuno automatizirane proizvodne linije i ostalih. Autori su u [76] usporedili baterije i TEG-ove kao napajanje takvih senzora i po pitanju kompleksnosti ugradnje, zahtjeva senzora po pitanju energija te isplativosti njihovog korištenja.

5. ZAKLJUČAK

Pretvorba toplinske energije u električnu se zasniva na Seebeckovom efektu, zbog čega se svaki poluvodički materijal može okarakterizirati Seebeckovim koeficijentom α . Na osnovu navedenog koeficijenta, iznosa električne provodnosti σ i koeficijenta toplinske vodljivosti κ definira se faktor izvrsnosti poluvodičkog materijala korištenog za termoelektričnu pretvorbu. Posljedice Thomsonovog i Jouleovog efekta su nepoželjni i oni nastaju zbog prirodnih svojstava korištenih materijala. Poluvodički materijal Bi_2Te_3 pokazuje najbolja svojstva za temperature tople strane do 600K i to je ujedno i najčešće korišten materijal u sustavima s malim iznosom otpadne toplinske energije. Geometrija TEG-a ima velik utjecaj na njegove performanse, tako povećanjem visine poluvodiča povećavamo iznos električnog otpora termopara, što pak izaziva dodatno nepotrebno zagrijavanje uslijed Jouleovog efekta, ali se smanjuje toplinska vodljivost termopara. Povećanje poprečnog presjeka poluvodiča izaziva suprotno djelovanje u odnosu na povećanje njegove visine. S obzirom da su parametri koji definiraju faktor izvrsnosti materijala temperaturno ovisni, tako se pristupilo segmentaciji materijala koji pokazuju bolja svojstva pri nižim tj. višim temperaturama s ciljem izrade TEG-a za šire temperaturno područje. Autori su uvođenjem faktora kompatibilnosti pokazali koje je materijale moguće uspješno segmentirati. Navedeni problem je moguće otkloniti upotrebom višestupanjskih (kaskadnih) TEG-ova, tako da se svaki stupanj može izraditi od različitog materijala, a rezultati su pokazali da je upotreba kaskadnih TEG-ova opravdana jedino u slučaju temperatura iznad 600K. Isto tako, pokazano je da se za različite omjere broja termoparova među stupnjevima generira maksimalna snaga P_{max} , efikasnost η_{max} i količina apsorbirane toplinske energije Q_{max} .

Teorem o maksimalnom prijenosu snage navodi da je maksimalna snaga na potrošaču ostvariva za slučaj jednakog iznosa unutarnjeg električnog otpora izvora i iznosa potrošača. S obzirom da je unutarnji električni otpor TEG-a ovisan o temperaturnom gradijentu, tako je i njegov iznos dinamički promjenjiva veličina. Za ostvarenje električne prilagodbe koristimo jednu od MPPT metoda najčešće primjenom Buck, Boost ili Buck-Boost DC-DC pretvarača. Metode je moguće razvrstati s obzirom na efikasnost, mogućnost implementacije u analognoj ili digitalnoj tehnici, brzinu konvergencije, kompleksnost implementacije, broju i vrsti potrebnih senzora, mjerenim parametrima te u konačnici s obzirom na cijenu izvedbe. U ovom radu smo stavili naglasak na metodu mjerenja napona otvorenog kruga i struje kratkog spoja koja se često upotrebljava kod TEG-ova zbog njihove linearne strujno-naponske karakteristike, te na metode P&O i na metodu inkrementalne vodljivosti sa fiksnim i promjenjivim korakom inkrementa, s kojim je postignut kompromis između brzine konvergencije i oscilacija u točki maksimalne snage. Znatno utjecaj na generiranu snagu ima i iznos kontaktnog toplinskog otpora između komponenti, a na njega je moguće utjecati većom silom pritiska, preporučeni i maksimalni iznos sile pritiska za pojedini TEG daje proizvođač u uputstvima. Osim pritiska, razmatrao se i utjecaj različitih materijala na smanjenje kontaktnog toplinskog otpora, a rezultati su pokazali da je pri nižim temperaturama tople strane TEG-a najbolje koristiti silikonsku termovodljivu pastu ili grafitni materijal na svim kontaktima u sustavu. Način disipacije nepretvorene toplinske energije akumulirane na hladnoj strani TEG-a također utječe na efikasnost sustava. Ovisno o opravdanosti upotrebe odlučujemo se za jednu od metoda disipacije toplinske energije, a u sustavima male snage se najčešće koristi pasivno hladilo hlađeno prirodnim strujanjem zraka. Iako aktivno hlađenje i neke druge metode pružaju bolje performanse, ali se zbog dodatne potrošnje energije za njihov rad oni ne koriste u ovakvim sustavima.

Primjena TEG-ova je zbog male efikasnosti pretvorbe ograničena samo na specifična područja. Tako se u sustavima male snage TEG-ovi pretežito koriste za napajanje senzora u medicini koji služe za praćenje vitalnih životnih funkcija, kao što su praćenje tlaka, elektromiografija (EMG), praćenje otkucaja srca (EKG) i slično. Navedeni senzori za rad zahtijevaju snagu reda veličine mW ili čak μW , a koja se može dobiti pretvorbom na osnovu ljudske topline tijela (temperaturni gradijent od svega nekoliko stupnjeva razlike). Napajanje rastućeg tržišta IoT senzora također predstavlja problem zbog njihove brojnosti i potrebe za periodičnim održavanjem tj. kontrolom i promjenom baterije, zbog čega je čest slučaj da se upravo TEG-ovi koriste za napajanje takvih senzora, a energiju koju koriste se dobije iz sunčevog zračenja ili nekog drugog izvora topline u okolini. Druga krajnost primjene TEG-ova bi bila za prikupljanje otpadne toplinske energije u sklopovima, pretvorbu u električnu energiju koju zatim vraćamo u krug napajanja, te pritom prividno povećavamo stupanj efikasnosti sklopa. Određeni radovi na tu temu su već napravljeni za prikupljanje otpadne toplinske energije generirane kod pojačala snage širokopoljnih baznih stanica. Osim navedenog, TEG-ovi pronalaze još niz specifičnih primjena koja nisu razmatrana u ovom radu kao što je njihova primjena u istraživanjima svemira, u industrijskim postrojenjima ili kod pretvorbe geotermalne energije i slično.

LITERATURA

- [1] Champier, D.: "Thermoelectric generators: A review of applications", *Energy Conversion and Management*, Vol. 140, pp. 167-181, 2017.
- [2] Jaziri, N. i dr.: "A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications", *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 264-287, 2020.
- [3] Shakouri, A.: "Recent Developments in Semiconductor Thermoelectric Physics and Materials", *Annual Review of Materials Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 399-431, 2011.
- [4] Wang, L. i dr.: "Modeling the Effects of Module Size and Material Property on Thermoelectric Generator Power", *ACS Omega*, Vol. 5, No. 46, pp. 29844-29853, 2020.
- [5] Mamur, H.: "A detailed modeling of thermoelectric generator for maximum power point tracking", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 28, 2019.
- [6] Elzalik, M. i dr.: "Thermoelectric Power Generation System-Simulation and Experimental Investigation", *2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 298-303, 2018.
- [7] Montecucco, A.: "Efficiently Maximising Power Generation from Thermoelectric Generators", doktorska disertacija, Dept. School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, 2014.
- [8] Deng, F. i dr.: "Wearable Thermoelectric Power Generators Combined With Flexible Supercapacitor for Low-Power Human Diagnosis Devices", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 2, pp. 1477-1485, 2017.
- [9] Snyder, G.: "Small Thermoelectric Generators", *Electrochemical Society Interface*, Vol. 17, pp. 54-56, 2008.
- [10] Kumar i dr.: "The Design of a Thermoelectric Generator and Its Medical Applications", *Designs*, Vol. 3, pp. 22, 2019.
- [11] Yan, J. i dr.: "Review of Micro Thermoelectric Generator", *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-18, 2018.
- [12] Zhang, M. i dr.: "Influence of Thomson effect on the thermoelectric generator", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 137, pp. 1183-1190, 2019.
- [13] Kalteh, M.; Garmejani, H.: "Investigating the influence of Thomson effect on the performance of a thermoelectric generator in a waste heat recovery system", *International Journal of Green Energy*, Vol. 16, 2019.
- [14] Snyder, G.; Ursell, T.: "Thermoelectric Efficiency and Compatibility", *Physical review letters*, Vol. 91, pp. 148301, 2003.
- [15] Snyder, G.; Snyder, A.: "Figure of Merit ZT of a Thermoelectric Device from Materials Properties", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 10, 2017.
- [16] Sootsman, J.; Chung, D.-Y.; Kanatzidis, M.: "New and Old Concepts in Thermoelectric Materials", *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, Vol. 48, pp. 8616-39, 2009.

- [17] Hamid Elsheikh, M. i dr.: "A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp. 337-355, 2014.
- [18] Du, Q. i dr.: "Influence of Structure Parameters on Performance of the Thermoelectric Module", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed*, Vol. 26, pp. 464-468, 2011.
- [19] Erturun, U.; Erermis, K.; Mossi, K.: "Effect of various leg geometries on thermo-mechanical and power generation performance of thermoelectric devices", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, No. 1, pp. 128-141, 2014.
- [20] Zebarjadi, M.: "Heat Management in Thermoelectric Power Generators", *Scientific reports*, Vol. 6, 2015.
- [21] Snyder, G.: "Application of the compatibility factor to the design of segmented and cascaded thermoelectric generators", *Applied Physics Letters*, Vol. 84, pp. 2436-2438, 2004.
- [22] Ouyang, Z.; Li, D.: "Modelling of segmented high-performance thermoelectric generators with effects of thermal radiation, electrical and thermal contact resistances", *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 24123, 2016.
- [23] Alemi.H, A. C. a. K. A.: "Optimization and Investigation of Multi-Stage Thermoelectric Generation Systems With Particle Swarm Optimization (PSO)", *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*, Vol. 3, 2014.
- [24] Sun, X. i dr.: "Comparison of the two-stage and traditional single-stage thermoelectric generator in recovering the waste heat of the high temperature exhaust gas of internal combustion engine", *Energy*, Vol. 77, 2014.
- [25] Liang, X. i dr.: "Comparison and parameter optimization of a two-stage thermoelectric generator using high temperature exhaust of internal combustion engine", *Applied Energy*, Vol. 130, pp. 190-199, 2014.
- [26] Li, J.; Sun, F.; Wu, F.: "Performance optimization of a two-stage semiconductor thermoelectric-generator", *Applied Energy*, Vol. 82, pp. 300-312, 2005.
- [27] Bond, M.; Park, J.: "Current-Sensorless Power Estimation and MPPT Implementation for Thermoelectric Generators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 9, pp. 5539-5548, 2015.
- [28] Laird, I. i dr.: "Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators", *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [29] Nagayoshi, H. i dr.: "Development of 100-W High-Efficiency MPPT Power Conditioner and Evaluation of TEG System with Battery Load", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 40, pp. 657-661, 2011.
- [30] Twaha, S. i dr.: "Performance analysis of thermoelectric generator using dc-dc converter with incremental conductance based maximum power point tracking", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 37, pp. 86-98, 2017.
- [31] El-Khozondar, H. J. i dr.: "A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms", *Renewables: Wind, Water, and Solar*, Vol. 3, No. 1, pp. 3, 2016.

- [32] Esram, T.; Chapman, P. L.: "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, 2007.
- [33] Ngan, M. S.; Tan, C. W.: "A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems", *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, pp. 22-27, 2011.
- [34] Paraskevas, A.; Koutroulis, E.: "A simple maximum power point tracker for thermoelectric generators", *Energy Conversion and Management*, Vol. 108, pp. 355-365, 2016.
- [35] Femia, N. i dr.: "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.
- [36] Pandey, A.; Dasgupta, N.; Mukerjee, A. K.: "Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance", *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 4387-4391, 2006.
- [37] Yadav, V. K.; Jha, S. K.; Kumar, B.: "Comparative Study of Different Variable Step Size Perturb and Observe based MPPT", *2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, pp. 272-277, 2020.
- [38] Mamur, H.; Ahiska, R.: "Application of a DC–DC boost converter with maximum power point tracking for low power thermoelectric generators", *Energy Conversion and Management*, Vol. 97, pp. 265-272, 2015.
- [39] Zakzouk, N. E. i dr.: "Modified variable-step incremental conductance maximum power point tracking technique for photovoltaic systems", *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1741-1748, 2013.
- [40] Liu, F. i dr.: "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, 2008.
- [41] Montecucco, A.; Knox, A. R.: "Maximum Power Point Tracking Converter Based on the Open-Circuit Voltage Method for Thermoelectric Generators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 2, pp. 828-839, 2015.
- [42] Nakayama, S. i dr.: "A simple MPPT control method for thermoelectric energy harvesting", *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6455-6460, 2015.
- [43] Yahya, K.; Bilgin, M.; Erfidan, T.: "Practical Implementation of Maximum Power Tracking Based Short-Current Pulse Method for Thermoelectric Generators Systems", *Journal of power electronics*, Vol. 18, pp. 1201-1210, 2018.
- [44] Schwartz, D. E.: "A maximum-power-point-tracking control system for thermoelectric generators", 2012.
- [45] Montecucco, A.; Siviter, J.; Knox, A. R.: "Simple, fast and accurate maximum power point tracking converter for thermoelectric generators", *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2777-2783, 2012.
- [46] Montecucco, A. i dr.: "A New Test Rig for Accurate Nonparametric Measurement and Characterization of Thermoelectric Generators", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, pp. 1-8, 2013.
- [47] Araiz, M. i dr.: "The Importance of the Assembly in Thermoelectric Generators". 2018.

- [48] Sandoz-Rosado, E.; Stevens, R. J.: "Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power Generation", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 38, No. 7, pp. 1239-1244, 2009.
- [49] Sakamoto, T. i dr.: "Selection and Evaluation of Thermal Interface Materials for Reduction of the Thermal Contact Resistance of Thermoelectric Generators", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 43, No. 10, pp. 3792-3800, 2014.
- [50] Hsu, C.-T. i dr.: "An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module", *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 5173-5179, 2011.
- [51] Abdelkefi, A.; Alothman, A.; Hajj, M. R.: "Performance analysis and validation of thermoelectric energy harvesters", *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, pp. 095014, 2013.
- [52] Tang, Z. B. i dr.: "A research on thermoelectric generator's electrical performance under temperature mismatch conditions for automotive waste heat recovery system", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 5, pp. 143-150, 2015.
- [53] Cheng-Ting Hsu, D.-J. Y., Ke-Jyun Ye, Ben Yu: "Renewable energy of waste heat recovery system for automobiles", *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2, 2010.
- [54] Liu, D. i dr.: "Developing instrumentation to characterize thermoelectric generator modules", *The Review of scientific instruments*, Vol. 86, pp. 034703, 2015.
- [55] Faraji, A.; Akbarzadeh, A.: "Design of a Compact, Portable Test System for Thermoelectric Power Generator Modules", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 42, 2012.
- [56] Elghool, A. i dr.: "A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance", *Energy Conversion and Management*, Vol. 134, pp. 260-277, 2017.
- [57] Lv, S. i dr.: "Study of different heat exchange technologies influence on the performance of thermoelectric generators", *Energy Conversion and Management*, Vol. 156, pp. 167-177, 2018.
- [58] Lineykin, S.; Ruchaevsky, I.; Kuperman, A.: "Analysis and optimization of TEG-heatsink waste energy harvesting system for low temperature gradients", *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2014.
- [59] Lossec, M.; Multon, B.; Ben Ahmed, H.: "Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat", *Energy Conversion and Management*, Vol. 68, pp. 260-265, 2013.
- [60] Leonov, V.: "Thermal matching of a thermoelectric energy scavenger with the ambience", 2007.
- [61] Lee, Y. i dr.: "Design and Experimental Investigation of Thermoelectric Generators for Wearable Applications", *Advanced Materials Technologies*, Vol. 2, pp. 1600292, 2017.
- [62] Beeby, S.; White, N.: "Energy Harvesting for Autonomous Systems", Vol. 308, 2010.
- [63] Selvarathinam, J.; Anpalagan, A.: "Energy Harvesting From the Human Body for Biomedical Applications", *IEEE Potentials*, Vol. 35, No. 6, pp. 6-12, 2016.

- [64] Leonov, V.; Vullers, R.: "Wearable electronics self-powered by using human body heat: The state of the art and the perspective", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 1, 2009.
- [65] Niotaki, K.; Georgiadis, A.; Collado, A.: "Thermal energy harvesting for power amplifiers", *2013 IEEE Radio and Wireless Symposium*, pp. 196-198, 2013.
- [66] Kim, K. J.; Hodes, M.: "Thermoelectric energy scavenging from waste heat of power amplifier transistors", *2009 15th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*, pp. 75-79, 2009.
- [67] Qi, T.; He, S.: "Further Efficiency Improvement of Power Amplifiers Using Thermal Energy Harvesting", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 12, pp. 9628-9631, 2019.
- [68] Jurkans, V.; Blums, J.; Gornevs, I.: "Harvesting Electrical Power from Body Heat Using Low Voltage Step-up Converters with Thermoelectric Generators", *2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, pp. 1-4, 2018.
- [69] Hyland, M. i dr.: "Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting", *Applied Energy*, Vol. 182, pp. 518-524, 2016.
- [70] Leonov, V.: "Thermoelectric Energy Harvesting of Human Body Heat for Wearable Sensors", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 6, pp. 2284-2291, 2013.
- [71] Suarez, F. i dr.: "Designing Thermoelectric Generators for Self-Powered Wearable Electronics", *Energy Environ. Sci.*, Vol. 9, 2016.
- [72] Bavel, M. i dr.: "Wearable Battery-free Wireless 2-channel EEG Systems Powered by Energy Scavengers", *Sensors and Transducers*, Vol. 94, pp. 103-115, 2008.
- [73] Leonov, V.: "Human Heat Generator for Energy Scavenging with Wearable Thermopiles", *Sensors and Transducers*, Vol. 126, pp. 1-10, 2011.
- [74] Nozariasbmarz, A. i dr.: "Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems", *Applied Energy*, Vol. 258, pp. 114069, 2020.
- [75] Markiewicz, M. i dr.: "Software Controlled Low Cost Thermoelectric Energy Harvester for Ultra-Low Power Wireless Sensor Nodes", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 38920-38930, 2020.
- [76] Haras, M.; Skotnicki, T.: "Thermoelectricity for IoT – A review", *Nano Energy*, Vol. 54, pp. 461-476, 2018.

POPIS OZNAKA I KRATICA

A	poprečni presjek termopara
D	omjer signala-pauze PWM signala
DC	istosmjerna struja
D_{MPP}	omjer signala-pauze PWM signala u točki maksimalne snage
engl	engleski
FN	fotonaponski
I_{MPP}	struja u točki maksimalne snage
IoT	Internet stvari
I_{SC}	struja kratkog spoja
J	gustoća električne struje
l	visina poluvodiča
MPP	točka maksimalne snage
MPPT	praćenje točke maksimalne snage
npr	na primjer
P&O	Perturb and observe
PCM	fazno promjenljivi materijal
PWM	pulsno-širinska modulacija
Q_{hladno}	toplinska energija na izlazu iz TEG-a
Q_J	toplinska energija uslijed Jouelovog efekta
Q_p	toplinska energija uslijed Peltierovog efekta
Q_{toplo}	toplinska energija koja ulazi u TEG
Q_{ukupno}	ukupna toplinska energija izvora topline
Q_τ	toplinska energija uslijed Thomsonovog efekta
R_g	električni otpor termopara
R_G	unutarnji električni otpor TEG-a
R_P	otpor potrošača
$R_{ulaznoBOOST}$	ulazni otpor Boost DC-DC pretvarača
$R_{ulaznoBUCK}$	ulazni otpor Buck DC-DC pretvarača

$R_{ulaznoBB}$	ulazni otpor Buck-Boost DC-DC pretvarača
s	faktor usklađenosti
TEC	termoelektrični hladnjak
TEG	termoelektrični generator
T_{hladno}	temperatura hladne strane
T_{toplo}	temperatura tople strane
U_{MPP}	napon u točki maksimalne snage
U_{OC}	napon otvorenog kruga
Z	faktor izvrsnosti
ZT	bezdimenzionalni faktor izvrsnosti
α	Seebeckov koeficijent
ΔT	temperaturni gradijent
η_c	efikasnost Carnotovog ciklusa
η_D	efikasnost DC-DC pretvarača
κ	koeficijent toplinske vodljivosti
π	Peltierov koeficijent
σ	električna provodnost
τ	Thomsonov koeficijent

SAŽETAK

Zbog sve veće potrošnje i potrebe za električnom energijom na globalnoj razini, pritom vodeći računa o ekologiji, obnovljivi izvori energije predstavljaju jedno od najčešćih područja istraživanja. Ovaj rad obuhvaća pregled literature na temu pretvorbe toplinske energije u električnu korištenjem termoelektričnih generatora (TEG-ova). Sama pretvorba se zasniva na Seebeckovom efektu. Prednosti njihovog korištenja su pouzdanost, ne zahtijevaju održavanje, dug radni vijek i nečujni su u radu, dok im je glavni nedostatak nizak stupanj efikasnosti, a to je ujedno i najveći problem za znanstvenike. Idealan poluvodički materijal bi trebao posjedovati visok iznos električne, a nizak iznos toplinske vodljivosti, što je teško izvedivo s obzirom da su navedeni faktori međusobno povezani. Osim o materijalu, efikasnost pretvorbe ovisi i o ostalim komponentama sustava zbog čega je potrebno postići električnu i toplinsku prilagodbu TEG-a, ako želimo da on generira maksimalnu snagu. Zbog niskog iznosa efikasnosti, primjena mu je ograničena samo na određena, specifična područja. Kod sustava malih snaga upotrebljava se za napajanje senzora IoT mreža ili senzora u medicinske ili rekreacijske svrhe za praćenje vitalnih životnih funkcija, dok još pronalazi primjenu u povećanju efikasnosti sklopova prikupljanjem otpadne toplinske energije, njenom pretvorbom i vraćanjem u krug napajanja.

Ključne riječi: termoelektrični generator, obnovljivi izvori energije, toplinska energija